

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ, МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

Выпуск 34

**ДОНБАССКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

Алчевск 2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ,
МОЛОДЕЖИ И СПОРТА УКРАИНЫ

**СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ
ДОНБАССКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Выпуск 34

Алчевск
2011

УДК 622(06) + 669(06) + 69(06) + 621.3 + 621.37

ББК Ия 54 + КЗя54 + Ня 54

С 41

*Постановлением президиума ВАК Украины от 9 июня 1999г. № 1-05/7
сборник научных трудов включен в перечень № 1 научных специализированных
изданий Украины в области технических наук*

*Свидетельство Госкомтелерадио Украины о регистрации
серия КВ, № 10307, от 27.12.2005*

*Рекомендовано ученым советом и редакционной коллегией ДонГТУ
(Протокол № 6 от 01 липня 2011 г.)*

Главный редактор

Заблодский Н.Н. – докт. техн. наук

Редакционная коллегия:

А.И. Акмаев – докт. экон. наук,
С.Н. Петрушов – докт. техн. наук,
А.М. Новохатский – докт. техн. наук,
Г.Г. Литвинский – докт. техн. наук,
Р.А. Фрумкин – докт. техн. наук,
Г.В. Бабиюк – докт. техн. наук,
Г.И. Гайко – докт. техн. наук,
Н.К. Клишин – докт. техн. наук,
А.Ф. Борzych – докт. техн. наук,
П.Н. Должиков – докт. техн. наук,
З.Л. Финкельштейн – докт. техн. наук,
В.Д. Лущик – докт. техн. наук,
С.В. Корнеев – докт. техн. наук,
В.А. Ульшин – докт. техн. наук,
А.И. Давиденко – докт. техн. наук,
Г.Я. Дрозд – докт. техн. наук,
В.Н. Ульяницкий – канд. техн. наук,
Ю.Э. Пазранд – канд. техн. наук,
С.А. Скомская – секретарь редакционной коллегии

**Сборник научных трудов Донбасского государственного
технического университета. Вып. 34 – Алчевск: ДонГТУ, 2011 – 415 с.**

ISSN 2077-1738

В сборнике помещены статьи, описывающие современные научные тенденции в
разработке полезных ископаемых, металлургии, строительстве, электротехнике и радио-
технике.

Для научных сотрудников, аспирантов, студентов высших учебных заведений.

УДК 622(06) + 669(06) + 69(06) + 621.3 + 621.37

ББК Ия 54 + КЗя54 + Ня 54

ISSN 2077-1738

© ДонГТУ, 2010

© дизайн обложки, Н.В. Чернышова, 2009

Адрес электронной почты: info@dmmti.edu.ua

**РАЗРАБОТКА
ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ**

*д.т.н. Бабиюк Г.В.,
Пунтус В.Ф.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ПРОЯВЛЕНИЕ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Наведені результати дослідження міцності матеріалу, еквівалентного гірській породі, на зразках різного розміру.

***Ключові слова:** випробування, модель, гірська порода, масив, міцність, масштабний ефект.*

Приведены результаты исследования прочности материала, эквивалентного горной породе, на образцах различного размера.

***Ключевые слова:** испытания, модель, горная порода, массив, прочность, масштабный эффект.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Изучение геомеханических процессов на физических моделях ограниченных размеров с целью последующего переноса установленных закономерностей деформирования пород, в том числе при их взаимодействии с крепью, на породный массив неограниченных размеров основывается на законе подобия деформирования твердых тел [1], согласно которому у моделей различных размеров, изготовленных и испытанных в одинаковых условиях, прочность материала не должна зависеть от геометрических размеров образцов, так как она определяется величиной нагрузки, отнесенной к единице площади. С соблюдением закона подобия при нагружении геометрически подобных тел различных абсолютных размеров обычно рассчитывают на прочность строительные конструкции, в том числе крепи выработок, по удельным механическим характеристикам с использованием теории упругости.

Однако испытания различных материалов (металлов, горных пород, угля, бетона и др.) показали, что на практике часто имеют место отклонения от этого закона. Поскольку они проявляются во влиянии масштабов или размеров моделей на прочность материалов, то причины, обуславливающие эти отклонения, обычно называют масштабным фактором, а само явление – масштабным эффектом. Истолкование этого явления представляет собой фундаментальную проблему [1], актуальную, в том числе, и при рассмотрении геомеханических процессов, про-

исходящих в породном массиве при сооружении горных выработок.

Анализ публикаций. В последнее время для количественной оценки влияния масштабного фактора на прочность горных пород предложены кардинальным образом отличающиеся методики, основанные на аналитическом [2] и вероятностно-статистическом [3] подходах.

Аналитически проф. Г.Г. Литвинский определяет масштабный фактор прочности как отношение предельных сдвигающих напряжений в неразрушенной и нарушенной ослаблениями горной породе, полученных из решения дифференциальных уравнений [2]:

$$M_f(x) = \frac{\tau'_{nt}}{\tau_{nt}} = \psi(x) \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0 \psi(x)} + 1 \right)^{\alpha \psi(x)} \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0} + 1 \right)^{-\alpha}, \quad (1)$$

где τ_{nt} и τ'_{nt} – касательные напряжения на площадке сдвига соответственно для однородной породы (образца) и породного массива, нарушенного ослаблениями в виде открытых трещин;

$\psi(x)$ – сплошность породы, зависящая от размера x образца и определяемая как функция поврежденности: $\psi(x) = 1 - \omega(x)$; $0 \leq \psi \leq 1$, при $\psi=0$ – полное разрушение, а при $\psi=1$ – порода бездефектна;

σ_n – нормальные напряжения на площадке сдвига;

σ_0 – когезия разрыва, которая для горных пород с $\alpha \leq 0,5$ может быть принята равной прочности породы на одноосное растяжение σ_p ;

α – параметр хрупкости, изменяющийся в диапазоне $0 \leq \alpha \leq 1$ и показывающий на какой части площадки сдвига происходит сухое трение; при $\alpha = 1$ паспорт прочности породы представляет собой прямолинейную огибающую с постоянным углом внутреннего трения; при $\alpha=0$ он соответствует идеально пластической породе.

По своей сути параметр $M_f(x)$ есть коэффициент структурного ослабления, показывающий во сколько раз прочность массива меньше прочности породы в образце. Он является сложной степенной функцией, зависящей от напряженного состояния σ_n , прочностных показателей σ_0 , строения массива ψ и параметра хрупкости α , определяющего вид паспорта прочности породы, причем при $\alpha=0$ параметр $M_f(x) = \psi(x)$. Уравнение (1) раскрывает многие закономерности поведения трещиноватого породного массива под нагрузкой, однако оно не дает в явном виде интересующую нас зависимость прочности от размера образца. Кроме того, нерешенным остается определение численных значений переменных $\psi(x)$ и α для конкретной породы, а в нашем случае для исследуемого материала, у которого отсутствуют открытые трещины, но имеются дефекты в виде пор.

Авторы работы [3] отличие прочности породного массива R_m от

математического ожидания прочности слагающих массив структурных элементов $M(R)$ также оценивают коэффициентом структурного ослабления, равным

$$k_c = R_m / M(R). \quad (2)$$

Конкретный вид выражения (2) зависит от выбора функции распределения случайной величины прочности образцов (R), что предполагает проведение представительных экспериментальных исследований с целью установления закона распределения и относительной вариации прочности структурных элементов, которые также меняются по мере изменения размеров образцов.

Следовательно, основой для теоретических построений должны быть экспериментальные исследования прочности горных пород и эквивалентных им материалов на образцах различного размера, которые не столь многочисленны, так как требуют огромных затрат труда и средств на проведение лабораторных и шахтных экспериментов.

По результатам лабораторных и шахтных исследований образцов горных пород на сжатие и растяжение развернутый анализ влияния масштабного эффекта на их прочность дан в работе [4], где отмечается противоречивость полученных результатов различными авторами, так как с увеличением размеров образцов прочность может не только уменьшаться, но и возрастать, либо оставаться без изменений. При этом масштабный эффект при сжатии и растяжении проявляется по-разному.

К числу исследований, отмечающих рост прочности на сжатие при увеличении линейных размеров кубических образцов известняка, мрамора, гипса и цемента, относится работа Л.И. Барона [5]. Однако при этом автор отмечает, что с ростом размеров образцов, несмотря на увеличение сопротивления раздавливанию, градиент разрушающего напряжения на единицу вновь образованной поверхности продуктов разрушения, изученных путем ситового анализа, снижается.

Как уменьшение, так и увеличение прочности горных пород с ростом размеров образцов отмечается в работах М.И. Койфмана [6]. Для объяснения этого факта он предложил различать масштабные эффекты первого и второго рода. Масштабный эффект первого рода, или объемный, связан со структурной неоднородностью испытываемого материала и наличием случайно распределенных по объему дефектов, а второго рода, или поверхностный, обусловлен качеством обработки образцов и степенью разрушения поверхностного слоя.

В работе [7] на основании анализа результатов испытаний образцов горных пород (угля) различных размеров сделан вывод о том, что основными причинами разницы свойств пород, изученных на лабораторных образцах малого размера и в массиве, является не только нарушение условия подобия между образцами и массивом в результате на-

личия трещиноватости, т.е. проявление масштабного эффекта, но и различие напряженного состояния лабораторных образцов и породного массива, воздействие напряжений (нагрузок) за несопоставимые временные периоды, изменения свойств образцов в процессе отбора и обработки из-за дегазации, высыхания, механических повреждений и др. Для определения прочности горных пород с учетом влияния масштабного эффекта авторами предложены уравнения, основанные на получении прочностных показателей на двух сериях испытаний образцов различных размеров:

$$\sigma_p = \frac{\sigma'_p}{(F/F')^n} \quad \text{и} \quad \sigma_c = \frac{\sigma'_c}{(F/F')^n}, \quad (3)$$

где σ_p и σ'_p , σ_c и σ'_c – соответственно прочность породы (угля) на разрыв и сжатие на образцах с площадью сечения F и F' ;

n – показатель масштабного эффекта, определяемый из выражений

$$n = \frac{\lg \sigma_{p_1} - \lg \sigma_{p_2}}{\lg F_2 - \lg F_1} \quad \text{и} \quad n = \frac{\lg \sigma_{c_1} - \lg \sigma_{c_2}}{\lg F_2 - \lg F_1}, \quad (4)$$

где индексы 1 и 2 означают показатели для образцов соответственно меньшего и большего размеров.

Большой объем испытаний на одноосное сжатие моделей массива, собранных из равнопрочных (разнопрочных) блоков с нормальносекущей (кососекущей) трещиноватостью выполнен во ВНИМИ. Коэффициент структурного ослабления такого массива рекомендуется определять с помощью зависимости вида [8]:

$$k_c = \frac{1}{1 + a \ln(H/l)}, \quad (5)$$

где H и l – размеры призмы и блока соответственно;

a – коэффициент, зависящий от прочности пород и изменяющийся от 1 до 7 с увеличением прочности пород от 1 до 100 МПа.

Из вышеизложенного следует, что вопрос о влиянии размеров образцов (моделей) на величину их механической прочности до сих пор окончательно не выяснен и требует дальнейших обстоятельных экспериментальных исследований на образцах (моделях) с широким диапазоном значений размеров и представительным числом испытаний для учета вариации показателей.

Формулировка цели (постановка задачи исследования). Основная задача настоящей работы состояла в исследовании показателей прочности модельных материалов, используемых при физическом моделировании геомеханических процессов, происходящих в породном массиве при его взаимодействии с анкерной крепью, в зависимости от размера (объема, площади раскола) моделей.

Представление основного материала исследования. Для осуществления поставленной задачи были изготовлены цилиндрические, кубические и призматические образцы различных размеров из модельного материала со следующим процентным соотношением компонентов (по объему) $ГП:П:Г:Ц:В=34:8:25:7:26$ и $ГП:П:Г:Ц:В=30:19:22:6:23$, где приняты следующие обозначения: ГП – мелкодробленая горелая порода с максимальным размером зерна 1,5 мм; П – мелкозернистый кварцевый песок (0,5 мм); Г – гипс; Ц – портландцемент марки 500; В – вода. Материал предназначался для изготовления моделей однородного массива, прототипом для которого являлась твердая осадочная порода сложного петрографического состава. Материал, с одной стороны, должен обладать свойствами хрупких горных пород и одновременно малой прочностью, которая давала бы возможность промоделировать процесс деформирования породного массива в режиме контролируемого разрушения за пределом прочности на обычном прессе с соблюдением критериев подобия. С другой стороны, он должен иметь стабильные свойства, т.е. неменяющиеся во времени в зависимости от влажности. Образцы испытывались в сухом состоянии через большой промежуток времени после их изготовления, причем влажность материала контролировалась путем взвешивания образцов.

Образование такого модельного материала протекает в две стадии. В течение первой происходит формирование каркаса структуры с возникновением контактов срастания между образующимися кристаллами. В течении второй стадии новые контакты не возникают, а происходит как рост прочности структуры, так и уменьшение её за счет возникновения внутренних дефектов в результате действия внутренних растягивающих напряжений, образующихся в результате направленного роста кристаллов и усыхания материала. Поэтому прочность образцов, с одной стороны зависит от соотношения между размерами образующихся кристаллов и площадью контактов между ними, а с другой стороны определяется связями в местах сплетения вытянутых кристалликов в ссостке, которые называются «условно-коагуляционными». Эти связи значительно прочнее, чем коагуляционные. Однако во влажной среде прочность образцов снижается до уровня прочности коагуляционных контактов и может восстанавливаться при полном высыхании.

Призматические образцы готовили в стандартных формах в виде балочек размером 40x40x160 мм, а испытывали их путем раскалывания клиньями на четыре необработанных кубика и последующего их раздавливания зубчатыми накладками с помощью пресса БП-3 с ручным гидравлическим приводом.

Кубические образцы делали в стандартных формах размером 100x100x100 мм. Большие кубики раскалывали клиньями вначале на призмы различных размеров, из которых получали восемь маленьких

кубиков, испытанных также на сжатие на прессе БП-3 с использованием зубчатых накладок.

Цилиндрические образцы изготавливали в специальных формах диаметром 35 мм, 83,5 мм, 87,1 мм, 101,8 мм. Цилиндры малого диаметра вначале раскалывали клиньями с цилиндрической выточкой перпендикулярно оси образца на малые цилиндрики длиной $l \geq 0,7d$, которые затем испытывали на сжатие зубчатыми инденторами по боковой поверхности образца с помощью полевого пресса для экспресс-испытаний (ППЭИ) горных пород [9]. Все вышеописанные образцы испытывали по обычной методике, т.е. образцы доводились до разрушения с одного нагружения.

Цилиндры большого диаметра выполняли различной высоты, но с приблизительно равным соотношением высоты (h) и диаметра (d), составлявшим 1,24 – 1,31, что соответствует интервалу стандартного отношения $h/d = 1-2$. Торцы образцов тщательно обрабатывались для получения параллельных поверхностей. Отклонения по высоте допускались в пределах 0,1-0,5%.

Испытывали большие цилиндры на одноосное сжатие путем раздавливания плоскими плитами с эластичными прокладками в виде четырех слоев полиэтиленовой пленки на гидравлическом прессе МС-1000 с регистрацией продольных и поперечных деформаций в режиме многократного нагружения и разгрузки и с полуавтоматизированным управлением с помощью персонального компьютера по разработанной программе. Программа регистрирует время начала и окончания каждого опыта, задает скорость загрузки образца, визуализирует ход эксперимента с помощью пяти диаграмм, демонстрирующих изменение нагрузки и перемещений во времени для каждого датчика. Полученные с датчиков данные сохраняются в компьютере в табличном текстовом файле, обработка которого производится при помощи программы Microsoft Office Excel.

На гидравлических прессах БП-3 и ППЭИ, не имеющих автоматики, скорость деформирования образца регулировалась вручную и приблизительно составляла 0,1–0,3 мм/мин, а на прессе МС-1000 регулирование скорости загрузки образца обеспечивалось программно с панели управления компьютера, при этом средняя скорость деформирования образца была равна 0,01–0,02 мм/мин.

При оценке прочности в расчет принимались максимальные усилия, затрачиваемые на разрушение образцов, которые относились к площади раскола (при растяжении) или площади нагружаемой поверхности (при сжатии). Образцы при сжатии разрушались путем образования продольных столбиков, характерных для хрупких однородных пород при отсутствии трения по торцевым поверхностям образцов, что достигалось за счет применения зубчатых накладок и эластичных прокладок.

Данные испытаний наносились на графики для получения зависимостей сопротивления модельного материала раздавливанию σ_c от объема образцов (V , см³) и сопротивления расколу σ_p от площади образцов (F , см²). В качестве примера зависимости для модельного материала состава ГП:П:Г:Ц:В=30:19:22:6:23 (менее прочного) приведены на рисунке 1, а для прочности образцов на сжатие σ_c и на рисунке 1, б для прочности образцов на растяжение σ_p . Несмотря на различие методик испытания на полученных зависимостях отчетливо зафиксирована тенденция уменьшения прочности образца с увеличением его размеров, причем в начальный момент (при малых размерах образцов) прочность материала снижается более активно, а начиная с площади раскола 12 см² (для растяжения) и объема 64 см³ (для сжатия) кривые выполаживаются. В среднем прочность материала на сжатие в 8 раз превышает прочность на растяжение, причем по мере роста размеров образцов это отношение увеличивается.

Как и следовало ожидать, масштабный эффект при расколе образцов проявляется сильнее, чем при сжатии, что можно объяснить следующим образом. Независимо от размера, образец содержит структурные элементы в виде частичек горелой породы, песчинок, скрепленных в единый конгломерат сложным связующим на основе гипса и цемента. Между структурными элементами остаются поры и при высыхании материала образуются трещины, которые являются структурными дефектами, случайным образом распределенными по всему объему образца. Поэтому при расколе сопротивляется не вся геометрическая площадь сечения раскола, а только некоторая ее часть, зависящая от соотношения попадающих в сечение дефектов и структурных элементов. При этом, чем меньше размер образца, тем большей будет площадь, приходящаяся на структурные элементы, так как их размер постоянен. При раздавливании образцов в начальный момент некоторая часть дефектов закрывается, что ведет к росту общего сопротивления материала сжатию, а, следовательно, и к увеличению средних значений напряжений по сравнению с расколом. После закрытия пор и трещин материал некоторое время работает упруго, а при дальнейшем увеличении напряжений он переходит на стадию микрорастрескивания, характеризующуюся накоплением и взаимодействием дефектов, концу которой отвечает предельная прочность материала на сжатие. С дальнейшим развитием процесса разрушения образцов происходит полный разрыв внутренних связей, что вызывает образование структурных столбиков с раскрытием магистральных трещин в продольном направлении и последующую общую потерю устойчивости образца. Все вышеотмеченные стадии деформирования образца модельного материала полностью соответствуют поведению полиминеральных осадочных пород.

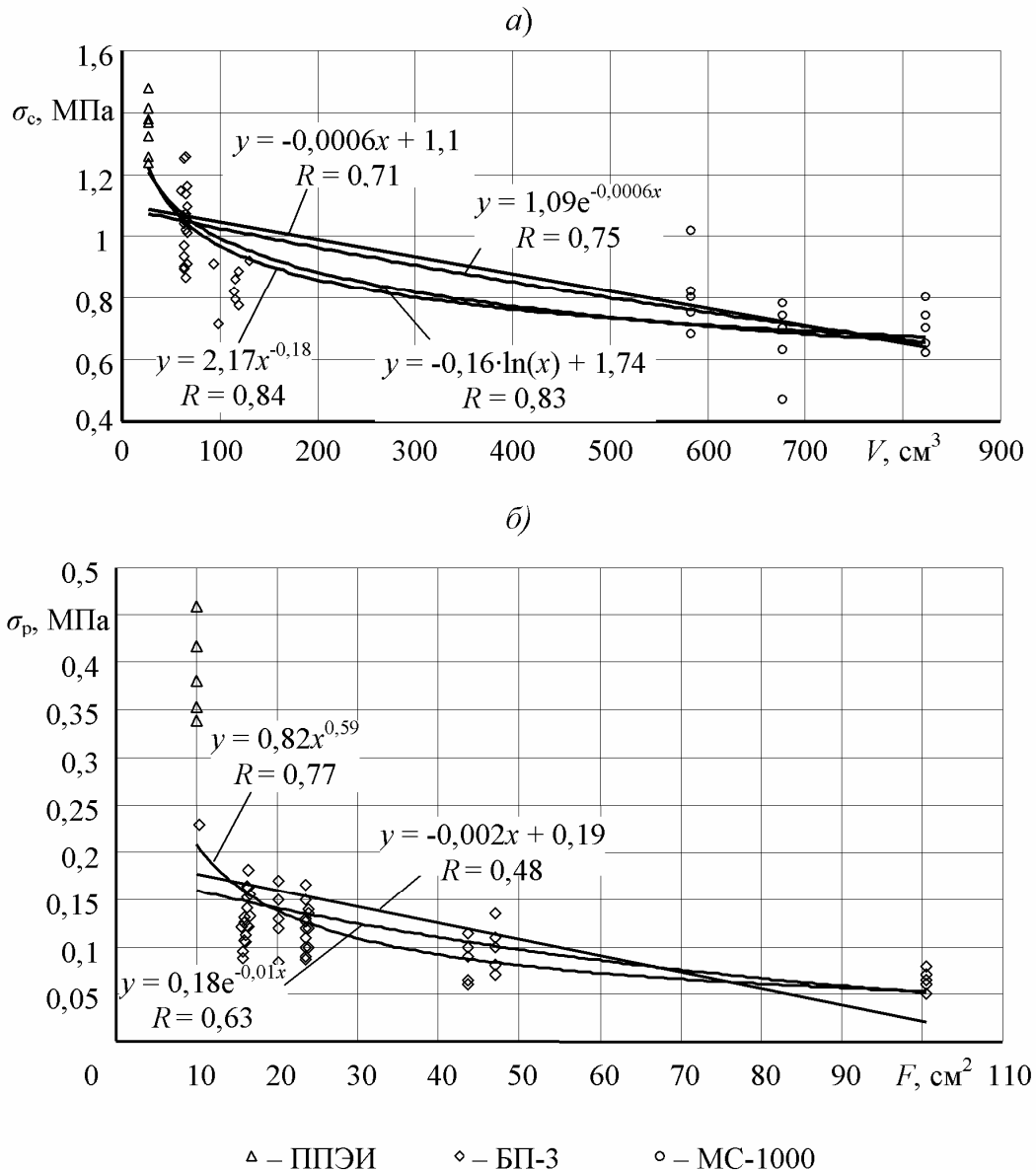


Рисунок 1 – Прочность на сжатие (а) и растяжение (б) модельного материала ГП:П:Г:Ц:В=30:19:22:6:23

По мере увеличения размеров образцов относительная площадь (объем) структурных дефектов увеличивается, а относительная площадь (объем) образца без дефектов уменьшается, поэтому средняя прочность материала при увеличении размеров снижается. В то же время для образцов малых размеров характерен больший разброс показателей, чем для крупных, менее прочных образцов. Однако прочность материала при увеличении размеров снижается не беспредельно. Кривая, характеризующая изменение прочности от размеров образца, асимптотически приближается к минимальному значению, которое можно принять за величину прочности породного массива.

Исходя из полученных результатов, можно отметить, что прочность конгломерата зависит от соотношения размеров слагающих его элементов (дефектов) и изучаемого фрагмента массива. Если массив однороден, т.е. число структурных элементов велико, то в данном диапазоне масштабный эффект невелик и им можно пренебречь, так как влияние размеров приблизительно соответствует вариации показателей, обусловленной неоднородностью пород. Если порода содержит несколько систем дефектов различного уровня (поры, трещины), то каждому уровню будет соответствовать своя кривая уменьшения прочности, значимая в определенном диапазоне изменения размеров, а общая зависимость будет иметь ступенчатый вид. При наложении областей взаимного влияния отдельных дефектов с увеличением размеров образцов прочность пород будет существенно снижаться.

Для исследования формы зависимостей экспериментальные данные обработаны методом наименьших квадратов [10]. Проведенное статистическое сравнение с помощью корреляционного отношения R показало, что для линейной, степенной, логарифмической и показательной зависимостей коэффициент имеет малую величину, что указывает на плохую коррелированность прочности от размеров образца. Кроме того, отмеченные выше функции пересекают ось ординат, т.е. при нулевых размерах образцов материал обладает прочностью, а при больших размерах некоторые функции стремятся к нулю, что не согласуется с физическим смыслом явления масштабного эффекта, так как прочность массива не может быть равна нулю. Лучше всего связь между показателями описывается смещенной гиперболой, особенно для прочности на растяжение σ_p , для которой корреляционное отношение близко к единице.

Для исследования гиперболической зависимости и уяснения физического смысла, входящих в нее величин, экспериментальные данные для обоих составов материала для объединенной выборки представлены в безразмерном виде на рисунке 2. Для этого на оси абсцисс отложены относительное значение объема (при сжатии) и площади (при растяжении) испытываемых образцов, причем нормировка размеров произведена по отношению к кубику с размерами 40x40x40 мм, а по оси ординат – относительные напряжения, т.е. отношение текущего значения прочности к прочности образцов с сечением 16 см² и объемом 64 см³. На основании анализа зависимостей можно заметить, что безразмерные кривые для различных составов могут быть объединены в общую зависимость, причем при сжатии кривая более пологая, а прочность снижается в 1,5 раза, а при растяжении кривая идет значительно круче, а прочность снижается более чем в 5 раз. Можно предположить, что для неоднородной и трещиноватой породы зависимость также будет более крутой, чем для малотрещиноватой и однородной породы. Следовательно, масштаб-

ный эффект связан с дефектами структуры и проявляется в большей степени в трещиноватых и неоднородных породах.

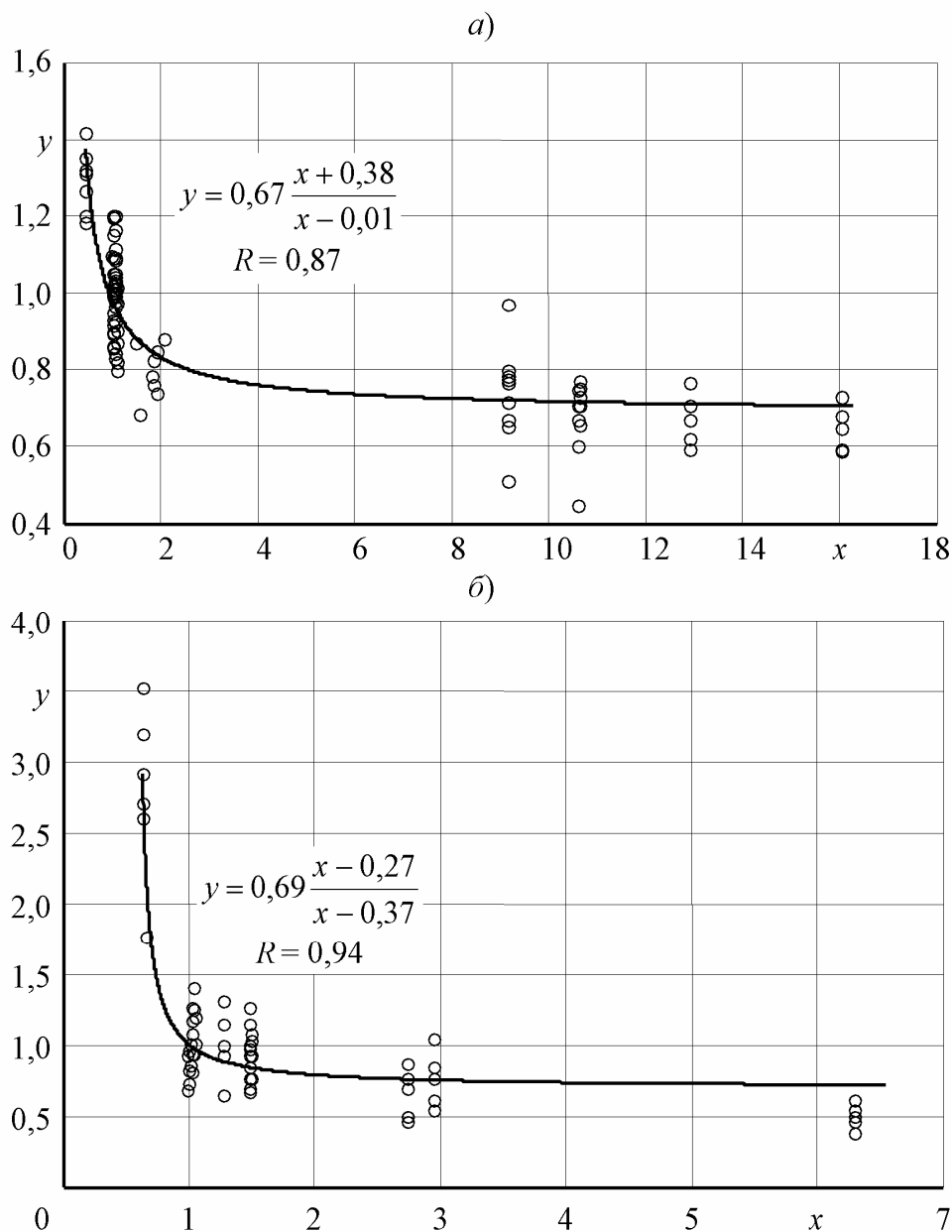


Рисунок 2 – Безразмерные зависимости масштабного эффекта для прочности модельного материала на сжатие (а) и растяжение (б)

Таким образом, статистическая обработка экспериментальных данных показала, что для математического описания масштабного эффекта может быть использована зависимость, впервые предложенная для описания масштабного эффекта в работе [7] М.М. Протодьяконовым (младшим). Однако для придания входящим в зависимость величинам более четкого физического смысла она должна быть трансформирована к виду:

$$\sigma(x) = \sigma_M \frac{x - mz}{x - z}, \quad (6)$$

где σ_M – прочность трещиноватого массива или образца с относительным размером (x) , стремящимся в бесконечность;

m – коэффициент, характеризующий кривизну функции и зависящий от вида напряженного состояния (сжатие, растяжение) и соотношения размеров структурных элементов и фрагмента массива;

x – относительный размер образца, имеющего прочность $\sigma(x)$;

z – параметр, имеющий смысл размера образца, при котором прочность стремится в бесконечность.

Следует заметить, что зависимость (6) имеет смысл при $x \geq z$. Дробь $(x-mz)/(x-z)$ является безразмерным коэффициентом, показывающим во сколько раз прочность образца размером x больше прочности массива σ_M , т.е. величина обратная коэффициенту структурного ослабления:

$$k_c = \frac{\sigma_M}{\sigma(x)} = \frac{x - z}{x - mz}. \quad (7)$$

При $x \rightarrow \infty$ вторыми членами в числителе и знаменателе уравнения (6) можно пренебречь, тогда $\sigma(x) = \sigma_M$, т.е. прочность крупных образцов асимптотически стремится к прочности массива.

Смысл параметра z легко понять, если приравнять $x=z$ и подставить в уравнение (6), откуда получим $\sigma(x) \rightarrow \infty$. Следовательно, z есть размер образца, при котором прочность стремится в бесконечность, т.е. параметр z является координатой вертикальной асимптоты.

Поскольку в уравнении (6) имеются три неизвестных параметра: σ_M , m и z , то для их определения достаточно иметь три точки, полученные опытным путем на образцах различных размеров. Испытав в лаборатории образцы трех размеров x_1 , x_2 и x_3 и получив их прочности σ_1 , σ_2 и σ_3 , можно без особого труда из системы трех уравнений вычислить параметры, характеризующие влияние масштабного эффекта на прочность массива.

Выводы. Экспериментальными исследованиями изучена прочность модельного материала на сжатие и растяжение и обоснована эмпирическая гиперболическая зависимость, позволяющая перейти от прочностных показателей, полученных путем моделирования, к прочности массива с учетом масштабного эффекта.

Библиографический список

1. Сухонос С.И. Масштабная гармония Вселенной / С.И. Сухонос. – М.: София, 2000. – 253 с.
2. Литвинский Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов: монография / Г.Г. Литвинский. - ДонГТУ. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 207 с.
3. Шашенко А.Н. Масштабный эффект в горных породах: монография / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.В. Кужель. - НГУ. – Днепропетровск: Арт-Пресс, 2004. – 132 с.
4. Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер, Е.С. Ватолин, М.Ф. Кунтыш; под ред. М.М. Протодьяконова. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
5. Барон Л.И. К вопросу о влиянии масштабного фактора при испытаниях горных пород на раздавливание // Л.И. Барон, В.М. Курбатов / Научные исследования при разработке угольных и рудных месторождений: ИГД АН СССР. – М.: Госгортехиздат, 1959. – С. 163-169.
6. Койфман М.И. Главный масштабный эффект в горных породах и углях // Проблемы механизации горных работ. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – С. 39-56.
7. Протодьяконов М.М. Трециноватость и прочность горных пород в массиве: монография / М.М. Протодьяконов, С.Е. Чирков. - ИГД им. А.А. Скочинского. – М.: Наука, 1964. – 67 с.
8. Фисенко Г.Л. Предельное состояние горных пород вокруг выработок / Г.Л. Фисенко. – М.: Недра, 1976. – 272 с.
9. Временная инструкция и методические указания по определению прочностных и деформационных свойств горных пород / Коммунарский горно-металлургический институт. – Коммунарск: Ком. гор. типография, 1981. – 41 с.
10. Румишский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Справочное руководство / Л.З. Румишский. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1971. – 192 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Клишиным Н.К.

*д.т.н. Должиков П.Н.,
Корсаков Д.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЛИКВИДАЦИИ ПРОВАЛА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАД ГОРНОЙ ВЫРАБОТКОЙ

По проведенным інструментальним дослідженням процесів зрушення порід на полях закритих шахт отримана критеріальна функція і розроблен стенд для моделювання ліквідації провалів земної поверхні, встановлені закономірності деформації закладочного масиву

Ключові слова: провалля, тампонаж, масив, деформація.

По проведенным инструментальным исследованиям процессов сдвижения пород на полях закрытых шахт получена критериальная функция и разработан стенд для моделирования ликвидации провалов земной поверхности, установлены закономерности деформации закладочного массива.

Ключевые слова: провал, тампонаж, массив, деформация.

Постановка проблемы. Добыча полезных ископаемых подземным способом привела к образованию региональных образований, характеризующихся изменением прочностных свойств пород; наличием в массиве горных пород пустот от очистных, подготовительных и капитальных выработок и связанных с этим изменения гидрогеологической ситуации.

Закрытие горных предприятий «мокрым» способом привело к поднятию уровня подземных вод, к изменению геодинамического состояния ранее осушаемого горными работами массива и формированию геологических рисков для городских, промышленных территорий. В результате чего возникает реальная угроза подтопления застроенных территорий; возобновления и активизации процессов сдвижения горных пород над очистными выработками, образованием провалов земной поверхности [1].

Провалы – довольно частое явление в районах с развитой горнодобывающей промышленностью, а также на территориях, имеющих развитую подземную инфраструктуру. Они могут быть связаны с суффозионными процессами и другими причинами. Провалы внезапны, на их месте образуются воронки диаметром до 3 – 5 м и более, а на поверхности возникают необратимые деформации. Провалы представляют

опасность для жизни людей, нормальной эксплуатации зданий и сооружений [2,3].

Снижение вредного влияния закрытия шахт и выбор рационального способа ликвидации провалов земной поверхности является важной проблемой, успешное решение которой в значительной степени зависит от изученности процесса развития провалов земной поверхности, основанных на детальном изучении его характера, особенностей и определяющих факторов. Использование этих данных на стадии планирования и проектирования ликвидационных работ с учётом качественных и количественных особенностей горно-геологических условий и горно-технических факторов, в конечном итоге, направлено на повышение эффективности погашения горных выработок [4].

Вышеуказанное свидетельствует об актуальности решаемой в работе задачи определения параметров провалов земной поверхности при изменении гидрогеологических условий на полях закрытых шахт.

Целью данной работы является исследование процесса деформации закладочного массива при ликвидации провалов земной поверхности методом послойного тампонирувания.

Решение данной задачи разделяем на два этапа. На первом этапе проводим инструментальные исследования провалов земной поверхности на территории горных отводов закрытых угольных шахт Луганской области для установления закономерностей активизации сдвижения горных пород и образования провалов при затоплении [2]. Данные, полученные на первом этапе исследований, являются основанием для проводимого на втором этапе физического моделирования процесса ликвидации провалов земной поверхности с применением ресурсосберегающих тампонажных растворов.

Проведенные натурные наблюдения за сдвижением земной поверхности служат исходной базой для моделирования процессов ликвидации провалов земной поверхности.

Цель моделирования заключается в получении качественных и количественных характеристик процессов деформирования засыпочно-го материала, для оценки эффективности принятого способа ликвидации провала.

При проведении лабораторных экспериментов по моделированию ликвидации провала информационными параметрами являются скорость и величина оседания засыпочно-го материала, итоговая несущая способность образованного массива.

Ликвидация провала выполняется ступенчато методом послойной засыпки на высоту $h = h_2 + h_1$, где h_1 – высота тампонажного раствора, причем $h_1 = \Delta h_3$ – усадка материала засыпки, то есть абсолютная деформация второй зоны первой ступени (рисунок 1).

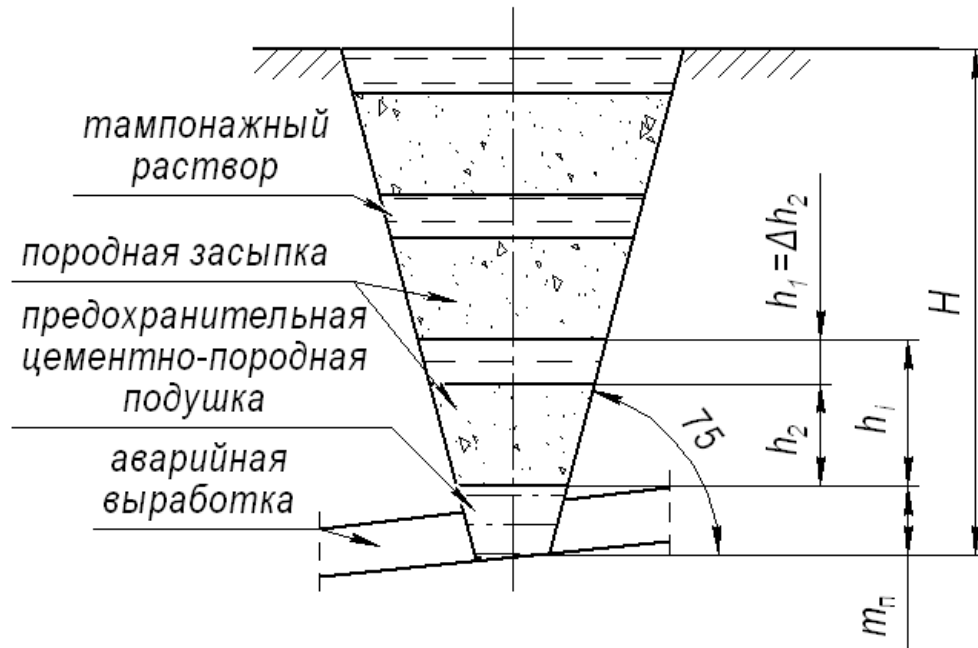


Рисунок 1 – Схема ликвидации провала над горной выработкой

Исходя из технологии производство работ число ступеней равно целому числу, а диаметр тампонажного кольца равен

$$d_i = D \frac{h_i}{h}.$$

В общем случае: $h_i = h_2 + h_1 = \frac{ih}{n}$, где i – номер ступени, n – число ступеней.

Следовательно:

$$d_i = D \frac{h_i}{h}.$$

Заметим, что за основную характеристику провала принимаем нижний диаметр d , верхний диаметр провала определяем по формуле:

$$D = d + 2h \operatorname{ctg} \alpha.$$

Для составления функции деформационного процесса учтем наиболее важные физические величины преобладающего действия. Получили следующую функцию деформационного процесса:

$$\varphi(\Delta h_2, t, q_c, E, h, d) = 0,$$

исходя из которой используя π -теорему получаем критериальную функцию

$$\Phi\left(\frac{d}{h}; \frac{tv}{dW}; \frac{Ed^2}{q_c}\right) = 0,$$

где t – время деформации, q_c – общая нагрузка на материал засыпки, E – модуль деформации пород засыпки; W – влажность, h – высота ступени засыпки.

На основе полученных критериев подобия был разработан стенд (рисунок 2), при помощи которого можно с достаточной точностью производить моделирование усадки закладочного материала под действием увлажнения и пригруза от вышележащего слоя

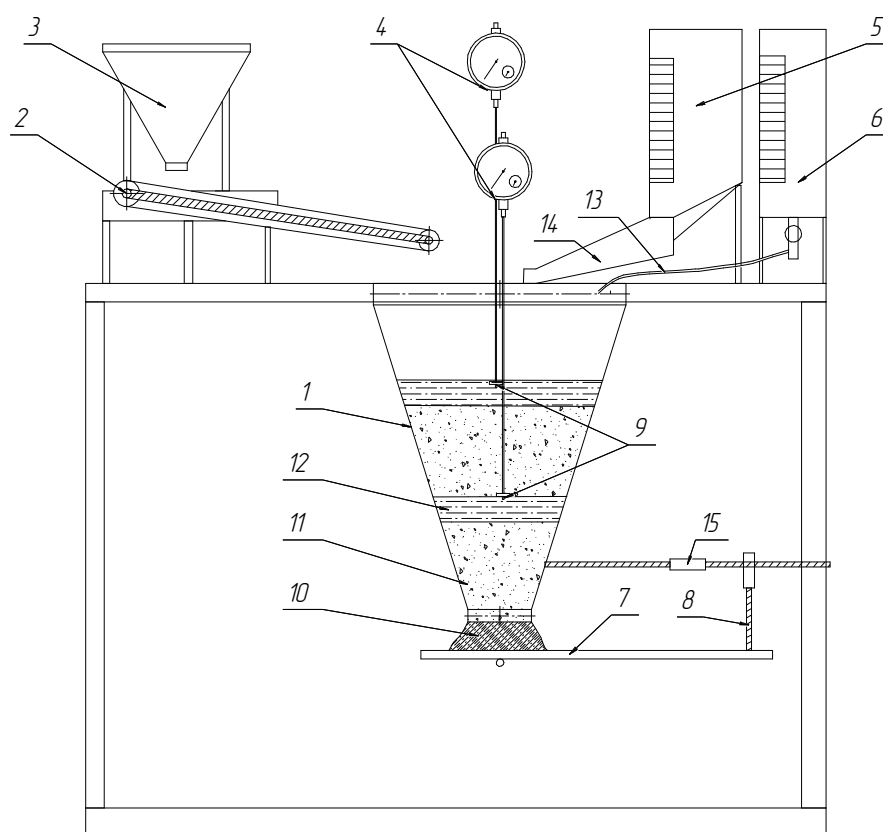


Рисунок 2 – Конструкция экспериментального стенда

Стенд работает следующим образом. Относительно модели провала 1 устанавливается имитатор почвы выработки 7 с зазором 6 см. С помощью регулятора 8 имитируется угол наклона выработки в вертикальной плоскости. С помощью регулятора 15 задается направление оси провала.

Для предотвращения ухода тампонажного материала в подземную выработку 7 в устье модели провала 1 сооружаем опорную подушку 10 из глиноцементного раствора с повышенным содержанием цемента.

После набора необходимой прочности подушки 10, на нее укладывают слой горелой породы 11, толщина которого зависит от ее прочностных и компрессионных свойств. Имитация укладки породы проводится с помощью питающего конвейера 2 из породного бункера 3. Для ускорения процесса усадки перегорелой породы при засыпке производят ее дополнительное увлажнение из резервуара 6.

После этого провал заливают в безнапорном режиме безусадочным глиноцементным тампонажным раствором, основе этой же породы, из приемного резервуара 5.

В результате, получаем ускорение процесса усадки закладочного материала под действием увлажнения и пригрузки вышележащего слоя.

На границах слоев 11 и 12 закладываются измерительные марки 9 для контроля процесса усадки закладочного материала и деформации тампонажных слоев с помощью индикаторов часового типа ИЧ10.

В качестве материалов для проведения экспериментов были использованы породы отвала шахты «Романовская» (бывшая шахта «Украина» ГП «Луганскуголь»). Проведенные исследования по определению физико-механических и деформационных свойств отвальных пород показали значительный разброс параметров, зависящих от гранулометрического состава образцов. Принимая во внимание технологические и деформационные требования к закладочному массиву, для дальнейших исследований были приняты фракции породы крупностью до 2.5 мм.

Исследования свойств растворов, на основе отвальных пород, показали, что для достижения пластической прочности 0,3 МПа достаточно ввести 40 кг/м^3 цемента марки М400 (рисунок 3).

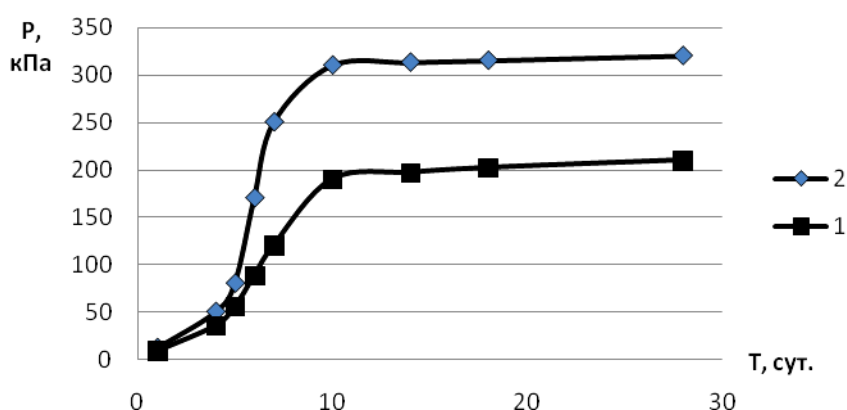


Рисунок 3 – Изменение пластической прочности тампонажного раствора во времени от количества введенного цемента 1 – 20 кг/м^3 ; 2 – 40 кг/м^3

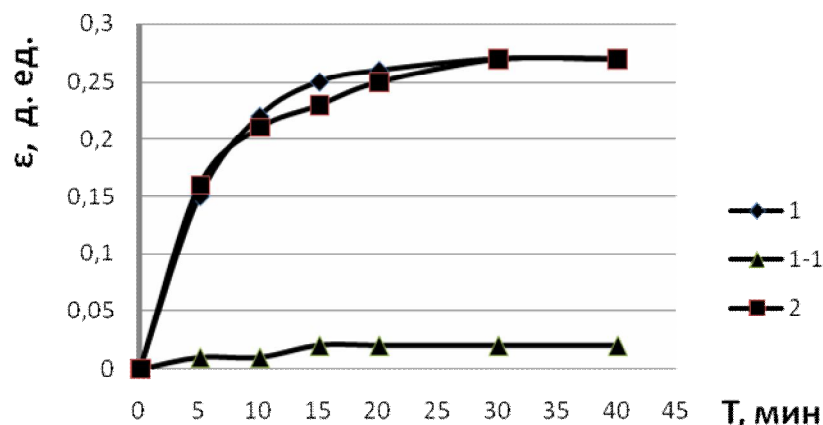


Рисунок 4 – Результаты моделирования процессов деформирования материала породной засыпки

1 – относительная деформация первого слоя засыпки;
 1-1 – деформация первого слоя засыпки после укладки второго слоя; 2 – деформация второго слоя засыпки.

Моделирования процесса ликвидации провала с использованием увлажнения закладочных материалов и дополнительного пригруза показало быстрое уплотнение закладочного массива (до 92% от общего уплотнения за 15 минут). Дополнительные деформации первой ступени от засыпки последующих ступеней засыпки не превышали 1-2% (рисунок 4).

Выводы.

Результаты натурных исследований позволили выявить основные факторы влияющие на процесс деформации закладочного массива и определить функцию деформационного процесса, а также разработать экспериментальный стенд, для моделирования процесса ликвидации провалов.

Результаты моделирования процесса усадки закладочного материала показали что формируется устойчивая слоистая система с относительной деформацией $\epsilon < 2\%$.

Введение в глинопородную суспензию цемента в количестве 40 кг/м³ позволяет получить достаточную пластическую прочность тампонажного слоя 320 кН.

Проведенные исследования позволили обосновать высокую эффективность применения при ликвидации провалов земной поверхности способа послойного тампонирования на основе суспензий горелых отвалных пород и глинопородных тампонажных растворов с добавками цемента.

Библиографический список

1. *Техногенные последствия закрытия угольных шахт Украины* / [Гавриленко Ю.Н., Ермаков В.Н., Кренида Ю.Ф. и др.]; под ред. Ю.Н. Гавриленко, В.Н. Ермаков. – Донецк, 2004. - 631с.
2. *Геомеханические и технологические проблемы закрытия шахт Донбасса* / Гребенкин С.С., Ермаков В.Н. [под ред. С.С. Гребенкина]. – Донецк: ДонНТУ, 2002.- 266с.
3. Должиков П.Н. Об экологической безопасности ликвидации выработок закрываемых шахт / Должиков П.Н. Рябичев В.Д. // Сб. науч. тр.: Состояние и перспективы развития Восточного Донбасса, ч.1. – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2001. – С. 75-77.
4. Должиков П.Н. Анализ деформаций земной поверхности при гидроактивизации горных пород / П.Н. Должиков, Д.В. Корсаков // Сб. науч. трудов ДонГТУ №32. – Алчевск: ДонГТУ, 2010. - С.125-130.
5. *Комплексная технология ликвидации наклонных выработок: монография* / [Кипко Э.Я., Должиков П.Н., Рябичев В.Д.]. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 220с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Гайко Г.И.

*д.т.н. Бабиюк Г.В.,
Диденко М.А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ДВУХЭТАПНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЫРАБОТОК

Наведені основні положення методики двохетапного прогнозування проявів гірського тиску у виробці, що проводиться, і вибору раціональних параметрів кріплення.

Ключові слова: *напружено-деформований стан, зміщення породного контуру, навантаження на кріплення.*

Приведены основные положения методики двухэтапного прогнозирования проявлений горного давления в проводимой горной выработке и выбора рациональных параметров крепи.

Ключевые слова: *напряженно-деформированное состояние, смещения породного контура, нагрузка на крепь.*

Проблема прогнозирования проявлений горного давления в подземных выработках имеет давнюю историю. Однако она до сих пор не потеряла своей актуальности, так как при разработке проекта проведения выработки перед проектировщиком встает непростая задача определения смещений контура выработки и нагрузок на крепь, решение которой осложняется отсутствием достоверной информации об исходном напряженно-деформированном состоянии массива, о свойствах горных пород, о взаимодействиях породного массива с крепью выработки и т.д. В связи с этим на практике при расчете пользуются упрощенными методиками и недостоверными исходными данными, поэтому назначаемые параметры крепи далеко нерациональны, в ряде случаев крепь не обеспечивает требуемой устойчивости выработки.

При принятии решений в условиях неполной информации выход возможен за счет перехода на двухстадийное проектирование, когда первоначальный проект подлежит корректировке непосредственно в ходе строительства выработки, если свойства пород и напряженно-деформированное состояние массива отличаются от исходных, использованных при разработке проекта.

Впервые вопрос о необходимости перехода на двухстадийное проектирование при сооружении выработок был поднят в работах [1, 2], а реали-

зован на практике такой подход был при проведении выработок в условиях пучащих пород [3]. Однако упор был сделан на повышение точности и представительности инженерно-геологических изысканий, а также на упрощение порядка пересмотра и утверждения проектной документации. При этом вопрос создания насущно необходимой для такого рода проектных работ методики двухэтапного прогнозирования проявлений горного давления в выработке долгое время оставался открытым, чему и была посвящена настоящая работа.

В связи с развитием компьютерного моделирования геомеханических процессов в окрестности выработки и обоснованием научных положений методологии обеспечения устойчивости выработок в изменчивых и неопределенных условиях их сооружения [4], двухэтапное прогнозирование проявлений горного давления при проведении выработок стало реальностью. Сущность такой методики состоит в определении параметров крепи на базе прогнозируемых смещений пород и нагрузок на крепь в два этапа. На первом этапе при разработке проекта проведения выработки производится сугубо приближенный, оценочный прогноз размеров зоны неупругих деформаций пород с помощью зависимости, установленной путем обработки результатов моделирования на ЭВМ при помощи метода конечных элементов в широком диапазоне горно-геологических условий и учитывающей основные влияющие факторы. При этом начальное напряженное состояние массива для наиболее ответственных выработок, наличии сближенных взаимовлияющих выработок или воздействии очистных работ оценивается путем численного решения прямой задачи.

На втором этапе при проведении выработки текущий прогноз проявлений горного давления обеспечивается последовательным решением плоских численных задач, периодически корректируемых путем шахтных инструментальных наблюдений с целью определения пространственно-временной функции распределения вокруг выработки коэффициента трещинной пустотности пород. Этот показатель связан корреляционными зависимостями с параметрами контроля состояния пород и функционально со смещениями породного контура выработки и отражает стадию развития деформационных процессов в зоне влияния забоя в окрестности выработки. Компьютерное моделирование на этапе текущего прогнозирования производится с помощью программного обеспечения, учитывающего широкий спектр механических свойств горных пород, в том числе допредельное, предельное и запредельное состояние пород, реологическое поведение массива при перераспределении напряжений в результате проведения выработки, ослабляющие воздействия геологического и технологического характера, а также силовое взаимодействие с породным массивом рамной податливой крепи, устанавливаемой с предварительным распором. При этом неизвестное исходное поле напряжений устанавливается путем реше-

ния обратной геомеханической задачи, а смещения контура выработки вычисляются по периодически уточняемым регрессионным зависимостям между относительными деформациями и коэффициентом трещинной пустотности, что позволяет получить с заданной точностью оперативную информацию для принятия решений по обеспечению надежности выработки непосредственно при ее проведении.

В привязке к отраслевому стандарту [5] прогнозирование проявлений горного давления при проведении выработки на этапе её проектирования производится в следующем порядке:

1. По данным геологической разведки устанавливается структура и свойства вмещающего выработку породного массива, определяются глубина заложения выработки, диапазоны изменения мощностей слагающих пород и вариация плотностных, прочностных и деформационных свойств пород.

2. В соответствии с техническим проектом шахты выбираются геометрические параметры поперечного сечения выработки, устанавливается её пространственное расположение в породном массиве по отношению к структурным неоднородностям, сближенным выработкам, влияющим на исходное напряженное состояние массива, и очистным работам с учетом их развития в течение всего срока службы выработки.

3. Составляется идеализированная численная геомеханическая модель для исследования напряженно-деформированного состояния породного массива в окрестности выработки без учета крепи и технологии её сооружения и производится пошаговое решение упругопластической задачи в зависимости от основных влияющих факторов: слоистости массива, анизотропии прочностных и деформационных свойств, нарушенных контактов между отдельными породными слоями и т.д.

4. Оценивается достоверность и адекватность геомеханической модели на основе анализа компонент напряжений и перемещений, анализируется степень погрешности допущений и идеализаций расчетной схемы, производится при необходимости корректировка модели и повторный вычислительный эксперимент.

5. На основе результатов предварительного геомеханического моделирования с учетом образования зоны неупругих деформаций вокруг выработки устанавливаются размеры фрагмента породного массива для детального моделирования при текущем прогнозировании проявлений горного давления во время проведения выработки, определяются компоненты напряжений и перемещений на границе фрагмента для последующего нагружения модели на втором этапе моделирования и рассчитывается усредненное значение обобщенного коэффициента бокового распора λ_0 как отношение горизонтальных напряжений к вертикальным с учетом действия грави-

тационного и тектонического полей напряжений, взаимовлияния выработок и воздействия очистных работ, а также изменчивости свойств пород.

6. Для выбранного фрагмента породного массива устанавливают мощности (m) слагающих его слоев пород (не более 5 м) на расстоянии не менее 20 м в кровле и почве от середины выработки и определяют средний расчетный предел прочности пород массива [5]:

$$R = (R_{кр} + R_n) / 2, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где $R_{кр}$, R_n – соответственно расчетные пределы прочности на одноосное сжатие пород кровли и почвы, МПа, рассчитываемые по формуле:

$$R_{кр(n)} = \frac{R_1 \cdot m_1 \cdot k_1 + R_2 \cdot m_2 \cdot k_2 + \dots + R_i \cdot m_i \cdot k_i}{m_1 \cdot k_1 + m_2 \cdot k_2 + \dots + m_i \cdot k_i}, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где R_1, R_2, \dots, R_i – расчетные пределы прочности на одноосное сжатие отдельных слоев пород, определяемые путем умножения средней прочности пород на одноосное сжатие σ_c , установленной по результатам испытаний стандартных образцов, на коэффициенты структурного ослабления k_c массива и обводненности пород, принимаемые согласно имеющимся рекомендациям [5, 6 и др.];

m_1, m_2, \dots, m_i – мощности слоев пород, м;

k_1, k_2, \dots, k_i – коэффициенты влияния слоев пород:

$$k_i = \exp \left[-\alpha \cdot \left(l_i - \frac{h}{2} \right) \right], \quad (3)$$

где α – эмпирический коэффициент, равный 0,5 для выработок, находящихся вне зоны влияния очистных работ;

l_i – расстояние от середины сечения выработки в проходке до середины определенного слоя пород, м;

h – высота выработки в проходке, м.

7. Для оценки интенсивности проявления горного давления в качестве расчетного параметра используется относительная площадь зоны разрушения пород вокруг выработки ($S_{pв} = S_p / S_в$, где S_p , $S_в$ – соответственно абсолютная площадь зоны разрушения и площадь поперечного сечения выработки). По результатам моделирования [7] установлено, что площадь зоны разрушения с удалением от забоя нелинейно возрастает, стремясь к некоторому предельному значению $S_{pв}(z_3)$, достигаемому на границе зоны влияния забоя, величина которого зависит от прочности пород ($c/\gamma H$) и исходного поля напряжений (λ_0). Протяженность зоны влияния забоя z_3 определяется

процессом перераспределения напряжений в результате проведения выработки и зависит, кроме того, от реологических свойств горных пород и скорости проведения выработки. Относительная площадь зоны разрушения от расстояния до забоя выработки аппроксимирована функцией вида:

$$S_{pв}(z) = S_{pв}(z_3) \cdot \left\{ 1 - e^{-\beta \cdot (z \cdot [k_p + (1-k_p)e^{-z}] - z_0)} \right\}, \quad (4)$$

где $z = L/R$ – совмещенная с продольной осью выработки безразмерная координата с началом отсчета от забоя;

$S_{pв}(z_3)$ – площадь зоны разрушенных пород на границе зоны влияния забоя;

z_0 и z_3 – расстояние, на котором соответственно начинается разрушение пород и заканчивается перераспределение напряжений;

β – коэффициент аппроксимации;

k_p – реологический параметр [7].

При моделировании развития зоны разрушения пород вокруг закрепленной выработки было установлено, что пассивный отпор крепи с максимальной несущей способностью не оказывает воздействия на деформационные процессы вокруг выработки. Для того, чтобы возмущения за счет воздействия крепи на массив вышли за пределы погрешности численного метода, несущая способность рам, монтируемых традиционным способом, должна составлять 4000-5000 кН. Одним из способов, позволяющим управлять приконтурным массивом, находящимся в предельном состоянии, является установка крепи с предварительным распором. Расчеты производились для арочной металлической податливой крепи с несущей способностью 160, 200, 350, 435, 540 и 700 кН/п.м. Крепь распиралась между кровлей и почвой с уплотняющим усилием 560 кН, что соответствует установке двух гидростоек типа 2СУГ30 под раму. В результате моделирования установлено, что предварительный распор крепи приводит к уменьшению предельной величины относительной площади зоны разрушения $S_{pв}(z_3)$ в 1,5-2,4 раза, при этом величина $S_{pв}(z_3)$ обратно пропорциональна несущей способности крепи P . Зависимость относительной площади зоны разрушения вокруг выработки может быть аппроксимирована с корреляционным отношением $\eta_{x|y} = 0,8998$ функцией вида:

$$S_{pв}(z_3) = \frac{2,7 \cdot e^{-4,1\lambda_o} + 0,56\lambda_o - 0,5}{(c/\gamma H)^{1,9} \cdot (1 + 0,002 \cdot P)}, \quad (5)$$

где λ_o – обобщенный коэффициент бокового распора, определяемый численным моделированием; если данные о λ_o отсутствуют, то расчет можно выполнить для нескольких оценочных значений ($\lambda_o = v/(1-v)$), где

ν – коэффициент Пуассона; $\lambda_o = 1$; $\lambda_o > 1$), а в качестве расчетной величины принять наихудший результат;

$c/\gamma H$ – безразмерная величина сцепления пород при прямолинейном паспорте прочности, которую определяют через расчетное сопротивление пород сжатию R (МПа), если задаться величиной угла внутреннего трения $\varphi = 20^\circ$, по формуле:

$$(c/\gamma H) \approx 350 \cdot R/(\gamma \cdot H), \quad (6)$$

здесь γ – объемный вес пород, кН/м³;

H – глубина расположения выработки, м.

P – несущая способность крепи, кН/п.м.; если распор рам крепи при установке не предусматривается, следует принять $P = 0$.

8. Исходя из размера зоны разрушения пород можно рассчитать высоту свода расслоившихся пород кровли:

$$h_c = 0,56 \cdot k_{кр} \sqrt{(1 + S_{ps}(z_3)) \cdot S_{np}}, \text{ м}, \quad (7)$$

где S_{np} – площадь поперечного сечения выработки в проходке, м²;

$k_{кр}$ – коэффициент, учитывающий долю смещений пород кровли в общих смещениях кровли и почвы, рассчитывается по формуле [5]:

$$k_{кр} = k_n \cdot R_n / (R_{кр} + R_n), \quad (8)$$

где k_n – коэффициент, учитывающий влияние глубины расположения выработки; для выработок, находящихся вне зоны влияния очистных работ рассчитывается по формуле [5]:

$$k_n = 1,2 - 0,0004 \cdot H. \quad (9)$$

Если рассчитанная по формуле (7) величина $h_c < 0,2 \cdot B_{np}$, где B_{np} – ширина выработки в проходке, м, то следует принять $h_c = 0,2 \cdot B_{np}$, м.

9. Рассчитать вес пород, формирующих нагрузку на крепь можно в предположении параболического свода обрушения с учетом возможного динамического проявления горного давления [5]:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot k_d \cdot B_{np} \cdot \gamma \cdot h_c, \text{ кН/м}, \quad (10)$$

где k_d – коэффициент динамичности загрузки крепи, величина которого принимается в соответствии со стандартом [5] в зависимости от

размера зазора между крепью и кровлей выработки; если крепь устанавливается без зазора с предварительным распором $k_0 = 2,0$.

10. Необходимое количество рам крепи n на 1 м выработки рассчитывают по формуле:

$$n = Q/P_{кр}, \text{ рама/м,} \quad (11)$$

где $P_{кр}$ – рабочее сопротивление крепи, кН.

Паспортную плотность установки рам крепи следует принять равной ближайшему значению в ряду: 1,0; 1,25; 1,5; 2,0. Если крепь устанавливается с предварительным распором, а несущая способность крепи по проекту отличается более чем на 25% от значения, принятого при определении площади зоны разрушения, величину P в формуле (5) следует скорректировать, а расчет по пунктам 7-10 нужно повторить.

На втором этапе прогнозирования проявлений горного давления определение параметров, необходимых для принятия решений по обеспечению устойчивости сооружаемой выработки, осуществляется путем сочетания компьютерного моделирования, шахтных исследований места зарождения и закономерностей развития зоны разрушения пород вокруг выработки с помощью скважинных методов, определения реальных значений прочностных и деформационных показателей горных пород по результатам испытаний образцов, отобранных в выработке, и изучения структурно-текстурных особенностей строения и сложения вмещающих выработку пород. Такой подход, соответствующий принципам имитационного моделирования системы «массив – породное обнажение – крепь», периодически корректируемого с помощью шахтных инструментальных наблюдений, позволяет устранить неопределенность в исходной информации и использовать математическое моделирование в период времени между шахтными замерами для текущего прогнозирования необходимых параметров. Суть такого подхода к решению проблемы обеспечения устойчивости выработок заключается не просто в выборе возможной стратегии или обосновании лучшей стратегии, как это делается при оптимизации, а в постоянном движении к наилучшему решению за счет адаптации технологии к среде, которая характеризуется стохастической и природной неопределенностью.

Такое моделирование геомеханических процессов проводится в течение всего жизненного цикла выработки и характеризуется поэтапным и многостадийным приближением модели к реальному объекту путем многократного повторения циклов (итераций) и оценивания достоверности и адекватности полученных результатов. Многостадийность второго этапа прогнозирования проявлений горного давления при проведении выработки подразумевает:

1. Детальное изучение строения породного массива по материалам горно-проходческих работ путем обследования породных обнажений и керна скважин, которые бурят для уточнения размеров отдельных слоев, характера трещиноватости и интроскопии массива;

2. Оценивание физико-механических свойств представительных участков массива путем отбора и испытания образцов для выявления изменчивости прочностных и деформационных показателей в зависимости от генезиса, минерального состава, структурно-текстурных особенностей и других факторов и построение полярных диаграмм и паспортов прочности пересекаемых выработкой пород;

3. Измерение нарушенности пород вокруг выработки с помощью электроемкостного каротажа и замеров смещений пород глубинными реперами, расчет и количественный анализ коэффициента трещинной пустотности пород и построение с помощью ЭВМ пространственно-временных зависимостей коэффициента трещинной пустотности пород, позволяющих в режиме мониторинга следить за развитием геомеханических процессов, сравнивать значения коэффициента с относительными деформациями пород, оценивать состояние выработки и своевременно принимать решения для достижения заданной надежности;

4. Разработку детальной конечно-элементной модели для моделирования на ЭВМ многопараметрических геомеханических процессов в сложно-структурном массиве, ослабленном выработкой произвольной конфигурации, позволяющей воспроизвести кинетику продвижения фронта разрушения пород по мере удаления от забоя выработки, неоднородность и анизотропию прочностных и деформационных свойств пород для каждого конечного элемента как в допредельном, так и в запредельном состоянии пород, многостадийное перераспределение исходного поля напряжений и учесть технологию проведения и крепления выработок;

5. Многостадийное моделирование проявлений горного давления по мере проведения выработки. При этом неизвестное исходное поле напряжений и недостоверные свойства пород определяются путем многовариантного решения методом конечных элементов геомеханической задачи по оценке возможных проявлений горного давления, которая осуществляется путем полного перебора вариантов сочетания неизвестных заранее параметров и параметров, задаваемых по данным шахтных измерений, либо путем использования методов планирования вычислительного эксперимента. Сопоставлением результатов моделирования с реальными показателями проявления горного давления, получаемыми с помощью инструментальных шахтных наблюдений, производится выбор решения, при котором расчетные проявления горного давления в наибольшей степени соответствуют реальным данным. Прежде всего, условием соответствия результатов моделирования, представляемых в виде картин распределения относитель-

ных деформаций и изображения формы зоны разрушения пород, является качественное подобие зарождения и развития геомеханических процессов, вокруг выработки, оцениваемое вначале визуально, что позволяет отбросить решения, кардинально не соответствующие шахтным замерам, и ограничиться анализом небольшого числа вариантов расчета. Количественными критериями сравнения служат равенства относительных размеров зоны разрушения в характерных направлениях для одного и того же момента времени, а также расчетной и фактической относительной площади зоны разрушения $S_{pв}(z_3)$ на определенном расстоянии от забоя выработки. Основным выходным параметром на первой стадии моделирования является коэффициент бокового распора λ_o , то есть соотношение горизонтальных и вертикальных напряжений на границе фрагмента массива.

При многостадийном моделировании нестационарность поля распределения напряжений в области влияния забоя выработки обеспечивается за счет решения псевдо-пространственной задачи, заключающейся в замене пространственной задачи о формировании зоны разрушения пород вокруг выработки рядом последовательно решаемых плоских. Для упрощения модели породный массив заменяется невесомым фрагментом, ослабленным выработкой и загруженным по внешнему контуру фиктивной нагрузкой, задаваемой при моделировании в зависимости от расстояния до проходческого забоя безразмерной функцией, учитывающей реологические свойства пород и скорость проведения выработки.

Вся серия решений реализуется на одной сети треугольных конечных элементов, позволяющих учесть неоднородность и анизотропию свойств породного массива, неправильную конфигурацию породного контура выработки, наличие зоны взрывного разрушения и воздействие крепи на породы. Изменение поля напряжений в призабойной части выработки и свойств пород в зоне неупругих деформаций учтено автоматически путем задания на каждом последующем шаге решения задачи новых начальных и граничных условий, получаемых из предыдущего шага. Состояние пород в зоне неупругих деформаций описано кусочно-линейной моделью среды с разупрочнением и разрыхлением пород, а нелинейная связь между напряжениями и деформациями воспроизведена с помощью итерационного метода начальных напряжений и комплекса условий, характеризующих изменение свойств пород по мере увеличения предельных деформаций и соотношения главных напряжений.

6. Определение смещений пород вокруг выработки, расчетной нагрузки и параметров крепи. При этом несоответствие расчетных перемещений фактическим устраняется путем получения в характерных направлениях корреляционных зависимостей между относительными деформациями разупрочнения ε_p и коэффициентом трещинной пустотности пород. По мере накопления статистических данных в ходе наблюдения связь между ука-

занными величинами уточняется. В интервалах между замерами полученные зависимости используются для прогнозирования по результатам моделирования коэффициента трещинной пустотности $k_{тр}$ во всей области массива, затронутой деформационными процессами. Путем интегрирования коэффициента $k_{тр}$ по глубине ЗНД определяются суммарные раскрытия трещин по нескольким характерным радиальным направлениям, численно равные перемещениям точек контура, и строится новое положение породного обнажения, являющееся результатом деформирования пород.

Предлагаемая методика двухэтапного прогнозирования проявлений горного давления использована при проведении воздухоподающего уклона пласта l_1 шахты им. XIX съезда КПСС ГП «Луганскуголь», а также 9-го западного конвейерного бремсберга пласта l_6^H шахты «Машинская» ш/у «Луганское». Применение разработанной методики позволило определить рациональные параметры установки крепи в этих выработках и обеспечить их безремонтное поддержание.

Таким образом, использование методики двухэтапного прогнозирования проявлений горного давления, использующей сочетание численного математического моделирования и результатов шахтных измерений, позволяет получать гибкое решение в зависимости от фактических условий проведения выработки, осуществлять выбор адекватных способов обеспечения устойчивости породного обнажения, уточнять априорно заданные исходные параметры состояния породного массива и его свойства. По сравнению с отраслевой методикой [5] такое моделирование позволяет воспроизвести присущие только данной выработке геомеханические процессы образования зоны разрушения пород в окрестности выработки с одновременным выполнением трех условий, гарантирующих адекватность моделирования: пространственное рассмотрение процесса перераспределения поля напряжений в зоне влияния забоя выработки; отражение реальной структуры породного массива с описанием его свойств по полной диаграмме деформирования пород для каждого элемента; максимально достоверное воспроизведение закономерностей образования зоны разрушения пород с учетом технологии горнопроходческих работ и воздействия крепи.

Библиографический список

1. Ардашев К.А. Геомеханические основы рационального проектирования и строительства капитальных выработок / К.А. Ардашев // *Шахтное строительство*. – 1978. – № 1. – С. 9-13.
2. Литвинский Г.Г. Область применения замкнутых конструкций крепи капитальных выработок / Г.Г. Литвинский, Г.В. Бабиюк // *Шахтное строительство*. – 1980. – № 9. – С. 13-16.

3. Литвинский Г.Г. Двухстадийное проектирование проведения выработок в условиях пучащих пород / Г.Г. Литвинский, Г.В. Бабиюк, Б.Н. Даниленко // *Шахтное строительство*. – 1983. – № 2. – С. 16-20.

4. Бабиюк Г.В. Системное обоснование и разработка адаптивных способов обеспечения надежности горных выработок: дис. докт. техн. наук : 05.15.04 : защ. 04.03.05 : утв. 08.06.05 / Бабиюк Геннадий Васильевич; Национальный горный университет. – Днепропетровск, 2005. – 522 с.

5. СОУ 10.1.00185790.011:2007. Підготовчі виробки на пологих пластах. Вибір кріплення, способів і засобів охорони. – К. : Вид-во Мінвуглепром України, 2007. – 118 с.

6. СНиП II94-80. Подземные горные выработки. Нормы проектирования. М. : Стройиздат, 1980. – 39 с.

7. Бабиюк Г.В. Моделирование деформационных процессов вокруг проводимой выработки при активном воздействии на породный массив / Г.В. Бабиюк, М.А. Диденко // *Сб. научн. трудов «Разработка рудных месторождений»*. – Кривой Рог: КТУ, 2005. – № 89. – С. 108-112.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Борзыхом А.Ф.

*д.т.н. Кипко Э.Я.,
к.т.н. Кипко А.Э.
(ВНУ им В. Даля, г. Антрацит, Украина)*

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТАМПОНИРОВАНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ ГЛИНОЦЕМЕНТНЫМИ РАСТВОРАМИ

Виконано аналіз структури та обводненості зон тектонічних порушень Східного Донбасу, наведені об'єкти впровадження технології тампонажу та показана їх ефективність при будівництві виробок.

Ключові слова: *тектонічні порушення, водоприток, гірнича виробка, тампонаж, ефективність.*

Выполнен анализ структуры и обводненности зон тектонических нарушений Восточного Донбасса, приведены объекты внедрения технологии тампонажа и показана их эффективность при строительстве выработок.

Ключевые слова: *тектонические нарушения, водоприток, горная выработка, тампонаж, эффективность.*

Постановка проблемы. В современных условиях эксплуатации шахт повышение добычи антрацитов в центральной части Главной синклинали Донбасса связаны с освоением глубоких горизонтов (до 1 км и более) и вовлечением в эксплуатацию резервных участков, отделенных от шахтных полей, крупными и средними разрывами. Зоны субмеридиональных разрывных нарушений типа сбросов играют большую роль в обводнении шахт центральной части Главной синклинали, тяготеющей к зоне Ровенецкого поперечного поднятия. По данным шахтных геологических служб, из 380 задокументированных случаев пересечения сбросов выработками на глубине до 1 км в районе зарегистрировано 278 прорывов подземных вод с дебитами до 2 тыс. м³/ч, что обычно приводило к аварийным ситуациям и к длительной остановке забоев [1].

Анализ гидрогеологических данных показал, что для шахт ГП «Антрацит» и ГП «Ровенькиантрацит» основной водоприток (до 50%) поступает из зон тектонических нарушений. Боково-Хрустальский и Должанско-Ровенецкий углепромышленные районы имеют обильную раздробленность зонами разрывных нарушений (сбросы Яковлевский, Ло-

бовский-западный, Ровеньковский, Кленовый, Дарьевский и система Валентиновских сбросов) (рисунок 1) [2, 3].

Цель работы – анализ эффективности тампонирования зон тектонических нарушений глиноцементными растворами.

Изложение основного материала. В пространственном положении сбросы имеют субмеридиональное простирание, западное и восточное падение под углами $70 - 87^{\circ}$. Как правило, сбросы имеют сложное строение, представлены несколькими сместителями, образуя в ряде случаев грабеновые структуры. Сместители открытого типа или частично заполнены раздробленным и перемятым материалом. В строении сбросов участвуют генетически связанные с ними зоны дробления и интенсивной трещиноватости, основная система которой ориентирована параллельно сместителям, чем обусловлена весьма высокая трещинная и фильтрационная анизотропия пород в зоне разрыва. Характерно, что в зонах сбросов, в отличие от спокойных не нарушенных участков шахтных полей, открытые трещины наблюдаются во всех литологических типах пород.

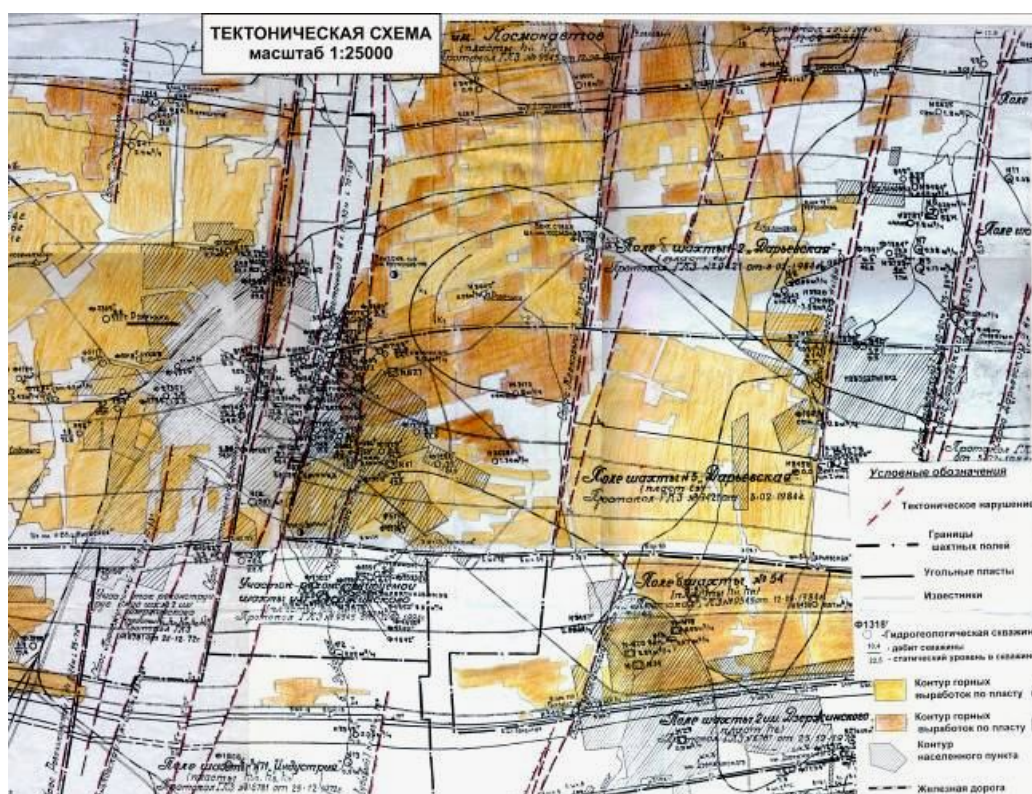


Рисунок 1 - Схема расположения зон тектонических нарушений в Должано-Ровенецком углепромышленном районе

Амплитуды разрывов и мощности, связанных с ними зон дробления закономерно возрастают в направлении оси синклинали и на глубину. На крыльях синклинали разрывы затухают, переходя в зоны трещиноватости и далее полностью выклиниваясь.

Установлено, что зоны разрывных нарушений не рассматриваемой площади в основном обладают весьма высокими фильтрационно-емкостными свойствами, сохраняющимися на глубине до 1 км и более. По таким зонам осуществляется гидравлическая связь водоносных горизонтов в толще карбона. Даже разрывы с амплитудами смещения 10-15 м мощностью зон трещиноватости 20-40 м на большой глубине дают прорыв воды с дебитом 100 м³/ч и более, что приводит к серьезным авариям и осложнениям в работе шахт.

Безусловно, в качестве основных мероприятий по предупреждению водопритокков и прорывов подземных вод в горные выработки является их гидроизоляция путем постановки гидроизолирующих завес с поверхности земли или из забоя. Такие работы по комплексному методу тампонажа успешно выполнены при пересечении зон разрывов с прогнозными водопритокками до 300 м³/ч на шахтах им. «50-летия Советской Украины», «Комсомольская», «Киевская» и др. Результаты водоподавления в зонах тектонических нарушений приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Объекты промышленного внедрения тампонажа зон тектонических нарушений

№	Шахта, производственное предприятие	Объект	Интервал тампонажа, м	Ожидаемый водоприток, м ³ /ч	Остаточный водоприток, м ³ /ч
1	2	3	4	5	6
1	«Комсомольская» ГП «Антрацит»	Вент. квершлаг №1, гор. 690 м	367-615	1060	4,5
2	«Комсомольская» ГП «Антрацит»	Вент. квершлаг №2, гор. 690 м	405-638	1304	4,6
3	«Комсомольская» ГП «Антрацит»	Конвейерный квершлаг гор. 690 м	206-387	180	0,5
4	«Комсомольская» ГП «Антрацит»	Откаточный квершлаг гор. 960 м	194-375	156	0,5

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6
5	«Комсомольская» ГП «Антрацит»	Людской ходок с гор. 690 м на гор. 880 м	50-150	230	1,0
6	Им. 50-летия Советской Украины	Наклонный ствол №3	68-128	60	0
7	Им. 50-летия Советской Украины	Откат штрек №6	1100-1530	200	1,5
8	«Киевская» ГП «Ровенькиантрацит»	Откат штрек №28	195-295	180	0,8
9	«Киевская» ГП «Ровенькиантрацит»	Бремсберг №30	215-345	70	0
10	«Прогресс» ГП «Торезантрацит»	11 восточный бортовой ходок	1530-1790	120	1,5

В последние годы реструктуризация угольной отрасли и, прежде всего, закрытие целого ряда шахт региона способом мокрой консервации способствовало значительному изменению гидрогеологической ситуации, чем в определенной степени обусловлено перераспределение водопритоков в горные выработки, особенно по зонам разрывов. Так, существенное увеличение установившихся водопритоков по зонам разрывов, вскрытых подготовительными выработками, связанное с закрытием и затоплением шахты им. газеты «Луганская Правда», зафиксировано на шахте «Комсомольская» (до 300³/ч) из зоны сбросов Щетовских и на шахте им. Вахрушева (100 – 200 м³/ч) из зоны сброса № 1. Существенное увеличение водопритока (на 150 – 300 м³/ч) в шахту «Фашевская № 5» связано с закрытием и затоплением шахты «Запорожская».

О социально-экономической эффективности тампонирования зон разломов говорит то, что к принципиально новым экологическим аспектам техногенно-природного подтопления шахтерских городов и поселков Луганской области следует добавить проявление гидрогеомеханических ударов (локальные техногенные землетрясения мощностью до 4-5 баллов в г. Стаханов, г. Ровеньки) и потоков взрывоопасных газов в направлении действующих шахт и водозаборов.

Следует также отметить, что в процессе ликвидации шахт с полным затоплением выработанного пространства происходит активизация

геомеханических процессов в тектонических зонах за счет гидродинамического воздействия. В этих условиях происходят фильтрационные процессы, обуславливающие структурную перестройку блоков горных пород, изменение трещиноватости и прочностных свойств. В подобных условиях накапливается энергия, которая при освобождении может проявиться в опасных сдвигениях массива пород (землетрясения и провалы). Поэтому применение методов тампонажных горных пород в этих условиях весьма необходимо.

Выводы

Таким образом, основные водопритоки в шахты центральной части Главной синклинали Донбасса связаны с зонами разрывов. Существенное снижение водопритоков и обеспечение благоприятных условий проведения выработок, а также стабилизация поверхности может быть достигнуто путем предварительной водоизоляции этих зон по комплексному методу тампонажа. Методика проектирования параметров и технология водоизоляции зон разрывов успешно апробирована в рассматриваемом районе и применена в других.

Библиографический список

1. Смородин Г.М. Разрывные нарушения в пределах Ровенецкого поднятия в Донбассе / Г.М. Смородин // Уголь Украины. – 1984. - №4. – С. 38-39.
2. Должиков П.Н. Проблемы горного дела и экологии горного производства. Монография / П.Н. Должиков, В.А. Рябичев, Г.С. Левчинский [и др.]. – Донецк: Вебер, 2007. – 257 с.
3. Смородин Г.М. Тектонические нарушения – один из факторов гидроактивизации геомеханических процессов в природных массивах / Г.М. Смородин, А.Э. Кипко, Ю.И. Кобзарь [и др.] // Науковий вісник НГУ. – 2008. - №12. – С.19-23.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

д.т.н. Чернай А.В.
(НГУ, Днепропетровск),
к.т.н. Налисько Н.Н., Лукашенко Е.Н.
(Горный факультет УИПА, г. Стаханов, Украина)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВА ЗАРЯДА ВВ ВБЛИЗИ ОТКРЫТОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Наведено результати чисельного моделювання дії заряду ВВ поблизу поверхні масиву порід. За результатами рішення тестових завдань установлена можливість проведення чисельного експерименту.

Ключові слова: *метод великих часток, рівняння стану, масив гірських порід, ударна хвиля, швидкість поширення.*

Приведены результаты численного моделирования действия заряда ВВ вблизи поверхности массива пород. По результатам решения тестовых задач установлена возможность проведения численного эксперимента.

Ключевые слова: *метод крупных частиц, уравнение состояния, массив горных пород, ударная волна, скорость распространения.*

Горная наука в своем развитии постоянно опирается на достижения фундаментальных наук: физики, химии, теории упругости, сопротивления материалов и др. Решению прикладных задач горного дела во многом оказывал содействие физико-математические науки и частности математическое моделирование производственных процессов.

В настоящее время в угольной промышленности достаточно широко используются накладные и открытые заряды взрывчатых веществ (ВВ). Детальное исследование процессов разрушения и взрыва в этих условиях вызывают практический интерес для повышения эффективности и безопасности работ.

В выполненных ранее исследованиях взрывного разрушения массивов пород были установлены наиболее общие законы геомеханики взрыва внутренних зарядов [1], а также найдены решения по моделированию результатов взрыва в определенных горно-геологических условиях [2, 3, 4]. Моделирование действия накладных и открытых зарядов проводилось в основном на натурных или физических моделях.

Наиболее перспективным в теоретическом исследовании является численное моделирование быстропротекающих процессов. На горном

факультете УИПА совместно с НГУ для этих целей был использован модифицированный метод крупных частиц (метод Давыдова) [3, 5]. Эффективность метода граничит с проведением численного эксперимента.

Постановка задачи для расчета действия открытого заряда следующая. Необходимо рассчитать параметры ударной волны и поля напряжений в массиве от действия открытого заряда вблизи поверхности массива скальных пород (рисунок 1).

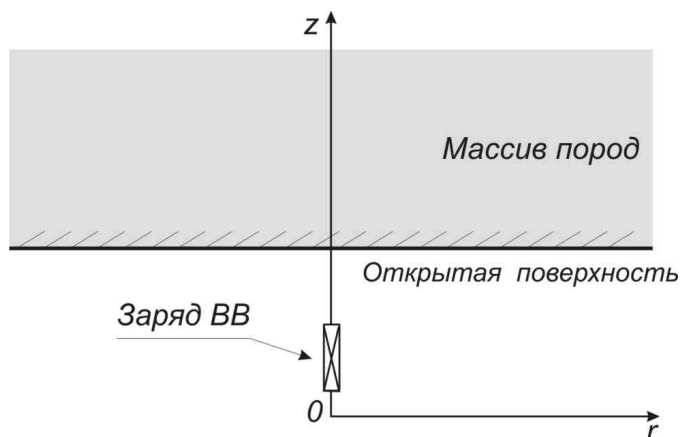


Рисунок 1 – Схема задачи

Согласно этого метода движение среды в цилиндрической системе координат описывается уравнениями Эйлера [5]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{W}) &= 0, \\ \frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial z} &= 0, \\ \frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \bar{W}) + \frac{\partial P}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{неразрывности;} \\ \text{движения;} \end{array}$$

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho E \bar{W}) + \operatorname{div}(PW) = 0, \quad \text{энергии;}$$

где ρ – плотность; P – давление; W – скорость; u, v – компоненты скорости W по оси z и r соответственно; z, r – цилиндрические координаты; $E = J + \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$ – полная энергия; J – внутренняя энергия.

Для замыкания этой системы используются уравнения состояния. Рассматриваемая задача предполагает учет в расчётной области четырёх веществ: газов - продуктов детонации (ПД) ВВ; массива горных пород, и атмосферного воздуха.

В качестве уравнения состояния продуктов детонации воспользуемся УРС для ТНТ [6], которое представим в виде двухзвенной кривой:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P}{P_*} &= \left(\frac{\rho}{\rho_*} \right)^n, \quad \text{при } P \leq P_*, \quad \rho \leq \rho_*, \quad n = 1, 3, \\ \frac{P}{P_n} &= \left(\frac{\rho}{\rho_n} \right)^n, \quad \text{при } P_* < P \leq P_n, \quad \rho_* < \rho \leq \rho_n, \quad n = 3, \end{aligned} \right\}$$

где P_n, ρ_n, P_*, ρ_* – давление и плотность в точках Чемпена–Жуге и в точке кривой разгрузки.

В качестве УРС атмосферного воздуха воспользуются уравнения состояния идеального газа [7]:

$$P = (\gamma - 1)\rho \cdot j,$$

где j – внутренняя энергия воздуха; γ – показатель политропы; ρ – плотность.

Наиболее адекватным УРС для массива является обобщенное уравнение (массив-дробленая порода), предложенное в работе [8], которое получено на основе упруго-пластической модели С.С.Григоряна [9]. Особенностью этого уравнения является то, что оно единым образом описывает поведение дробленой и сплошной части массива горной породы.

Обобщённое уравнение состояния имеет вид:

$$P = P_x(\rho) - \rho \Gamma (E - E_x(\rho)); \quad E_x(\rho) = \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{P_x(\rho)}{\rho^2} d\rho,$$

где $P_x(\rho) = \frac{k}{n} \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right)$. Здесь k и n – константы, $k = 36$ ГПа, $n =$

3; Γ – коэффициент Грюнайзена, $\Gamma = 1$; $y = \frac{\rho}{\rho_0}$, где ρ_0, ρ – соответственно,

начальная и текущая плотность массива.

В статье представлены результаты моделирования тестовой задачи по схеме на рисунке 1. Геометрические размеры расчетной области следующие. Заряд находится на расстоянии 0,1 м от массива (до торца). Длина заряда 0,1 м, диаметр 0,04 м. Характеристики среды: давление детонации $P_{\text{детон.}} = 1,2$ ГПа, удельная энергия заряда $E = 5,45$ МДж/кг, плотность ВВ $\rho = 1100$ кг/м³, масса – 0,25 кг, плотность воздуха $\rho = 1,0$ кг/м³. Численное моделирование тестовой задачи проводилось для массива пород с коэффициентом крепости по шкале проф. Протодяконова $f > 12$, что соответствует породам с большой акустической жесткостью. Прочностные свойства породы учтены следующими характери-

стиками: предел прочности на одноосное сжатие $[\sigma_{сж}]$, растяжение $[\sigma_p]$, сдвиг $[\tau_s]$, сцепление $[Y_0]$, коэффициент внутреннего трения $\mu_{тр}$, коэффициент Пуассона μ , Модуль Юнга E , плотность ρ (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристика породного массива

Обозначение	Единицы	Величина	Обозначение	Единицы	Величина
$[\sigma_{сж}]$	ГПа	18	$[Y_0]$	ГПа	0,2
$[\sigma_p]$	ГПа	0,18	μ	–	0,35
$[\tau_s]$	ГПа	1,8	E	ГПа	50
$\mu_{тр}$	–	0,4	ρ	кг/м ³	2500

Тестовая задача сводилась к определению скорости ударной волны в воздухе от взрыва заряда и некоторых других характеристик процесса распространения ударной волны и сравнения их с известными экспериментальными данными. Детонация заряда считается мгновенной. Плотность воздуха варьировалась от 0,25 до 10 кг/м³. Для проведения численного эксперимента разработана компьютерная программа для визуализации процесса распространения ударной волны в среде.

В результате численного эксперимента были получены следующие результаты (рисунок 2). При плотности воздуха $\rho = 1$ кг/м³ скорость ударной волны составила $V_{уд} = 2000$ м/с (рисунок 2, график а), что соответствует известным экспериментальным данным. Скорость ударной волны определена по времени прихода ударной волны к массиву (50 мс) и пройденному пути 0,1 м:

$$v_{уд} = \frac{l}{t} = \frac{1 \cdot 10^{-1}}{50 \cdot 10^{-6}} = 2000 \text{ м/с}.$$

Для детального тестирования модели плотность воздуха задавалась выше и ниже реального значения: 10 кг/м³ (рисунок 2, график б) и 0,25 кг/м³ (рисунок 2, график в). В обоих случаях отмечалось адекватное реагирование модели, а именно, в первом случае скорость ударной волны снизилась до 1200 м/с, фронт ударной волны формировался лишь на 30 мс. Во втором случае скорость ударной волны возрастала до 3000 м/с, при этом ударная волна на фронте распространения продуктов детонации была слабо выражена. Более четко обозначилось формирование ударной волны внутри газового облака продуктов детонации, где плотность газов значительно выше плотности воздуха. Здесь ударная волна сформировалась за счет «подпираания» внутреннего газового ядра с большей энергией, периферических газов облака продуктов детонации.

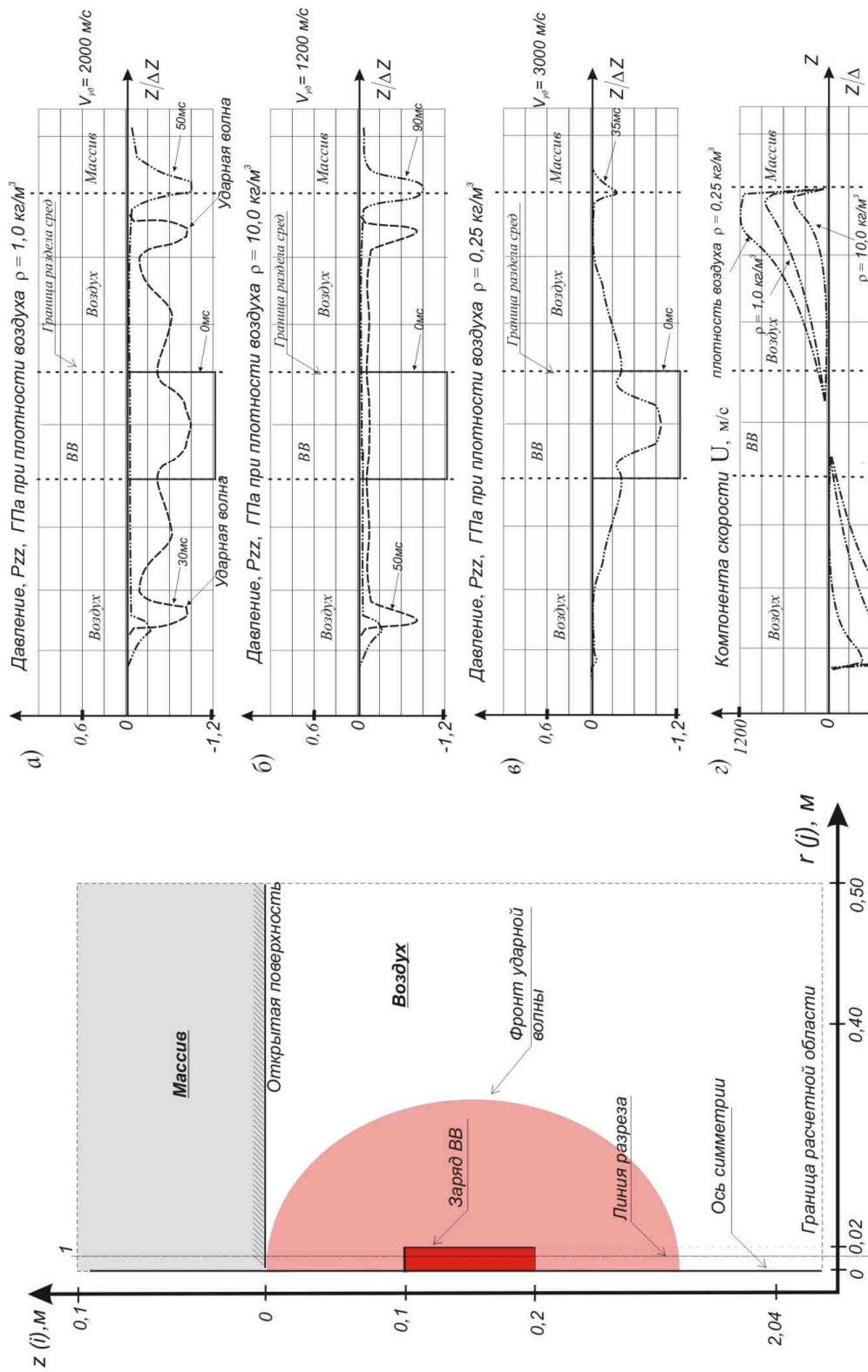


Рисунок 2 - Тестовая задача взрыв заряда ВВ вблизи открытой поверхности

Выводы

Полученный алгоритм численного счета модифицированным методом «крупных» частиц можно использовать для нахождения закономерностей действия открытого заряда вблизи открытой поверхности в необходимых условиях ведения взрывных работ.

Библиографический список

1. Литвинский Г.Г. *К основам теории геомеханики подземного взрыва* // Проблемы горного дела и экологии: сб. науч. тр. - Донецк: Вебер, 2007.

2. Ефремов Э.И. *Прогнозирование дробления горных массивов взрывом* / Э.И. Ефремов, В.Д. Петренко, А.И. Пастухов. – К.: Наукова думка, 1990. – 120 с.

3. Чернай А.В. *О перспективе использования численного метода расчета - „метод крупных частиц” в задачах динамического воздействия на горный массив* / А.В. Чернай, В.В. Соболев, Н.Н. Налисько // Сб. научн. трудов Национальной горной академии Украины. №11, т.3. - Днепропетровск: НГАУ, 2001.- С.225-232.

4. Жуков В.В. *Динамическое деформирование и разрушение массива горных пород* // В.В. Жуков, В.Ф. Котенко, Ю.Г. Коротких. – Л.: Наука, 1979.– 165 с.

5. Белоцерковский О.М. *Метод крупных частиц в газовой динамике* / О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов. – М.: Наука, 1982.– 391 с.

6. Баум Ф.А. *Физика взрыва* / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович К.П.[и др.]. – М.: Наука, 1975. – 704 с.

7. Гурин А.А. *Ударные воздушные волны в горных выработках* /А.А. Гурин, П.С. Малый, С.К. Савенко. – М.: Недра, 1983.– 223 с.

8. Вовк А.А. *Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок* / А.А.Вовк. – К.: Наукова думка, 1984.– 287 с.

9. Григорян С.С. *Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород* / Григорян С.С. // Прикладная математика и механика. – 1967. – № 4(31). – С. 643 – 669.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

*д.т.н. Гайко Г.И.,
к.т.н. Иванов А.П.,
Заев В.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ ЗОЛЫ НА НАДЕЖНОСТЬ ТРУБНОГО КОЛЛЕКТОРА ПОДЗЕМНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА

Наведені результати дослідження впливу захисного шару зольного залишку, утвореного у підземному газогенераторі при підземному спалюванні (газифікації) вугільного пласта, на деформування й надійність трубного колектора або ставу, що знаходиться під тиском обрешених порід покрівлі.

Ключові слова: *підземна газифікація вугілля, підземний газогенератор, трубний колектор, зольний залишок, захисний шар.*

Приведены результаты исследования влияния защитного слоя зольного остатка, образованного в подземном газогенераторе при подземном сжигании (газификации) угольного пласта, на деформируемость и надежность трубного коллектора или става, который находится под давлением обрешенных пород кровли.

Ключевые слова: *подземная газификация угля, подземный газогенератор, трубный коллектор, зольный остаток, защитный слой.*

Одной из основных проблем технологии подземной газификации угольных пластов (ПГУ) являются значительные (до 50%) потери тепловой энергии, которая непроизводительно расходуется на разогрев вмещающих пород подземного газогенератора [1]. В ДонГТУ разработана технология извлечения тепла из зоны горения пласта, предполагающая циркуляцию жидкого теплоносителя (перегретой воды) в трубном коллекторе (ставе), размещенном в почве угольного пласта, с последующей генерацией дополнительной электроэнергии на гидропаровых турбинах [2, 3]. Поскольку основным технологическим элементом разработанного способа утилизации тепла является трубный коллектор (став), большое значение имеет его работоспособность в условиях выгоревшего пространства.

Термохимическая переработка угольного пласта приводит к процессам оседания (обрушения) пород кровли подземного газогенератора с возможностью нагружения труб, в которых циркулирует теплоноси-

тель. Исследования физикомеханических свойств зольного остатка при подземной газификации углей [4] свидетельствуют, что трубный коллектор будет находиться в слое золы толщиной (для условий Донбасса) от 90 до 270 мм и более (при мощности пласта 1 м), причем объем зольного остатка будет возрастать пропорционально увеличению мощности угольного пласта. Поскольку зола может выполнять роль защитного слоя, перераспределяющего и снижающего нагрузку от обрушенных пород кровли, то целесообразно оценить роль зольного остатка как своеобразного буфера, изменяющего давление пород на трубные ставы.

Таким образом, целью эксперимента являлось установление влияния толщины защитного слоя золы, образуемой при сжигании (газификации) угольного пласта в подземном газогенераторе, на деформируемость и надежность работы трубного коллектора.

Для проведения эксперимента был разработан испытательный стенд (рисунок 1), представляющий собой испытательную емкость, изготовленную из отрезка электросварной прямошовной трубы (длиной $L_{тр} = 300$ мм) круглого сечения (диаметром $D_{тр} = 530$ мм) с толщиной стенки $b_{тр} = 10$ мм. К торцу трубы было приварено основание в виде стальной плиты с размерами 600×600 мм и толщиной $b_{п} = 15$ мм, причем по периметру конструкция была усилена ребрами жесткости.

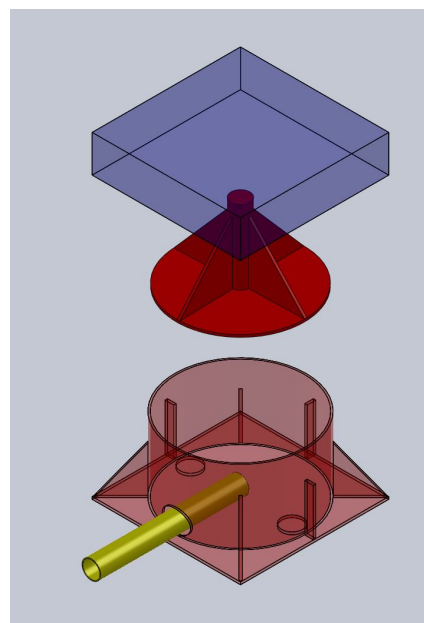


Рисунок 1 – Конструкция испытательного стенда (общий вид)

Трубный став был представлен отрезком стальной трубы длиной 510 мм, диаметром 76 мм с толщиной стенки 3,5 мм (натуральные раз-

меры для одного из технологических вариантов). Для размещения трубного става испытательная емкость была оснащена двумя технологическими отверстиями, в которые входил испытуемый отрезок трубы. Технологические отверстия позволяли вывести провода измерительной аппаратуры, размещенной в испытуемой трубе (рисунок 2). Зазор между трубой и стенкой испытательной емкости изолировался накладкой. Испытательная емкость, оснащенная трубным ставом, заполнялась слоем золы (рисунок 3), который представлял собой натуральный зольный остаток, полученный при сжигании угля. Для снижения влажности золу предварительно прокаливали в муфельной печи.



Рисунок 2 – Вид технологического отверстия с отрезком трубы и измерительной аппаратурой



Рисунок 3 – Испытательная емкость, заполненная золой

На слой золы помещали штамп, диаметр которого соответствовал внутреннему диаметру испытательной емкости. Конструкция штампа представляла собой стальную плиту толщиной $b_{\text{п}} = 15$ мм с наваренным пуансоном, усиленным ребрами жесткости. Оголовок пуансона был снабжен накладкой воспринимающей нагрузку от штока испытательного пресса ИПС- 500.

Методика испытаний заключалась в следующем. Исследовались напряженное состояние и деформации трубного става в зависимости от величины смещений (сжатия) слоя золы под нагрузкой (аналог давления осевших или обрушенных пород кровли). Для измерения напряженного

состояния металла каждый испытуемый отрезок става оснащался четырьмя тензодатчиками, которые размещали на поверхности трубы попарно на центральных осях. Для фиксации деформаций сжатия трубного става (по вертикальной оси) внутри трубы размещались индикаторные кольца с тензорезисторами сопротивления, показания которых регистрировали прибором СИИТ-3. Показания фиксировали как при нагружении, так и при сбросе нагрузки. Все датчики были предварительно оттарированы на ожидаемые нагрузки. Смещение (сжатие) слоя золы под действием давления на штамп измеряли прогибомером 6ПАО, который взаимодействовал посредством проволоочной связи с закрепленным на штампе рычагом. Давление от штока пресса ИПС-500 передавалось на оголовок штампа и фиксировалось на шкале пресса, а также на промежуточном динамометре ДС – 5. После проведения испытания и высвобождения отрезка трубы штангенциркулем измерялась величина изменения диаметра трубы на участке запредельного прогиба, что с учетом информации о соответствующем давлении позволило дополнительно характеризовать варианты нагружения.

Для анализа влияния толщины зольного слоя на напряженно-деформируемое состояние трубы сравнивались показания при трех вариантах заполнения испытательной емкости золой:

- первый уровень – 90 мм (превышение слоя золы над трубой составляло 14 мм);
- второй уровень – 150 мм (превышение – 74 мм);
- третий уровень – 225 мм (превышение – 149 мм).

Принятые толщины защитного слоя золы обусловлены наиболее характерными средними значениями зольности угольных пластов Донбасса, которые были сгруппированы по трем принятым категориям. Толщина засыпки контролировалась щупом и измерительной линейкой. При каждом испытании использовался новый отрезок трубы, и производилось заполнение испытательной емкости золой.

В процессе нагружения фиксировалось давление пресса на штамп, смещение штампа под нагрузкой (сжатие золы), показания датчиков на поверхности и внутри трубы. Полученные данные в последствии обрабатывались с помощью программы Microsoft Office Excel и наносились на соответствующие графики. Для выявления величины деформаций сжатия, замеренные показания сопротивления датчиков были перерасчитаны в линейные размеры прогиба трубы [5].

Основные обобщенные результаты экспериментов приведены на рисунках 4, 5. На рисунке 4 показаны графики смещений (сжатия) различных слоев золы под нарастающим давлением пресса. Как и следовало ожидать, чем больше толщина зольного слоя, тем большую усадку (смещение) он испытывает под давлением, оказывая при этом возрас-

тающее защитное воздействие на трубу (за счет перераспределения нагрузки на уплотнение и трение частиц золы). Как видно из графиков, при давлении 0,2 МПа (нагрузка прессы на штамп около 5 т) смещения слоя толщиной 90 мм составили 9 мм, при 150 мм – 17 мм, при 225 мм – 28 мм. Таким образом, увеличение толщины зольного слоя в 1,7 раза ведет к росту смещений в 1,9 раза, а при увеличении толщины в 2,5 раза – смещения возрастают в 3,1 раза. При увеличении нагрузок до 0,5 МПа и более (график не приведен) эта пропорция в значительной степени сохранялась, не смотря на резкое замедление роста смещений. Следует отметить ту любопытную особенность, что степень усадки слоя золы не была прямо пропорциональна повышению толщины слоя, а оказалась в 1,12 – 1,24 раза выше (на уровне давлений порядка 0,2 МПа), что еще более усиливает защитные свойства зольного остатка.

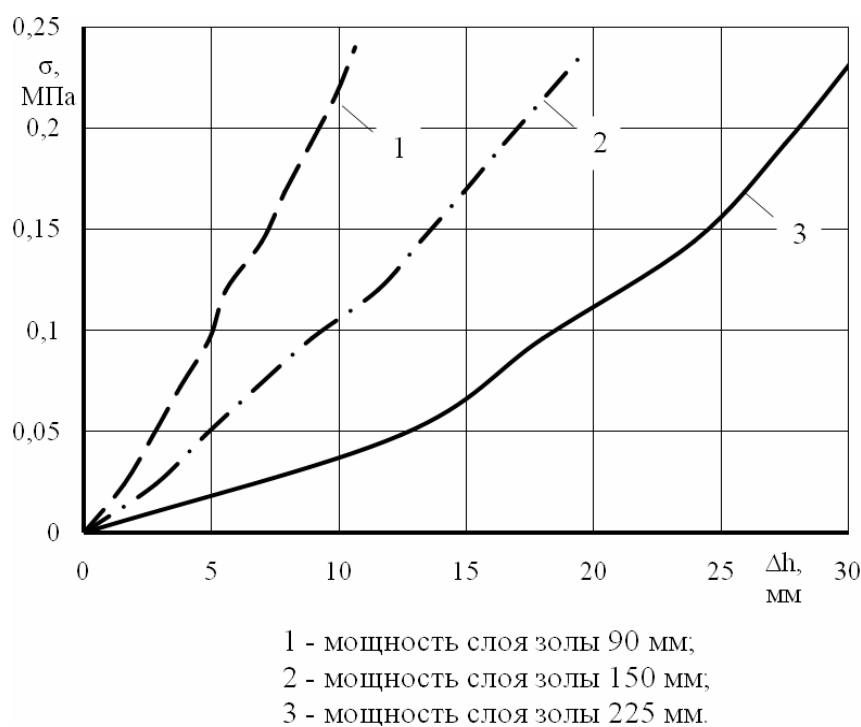


Рисунок 4 – Уплотнение (сжатие) зольных слоев при нагружении штампа прессом

На рисунке 5 показаны графики деформаций (прогибов) отрезков трубного става в зависимости от нагружения при различной толщине защитного слоя золы. Как видно из графиков, упругая стадия работы металла трубы наблюдается при деформациях 0,7 – 1 мм, после чего металл переходит в упруго-пластическую стадию работы. Об этом свидетельствуют специально проведенные эксперименты с разгрузкой металла трубы при прогибах стенки 1 – 2 мм, при которых деформации воз-

врата лишь частично восстанавливали первоначальный диаметр трубы. Поэтому для сравнительного анализа графиков была принята величина прогиба 0,8 мм, как граница упругой зоны работы.

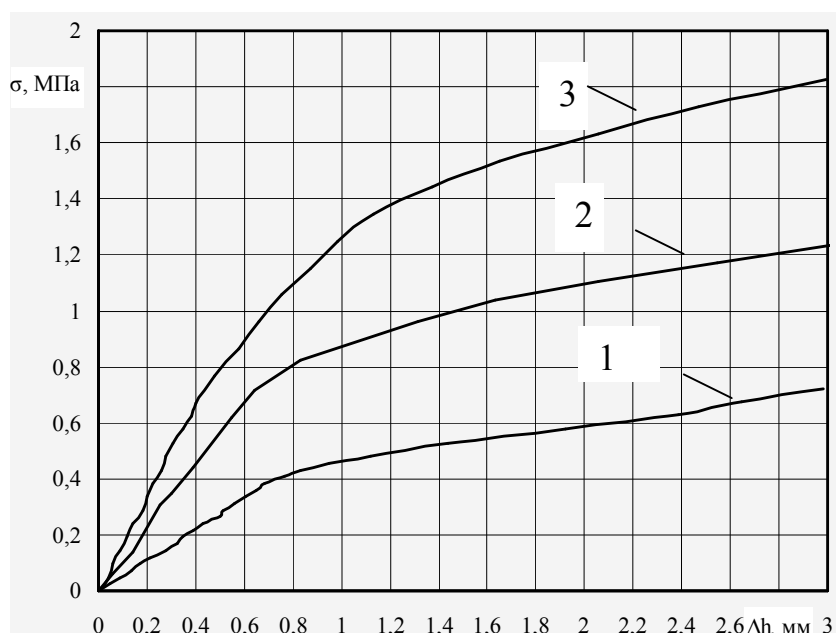


Рисунок 5 – Прогибы трубного става при нагружении штампа прессом:
1 – толщина зольного слоя 90 мм; 2 – 150 мм; 3 – 225 мм.

Анализ графиков позволяет заключить, что несущая способность отрезка трубного става существенно возрастает с увеличением защитного слоя золы. Так при его толщине 90 мм (кривая 1) потеря упругости трубы наблюдается при давлении около 0,41 МПа, при этом смещения золы оказались в пределах 12 мм, т.е. штамп не вошел в непосредственный контакт с трубой. При толщине защитного слоя 150 мм (кривая 2) предельное давление в упругой стадии составило около 0,80 МПа, а при толщине 225 мм (кривая 3) – 1,1 МПа. Таким образом, увеличение толщины зольного слоя с 90 до 150 мм позволило трубе воспринять почти двукратное увеличение нагрузки, а изменение толщины от 90 до 225 мм позволило увеличить несущую способность трубы в 2,7 раза. Примечательно, что и в упруго-пластической стадии примерно сохраняются те же соотношения.

Показания, которые были сняты с тензодатчиков, размещенных на поверхности испытуемых отрезков труб, показали следующее. Часть датчиков в процессе нагружений вышла из строя, при этом максимальный уровень допустимого давления на штамп не превысил 0,23 МПа. Непосредственное касание поверхности датчиков с зольными фракциями различных размеров и их смещения в ходе проведения эксперимен-

тов приводили к неоднозначным изменениям регистрируемых значений. Наиболее стабильные показатели давали лишь верхние датчики, размещенные на вертикальной оси. Усредненные значения действующих в поверхностных слоях металла (в вершине свода трубы) сжимающих напряжений при давлении на штамп 0,23 МПа выглядят следующим образом: при толщине зольного слоя 90 мм – значение напряжений (в условных единицах) составило 96, при толщине 150 мм – 64, при толщине 225 мм – 50. Таким образом, прослеживается закономерность снижения напряженного состояния металла при увеличении толщины защитного слоя золы, однако в количественном отношении полученный эффект несколько ниже (приблизительно на 30%), чем в случае фиксации деформаций (прогибов) трубы.

Следует отметить, что достигнутые при проведении экспериментов максимальные давления штампа сопоставимы (а при толщине слоя 225 мм даже превышают) фактические величины возможного давления на трубный коллектор осевших пород кровли подземного газогенератора. Это свидетельствует о том, что образованный в процессе выгорания пласта слой золы способен надежно защитить трубные ставы при обрушении (оседании) пород кровли и исключает возможность разрушения труб.

Библиографический список

1. *Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля: монография.* / Под общ. ред. О.В. Колоколова. – Днепропетровск: НГА Украины, 2000. – 281 с.

2. Гайко Г.И. Концепция шахты-электростанции, предполагающей подземное сжигание угольных пластов / Г.И. Гайко, В.А. Касьянов, С.М. Семикин // *Уголь Украины.* – 2006. – №7. – С. 3 – 5.

3. Гайко Г.І. Новий спосіб отримання електроенергії при підземній газифікації (спаленні) вугільних пластів / Г.І. Гайко, В.В. Заєв // *Донецький вісник НТШ.* Т. 29. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2010. – С. 64 – 67.

4. Турчанинов И.А. О некоторых физико-механических свойствах зольного остатка при подземной газификации углей // *Подземная газификация углей.* – М.: Углетехиздат, 1956. – С. 55 – 58.

5. Касаткин Б.С. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, В.А. Пивторак – Київ: Наукова думка, 1981. – 375с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

*к.т.н. Шубин А.А.
(Шахтинский институт ЮРГТУ (НПИ), Россия)*

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ЗАКЛАДКИ

У статті виконано аналіз міцностних та фільтраційних властивостей піщаних та піщано-цементних гідрозакладних суспензій при різних в них концентраціях твердої фази; показано, що при частці цементу в розчині $1/8 \div 1/6$ міцність закладного масиву складає 1,7 – 2,7 МПа.

Ключові слова: закладка, пісок, цемент, порода, властивості закладки.

В статье выполнен анализ прочностных и фильтрационных свойств песчаных и песчано-цементных гидрозакладочных суспензий при различной в них концентрации твердой фазы; показано, что при доле цемента в растворе $1/8 \div 1/6$ прочность закладочного массива составляет 1,7 – 2,7 МПа.

Ключевые слова: закладка, песок, цемент, порода, свойства закладки.

В настоящее время для закладки выработанного пространства применяются разнообразные природные и искусственные материалы, используемые либо в чистом виде, либо в смеси (закладочная шихта). Пригодность различных материалов для создания плотного закладочного массива определяется не только их физико-механическими свойствами, но и способом закладки, при котором данный материал используется [1].

Как и при любом способе закладки, гидрозакладочный материал должен отвечать двум основным требованиям:

- образовывать плотный массив после укладки в выработанное пространство, давая при этом минимальную усадку;
- содержать строго ограниченное количество горючих компонентов для предотвращения возникновения пожаров в выработанном пространстве.

Кроме того, материал должен удовлетворять ряду специфических требований, обусловленных особенностями его транспортирования по трубам и процесса заполнения выработанного пространства:

- при смешивании с водой образовывать пульпу, свободно протекающую по пульпопроводу при минимальном расходе воды;
- обладать малой абразивностью, хорошей водоотдачей и фильтрационной способностью, не содержать растворимых в воде солей;
- иметь минимальное содержание тонких частиц, которые могут выноситься с отработанной водой.

Обычно при гидрозакладке применяются в чистом виде либо в смеси дробленая порода, добываемая в специальных карьерах, отходы обогащения, порода из отвалов на поверхности, песок, глиняные брикеты, зола котельных, металлургические шлаки и пр. [2].

Наиболее подходящим материалом для гидрозакладки является песок, что и определяет широкие масштабы его применения для этой цели.

Основной частью песка являются зерна кварца, содержание которых обычно составляет 70 – 80 %. Наиболее крупные и наиболее мелкие зерна – почти исключительно кварцевые, причем с уменьшением их диаметра возрастает число зерен острогранной формы (зерна диаметром менее 0,1 мм в большинстве своем имеют острые грани). Наличие мелких острогранных зерен нежелательно, так как приводит к быстрому износу труб.

Одной из постоянных проблем гидрозакладки является вязкость пульпы, так как она оказывает большое влияние на износ пульпопроводов. Установлена линейная пропорциональная зависимость вязкости при определенных значениях густоты пульпы – 26 % по объему, или 49 % по весу. При большей густоте пульпы ее вязкость увеличивается значительно быстрее. Влияние вязкости на износ пульпопроводов при густоте 60 – 70 % и более в настоящее время еще недостаточно изучено. Изменение вязкости наблюдается при снижении средней, крупности зерен пульпы. Например, для кремнистого материала при уменьшении крупности зерен до 0,02 мм и ниже вязкость пульпы резко падает.

Цель работы – выполнить анализ грансостава, фильтрационных и прочностных свойств закладочного материала различных составов.

Качество пульпы для гидрозакладки зависит от скорости падения частиц в водной среде. Быстро оседающим в воде материалом являются зерна песка крупностью более 0,5 мм. Для зерен песка средней крупности (0,5 – 2 мм) тенденции к расслоению на классы по крупности не наблюдается. Зерна крупностью 0,2 – 0,5 мм образуют верхний слой быстро оседающего закладочного материала. После осаждения зерен крупностью более 0,2 мм часть материала, находящегося в воде во взвешенном состоянии, остается в выработанном пространстве при фильтрации отработанной воды через закладочный массив. Если же отработанная вода уходит с поверхности закладочного массива, то большая часть

мелкого материала уносится вместе с ней и осаждается в водосборниках. Материал крупностью менее 0,1 мм осаждается в выработанном пространстве в ничтожном количестве, зависящем от технологии закладочных работ, и применение его считается нежелательным, так как он почти весь выносится с отработанной водой.

В связи с этим песок, применяемый для гидрозакладки в Украине и России, можно классифицировать на три категории. Гранулометрический состав песка, величина усадки закладочного материала (подвергаемого испытаниям при давлении 15 МПа) и коэффициент фильтрации песка должны соответствовать данным, приведенным в таблице 1. Содержание растительных частиц, как, например, корней, дерна и др., не должно превышать 0,5% по объему [2].

Таблица 2 - Классификация песка используемого для гидрозакладки

Категория песка	Размер фракции, мм	Содержание фракций, %	Максимальная усадка, %	Минимальный коэффициент фильтрации, см/сек
I	<0,1 0,1–0,2	10 90	5	0,07
II	<0,1 0,1–0,2	20 80	10	0,002
III	<0,1 0,1–0,2	30 70	15	0,0004

Скорость осушения поверхности закладочного массива обуславливается, прежде всего, скоростью фильтрации. Исследованиями, установлено, что:

- на скорость фильтрации значительное влияние оказывает зернистость закладочного материала (размеры зерен и их соотношение);
- зерна кварца размером от 0,044 до 0,053 мм обуславливают практически нулевую фильтрацию;
- при одинаковой зернистости пульпы кварцевые породы обладают лучшей фильтрационной способностью, чем остальные породы;
- наличие в пульпе воздуха резко снижает скорость фильтрации.

Обычно при гидрозакладке применяются материалы, состоящие из зерен меньше 0,0074 мм (от 5 до 70 %), скорость фильтрации которых достигает 10 см/ч (0,0028 см/сек и более), что является критическим. При дальнейшем увеличении содержания зерен такой крупности скорость фильтрации резко уменьшается. Наибольшая скорость фильтрации наблюдается при содержании в пульпе 50 – 70 % твердых частиц.

Закладочный материал, представленный однородными по петрографическому составу породами, шлаками и пр., как правило, образует

закладочный массив, менее плотный и дающий большую усадку, чем песок. Поэтому песок и считается наиболее подходящим материалом для гидрозакладки.

Отсутствие песка в ряде мест и стремление использовать отходы производства вынуждают применять для закладки шахтные породы, отходы обогащения и пр. При этом одним из существенных является вопрос содержания в них горючих компонентов. В некоторых случаях считается допустимым содержание горючих не более 10 – 15%, а иногда – до 20%.

Проведенные нами исследования показали, что усадка закладки, состоящей из пустых пород, незначительно отличается от закладки, состоящей из песка. При этом может быть сохранен характер деформаций поверхности и получен значительный экономический эффект, а также, в условиях действующих предприятий, решена проблема оставления породы в шахте или руднике. Возможность увеличения использования шахтной породы при гидравлической закладке предопределяется сочетанием таких факторов, как категория охраны объектов, горногеологические условия, глубина залегания и мощность разрабатываемых пластов.

Широкое использование для гидрозакладки отходов мокрого обогащения приводит к удешевлению и повышению эффективности закладочных работ. Однако отходы обогащения, как и любой другой закладочный материал, не обладают способностью самоупрочняться. Поэтому для упрочнения закладочного массива используются различные цементирующие добавки.

Для гидрозакладочных работ могут быть применены гидросмеси, упрочненные вяжущим, с содержанием твердого от 60 до 72 %. Прочность на сжатие массива бетонной закладки через 30 суток при соотношении песок: цемент, равном 30:1, составляет 0,12 МПа при концентрации твердого 60%; 0,23 МПа при концентрации 72%. Поэтому рекомендуется применять возможно более густые упрочненные смеси.

Основным фактором, определяющим прочность затвердевшего массива бетонной закладки, является отношение между твердым инертным материалом и цементом. Так, через 30 суток после укладки прочность на сжатие закладочного массива составляет при соотношении 20:1 около 0,4 МПа, при 8:1 около 1,7 МПа и при 6:1 около 2,7 МПа.

Большое значение имеет также гранулометрический состав закладочного материала. Отсев крупных частиц природного песка приводит к незначительному повышению прочности. В то же время отделение мельчайших фракций из отходов флотации заметно сказывается на увеличении прочности закладочного массива. Обычные способы классификации (при помощи циклона) для отделения большей части шламовых

частиц обеспечивают получение наиболее оптимального гранулометрического состава.

Опыт показал, что применение упрочненной закладки позволяет значительно (на 29 %) сократить расход леса и повысить производительность труда по выемке руды (на 20 %). Кроме того, эта закладка устраняет опасность обрушения закладочного массива, повышает устойчивость боковых пород и способствует снижению потерь полезного ископаемого.

Выводы

Из выполненного анализа следует, что для гидрозакладки выработанного пространства целесообразно применение суспензий на основе песка или отвалных пород с добавками цемента не более $1/6 \div 1/8$ доли от твердой фазы.

Библиографический список

1. *Закладочные работы в шахтах: справочник / Под ред. Д. М. Бронникова, М. Н. Цыгалова. – М.: Недра, 1989.*
2. *Кипко Э.Я. Комплексная технология ликвидации наклонных выработок закрываемых шахт // Э.Я. Кипко, П.Н. Должиков, В.Д. Рябичев. – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 220 с.*

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

*к.т.н. Левчинский Г.С.,
(МПВП «Поиск», г. Антрацит, Украина),
Палейчук Н.Н.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ СРЕДСТВ КРЕПЛЕНИЯ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ ШАХТ

Наведено результати досліджень зміни собівартості вугілля від загальної довжини підтримуваних виробок в умовах шахт ДП «Антрацит». Встановлено характер деформування приконтурного масиву і елементів кріплення. Наведено оптимальні форми поперечних перетинів виробок і кріплення в умовах глибоких шахт.

Ключові слова: *виробки, собівартість, поперечний перетин, оптимальна форма, кріплення нового технічного рівня.*

Приведены результаты исследований изменения себестоимости угля от общей длины поддерживаемых выработок в условиях шахт ГП «Антрацит». Установлен характер деформирования приконтурного массива и элементов крепи. Приведены оптимальные формы поперечных сечений выработок и крепей в условиях глубоких шахт.

Ключевые слова: *выработки, себестоимость, поперечное сечение, оптимальная форма, крепи нового технического уровня.*

В настоящее время на шахтах Украинского Донбасса наиболее распространенным типом поперечного сечения выработок, а соответственно и крепи, является арочная форма. Однако практика эксплуатации сечения данного типа показывает, что в современных геомеханических условиях, когда разработка ведется на глубинах свыше 1000 м, в подавляющем большинстве случаев безремонтное поддержание выработок практически невозможно. С каждым годом возрастает количество перекреплений, что соответственно ложится на себестоимость угля, а затраты на ремонтно-восстановительные работы часто превосходят затраты на проведение и крепление выработок. Особенно остро данная проблема наблюдается в Восточном Донбассе, где зачастую требуют ремонта до 70% выработок.

Анализ отечественных и зарубежных публикаций показывает, что сегодня большинство работ посвящено исследованиям в области техно-

логии сооружения выработок, анализу НДС в различных условиях и т.д. Однако работ посвященных обоснованию адаптации параметров выработок и крепей к действующей нагрузке не много. В этой связи необходимо исследовать альтернативные типы поперечного сечения и крепей, параметры которых в большей степени соответствовали-бы современным горно-геологическим и геомеханическим условиям, а их применение позволило-бы сократить количество ремонтируемых выработок и повысить технико-экономические показатели работы угольных шахт.

Целью статьи является обоснование необходимости изменения формы поперечного сечения и типа крепи выработок шахт Восточного Донбасса.

Основной задачей развития подземного комплекса угольных шахт является долговременное поддержание разветвленной сети горных выработок в эксплуатационном состоянии. Но сегодня это довольно сложная задача, требующая существенных материальных и трудовых затрат. Так по состоянию на 01.01.2011 полная стоимость проведения 1 м выработки для условий Восточного Донбасса составляет $7 \div 16$ тыс. грн. в зависимости от площади поперечного сечения и горно-геологических условий. Стоимость перекрепления 1 м выработки с заменой арочной крепи, как правило, превышает затраты на проведение на 20-40%. Поскольку при существующих типах поперечных сечений и металлокрепей безремонтного поддержания выработок в условиях Восточного Донбасса добиться не удастся, становится очевидно, что увеличение протяженности поддерживаемых выработок будет значительным образом сказываться на себестоимости 1 т угля, что наглядно демонстрирует зависимость на рисунке 1.

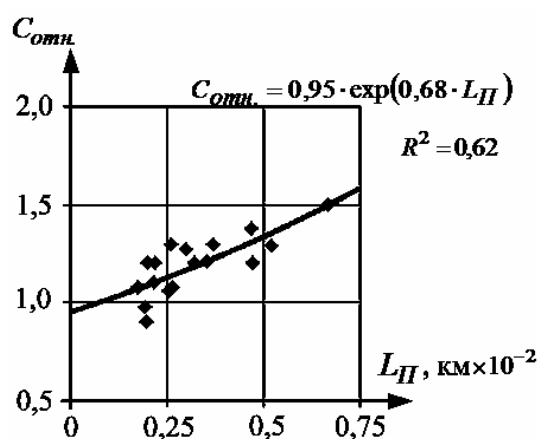


Рисунок 1 – Зависимость относительной себестоимости 1 т угля от общей длины поддерживаемых выработок пласта h_{10} шахт ГП «Антрацит»

Анализ зависимости на рисунке 1 показывает, что в подавляющем большинстве фактическая себестоимость превышает плановую на $10 \div 35\%$, а в отдельных случаях – на 50% . Современное состояние выработок шахт ГП «Антрацит» кроме отрицательной экономической составляющей включает в себя нарушение целого ряда нормативных документов [1, 2 и др.], а отдельные участки представляют прямую опасность для работающих там людей.

В работе [3] участки выработок по показателю устойчивости ω_N , определяемым отношением количества работоспособных рам металлокрепей к общему их числу на исследуемом участке, были классифицированы на четыре типа и для них приведены данные о вероятности вывалообразований.

Исходя из распределения вероятностей вывалообразований на различных участках [3], наибольшее число вывалов происходит в зонах I-го типа. Учитывая, что со временем практически 100% зон II-го типа переходят в зоны I-го типа, очевидна тенденция к постоянному увеличению количества вывалообразований. На рисунке 2 представлено распределение количества зон II-го и I-го типов в исследуемых диапазонах глубин разработки.

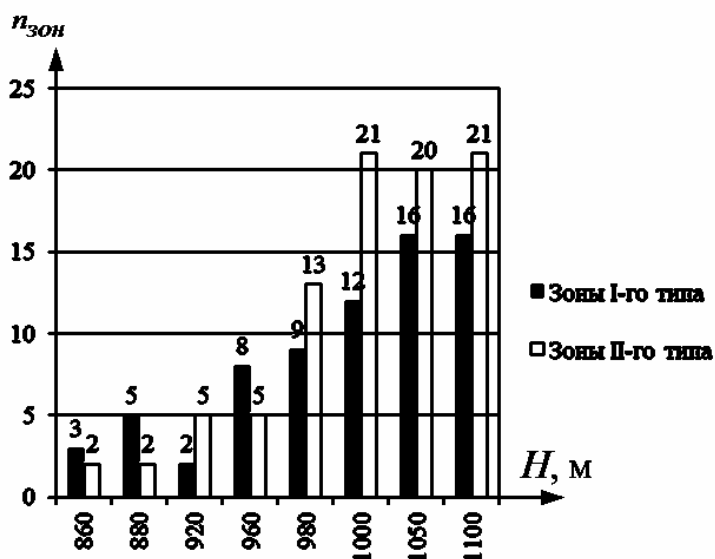


Рисунок 2 – Распределение по глубине численности зон II-го и I-го типов в выработках шахт ГП «Антрацит»

Анализ диаграммы распределения на рисунке 2 показывает, что с ростом глубины количество зон II-го и I-го типов возрастает, а соответственно растет и вероятность вывалообразований.

В результате исследования характера деформирования контура выработок и элементов крепления было установлено следующее:

- характер действующей нагрузки на крепь в зонах различных типов определяется неравномерностью разрушения пород по длине и сечению выработки вследствие воздействия ряда факторов: угла напластования пород, геологической нарушенности, вариации значений мощности пород и их деформационно-прочностных свойств и в большинстве исследуемых выработок имеет асимметричную направленность;

- после исчерпания конструктивной податливости крепи в зонах II-го и I-го типа наблюдался прогиб верхняка синклинальной складчатой структуры, изгиб стоек и разрыв скоб замковых соединений, а в местах сопряжения стоек и верхняка происходила фрагментация профиля СВП стойки;

- потеря площади поперечного сечения выработки в зонах II-го и I-го типа на глубинах 880 ÷ 1115 м достигала 30-40%, а затяжка практически полностью была разрушена.

Таким образом, дальнейшее увеличение протяженности выработок при существующих типах поперечных сечений и крепи без применения научно обоснованных технических решений будет способствовать экономической нецелесообразности подземной разработки в данных условиях.

Одной из основных причин, постоянно ухудшающихся эксплуатационных условий является несоответствие существующих геометрических параметров выработок напряженно-деформированному состоянию (НДС) в части оптимальности формы поперечного сечения. Ключевым условием сохранения заданных размеров и формы поперечного сечения отверстий является условие постоянства напряжений на контуре:

$$\sigma_{\rho} + \sigma_{\theta} = \sigma_1 + \sigma_2 = const, \quad (1)$$

где σ_1 , σ_2 – соответственно вертикальные и горизонтальные напряжения, заданные на бесконечности.

С точки зрения оптимизации НДС системы крепь-массив, т.е. условия при котором достигается постоянство напряжений действующих на контуре, наиболее приемлемой формой поперечного сечения одиночной выработки является эллипс с соотношением радиусов:

$$\frac{a}{b} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \lambda, \quad (2)$$

где a – горизонтальный радиус;

b – вертикальный радиус эллипса;

λ – коэффициент бокового распора.

В работе С.В. Мартыненко [4] была доказана целесообразность использования эллипсовидной формы поперечного сечения с позиций минимизации изгибающих моментов. Ним были получены контуры оптимальных сечений при различных значениях коэффициента бокового распора, которые представлены на рисунке 3.

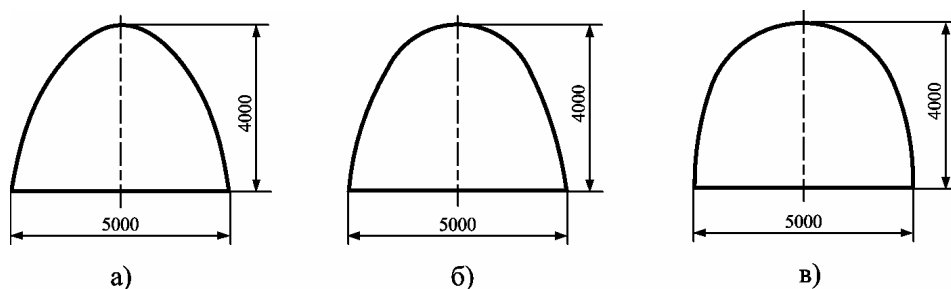


Рисунок 3 – Оптимальные формы поперечного сечения ($15,5 \text{ м}^2$) для различных соотношений вертикальной и боковой нагрузок: а – при значении $\lambda = 0,3$; б – при $\lambda = 0,4$; в – при $\lambda = 0,5$.

Несмотря на внешнее сходство оптимальных типов сечений с арочной формой, в особенности б и в (рисунок 3), ключевое отличие заключается в том, что в данных формах отсутствуют прямолинейные элементы, чем обеспечивается минимизация изгибающих моментов и постоянство напряжений на их контуре.

Полученные формы поперечных сечений наиболее оптимальны для одиночных горизонтальных выработок. И. Н. Булычевым в результате численного решения была получена форма поперечного сечения для условий асимметричного нагружения, имитирующего наклоннозалегающие слои пород или влияние рядом расположенной выработки.

Полученное оптимальное сечение представляет собой полуэллипс со смещенной вертикальной осью (рисунок 4)[5].

И. Н. Булычевым было установлено, что смещением вертикальной оси полуэллипса можно добиться снижения концентрации напряжений на контуре выработки за счет их выравнивания в противоположащих стенках [5].

Таким образом, существующие научные разработки в значительной мере способны обеспечить качественное эксплуатационное состояние выработок при дифференцированном подходе и широком их использовании. Одним из перспективных направлений, способным обеспечить надлежащий уровень поддержания выработок является адаптация форм крепей к оптимальной для соответствующих ГГУ форме поперечного сечения.

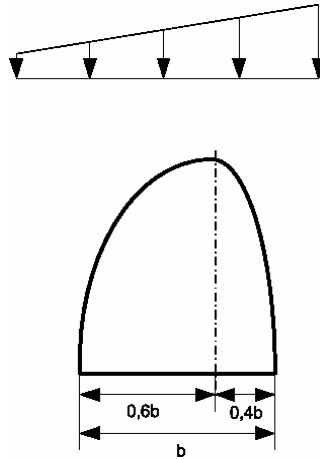


Рисунок 4 – Оптимальная форма поперечного сечения в условиях асимметричной нагрузки

Проведя анализ выпускаемых в настоящее время отечественных конструкций металлокрепей было установлено, что по параметрам оптимальности формы поперечного сечения, а также минимизации изгибающих моментов в элементах крепи для условий глубоких шахт наиболее перспективной является разработанная в Западно - Донбасском научно - производственном центре «Геомеханика» двухрадиусная крепь КМП-А3Р2, -А4Р2 и -А5Р2, внешний вид которой представлен на рисунке 5.

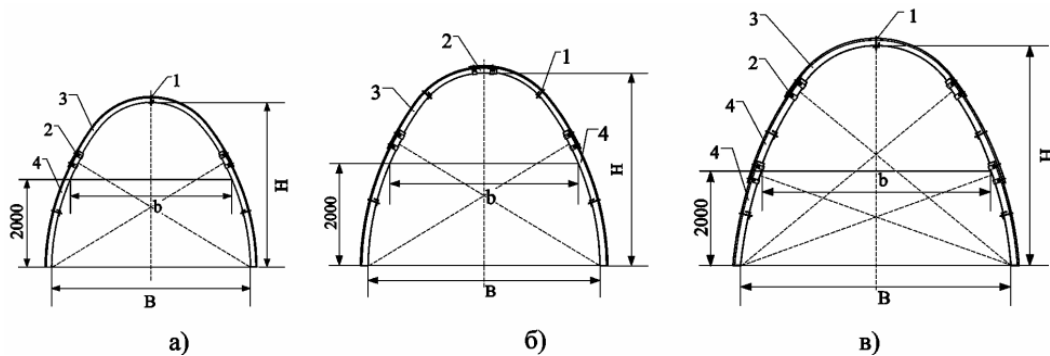


Рисунок 5 – Конструктивное исполнение крепей нового технического уровня КМП-Р2: а – трехзвенной А3, б – четырехзвенной А4,

в – пятизвенной А5; 1 – межрамная стяжка, 2 – узел податливости, 3 – верхняк (для четырехзвенной крепи – элемент составного верхняка), 4 – стойка.

Последняя имеет форму овоида, максимально приближенного к эллипсу. Кроме этого крепи КМП-АхР2 отличаются увеличенной грузонесущей способностью и значительной податливостью по сравнению

с типовыми металлокрепями КМП и АП. Хотя стоимость овоидных крепей на 15-20 % выше, чем арочных, экономический эффект от внедрения инновационного крепления на этапе эксплуатации многократно превышает первичные прямые затраты [6].

Выводы

1. В условиях глубоких шахт Восточного Донбасса в подавляющем своем большинстве выработки имеют арочную форму и закреплены соответствующей крепью, однако данная форма является морально устаревшей и не обеспечивает надлежащего уровня эксплуатационного состояния выработок, что, как показано в статье, в дальнейшем может привести к экономической нецелесообразности в связи с ростом фактической себестоимости, так как безремонтное поддержание выработок данной формы при существующих геомеханических условиях не представляется возможным.

2. На сегодня обоснованы оптимальные формы поперечного сечения выработок, при которых достигается постоянство напряжений действующих на их контуре, а также минимизируются изгибающие моменты, чем обеспечивается длительное сохранение заданных размеров и форм.

3. В настоящее время выпускаются крепи нового уровня, соответствующие критерию оптимальности формы и обеспечивающие безремонтное поддержание выработок, однако широкое их применение на шахтах скорее исключение.

Библиографический список

1. *Правила безпеки у вугільних шахтах: НПАОП 10.0-1.01-10 / Державний комітет України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду. – Офіц. вид. – К.: Друк. ДП «Редакція журналу Охорона праці», 2010. – 430 с.: табл. – (Нормативно-правовий акт з охорони праці).*

2. *Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт: ДНАОП 1.1.30-6.09.93 / Государственный комитет Украины по надзору за охраной труда. – К.: Основа, 1994. – 312 с.: ил., табл. – (Государственный нормативный акт об охране труда).*

3. *Должиков П.Н. Исследование влияния различных факторов на устойчивость горизонтальных выработок глубоких шахт / П.Н. Должиков, Н.Н. Палейчук // Науковий вісник НГУ. – 2011. – №1. – С.23-29.*

4. *Мартыненко С.В. Задача подготовки исходных данных для расчета параметров металлической крепи и ее реализация на системе управления базами данных «Visual Fox Pro 6.0» / С.В. Мартыненко // Горнодобывающая промышленность Украины и Польши: Актуальные проблемы и перспективы: Украинско – Польский форум горняков, (Ял-*

та, 13-19 сент. 2004 г.). - Национальный горный ун-т. – Д., 2004. – С. 92-104. – (Библиогр. в конце ст.)

5. Булычев И.Н. К вопросу оптимизации контуров поперечных сечений протяженных горизонтальных выработок / И.Н. Булычев // Известия Тульского государственного университета: (серия: Геомеханика. Механика подземных сооружений). – 2004. – Вып. 2. – С.62-67.

6. Прокопенко В.И. Экономическая целесообразность внедрения инновационных крепей на шахтах / В.И. Прокопенко, А.В. Кириченко, В.Я. Кириченко // Уголь Украины. – 2011. – №3. – С.18-22.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

*Доценко О. Г.,
к.т.н. Иванова М. С.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ОБРУШЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

В статті наведена методика моделювання процесу ущільнення обвалених гірничих порід і вказані напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: деформаційні властивості; обвалені породи; факторний експеримент.

В статье приведена методика моделирования процесса уплотнения обрушенных горных пород и указаны пути дальнейших исследований.

Ключевые слова: деформационные свойства; обрушенные породы; факторный эксперимент.

Одна из основных проблем добычи угля на шахтах Донбасса связана с увеличением глубины разработки и проявляется в снижении устойчивости горных выработок. Широко распространенные способы охраны выработок на больших глубинах не могут в достаточной мере обеспечить безопасные условия работы и безремонтное их поддержание.

Перспективным способом охраны считается расположение выработок в выработанном пространстве [1,2], при котором исключается влияние опорного давления, но за счет повышенной трещиноватости породного массива снижается прочность пород, и изменяются их деформационные показатели. Существующие технологические схемы с выработками, пройденными по обрушенным породам, применяют на шахтах очень редко ввиду присущих им недостатков и отсутствия достоверной методики расчета параметров их охраны, учитывающих реальные свойства обрушенных и уплотняющихся пород.

Для решения актуального вопроса по установлению параметров проведения выработок по обрушенным породам необходимо знать распределение напряжений в горном массиве с учетом выработанного пространства и деформационных свойств горных пород.

Напряженно-деформированное состояние пород при ведении очистных работ можно исследовать методом конечных элементов

(МКЭ) [3] в предположении упруго-нелинейного поведения массива, что предполагает установление модуля деформации обрушенных пород, зависящего от действующих напряжений, продолжительности действия нагрузки, типа породы, ее влажности, а также структуры и трещинной пустотности обрушившегося массива [4]. Изменение деформационных свойств пород выработанного пространства во времени практически не изучено.

Цель работы заключается в получении зависимости изменения во времени деформационных свойств обрушенных пород с учетом их физико-механических характеристик.

Для достижения поставленной цели проведен эксперимент, основанный на стандартных методах определения сжимаемости грунтов [5], отличающийся от существующих тем, что структура и пустотность испытуемых породных образцов задавалась искусственно.

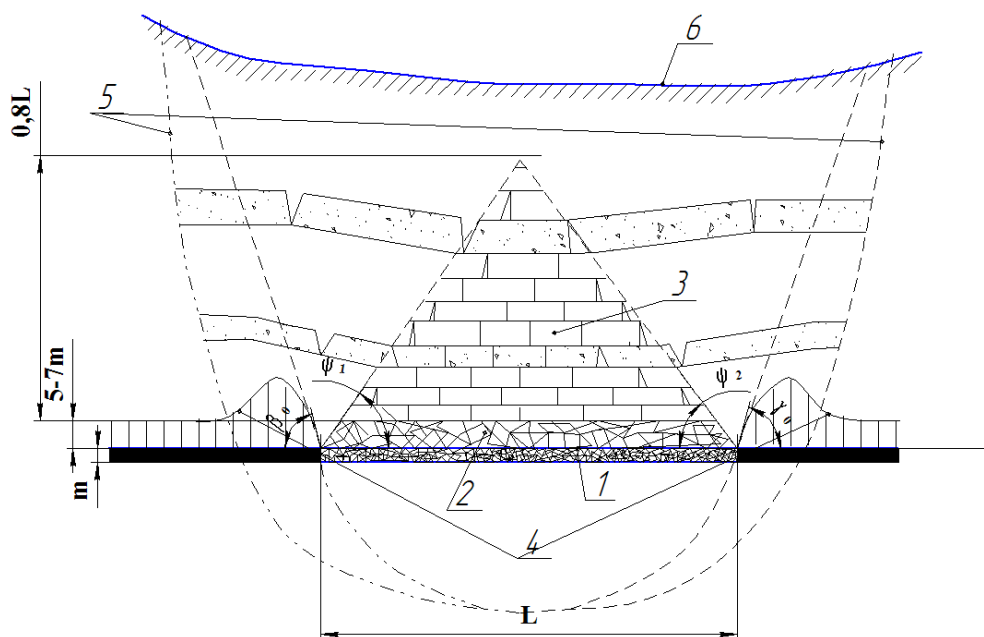
На предварительной стадии эксперимента в лабораторных условиях установлены физико-механические характеристики испытуемых пород: прочность, плотность и влажность.

Прочность породы на одноосное сжатие определялась с помощью полевого пресса БП-14 с использованием зубчатых накладок. Образцы правильной призматической формы, отобранные из забоя при проведении выработки на одной из антрацитовых шахт Восточного Донбасса, поочередно устанавливались между зубчатыми накладками и подвергались воздействию нагрузки. Разрушение образца фиксировалось по манометру, причем для вычисления предела прочности брался максимальный отсчет, фиксируемый в момент разрушения образца. Методом разрушения образцов произвольной формы встречными сферическими инденторами определялся предел прочности на одноосное растяжение. Результаты испытаний пород на прочность приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний пород на прочность

Наименование пород	$\sigma_{сж}$	σ_p	C	$tg\varphi$	φ	Уравнение прямолинейной огибающей кругов Мора
аргиллит	51,35	10,32	8,59	0,6653	33	$\tau = \sigma \cdot tg33^0 + 8,59$
алевролит	68,7	12,94	10,89	0,6830	35	$\tau = \sigma \cdot tg35^0 + 10,89$
песчаник	105,54	11,4	10,29	0,8050	39	$\tau = \sigma \cdot tg39^0 + 11,4$

Пустотность породы играет существенную роль при уплотнении, так как влияет на деформационные показатели и на длительность самого процесса. Численное значение пустотности зависит от плотности породы, размеров ее кусков и расположения их в массиве. Согласно существующим представлениям о сдвигении подработанной толщи при управлении кровлей полным обрушением, вслед за очистным забоем породы обрушаются и образуют свод, состоящий из двух зон, показанных на рисунке 1.



1 – мелкодробленые породы зоны обрушения, 2 – крупнодробленые породы зоны обрушения, 3 – расслоенные породы зоны полных сдвижений, 4 – эпюры опорного давления, 5 – границы влияния очистных работ, 6 – земная поверхность, β_0, γ_0 – граничные углы сдвижений земной поверхности; ψ_1, ψ_2 – углы полных сдвижений пород

Рисунок 1 – Схема сдвига массива вокруг лавы

Нижний слой пород зоны обрушения высотой близкой к мощности пласта представлен мелкодроблеными, хаотично расположенными породными кусками с линейными размерами до 0,5 м; по мере удаления от него размер кусков постепенно увеличивается и достигает 2,5 м на высоте пять-семь мощностей пласта. Зона полных сдвижений представлена расслоившимися породами, имеет высоту $0,8L$ (где L – длина лавы), сложена крупными блоками с линейными размерами 10-12,5 м и напоминает безрастворную кирпичную кладку.

Обрушенный массив при проведении эксперимента моделировался породой с такими же прочностными характеристиками, как и в натурных условиях, но размеры ее кусков были существенно уменьшены. Так зона обрушения моделировалась породой с размерами кусков до 1 мм, что по своей сути напоминает песок, а породы зоны полных сдвижений кусками крупностью 2,5-5,0 мм, что является щебнем.

Пустотность песка и щебня возможно рассчитать по формулам 1 и 2 соответственно:

$$V_{n.n} = \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_y}\right) \cdot 100, \% \quad (1)$$

где ρ_n - насыпной вес образца, г/см³;

ρ_y - плотность породы, г/см³.

$$V_{n.ш} = \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_o}\right) \cdot 100, \% \quad (2)$$

где ρ_o - объемная масса зерен породы, г/см³.

Плотность породы определялась пикнометрическим способом, ее объемный вес - путем взвешивания в воде парафинированного образца, а насыпной вес методом режущего кольца.

На процесс уплотнения обрушенных пород оказывает влияние влажность, учет которой в эксперименте позволит повысить достоверность получаемых результатов. Численное значение влажности определялось методом высушивания образца до постоянной массы.

На основной стадии эксперимента с учетом структуры, пустотности и влажности образцов проводились компрессионные испытания пород, имеющих различные физико-механические характеристики, на приборе-одометре.

Образец нагружался ступенями с интервалом 50 кПа. На каждой из ступеней фиксировалась величина его осадки с точностью до 0,001 мм с помощью индикатора часового типа, располагаемого на приборе, через 1, 2, 3, 4, 5, 10 мин и т.д. до достижения условной стабилизации. Наблюдение за процессом уплотнения во времени осуществлялось на последней ступени нагружения.

Время достижения условной стабилизации осадки испытуемых пород зависит от их вида, определяемого по показателю консистенции и числу пластичности, вычисляемых на основе значений естественной влажности, влажности на границах текучести и раскатывания. Рассмат-

риваемые породы относятся к твердым супесям, следовательно, согласно [5] период времени, в течение которого наступает условная стабилизация уплотнения, равен 30 мин, а сам процесс уплотнения длиться не менее 24 часов.

Для перевода результатов моделирования к натурным значениям введены критерии подобия, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Критерии подобия, учтенные при моделировании процесса уплотнения обрушенных пород

Название критерия подобия	Значение критерия подобия	Условные обозначения
Геометрический α_l	$\alpha_l = \frac{l_n}{l_m} = 2500$	l_n, l_m - линейные размеры соответственно в натуральных условиях и на модели, м
Динамический α_γ	$\alpha_\gamma = \frac{\gamma_n}{\gamma_m} = 1$	γ_n, γ_m - плотность породы соответственно в натуральных условиях и на модели, т/м ³
Кинематический α_t	$\alpha_t = \frac{t_n}{t_m} = \sqrt{\frac{\alpha_l^2 \cdot \alpha_\gamma}{\alpha_p}} = 651,72$	t_n, t_m - время уплотнения пород в натуральных условиях и на модели, с

Исходя из динамического подобия, соотношение между действующими нагрузками в натуральных условиях p_n и на модели p_m составляет 14,715.

Наиболее характерные графические зависимости, полученные в экспериментальной работе, отображены на рисунках 2 и 3.

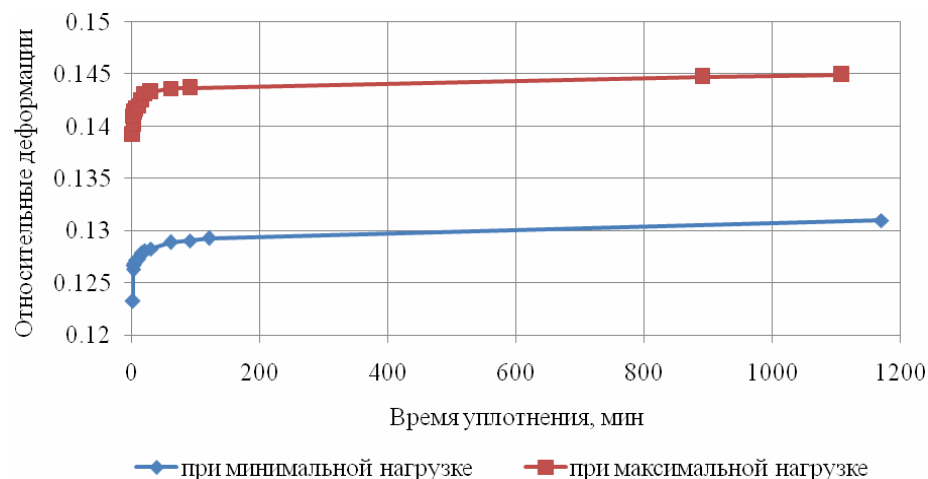


Рисунок 2 – Кривые ползучести обрушенных пород (на примере крупнодробленого песчаника)

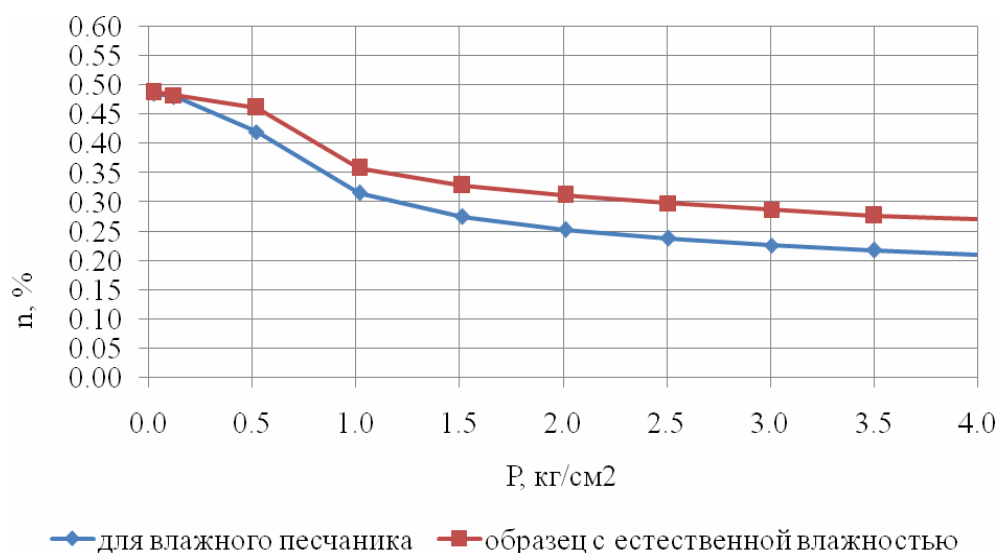


Рисунок 3 – Компрессионные кривые обрушенных пород при различной влажности (на примере крупнодробленого песчаника)

По описанной методике был проведен эксперимент по определению деформационных свойств обрушенных и уплотняющихся пород. В результате получены кривые ползучести раздробленных пород, отражающие зависимость между относительными деформациями и временем уплотнения, и компрессионные кривые, показывающие, как изменяется пустотность пород при различной влажности с ростом нагрузки.

В дальнейшем планируется установить изменение деформационных свойств пород во времени от их физико-механических свойств, пустотности, влажности и действующей нагрузки.

Библиографический список

1. Зборщик М. П. *Охрана выработок глубоких шахт в выработанном пространстве* / Зборщик М. П. - К.: Техника, 1978. - 176 с.
2. Симанович А. М. *Охрана выработок на глубоких горизонтах* / А. М. Симанович, М. А. Сребный. – М.: Недра, 1976. – 144 с.
3. Комиссаров С. Н. *Управление массивом горных пород вокруг очистных выработок* / Комиссаров С. Н. - М.: Недра, 1983. – 237 с.
4. Баклашов И. В. *Деформирование и разрушение породных массивов* / Баклашов И. В. – М.: Недра, 1988. – 271 с.
5. ГОСТ 12248-96. *Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.* – Введ. 1997-01-01. – М.: Минстрой России, 1997. – 54 с. - (Межгосударственный стандарт).

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Клишиным Н.К.

*Кизияров О.Л.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ БЕСШПУРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВОЙ КРОВЛИ В ЛАВЕ

Наведені результати досліджень впливу безшпурових способів зміцнення на напружений стан покрівлі в лаві.

Ключові слова: набрызг речовин, заповнення куполоутворень, зони втрати стійкості, еквівалентні напруження.

Приведены результаты исследований влияния бесшпуровых способов упрочнения на напряженное состояние кровли в лаве.

Ключевые слова: набрызг составов, заполнение куполообразований, эквивалентные напряжения, зоны потери устойчивости.

На шахтах Донбасса широко применяются способы упрочнения неустойчивой кровли в лаве химическим анкерованием и нагнетанием в кровлю скрепляющих составов. Известны так же безшпуровые способы: упрочнение приконтурного массива путем набрызга скрепляющих составов на поверхность вывала [1], а также заполнение куполообразований [2,3]. Широкое применение технологий набрызг-полимерного крепления и заполнения пустот и куполообразований получено на шахтах России [4]. Разработаны вспенивающиеся смолы Карбофил, с кратностью вспенивания 30 - 35 при среднем расходе смолы 45 кг на 1 м³ вспененной массы. В качестве набрызг-полимерного покрытия фирмой "MINOVA" рекомендуется полимер Текфлекс, обладающий способностью при толщине слоя 4 - 5 мм обеспечить скрепление нарушенной кровли. Опыт применения технологии набрызг-полимерного покрытия накоплен в промышленных масштабах на рудниках "Комсомольский", "Октябрьский", "Скалистый" и "Таймырский" ГМК "Норильский Никель", где вместо железобетонной анкерной крепи и набрызг-бетона успешно внедрен паспорт крепления выработок сталеполимерными анкерами с полимерным покрытием кровли и боков. Безшпуровая технология является перспективной, как составная часть комбинированной технологии упрочнения. Достоинством способов является технологичность, отсутствие работ по бурению шпуров, меньшая трудоемкость

выполнения работ по сравнению с традиционными способами упрочнения. Недостатки: недостаточно обоснованы параметры технологий.

Цель работы - обоснование параметров технологии бесшпурового упрочнения неустойчивой кровли в лаве.

Объект исследования - технологии бесшпурового упрочнения неустойчивой кровли в лаве.

Предмет исследования - напряженно-деформированное состояние кровли в лаве, упрочненной по бесшпуровой технологии.

Для исследования напряженного состояния кровли в окрестности очистного забоя решена объемная задача с использованием МКЭ [5].

Задачи решались для следующих условий: высота вывала 0,4 - 2,0 м. На первом этапе решена задача упрочнения приконтурного массива набрызгом составов. Параметры технологии упрочнения приконтурного массива: свойства состава, толщина слоя, давление нагнетания. Для моделирования технологии упрочнения набрызгом составов на поверхность вывала предложена расчетная схема, представленная на рисунке 1.

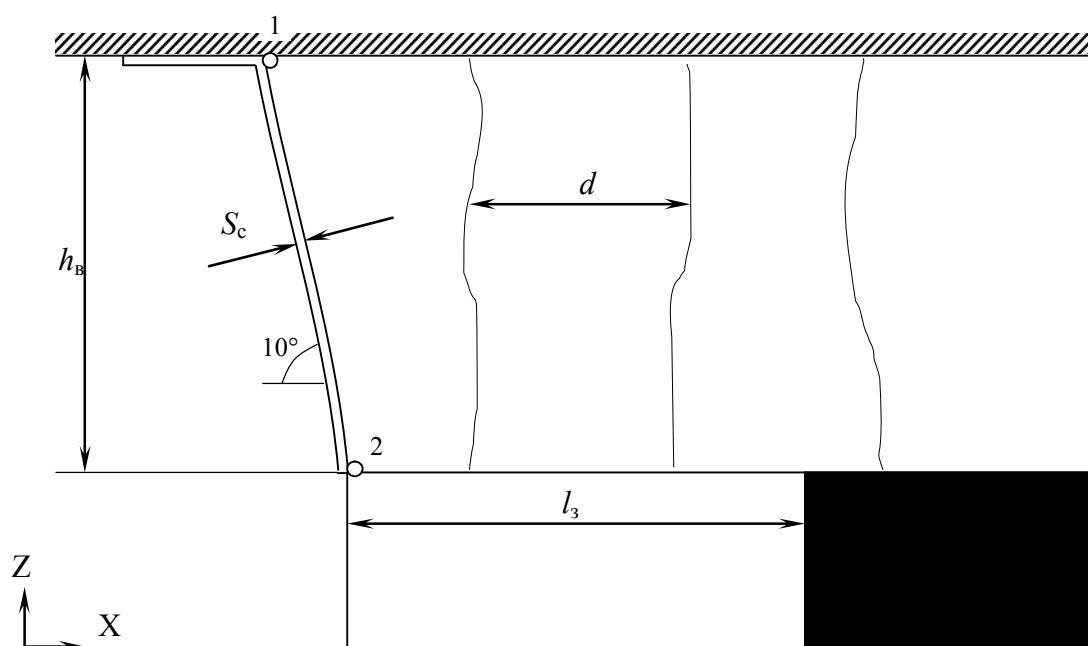


Рисунок 1 - Расчетная схема к моделированию технологии набрызга составов на поверхность вывала

На рисунке обозначено:

- S_c - толщина слоя, наносимого на поверхность вывала, мм;
- d - расстояние между трещинами, мм;
- h_b - высота вывала, м;
- l_3 - ширина зависших и упрочненных пород, м.

Для моделирования скрепляющего слоя использовались плоские элементы - пластины, которым задавались свойства:

- E_c - модуль упругости скрепляющего состава, МПа;
- φ - угол внутреннего трения, град;
- C - сцепление пород, МПа.

Расчет произведен на основании теории прочности Кулона - Мора.

Как показали исследования, набрызг составов на поверхность вывала приводит к незначительным изменениям напряженного состояния пород, главным образом на поверхности вывала. Дальнейшие исследования показали, что высота вывала, толщина слоя и его свойства мало сказываются на изменении НДС кровли.

Дальнейшему анализу подлежали максимальные напряжения σ_{\max} в скрепляющем слое.

На рисунке 2 представлен график зависимости максимальных растягивающих напряжений σ_{\max} в скрепляющем слое от высоты вывала.

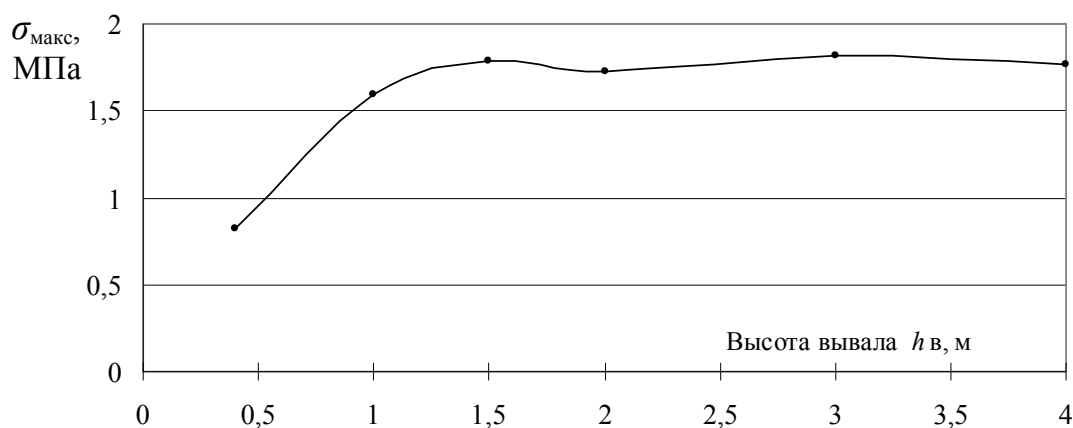


Рисунок 2 - График зависимости максимальных растягивающих напряжений в скрепляющем слое от высоты вывала

Как видно из рисунка, при увеличении высоты вывала до 1,6 м наблюдается рост, а при дальнейшем увеличении высоты вывала - стабилизация максимальных растягивающих напряжений в скрепляющем слое.

Далее решены задачи для определения зависимости максимальных растягивающих напряжений в набрызг-слое от: модуля упругости состава E_c ; толщины слоя S_c ; от расстояния между трещинами d и от ширины зависших и упороченных пород l_3 .

После статистического анализа, выполненного посредством MS Excel, получены регрессионные зависимости, представленные ниже.

Для проверки адекватности функции регрессии исходным данным рассчитывались следующие показатели: множественный коэффициент детерминации R^2 , уровень значимости коэффициента детерминации α_p , расчетное значение F -критерия Фишера, показатель средней ошибки аппроксимации.

Зависимость максимальных растягивающих напряжений N_z в скрепляющем слое от:

- модуля упругости состава

$$N_z = 1,446 + 0,0002 \cdot E_c - 25,037/E_c, \text{ МПа}; \quad (1)$$

$$R^2 = 0,99; \alpha_p = 0,0001; F_p = 1028;$$

- толщины слоя

$$N_z = (0,40655 + 0,10968 \cdot S_c + 0,00022 \cdot S_c^2)^{-1}, \text{ МПа}; \quad (2)$$

$$R^2 = 1; \alpha_p = 0,00001; F_p = 1,1 \cdot 10^6;$$

- от расстояния между трещинами

$$N_z = 1,452 - 0,00007 \cdot d + 38,3/d, \text{ МПа}; \quad (3)$$

$$R^2 = 0,99; \alpha_p = 0,0006; F_p = 1602;$$

- от высоты вывала

$$N_z = 2,228 - 0,0818 \cdot h_b - 0,54872/h_b, \text{ МПа}; \quad (4)$$

$$R^2 = 0,99; \alpha_p = 0,0008; F_p = 168;$$

- от ширины зависших и упрочненных пород

$$N_z = 0,272 + 1,57 \cdot l_3, \text{ МПа}; \quad (5)$$

$$R^2 = 0,99; \alpha_p = 0,0002; F_p = 456.$$

Уравнение множественных регрессий

$$N_z = -0,444 + 0,000184 \cdot E_c - 17,64 \cdot E_c^{-1} + 2,324 \cdot S_c^{-1} - 0,773 \cdot S_c^{-2} +$$

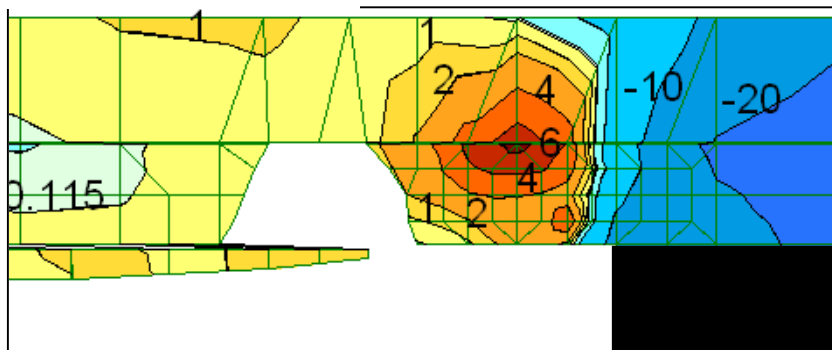
$$+ 45,8 \cdot d^{-1} - 0,0493 \cdot h_b - 0,513 \cdot h_b^{-1} + 1,546 \cdot l_3, \text{ МПа}; \quad (6)$$

$$R^2 = 0,99; \alpha_p = 0,073; F_p = 115.$$

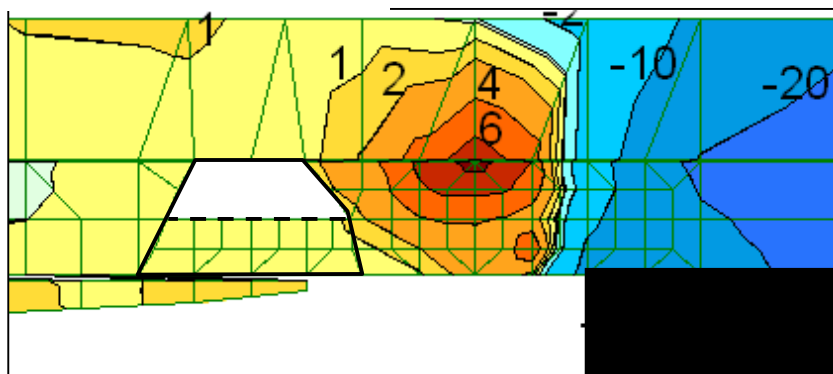
Изменяя свойства скрепляющего состава, высоту вывала в диапазоне $h_b = 0,5 - 4$ м, расстояние между трещинами $d = 100 - 1000$ мм, а также задаваясь величиной предельных напряжений в скрепляющем слое, равной величине адгезии 4 МПа, получена толщина набрызг-слоя $S_c = 1,5 - 3$ мм, что несколько меньше рекомендуемых 4 - 5 мм.

Следующими задачами проводилось моделирование заполнения куполообразований кровли. На рисунке 3 представлены изополя эквивалентных напряжений при высоте вывала 0,4 м после снятия полосы угля.

а) без заполнителя



б) высота заполнителя 50%



в) высота заполнителя 100%

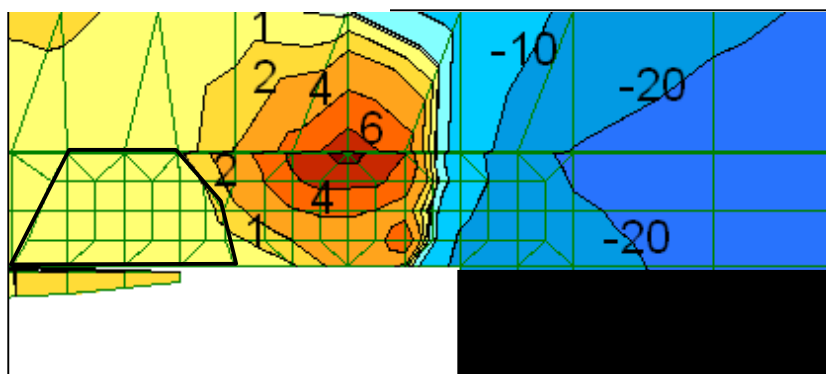


Рисунок 3 - Изополя эквивалентных напряжений

Моделирование заполнения пустот осуществлялось путем добавления в расчетную схему элементов, со свойствами материала заполнителя. На следующей стадии снималась полоса угля и анализировались горизонтальные и эквивалентные напряжения, рассчитанные согласно теории прочности О.Мора.

Высота вывала моделировалась в диапазоне от 0,4 до 2 м.

Одним из параметров технологической схемы является высота заполнения, которая в модели изменялась от 0 до 100% с шагом в 25%.

Из рисунков видно, что максимальные растягивающие напряжения возникают на границе неустойчивого слоя с устойчивыми породами, на расстоянии 0,4 м и достигают 6 МПа. На контуре поверхности вывала наблюдаются растягивающие напряжения величиной 1 - 2 МПа. Заполнение куполообразований приводит к улучшению состояния кровли главным образом на поверхности вывала. Так, при высоте заполнителя 50% величина напряжений достигает 1 МПа, а при полном заполнении куполообразований - напряжения на контуре вывала снижаются до 0,5 - 1 МПа.

На рисунке 4 приведены результаты расчета эквивалентных напряжений при высоте вывала 1 и 2 м. При высоте вывала 1 м зона потери устойчивости (ЗПУ) (изолиния 4 МПа) распространяется на всю высоту вывала, в то время как при высоте вывала 2 м ЗПУ распространена лишь до половины его высоты. Дальнейшие исследования показали, что высота ЗПУ растет по мере увеличения мощности нарушенного слоя кровли до 1,2 - 1,6 м, а затем рост прекращается. При 50% заполнении вывала высотой 1 м ЗПУ разбивается на 2 части (рисунок 4-1-б) - верхнюю (0,3 м х 0,45 м) и нижнюю (0,35х0,65 м), причем при полном заполнении купола верхняя часть ЗПУ уменьшается до 0,25х0,3 м, а нижняя увеличивается до 0,4х0,65 м. Кроме того, величина максимальных растягивающих напряжений возросла до 8 МПа.

При высоте вывала 2 м (рисунок 4 - 2) ЗПУ наблюдается только в нижней части и имеет размер 0,6х1,1 м. При полном заполнении размер ЗПУ незначительно уменьшается и составляет 0,55х1,05 м.

На основании проделанного анализа можно предположить следующие выводы: при отсутствии заполнителя, будет наблюдаться сползание отслоившихся пород, а в случае заполнения куполообразований происходит распор и удержание отслоившихся пород, что предотвращает их дальнейшие перемещения. При высоте вывала до 1,2 - 1,4 м необходимо полное заполнение вывала, а при большей высоте достаточно 75 - 50% заполнения пустот.

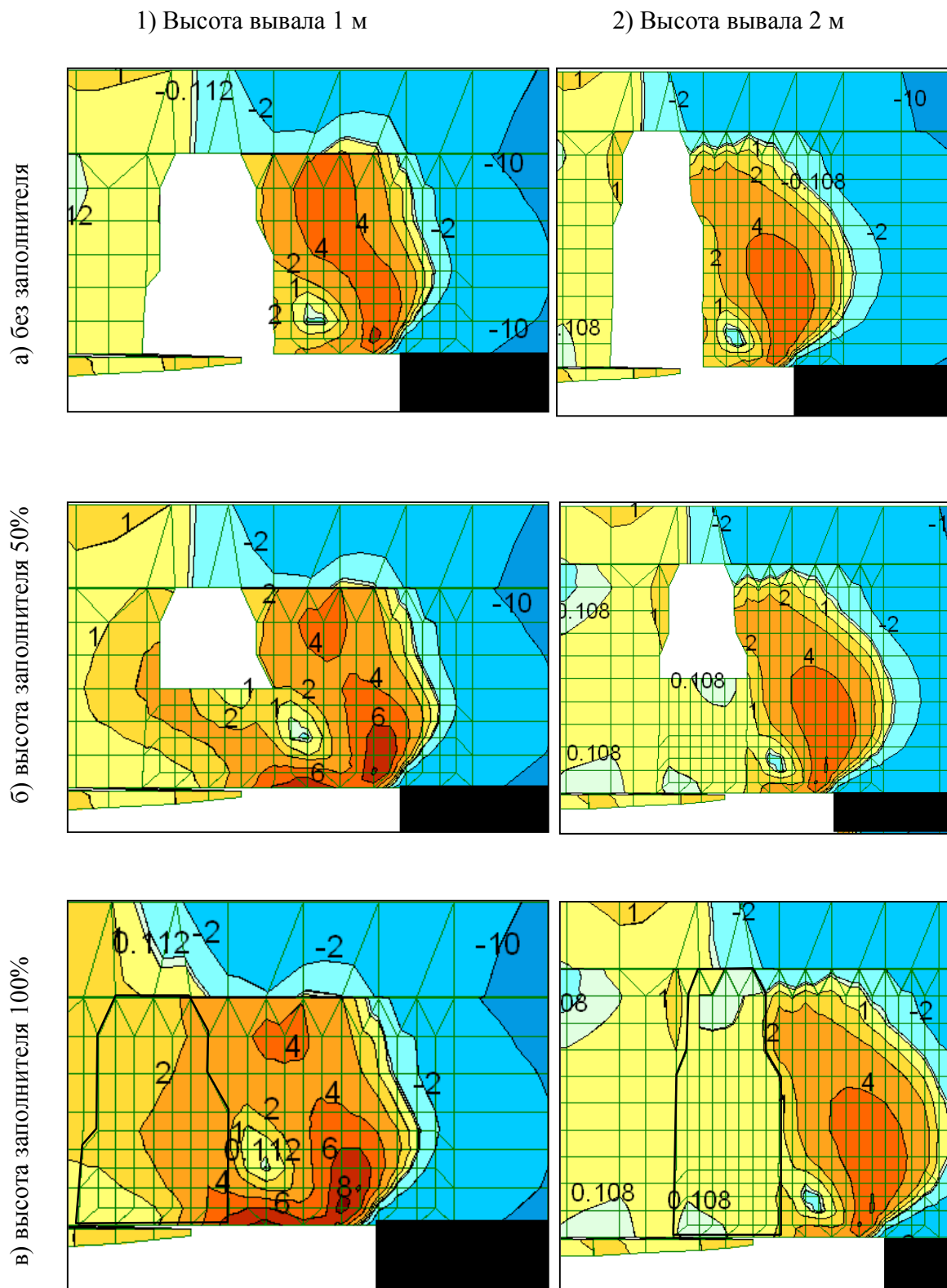


Рисунок 4 - Изополя эквивалентных напряжений при высоте вьвала 1 и 2 м и различной высоте заполнителя

Выводы: Аналитическими исследованиями проанализировано влияние основных параметров бесшпуровых способов упрочнения на НДС кровли, получены регрессионные зависимости, предназначены для определения параметров технологии бесшпурового упрочнения неустойчивой кровли в лаве.

Направления дальнейших исследований: обоснование параметров технологии комбинированного упрочнения неустойчивой кровли в очистном забое с учетом упрочнения набрызгом составов и заполнения куполообразований.

Библиографический список

1. А.с. 810971 СССР, МКИ 3 Е 21 С 41/04. Способ поддержания кровли/ Н.К. Клишин, А.А. Ефименко, А.А. Пятаченко, Ю.Ф. Савенко; заявл. 04.05.79.; опубл. 07.03.81, Бюл. № 9. – 1981. – С. 130.
2. Заяв. № 1573609, МКИ. Е 21 Д 11/0. Способ и устройство для ремонта кровли. Великобритания. - № 4770. Заявл. 28.08.1980.; опубл. ИСМ, 1981, № 5, вып.. 81. – С. 59.
3. Технология разработки нарушенных угольных пластов/ [Ф.М. Киржнер, В.Н. Скуба, Е.М. Козионов, П.Е. Левкович]. - Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1983. – 172 с.
4. Климчук И.В. Опыт применения полимерных технологий на горнодобывающих предприятиях России / И.В. Климчук, В.М. Маланченко // Горная промышленность. - 2007. - №4. - С. 22 - 25.
5. Кизияров О.Л. Модель для исследования параметров технологии комбинированного упрочнения кровли в лавах /О.Л. Кизияров // Сборник научных трудов. - Алчевск: 2004. - № 18. – С. 87 - 91.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Клишиным Н.К.

**Сиидов В.Н.,
к. т. н. Пупков В.С.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)**

МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ И КОЭФФИЦИЕНТ БОКОВОГО РАСПОРА РАЗРУШЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Експериментальним шляхом встановлено модуль деформації та коефіцієнт бокового розпору роздробленої породи для пісковика, аргіліту та алевроліту.

Ключові слова: модуль деформації, коефіцієнт бокового розпору, роздроблена порода, пісковик, аргіліт, алевроліт.

Экспериментальным путем установлены модуль деформации и коэффициент бокового распора раздробленной породы для песчаника, аргиллита и алевролита.

Ключевые слова: модуль деформации, коэффициент бокового распора, раздробленная порода, песчаник, аргиллит, алевролит.

В настоящее время одним из эффективных методов исследования напряженно-деформированного состояния высокометаморфизированного угленосного массива является численное моделирование с использованием механических характеристик, полученных на базе лабораторных исследований [1]. Механические характеристики пород подработанного пространства, разрушенных под влиянием очистных работ, существенно отличаются от аналогичных характеристик нетронутого массива [2]. Анализ исследований по рассматриваемому вопросу [2-3] показывает, что всеми авторами отмечается заметное снижение модуля деформации разрушенных материалов. Однако отсутствуют достоверные данные, касающиеся коэффициента бокового распора для разрушенной породы. Поскольку точность решения задач геомеханики методом конечных элементов зависит от корректно заданных обоих коэффициентов, то установление их величин является актуальной задачей. Целью проводимых исследований на базе образцов основных пород антрацитовых шахт Украинского Донбасса является определение основных механических характеристик: модуля деформации и коэффициента бокового распора.

При экспериментальном определении механических характеристик раздробленной породы основная сложность заключается в том, что образцы должны размещаться в ограничивающей их оболочке [4]. Ис-

пытания разрушенной породы выполняются в тонкостенной металлической цилиндрической оболочке (рисунок 1, а), для которой предварительным тарированием получена зависимость связи бокового давления с его деформациями. Анализ производился путем замены оболочки эквивалентным боковым давлением (рисунок 1, б).

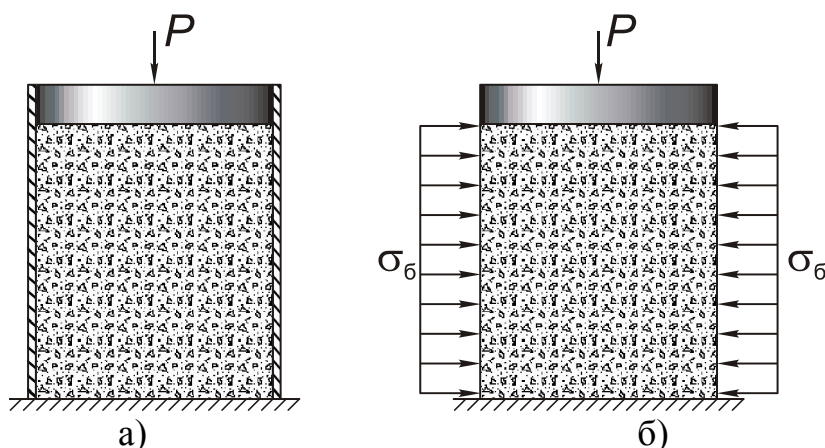


Рисунок 1 – Схема экспериментальных испытаний разрушенной породы: а – реальная; б – расчетная.

Экспериментальная установка (рисунок 2) состоит из основных узлов:

1 – тонкостенная металлическая труба, внешний и внутренний диаметры соответственно $D = 50$, $d = 48$ мм; 2 – жесткий металлический цилиндр; 3 – фиксирующая обойма; 4 – верхнее фиксирующее кольцо; 5 и 6 – поршни соответственно верхний и нижний $d = 47,9$ мм; 7 – тензометрический датчик бокового давления; 8 – датчик; 9 – отверстие для вывода контактов датчика 8 к усилителю; 10 и 11 – траверсы силовой установки соответственно подвижная и неподвижная; 12 – исследуемая навеска породы.

Экспериментальная модель нагружается с использованием машины УИМ-50м (рисунок 3).

В процессе экспериментальных исследований фиксировали усилия сжатия P , возникающие при этом радиальные напряжения σ_r и усадку образца Δh . Сила сжатия регистрировалась по показаниям силоизмерителя машины УИМ-50м. Усадка образца определялась по показаниям индикатора.

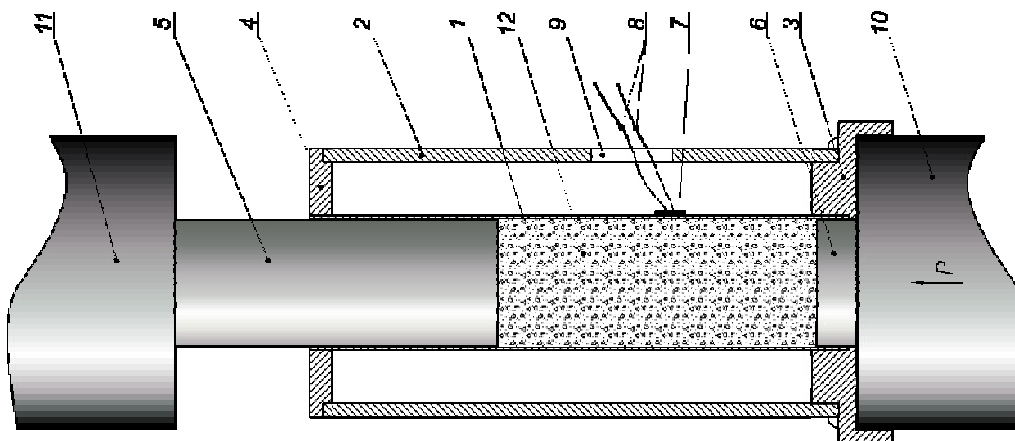
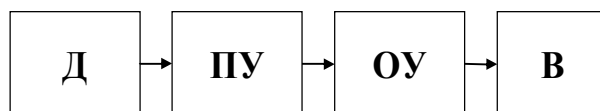


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки



Рисунок 3 – Внешний вид регистрирующего комплекса

Регистрация радиальных напряжений осуществлялась за счет специально разработанного комплекса регистрирующей аппаратуры (рисунок 4).



Д – тензометрический датчик; ПУ – пред усилитель сигнала;
ОУ – оконечный усилитель; В – цифровой вольтметр.

Рисунок 4 – Общая схема регистрирующего комплекса

Датчик радиальных напряжений представляет собой тензорезистор, приклеенный к внешней стороне тонкостенного цилиндра. В работе [5] показано, что такие датчики пригодны для измерения напряжений в диапазоне 1...100 МПа.

Тарирование полученной измерительной системы производилось путем ее гидравлического испытания давлением жидкости согласно схеме, представленной на рисунке 5.

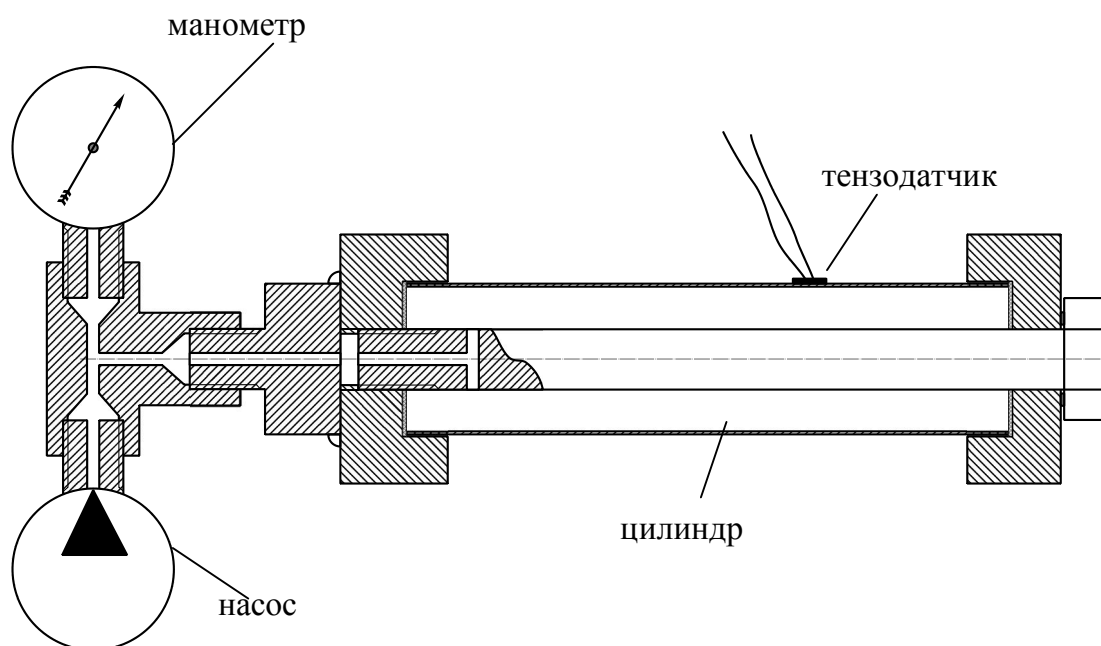


Рисунок 5 – Общая схема тарировки датчика (тензорезистора) радиальных напряжений

Изменение давления в 1 МПа соответствует изменению напряжения на выходе усилителя $\Delta U = 0.062 \text{ В}$, с погрешностью 9 %.

При проведении эксперимента измерения производились после предварительной усадки образца до показаний силоизмерителя $P = 1 \text{ кН}$. Эта процедура необходима для устранения неравномерности насыпки материала.

В качестве варьирующего параметра приняты показания силоизмерителя. Шаг измерений принят равный $\Delta P = 5 \text{ кН}$. При этом прирост напряжений сжатия определялся по формуле:

$$\Delta \sigma_{сж} = \frac{\Delta P}{A}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где A – площадь поперечного сечения верхнего поршня, м^2 .

Соответствующее приросту $\Delta\sigma_{сж}$ изменение бокового давления определялось по формуле:

$$\Delta\sigma_{\delta} = \frac{(U_{\kappa} - U_{\eta})}{\alpha} \cdot 10^6, \text{ МПа}, \quad (2)$$

где α – эмпирический коэффициент пересчета показаний в результате тарировки ($\alpha = 0.062$).

Прирост относительной деформации образца, при изменении давления сжатия $\Delta\sigma_{сж}$ определялся по формуле:

$$\Delta\varepsilon_z = \frac{h_{\eta} - h_{\kappa}}{H - h_{\eta}}, \quad (3)$$

где h_{η} и h_{κ} – величины усадки образца, соответственно начальная и конечная, мм;

H – начальная высота насыпки, мм.

Допуская, что тонкостенный цилиндр подвержен преимущественно деформациям растяжения, представляется возможным найти линейную связь между $\Delta\sigma_{\delta}$ и тангенциальными растяжениями цилиндра $\Delta\varepsilon_m$ [6]:

$$\Delta\varepsilon_m = \frac{\Delta\sigma_{\delta} \cdot d_{\text{ц}}}{2 \cdot \delta_{\text{ц}} \cdot E_{\text{ц}}} = \frac{\Delta\sigma_{\delta}}{\varphi}, \quad (4)$$

где $\varphi = \frac{E_{\text{ц}} \cdot 2\delta_{\text{ц}}}{d_{\text{ц}}}$, ($\varphi = 0,833 \cdot 10^{10} \text{ Па}$).

Если рассматривать процесс усадки раздробленной породы как деформацию цилиндра нагруженного осевой силой и боковым давлением, то

$$\begin{aligned} \sigma_{\tau} &= \sigma_{\delta}, \text{ Па}, \\ \sigma_{\theta} &= \sigma_{\delta}, \text{ Па}, \\ U &= \frac{1-\mu}{E} \cdot \sigma_{\delta} \cdot r - \mu \cdot \frac{\sigma_z}{E} \cdot r, \text{ м}, \end{aligned} \quad (5)$$

где σ_θ – тангенциальные напряжения, Па;
 U – радиальные деформации образца, м;
 μ – коэффициент бокового распора;
 E – модуль деформации, Па;
 r – текущий радиус, м.

Зависимости для относительной тангенциальной (ε_θ) и продольной (ε_z) деформаций имеют вид:

$$\varepsilon_\theta = \frac{U}{\delta} = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_\delta - \mu \cdot (\sigma_\delta + \sigma_z)], \quad (6)$$

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \frac{\mu}{E} \cdot (\sigma_z + \sigma_\theta) = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_z - \mu \cdot 2 \cdot \sigma_\delta]. \quad (7)$$

Поскольку из условия деформации цилиндра известна связь между ε_θ и ε_z , то переходя к записи уравнений в приращениях рассматриваемых величин на каждом шаге эксперимента, можно составить уравнения:

$$\Delta \varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot [\Delta \sigma_z - \mu \cdot 2 \cdot \Delta \sigma_\delta], \quad (8)$$

$$\frac{\Delta \sigma_\delta}{\varphi} = \frac{1}{E} \cdot [\Delta \sigma_\delta - \mu \cdot (\Delta \sigma_z + \Delta \sigma_\delta)]. \quad (9)$$

Решая уравнения (8) – (9) находим:

$$\mu = \frac{\frac{\Delta \sigma_\delta \cdot \Delta \sigma_z}{\varphi \cdot \Delta \varepsilon_z} + \Delta \sigma_\delta}{\left[\frac{2 \cdot (\Delta \sigma_\delta)^2}{\varphi \cdot \Delta \varepsilon_z} + \Delta \sigma_z + \Delta \sigma_\delta \right]}; \quad (10)$$

$$E = \frac{\Delta \sigma_z - 2\mu \cdot \Delta \sigma_\delta}{\Delta \varepsilon_z}. \quad (11)$$

При определении механических характеристик экспериментальные исследования выполнялись для трех основных типов пород (алевролит, аргиллит, песчаник) с крупностью их фракции 2,5-5 мм. Эксперимент проводился тремя сериями. Усредненные данные по результатам экспериментов сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Механические характеристики разрушенных пород

Тип породы	Коэффициент бокового распора μ	Модуль деформации E , МПа
Песчаник	0,29	22200
Алевролит	0,43	9500
Аргиллит	0,47	6500

На основании проведенных экспериментов установлено, что величина модуля деформации разрушенных пород для аргиллита, алевролита и песчаника в среднем соответственно в 3.8, 2.8 и 1.6 раза меньше, чем модуль деформации этих пород в массиве. Величины коэффициентов бокового распора этих уплотненных пород в 1.9-2.1 раз больше, чем в массиве. При этом коэффициент остаточного разрыхления пород составляет 1.01-1.03.

Снижение значения модуля деформации хорошо согласуется с уже известными данными. Увеличение значения коэффициента бокового распора можно объяснить дискретным строением разрушенной породы, что допускает смещение отдельных фрагментов относительно друг друга. Тем самым создавая предпосылки для увеличения боковых деформаций образца за счет перемещения отдельных частиц материала в направлении, перпендикулярном прилагаемому усилию сжатия. В дальнейших исследованиях предполагается проверить полученные данные на образцах с другими размерами фрагментов, а также учесть трения материала образца о стенки ограждающей оболочки.

Библиографический список

1. Болучевский В.И. Особенности деформирования горного массива под влиянием очистных работ / Болучевский В.И., Ведяшкин А.С., Спроге А.О. – Уголь. – 1988. – №11. – С. 10-12.
2. Зборицк М.П. Свойства пород зон разгрузки / М.П. Зборицк, В.В. Назимко // Разраб. месторождений полез. ископаемых. Респ. межвед. науч. – техн. сб. – Киев: "Техніка", 1991. – Вып. 90. – С. 28-36.
3. Андранович В.А. Определение модуля деформации разрушенных пород / В.А. Андранович, Ю.В. Громов, Г.А. Иванов. // Уголь Украины. – 1984. – № 2. – С. 18-19.

4. Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая, Р.И. Тедер, Е.С. Ватолин, М.Ф. Кунтыш. – М.: Недра, 1969. – 392 с.

5. Элдер В., Вальтер Л. Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами / В.Элдер, Л. Вальтер. – М.: Мир, 1974. – 286 с.

6. Тимошенко С.П. Пластины и оболочки / С.П.Тимошенко, С.Войновский-Кригер. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы. 1963. – 635с.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Борзыхом А.Ф.

МЕТАЛЛУРГИЯ

*д.т.н. Новохатский А.М.,
Михайлюк Г.Д., Карпов А.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ РАЗВИТИЯ РЕАКЦИИ БУДУАРА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ АНТРАЦИТА

Проаналізовано ступінь розвитку реакції Будуара в доменній печі з погляду термодинаміки. Дослідним шляхом знайдена витрата антрациту на протікання реакції Будуара в робочому просторі печі. Розрахунковим шляхом визначена частка антрациту, що доходить до нижньої частини печі.

Ключові слова: доменна піч, антрацит, реакція Будуара, константа рівноваги.

Проанализирована степень развития реакции Будуара в доменной печи с точки зрения термодинамики. Опытным путем найден расход антрацита на протекание реакции Будуара в рабочем пространстве печи. Расчетным путем определена доля антрацита, доходящего до нижних горизонтов печи.

Ключевые слова: доменная печь, антрацит, реакция Будуара, константа равновесия.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами.

Как известно реакция Будуара - это процесс взаимодействия диоксида углерода с углеродом кокса:



Начало данной реакции свидетельствует о начале прямого восстановления железа. Из этого следует, что начало реакции Будуара соответствует началу расхода углерода кокса на реакции восстановления железа, так как до этого оно восстанавливается газом (CO).

Применение антрацита в качестве заменителя кокса осложняется сравнительно низкой прочностью угля. Чтобы предотвратить снижение газопроницаемости коксовой насадки необходимо создать такие условия, при которых весь антрацит израсходуется на процессы восстановления оксидов железа до того, как уголь попадет в горн.

Анализ исследований и публикаций.

Температура начала и интенсивность взаимодействия диоксида углерода с углеродом кокса зависят от степени его графитизации и пористости структуры кокса и от наличия катализаторов реакции. Исследования проб металлургических коксов показали, что эта реакция начинается при 900°C и протекает с большой скоростью при температурах 1000°C и выше.

Температуру 900°C обычно и принимают в расчетах равновесного состава газов при косвенном восстановлении FeO. При 1173 К (900°C) $K_P = 0.47$ и $C_{\text{уд}}^e = \frac{1}{K_{P1}} + 1 = 3,128$ моль/моль Fe. Соответственно при $t < 900^\circ\text{C}$ косвенное восстановление оксидов железа протекает в присутствии кокса, который ведет себя в шахте печи как нейтральное по отношению к системе FeO - Fe - CO – CO₂ вещество[1].

Известно [1], что при $t = 685^\circ\text{C}$ все оксиды железа должны восстанавливаться оксидом углерода или твердым углеродом с образованием нейтральной смеси газов уже не по отношению к оксиду железа, а по отношению к твердому углероду кокса. Косвенное восстановление оксидов железа до железа протекало бы с гораздо большим избытком CO, чем это требует реакция $FeO + CO = Fe + CO_2$, реализуемая в лабораторных условиях без твердого углерода, и при повышении температуры с 685°C до 900°C и выше концентрация CO₂ в нейтральной по отношению к углероду кокса газовой смеси уменьшится с 42 % практически до 0 %, т.е. при $t > 900^\circ\text{C}$ восстановление оксидов железа косвенным путем стало бы вообще невозможным. Между тем, вюстит в шахте восстанавливается косвенным путем при температурах 850-900°C и состав печных газов приближается к равновесному по отношению к реакции косвенного восстановления FeO при отсутствии твердого углерода, а вовсе не характеризуется исчезающе малыми концентрациями CO₂.

Была высказана гипотеза[2] о том, что при температурах 850-900°C печные газы исчерпали свою восстановительную способность применительно к системе вюстит - железо. И хотя соотношение CO₂/CO в печных газах было несколько ниже равновесного для указанных температур, гипотеза оказалась весьма плодотворной, т.к. была блестяще подтверждена опытами с «замораживанием» действующих печей, в столбе шихты которых были обнаружены зоны скопления вюстита. Сам факт зональности восстановления не по толщине куска руды, а по высоте столба шихты, свидетельствовал о потоколимитируемом режиме восстановления на стадии вюстит - железо.

Потоколимитируемый режим восстановления вюстита означает, что степень его металлизации не зависит от кинетических условий, но полностью определяется количеством восстановителя, который достав-

ляется газовым потоком. Косвенное восстановление вюстита в шахте печи протекает в этом случае в условиях дефицита газообразного восстановителя для его полного восстановления, т.к. задолго до этого газ полностью исчерпывает свою восстановительную способность, т.е. вплотную приближается к равновесному составу, который характеризуется константой равновесия K_p .

Постановка задачи.

Определить степень взаимодействия и долю углерода антрацита с CO_2 . Сравнить степени взаимодействия углеродов антрацита и кокса с CO_2 .

Изложение материала и его результаты.

Углерод в природе находится в различных модификациях: графит, алмаз, карбид, лонсдейлит, фуллерены, углеродные нанотрубки, графен, аморфный углерод, уголь, техуглерод, сажа.

Углерод в коксе и антраците находится в виде аморфного углерода. Но Структура кокса является пористой, в отличие от монолитной структуры антрацита. В связи с этим поверхность взаимодействия газов с коксом является выше, чем у антрацита.

На основе вышеизложенного можно сделать вывод, что динамика развития реакции Будуара и с углеродом кокса и антрацита будет отличаться.

Для оценки развития реакции Будуара обратимся к термодинамике. Константа равновесия реакции (1) равна

$$\lg K_p = \frac{9128}{T} + 0,941 \left(\ln \frac{T}{298} + \frac{298}{T} - 1 \right) + 9,2. \quad (2)$$

Рассчитав константу равновесия по формуле 2 для различных температур можно получить направление реакции (таблица 1).

Таблица 1 – Константа равновесия реакции $CO_2 + 2 C \Leftrightarrow 2 CO$

T, °C	K_p
400	2,61E-14
500	1,12E-09
600	1,48E-06
700	0,00026
800	0,013
900	0,29
1000	3,55
1100	27,83
1200	157,33

Как видно из таблицы действительно реакция Будуара начинается при 700°C и уже активно развита при температуре 900°C и выше.

Начало реакции Будуара так же зависит от давления в системе. При высоком давлении данная реакция менее развита (рисунок 1)[3].

Зависимость равновесного состава газовой фазы от общего давления выражается следующим образом

$$P_{CO} = -\frac{K_P}{2} + \sqrt{\frac{K_P^2}{4} + K_P \cdot P}, \quad (3)$$

$$P_{CO_2} = P + \frac{K_P}{2} - \sqrt{\frac{K_P^2}{4} + K_P \cdot P}. \quad (4)$$

Установка, на которой производились исследования, схематично показана на рисунке 2. Установка состоит из емкости для пробы, в которую погружается навеска исследуемого материала, труб подачи CO₂ и отвода прореагировавшего газа, нагревательной печи, а также термопары для замера температуры процесса.

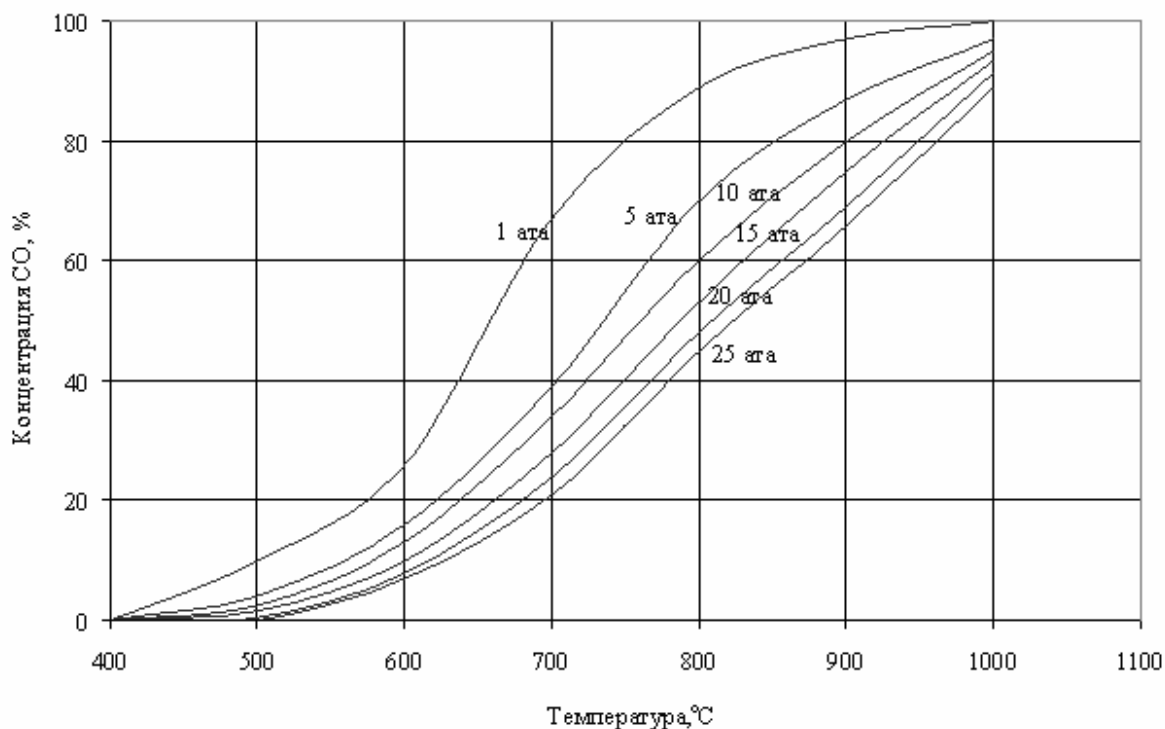


Рисунок 1 – Влияние давления на равновесный состав в системе C – CO – CO₂

Принцип работы установки заключается в контроле массы пробы до погружения в контейнер и после его изъятия через определенное время. Для поддержания постоянства прохождения реакции Будуара, в установку непрерывно подается газ CO_2 . Во время опыта проба антрацита нагревается до заданной температуры, за счет чего активируется процесс взаимодействия газа CO_2 с углеродом, продукты реакции уходят из установки в виде смеси CO и CO_2 .

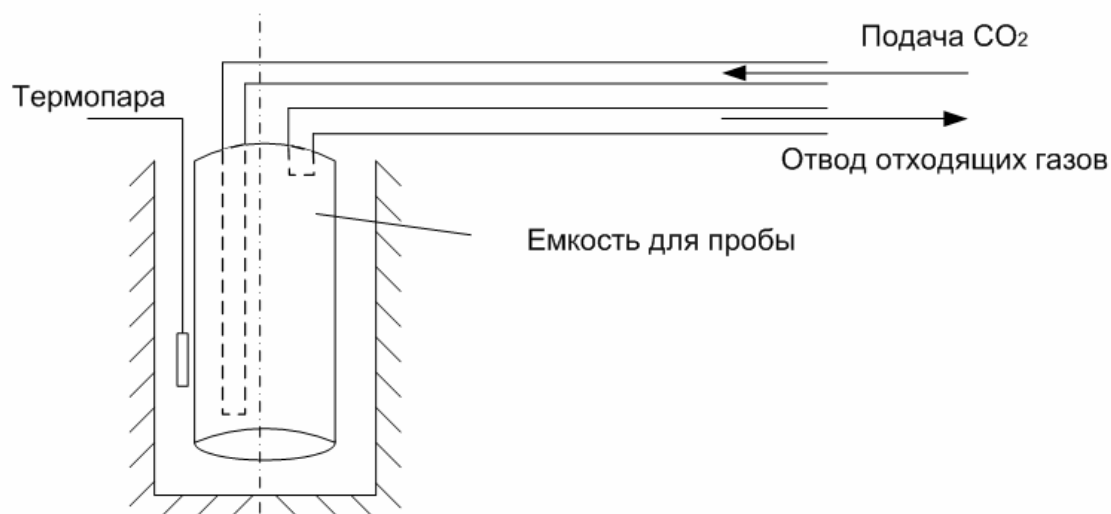


Рисунок 2 - Схема установки для определения массы углерода взаимодействующего с CO_2

Таблица 2 – Изменение массы пробы при взаимодействии с CO_2

Проба	Температура, °C	Начальная масса, г	Конечная масса, г	Изменение массы	
				грамм	%
Антрацит	400	225	225	0	0
Антрацит	600	235	230	5	2,2
Антрацит	700	230	225	5	2,2
Антрацит	700	210	208	7	3,4
Антрацит	800	222	210	12	5,7
Кокс	800	247	243	4	1,6

Для того, чтобы объективно оценить количество расходуемого антрацита в доменной печи, она была разбита на условные зоны (рисунок 3):

- 1-я зона – колошник ($T \approx 400^\circ\text{C}$);
- 2-я зона – средняя часть шахты ($T \approx 700^\circ\text{C}$);
- 3-я зона – нижняя часть шахты ($T \approx 800^\circ\text{C}$);
- 4-я зона – распар ($T \approx 1000^\circ\text{C}$).

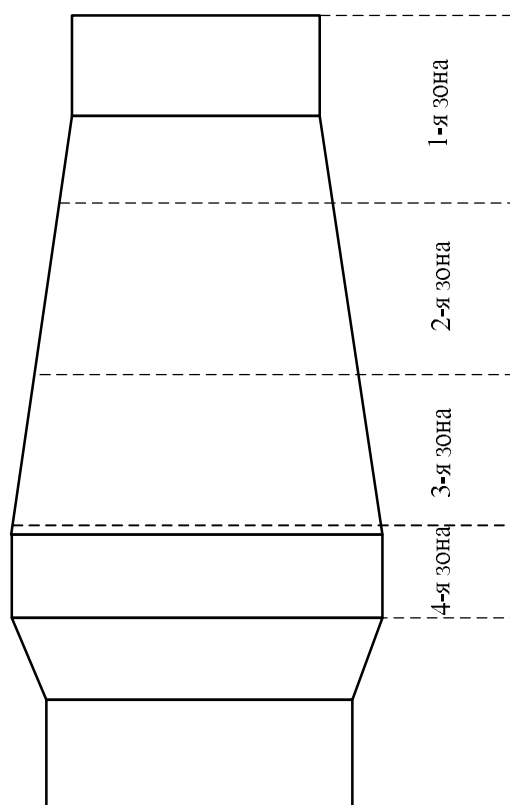


Рисунок 3 – Схема расположения температурных зон по высоте доменной печи

Выдержка 20 минут проб антрацита объективно не характеризует расход углерода при взаимодействии с CO_2 в рабочем пространстве печи. Для того, чтобы оценить долю взаимодействующего углерода антрацита с CO_2 , была проведено моделирование процесса происходящего в рабочем пространстве печи на установке, отображенная на рисунке 2. Известно, что материалы в доменной печи находятся 7-8 часов. Для моделирования было принято, что материалы с колошника до низа распара доходят за 5 часов. По схеме расположения температурных зон по высоте доменной печи (рисунок 3), определено время пребывания шихтовых материалов в каждой зоне. Так же из опытных данных известно давление, которые соответствуют каждой зоне. На основе выше изложенного сделан вывод, что время пребывания материалов в первой зоне составляет 95 минут при давлении газов 1 атм, во второй 120 минут при давлении газов 1,4 атм, в третьей 60 минут при давлении газов 1,9 атм и в 24 минуты четвертой при давлении 2,7 атм. Результаты моделирования представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Моделирования прохождения реакции Будуара в рабочем пространстве печи

Но- мер зоны	Время пребы- ва-ния, мин	Дав- ле- ние, ата	Темпе- ра-тура газов, °С	Массы пробы, г		Измене- ние мас- сы, г	Измене- ние массы, %
				до ис- пыта- ния	после испыта- ния		
1	95	1	400	224	208	16	7,1
2	120	1,4	700	220	195	25	11,4
3	60	1,9	800	224	196	28	12,5
4	24	2,7	1000	218	198	20	9,2

Из таблицы видно, что при прохождении материалов через 4 зоны расходуется 40,2% от массы материала на реакцию Будуара.

Нужно отметить, что при температуре 400°С израсходовалось 16 г антрацита. Как видно из таблицы 1, реакция не должна быть развитой при этой температуре, но из-за длительной выдержки пробы при этой температуре эта реакция протекает.

Наибольшее количество углерода антрацита расходуется в 3 зоне, так как при температуре 800°С константа равновесия реакции 1 смещается вправо и соответственно реакция значительно развита.

В четвертой зоне расходуется наибольшее количество углерода антрацита в единицу времени, так как в этой зоне высокая температура, что способствует значительному развитию реакции Будуара.

По результатам экспериментов были подсчитаны скорости расходования антрацита (таблица 4).

Таблица 4 – Скорость расходования углерода антрацита в зависимости от температуры

Номер зоны	Температура, °С	Скорость расходования угле- рода антрацита, %/мин
1	400	0,075
2	700	0,095
3	800	0,208
4	1000	0,375

Из таблицы 4 видно, что наибольшая скорость расходования антрацита наблюдается в нижних горизонтах печи при температурах 800-1000°С.

Применение антрацита осложняется тем, что необходимо предотвратить попадание его в зону коксовой насадки. Из показателей работы

ОАО «АМК» на доменной печи №3 применялось до 50 кг/т чугуна. Зная скорость расходования антрацита в доменной печи, можно определить массу угля дошедшей до распара.

Таблица 5 – Изменение массы антрацита в рабочем пространстве доменной печи

Номер зоны	Масса антрацита, кг/т чугуна	Изменение массы антрацита, кг/т чугуна
1	50	3,57
2	46,4	5,27
3	41,1	5,14
4	36,1	3,3
	32,7	

Из таблицы видно, что до нижних горизонтов печи доходит примерно 32,7 кг/т чугуна антрацита, который в дальнейшем расходуется в результате прямого восстановления при высоких температурах.

Выводы и направления дальнейших исследований. Определена масса антрацита, расходуемая на реакции Будуара при различных условиях. Найдена зависимость расхода количества антрацита при различных температурах, но при равных прочих условиях. Также получены степени взаимодействия CO_2 с антрацитом в рабочем пространстве при условиях соответствующих реальным показателям работы печи. В результате выполненной работы стало возможно рассчитать массу антрацита, расходуемую на реакции Будуара в рабочем пространстве печи. В дальнейшем предполагается разработать методику определения расхода антрацита на реакции прямого восстановления. Практически антрацит с расходом 50 кг/т чугуна расходуется до фурменной зоны и не попадает в горновую насадку из кокса, при этом дренажные условия горна сохраняются. Дальнейшее направление исследований – в лабораторных условиях определить кинетику газификации кусков антрацита в среде расплавленного агломерата с различным содержанием монооксида железа (FeO).

Библиографический список

1. Андронов В.Н. Экстракция черных металлов из природного и техногенного сырья. Доменный процесс / В.Н. Андронов. – Донецк: Норд-Пресс, 2009. – 377с.

2. Мишар Ж. Тепловые балансы и теплообмен в доменной печи (перевод с франц.) / Ж. Мишар. – М.: Металлургиздат, 1963. – 151с.

3. Доменное производство. Справочник Т. 1./ Под редакцией И.П. Бардина. – М.: Металлургиздат, 1963. – 648 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Петрушовым С.Н.

*д.т.н. Петрушов С.Н.,
к.т.н. Русанов И.Ф., к.т.н. Куберский С.В.,
Лупанов Д.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

СПЕКАНИЕ АГЛОМЕРАТА С ВВОДОМ В ПРИБОРТОВОЙ СЛОЙ ЧУГУННОЙ СТРУЖКИ

Наведені результати теоретичних та практичних досліджень, отримані залежності, що описують процес агломерації з введенням чавунної стружки до складу шихти прибортового шару на агломераційній машині.

Ключові слова: *агломерація, чавунна стружка, прибортовий шар, показники процесу агломерації, міцність агломерату.*

Приведены результаты теоретических и практических исследований, получены зависимости, которые описывают процесс агломерации с вводом чугуновой стружки в состав шихты прибортового слоя на агломерационной машине.

Ключевые слова: *агломерация, чугуновая стружка, прибортовой слой, показатели процесса агломерации, прочность агломерата.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами.

Содержание мелочи в готовом агломерате в значительной мере определяется условиями спекания агломерационной шихты у бортов спекательных тележек, где проявляется так называемый “пристеночный эффект”. Суть его заключается в том, что газопроницаемость слоя полифракционных материалов у стен значительно выше, чем слоев удаленных от стен. В результате повышенной газопроницаемости прибортового слоя шихты (его ширина составляет 50-100 мм или 2-4 % от общей ширины спекаемого слоя) скорость движения воздуха и газов в нем в 1,2-1,5 раза выше средней скорости их движения во всем слое. При такой скорости газов условия протекания всех физико-химических и тепловых процессов далеки от оптимальных. В результате спеченный агломерат прибортовой зоны имеет низкое качество.

В связи с этим возникает проблема изменить условия спекания агломерата в прибортовой зоне агломашины или же перейти на новую технологию, позволяющую в существующих условиях получить качественный агломерат.

Решение этой проблемы на основе научных изысканий позволит повысить качество агломерата прибортовой зоны и тем самым увеличить выход годного.

Анализ исследований и публикаций.

Проблеме улучшения качества агломерата, спеченного в прибортовой зоне агломашины, уделяется большое внимание. При этом основные разработки и предложения направлены на изменение условий спекания агломерата в прибортовой зоне путем снижения газопроницаемости слоя шихты в ней. В частности предложены различные устройства - уплотнители уложенного на спекательные тележки слоя ("лыжи", барабаны и др.) уменьшающие порозность слоя и тем самым увеличивающие его газодинамическое сопротивление.

В некоторых исследованиях проблема решается путем изменения структуры слоя шихты в прибортовой зоны. Достигается это увеличением высоты слоя шихты в этой зоне или же изменением условий сегрегации гранул шихты по его высоте [1,2].

Все известные предложения позволяют в той или иной мере решить проблему улучшения условий спекания агломерата в прибортовой зоне. Однако при этом вопрос тепловой нагрузки в прибортовой зоне решен не полностью, что не позволяет свести на нет негативное влияние условий спекания агломерата в этой зоне на его качество.

Постановка задачи. В работе поставлена задача: улучшить качество агломерата, спекаемого у бортов агломашины, не изменяя условий формирования структуры слоя шихты в этой зоне, а используя ее особенности. В частности, используя избыточный кислород этой зоны для увеличения тепловой нагрузки в ней путем окисления чугунной стружки вводимой в шихту, прилегающую к бортам агломашины.

Изложение материала и его результаты.

Проведенные по ширине одной из агломерационных машин ПАО «Алчевский металлургический комбинат» замеры скорости движения воздуха в слое сырой шихты показали следующее. По всей ширине машины, кроме бортовой зоны шириной около 100 мм, скорость движения воздуха примерно одинакова и в условиях комбината составляет 0,8-0,9 м/с. В прибортовой зоне она плавно возрастает, достигая максимального значения равного 1,2-1,5 м/с непосредственно у бортов.

Как показали расчеты такое увеличение скорости движения воздуха в слое прибортовой зоны вызвано тем, что пористость слоя в этой зоне на $0,08 - 0,10 \text{ м}^3/\text{м}^3$ выше, чем во всем остальном слое.

Пористость слоя прибортовой зоны может быть снижена путем ввода в слой любого мелкого материала, например, агломерационной руды. Однако при этом удастся лишь выровнять скорость движения воздуха в слое по ширине машины без компенсации потерь тепла через

борта спекательных тележек. В результате проблема получения качественного агломерата в прибортовой зоне будет решена не в полной мере.

Для увеличения тепловой нагрузки в слой необходимо вводить не инертный материал, а какой-либо теплоноситель. В частности таким материалом может быть мелкая чугунная стружка. Соответствующие расчеты показали, что максимальное количество вводимой стружки, которое может быть введено в слой, составляет около 18 % от массы шихты в прибортовой зоне.

С целью определения влияния ввода стружки в прибортовую зону спекаемого слоя в лаборатории ДонГТУ проведены специальные исследования.

При проведении исследований в центральную часть установки загружалась обычная агломерационная шихта, а в прибортовую - шихта, содержащая чугунную стружку. Спекания проводились в цилиндрической чаше диаметром 0,2 м и высотой 0,4 м. Стружка вводилась в прибортовое кольцо шириной 0,01 м в количестве 10- 20 % от общей массы шихты загруженной в эту кольцевую зону.

Насыпная масса шихты со стружкой возрастала пропорционально ее количеству в шихте. Если насыпная масса шихты без стружки равнялась 1870 кг/м^3 , то при введении в нее стружки в количестве 0,1 и 0,2 от массы шихты ее насыпная масса в условиях опытов была равна 2170 и 2450 кг/м^3 соответственно. Учитывая, что стружка не участвовала в процессе окомкования шихты, а вводилась в слой непосредственно при загрузке шихты в установку, увеличение насыпной массы приводило к снижению пористости слоя в прибортовой зоне. Обычно пористость слоя агломерационной шихты равна $0,47 - 0,54 \text{ м}^3/\text{м}^3$. В прибортовой зоне она выше на $0,05 - 0,07 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

В результате проведенных исследований установлено, что шихта прибортовой зоны после ввода в слой стружки спекается примерно в таких же условиях, как и шихта в центральной части установки. При вводе стружки в прибортовую зону выравнивается температура по сечению спекаемого слоя. Если при обычном спекании температура в прибортовой зоне не превышала $600-700^\circ\text{C}$, то при вводе стружки она была близка к температуре в центре чаши (возросла до $1200-1250^\circ\text{C}$).

Повышение температуры в прибортовой зоне явилось следствием окисления чугунной стружки. Физико-химические закономерности этого процесса подробно описаны в работе [3].

При вводе чугунной стружки в прибортовую зону выход годного агломерата крупностью более 5 мм возрастал пропорционально количеству введенной стружки, - на 1-2 %.

В результате прочность агломерата по всей установке стала примерно одинакова. Определенный по методике, изложенной в работе [4]

коэффициент прочности агломерата центральной зоны был равен 1,32, а агломерата прибортовой зоны – 1,34.

Разработанная технология опробована в аглоцехе Алчевского металлургического комбината. При этом порядок проведения экспериментов был следующий.

Вначале, во время кратковременной остановки агломашины, перед зажигательным горном в слой у одного из бортов спекательной тележки на глубину 150 мм был заглублен в шихту П-образный стальной лист толщиной 1 мм. Лист ограничивал возле борта тележки прямоугольную зону шириной 100 мм и длиной 350 мм.

Спекание агломерата во время проведения эксперимента проводилось при вакууме 840 мм вод. ст., скорости движения аглоленты 1,5 м/мин и высоте слоя 350 мм. Температура в зажигательном горне была равна 1020°C.

После завершения процесса агломерации и выхода тележки с экспериментальным спеком в зону охлаждения производилось извлечение куска, ограниченного П-образным листом, для проведения исследований. При извлечении спека из ограниченной зоны было установлено, что реально можно извлечь спек на глубину не более 150 мм. Поэтому в последующих двух опытных спеканиях стружка загружалась в слой толщиной не более этой величины.

В этих опытных спеканиях чугунная стружка вводилась в слой в количестве 1 и 2 кг, что в пересчёте на всю спекаемую аглошихту при двухсторонней загрузке составит приблизительно 0,3 % и 0,6 % соответственно. Загрузка заданного количества стружки производилась на тележку вдоль борта на глубину приблизительно 150 мм и ширину приблизительно 100 мм. Загрузку стружки проводили по возможности равномерно, а после загрузки обязательно перемешивали стружку с шихтой для предотвращения образования плотной корки на поверхности спека. После загрузки стружки, в шихту заглублялся П-образный лист.

Следует отметить, что во всех трёх спеканиях стальной П-образный лист в ходе агломерации шихты с глубины приблизительно 20 мм полностью окислился. Включений чугунной стружки при осмотре спека также не было обнаружено, что полностью согласуется с ранее установленными авторами закономерностями поведения при агломерации металлического железа [3].

После извлечения спека проводился его рассев на ситах 3 и 5 мм и готовились пробы для химического анализа. Результаты отсева спеков и их полные химические анализы приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 – Результаты рассева экспериментальных спеков

Фракция	Спек без стружки		Спек с вводом в прибортовой слой 1 кг стружки		Спек с вводом в прибортовой слой 2 кг стружки	
	кг	%	кг	%	кг	%
+ 5	2,60	94,55	2,7	95,07	2,60	95,60
3 - 5	0,05	1,82	0,06	2,11	0,07	2,57
- 3	0,10	3,63	0,08	2,81	0,05	1,84
Всего	2,75	100	2,84	100	2,72	100

Таблица 2 – Химический анализ спеков с различным содержанием стружки

Количество введенной стружки, кг	Содержание компонентов, %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	MnO
0	9,27	0,93	9,78	1,55	56,3	24,9	52,8	0,187
1	8,87	0,88	8,97	1,38	57,3	28,1	50,7	0,161
2	8,28	0,91	9,33	1,5	58,3	33,9	45,7	0,232
Количество введенной стружки, кг	Содержание компонентов, %							
	P	S	TiO ₂	Zn	Pb	K ₂ O	Na ₂ O	P
0	0,032	0,087	0,047	0,009	0,014	0,1	0,14	0
1	0,037	0,072	0,046	0,012	0,015	0,1	0,15	1
2	0,033	0,175	0,048	0,009	0,015	0,08	0,15	2

Как следует из таблицы 1, выход фракции + 5 мм при вводе в прибортовую зону чугуна стружки увеличивается пропорционально ее количеству. При этом прирост выхода фракции в условиях эксперимента составлял примерно 0,5 % на каждый кг введенной стружки.

Изменение количества фракции + 5 мм, явилось следствием повышения температурного уровня в прибортовой зоне, которое повлияло также и на изменение химического состава полученного агломерата.

Полученные данные позволяют полагать, что при полномасштабном внедрении предложенной технологии выход годного агломерата возрастет на 1,2-2,0 %.

Как следует из анализа данных, приведенных в таблице 2, при вводе в слой чугунной стружки содержание Fe в агломерате возрастает пропорционально количеству введенной стружки. В условиях опытов содержание железа в спеке прибортовой зоны возрастало на 1 % на каждый кг введенной стружки. В пересчете на весь агломерат рост содержания железа в нем составит 0,1-0,2 %.

Согласно данным таблицы 2 при вводе в слой стружки содержание FeO в спеке возрастает также пропорционально количеству введенной стружки, что является следствием окисления металлического железа. Характерно, что при относительном увеличении расхода стружки металлическое железо в большей степени окисляется до FeO. Если при вводе в слой 1 кг стружки до FeO окислилось 58,7 % железа (остальное окислилось до Fe₂O₃), то при вводе 2 кг стружки – 75,2%.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Проанализировав результаты экспериментов можно сделать следующие выводы.

Ввод чугунной стружки в прибортовую зону агломашины позволяет существенно изменить условия спекания агломерата в этой зоне. В результате увеличивается выход годного агломерата на 1,2-2,0 %, при повышении содержания Fe в агломерате на 0,1-0,2 %.

Введенное в слой металлическое железо в количестве до 20 % от массы шихты окисляется полностью до FeO и Fe₂O₃. При этом, чем больше введено стружки, тем в большей степени металлическое железо окисляется до FeO, что создает предпосылки для снижения расхода твердого топлива.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку теоретических основ использования чугунной стружки как в прибортовом слое аглошихты, так и при агломерации железорудного сырья в целом.

Библиографический список

1. Рудь Ю.С. Интенсификация процесса спекания перераспределением общего потока воздуха, просасываемого через слой агломерационной шихты / Ю.С. Рудь, В.Т. Кучер // *Теплотехника и газодинамика агломерационного процесса*. - Киев: Наукова думка. – 1983. – С. 133.

2. Авт. св. 1388443, МКИ С 22 В 1/16, Способ агломерации железосодержащих материалов / И.Ф. Русанов, С. Н. Петрушов, С. Н. Кубышкин и др.// *Опубл. Бюл. № 14.* – 1988.

3. Петрушов С.Н. Определение прочности материалов по результатам их дробления / С.Н. Петрушов, И.Ф. Русанов, Д.Б Остапенко, Р.И. Русанов, Д.С. Петрушов // *Теория и практика производства чугуна: Сб. тр. Междун. НТК (Кривой Рог, КГГМК “Криворожсталь”, 24-27 мая 2004 г).* – С. 499-501.

4. Петрушов С.Н. Особенности спекания агломерата из шихты, содержащей металлическое железо / С.Н. Петрушов, И.Ф. Русанов, Р.И. Русанов, Д.В. Лупанов // Сборник научн. трудов ДонГТУ. - вып. 19. - 2005. – С. 142-149.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.

*д.т.н. Новохатский А.М., Михайлюк Г.Д.,
к.т.н. Тищенко О.М., Скляр А.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ВЛИЯНИЕ ОПОЛЗАНИЯ ГАРНИСАЖА НА ХОД ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ

Проаналізовано аналіз впливу оповзання гарнісажу зі стін кладки доменної печі на вид електрограм, вимірюваних на кожусі горна. Визначено вплив потрапляння в горн непроплавлених мас на зміну параметрів доменного процесу. Запропоновано заходи щодо стабілізації ходу плавки.

Ключові слова: доменна піч, гарнісаж, електрограма, хід доменної печі.

Проанализирован анализ влияние оползания гарнисажа со стен кладки доменной печи на изменение показаний электрограмм, измеряемых на кожухе горна. Определено влияние попадания в горн непроплавленных масс на изменение параметров доменного процесса. Предложены мероприятия по стабилизации хода плавки.

Ключевые слова: доменная печь, гарнисаж, электрограмма, ход доменной печи.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

При освоении мощных доменных печей чаще стали встречаться расстройства горна, которые приводят к похолоданию печи, неполному выпуску продуктов плавки, к колебаниям химического состава целевого продукта, увеличению длительности выпусков продуктов плавки, массовому горению воздушных фурм и, в итоге, к ухудшению технико-экономических показателей плавки.

Анализ исследований и публикаций.

Эти расстройства и их последствия связаны с загромождением горна при оползаниях гарнисажа и приходом в нижнюю часть печи не проплавленных масс, периодически обрушающихся со стенок кладки распара, заплечиков и нижней части шахты. Наиболее активное формирование и оползание гарнисажа наблюдается на мощных доменных печах с эксплуатацией кладки более 2-х лет, имеющих испарительное охлаждение и работающих на железорудной части, состоящей в основном из агломерата [1].

Для определения момента оползания гарнисажа используют средства для определения потерь тепла через кладку печи, однако эта информация имеет инерционный характер и является не совсем объективной [2].

Постановка задачи.

Целью данной работы является разработка современных средств контроля работы доменной печи, отклонения от нормального режима, и разработка мероприятий по стабилизации хода плавки.

Изложение материала и его результаты.

На четырех доменных печах №1, 3, 4, 5 ПАО «Алчевский металлургический комбинат» внедрены системы контроля состояния горна [3], которые используют основную информацию об изменениях электрограмм на кожухе нижней части печи в 10-14 секторах, в зависимости от её объема, и ряд других показателей.

Системы по заданному алгоритму решают ряд задач: контроль изменения уровня расплава по окружности горна печи в период наполнения и опорожнения жидкими продуктами плавки; оценка дренажных условий и тенденции изменения теплового состояния печи.

Кроме того, при исследовании информации системы было определено, что они чувствительны к оползанию гарнисажа со стен печи. При этом нарушается электропроводность внутри печи и на кожухе изменяется хаотично (рисунок 1).

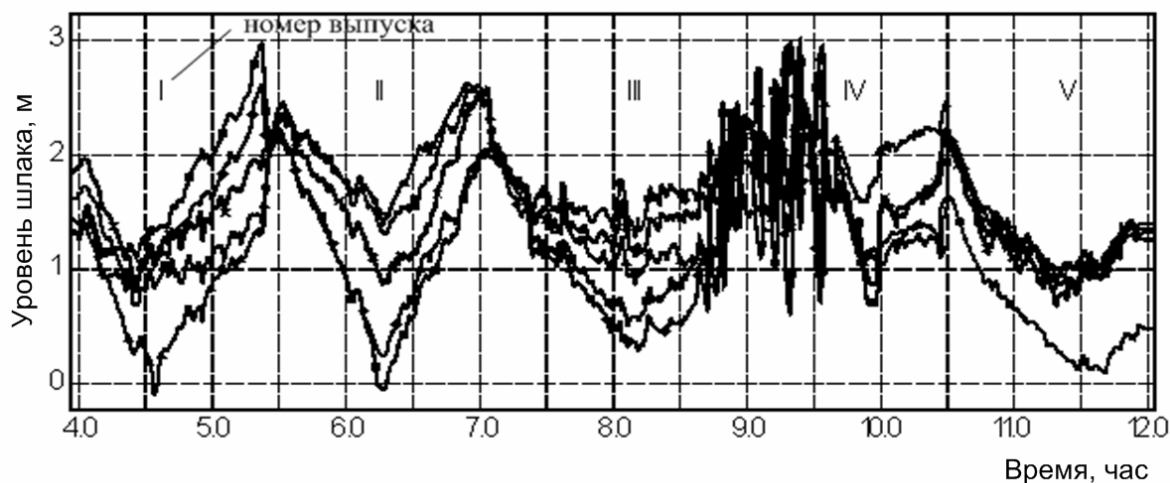


Рисунок 1 – Изменение уровня шлака по окружности горна доменной печи за пять выпусков и наполнений продуктов плавки

На рисунке 1 представлено, определяемо системой контроля состояния горна ДП №1 объемом 3000 м³ изменения уровня шлака в секторах воздушной фурмы №1, 3, 5, 7, 9, 11, 13.

В таблице 1 представлен режим выпусков продуктов плавки через канал летки.

В период выпуска величина отображаемого системой уровня шлака уменьшается пропорционально изменения его уровня в горне. Наиболее изменяется уровень шлака в районе чугунной летки, а с противоположной стороны горна – минимально, поскольку слой шлака в горне, согласно законом гидродинамики, образует депрессионную воронку.

Таблица 1 – Режим выпусков продуктов плавки

№ выпуска	I	II	III	IV	V
№ выпуска (плавильный журнал)	16450	16451	16452	16453	16454
время начала выпуска, час- мин	4-10	5-30	7-10	9-20	10-40
время оконча- ния выпуска, час-мин	4-25	6-20	8-15	10-10	11-30

В период I выпуска и наполнения, показанных на рисунке 1, дренажные условия были удовлетворительны, поскольку уровень шлака с противоположной от летки стороны горна доменной печи опускался на уровень 1,1 м относительно горизонта канала чугунной летки.

В период II выпуска, а особенно – III и IV выпусков – дренажные условия ухудшались и восстановились на V выпуске.

Технологический персонал обнаружил в 9 часов 20 минут, через фурменные «гляделки», появление в очагах горения темных кусков не проплавленных масс (гарнисажа). Анализ электрограмм показал, что начало оползания гарнисажа произошло в 7 часов 20 минут, особенно усилилось в 8 часов 35 минут. Хаотическое изменение разности электропотенциалов по высоте кожуха горна печи обусловлено изменением электропроводности гарнисажа в результате его разрушения и оползания в нижнюю зону печи, в приемник шлака и чугуна.

Неровный ход доменной печи начался в 7 часов 50 минут, на что указывает характер изменения верхнего перепада давления доменного газа, а так же повышение нижнего перепада давления (рисунок 2).

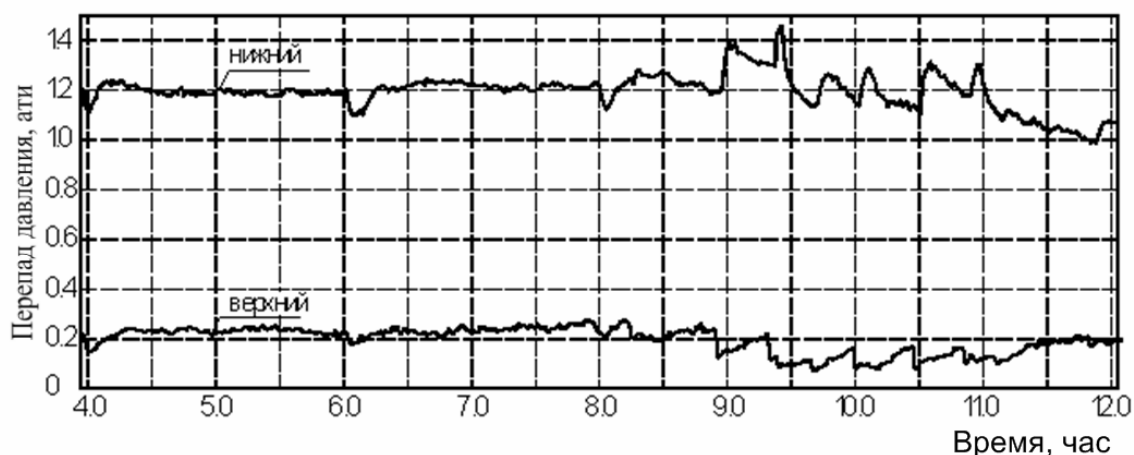


Рисунок 2 – Изменение нижнего и верхнего перепада давлений

Непрерывное повышение нижнего перепада давления обусловлено попаданием кусков гарнисажа в фурменные очаги горения перед струей дутья, перед рыльным срезом фурмы, при этом создается сопротивление движению горновых газов. Возникающая ситуация провоцирует нижнее подвисание столба шихтовых материалов, что является на печи не допустимым.

Принято решение об изменении параметров дутьевого режима путем уменьшения расхода дутья с 8 часов 00 минут (рисунок 3).

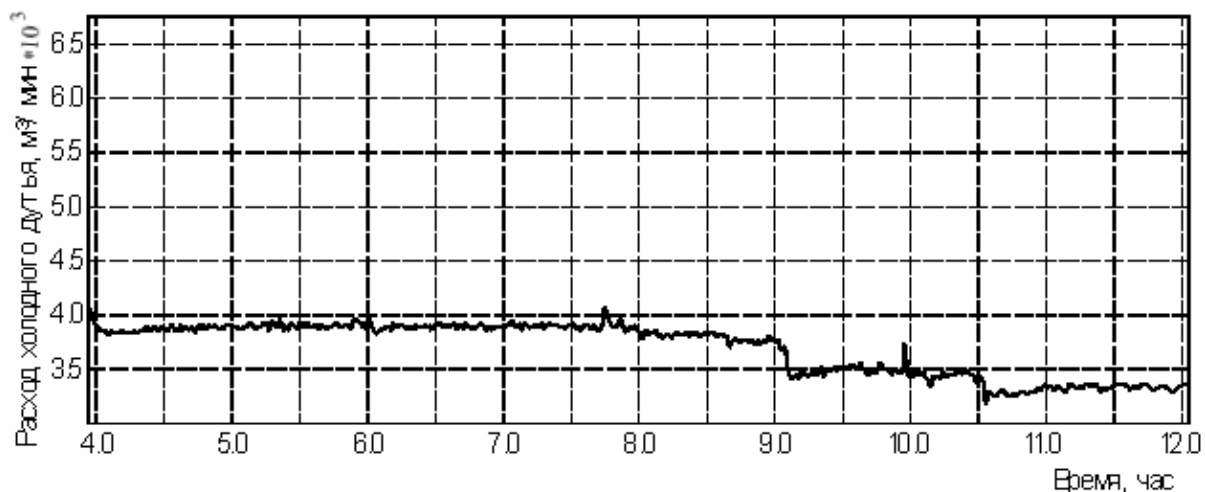


Рисунок 3 – Изменение расхода холодного дутья

Кроме того, для стабилизации газодинамики доменной печи снизили температуру дутья на 50 °С в 9 часов 30 минут (рисунок 4), что с другой стороны ведет к понижению температуры продуктов плавки в

горне печи и изменению химического состава чугуна и шлака, что более усугубляет тепловое состояние горна в период оползания гарнисажа.

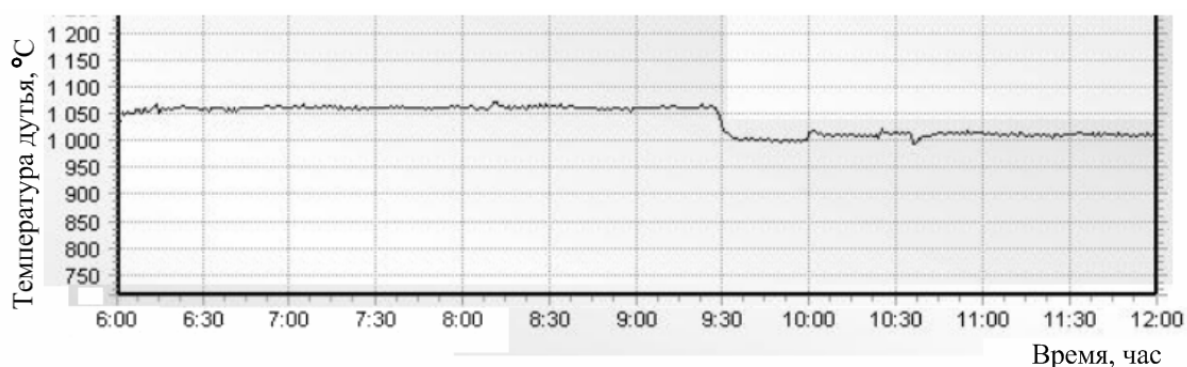


Рисунок 4 – Изменение температуры горячего дутья

В таблице 2 представлено изменение химического состава чугуна и шлака в период оползания гарнисажа.

Таблица 2 - Химический состав чугуна и шлака

№ выпуска (плавильный журнал)	16450	16451	16452	16453	16454	16455	16456	16457	16458
Содержание кремния в чугуна [Si], %	0,53	0,53	0,45	0,51	0,53	0,45	0,62	0,56	0,52
Содержание марганца в чугуна [Mn], %	0,46	0,45	0,43	0,39	0,47	0,44	0,47	0,46	0,41
Содержание серы в чугуна [S], %	0,039	0,047	0,052	0,054	0,042	0,035	0,03	0,029	0,031
Основность шлака В	1,16	1,14	1,1	1,14	1,15	1,18	1,21	1,19	1,18

Содержание кремния [Si] и марганца [Mn] в чугуна, как видно из таблицы 2, уменьшилось не значительно, основность шлака выдерживалась практически на одном и том же уровне.

Обычно в гарнисаже накапливается сера и при попадании его в горн вызывает повышение содержания серы в чугуна [S]. При более массивном оползании гарнисажа содержание серы в чугуна может быть большим, что повлечет за собой получение не кондиционного конечного продукта (брак).

Выводы и направления дальнейших исследований.

Оползание гарнисажа со стен кладки влечет за собой нарушение хода доменной печи. Попадание не проплавленных масс гарнисажа в горн печи понижает температуру расплавов и изменяет химический состав чугуна. Повышает содержание серы в чугуне [S], которая может привести к браку конечного продукта. Регулирование параметров дутьевого режима предотвращает подвисание столба шихтовых материалов. В период оползания гарнисажа уменьшается производительность печи и снижается тепловое состояние горна.

Момент оползания гарнисажа точно и своевременно определяется по характеру изменения электрограмм, снимаемых с кожуха горна печи.

В дальнейших исследованиях следует доработать эффективность регулирования хода доменной печи.

Библиографический список

1 Новохатский А.М. Динамика нарастания и оползания гарнисажа на стенках футеровки доменной печи / А.М.Новохатский // Сборник трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2007. – Вып. 24. - С. 195-204.

2. Новохатский А.М. Система контроля потерь тепла в нижней части шахты распара и заплечиков / А.М. Новохатский, Г.Д. Михайлюк //Сборник научных трудов ДонбГТУ. – Алчевск, 2007. – Вып. 23. – С.153-158.

3. Новохатский А.М. Система контроля работы горна доменной печи / А.М. Новохатский, Г.Д. Михайлюк // - Сборник научных трудов ДонГТУ. – Алчевск, 2003. – Вып. 17 – С. 276-282.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Петрушовым С.Н.

*д.т.н. Смирнов А.Н.
(ГВУЗ «ДонНТУ», г. Донецк, Украина),
к.т.н. Куберский С.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина),
Шутов И.В., Спиридонов Д.В.
(ОАО «АЗОЦМ», г. Артемовск, Украина)*

КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ МИКРО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

Проведена оцінка конкурентоспроможності мікро металургійних заводів і запропоновано основні підходи до вибору ефективної технологічної схеми виробництва металопродукції, а також обладнання для її реалізації.

Ключові слова: мікро металургійний завод, мінімізація витрат, стратегія спеціалізації, побудова, плавильний агрегат і розливний ківш малої одиничної потужності.

Произведена оценка конкурентоспособности микро металлургических заводов и предложены основные подходы к выбору эффективной технологической схемы производства металлопродукции, а также оборудования для ее реализации.

Ключевые слова: микро металлургический завод, минимизация издержек, стратегия специализации, построение, плавильный агрегат и разливочный ковш малой единичной мощности.

В последние десятилетия в мировой металлургии достаточно четко обозначилась тенденция применения микро металлургических заводов (годовой объем 5-50 тыс. т продукции) для производства металлопродукции небольшими партиями. Эти заводы обычно ориентированы на производство заготовок из легированных сталей, а также цветных сплавов и снабжают металлопродукцией предприятия определенного промышленного региона [1,2].

Микро-заводы могут успешно решать проблемы рационального снабжения металлопродукцией так называемых «неметаллургических» регионов, используя региональный ресурс металлолома. С другой стороны, в рамках микро-завода удастся сконцентрировать внимание на нуждах одного сегмента рынка или конкурентной группы покупателей

(без стремления охватить весь рынок) с целью удовлетворения потребностей выбранного целевого сегмента определенной металлопродукцией лучше, чем конкуренты. В этом случае завод должен иметь высокоспециализированное производство и качественный маркетинг, для того чтобы стать лидером в своей области.

Поэтому основной целью данной работы было оценить конкурентоспособность микро металлургических заводов в условиях современного состояния отечественной и мировой металлургической отрасли, а также предложить основные подходы к выбору эффективной технологической схемы производства металлопродукции и оборудования при использовании агрегатов для плавки металлов небольшой единичной емкости.

Предпосылками для распространения и успешного функционирования микро металлургических заводов является наличие в регионе устойчивых источников металлолома легированных сталей и цветных сплавов, что, как правило, связывается с крупными и металлоемкими машиностроительными предприятиями. Также весьма важным фактором является наличие в регионе источников вторичных ресурсов и металлургических отходов, которые можно использовать в определенных количествах в технологическом цикле выплавки, внепечной обработки и разливки металла.

Основной составляющей стратегии микро завода является минимизация издержек производства и реализации своей продукции. Такие заводы должны иметь рациональную организацию производства, современную технологию, оптимальную систему распределения продукции, жёсткий контроль над производством и сбытом, стабильные инвестиции, высокую техническую компетентность персонала и стандартизованную продукцию. Кроме того, необходим тщательный контроль за постоянными расходами, инвестиции в производство, всесторонняя проработка эффективности производства новых видов продукции, пониженные сбытовые издержки и т.п. Таким образом, лидерство за счёт экономии на издержках дает надёжную защиту потому, что первыми на себе действие конкурентной борьбы испытывают наименее эффективные фирмы. При этом наиболее опасными конкурентами для микро заводов являются действующие металлургические заводы с большими объемами производства, поскольку они, как правило, имеют несколько меньшие удельные затраты на тонну металлопродукции, но выпускающие и реализующие эту продукцию большими партиями.

Низкие издержки при производстве металлопродукции на микро заводах, прежде всего, достигаются за счет: использования металлолома данного экономического района, что исключает нерациональные перевозки на большие расстояния; потребления значительной части проката (или заготовки) непосредственно в районе его производства (то есть в

индустриально-территориальном комплексе); возможности согласования работы основных технологических агрегатов и снижение энергозатрат; использования технологии непрерывной разливки металла, небольших площадей, требующихся для размещения оборудования, величина которых примерно в 8-15 раз ниже, чем для традиционных металлургических заводов; сравнительно коротких сроков проектирования и строительства микро-завода; сравнительно низкой стоимости завода и возможности его модернизации и т.п. Благодаря высокой гибкости производства на таких предприятиях изготавливается продукция небольшими партиями в зависимости от нужд потребителей внутри региона, а также на внешнем рынке.

Говоря о стратегии специализации в производстве продукции необходимо отметить, что она позволяет добиться высокой доли рынка в целевом сегменте, но всегда ведет к малой доле рынка в целом. Стратегия специализации может опираться как на дифференциацию (фиксация определённого сегмента ранка), так и на лидерство по издержкам, либо на то и на другое, но только в рамках целевого сегмента.

В мировой металлургической практике большое распространение получили мини металлургические заводы с объемами производства в диапазоне 80-1500 тыс. т стали в год и более. Современное построение мини металлургических заводов для производства металлопродукции из качественных сталей предполагает наличие высокопроизводительного сталеплавильного агрегата (дуговой сталеплавильной печи), обеспечивающего, как правило, выплавку железоуглеродистого полупродукта. В дальнейшем эта сталь подвергается комплексной доводке непосредственно в ковше (продувка аргоном, рафинирование, легирование, вакуумирование, подогрев и пр.), что обеспечивает достижение требуемых кондиций металла по химическому составу и температуре. Разливка стали осуществляется на высокопроизводительных машинах непрерывного литья на заготовки, сечение которых максимально приближено к сечению готовой продукции (с учетом прокатки заготовки). Такая схема (рисунок 1) может рассматриваться как весьма универсальная, поскольку позволяет осуществлять выплавку и разливку стали по модульной схеме. При этом производительность модуля определяется емкостью плавильного агрегата, временем выплавки металла и его выпуска в ковш.

Между тем, рассмотренная на рисунке 1 схема построения сталеплавильного модуля имеет определенные технологические и функциональные ограничения, которые, прежде всего, проявляются при уменьшении единичной мощности плавильного агрегата и соответственно вместимости разливочного ковша. Лимитирующим звеном при этом является конфигурация (диаметр) разливочного ковша, которая приобретает ре-

шающее значение при организации технологии подогрева металла электрическими дугами. В целом при уменьшении вместимости (и диаметра) ковша наблюдается повышенный износ футеровки рабочего слоя за счет ее выгорания в области дуг, а также увеличиваются удельные тепловые потери, что ограничивает время пребывания металла в ковше. Как показывает практика, подогрев металла в ковше электрическими дугами представляется затруднительным уже для ковшей вместимостью 12-15 тонн и менее [3,4].

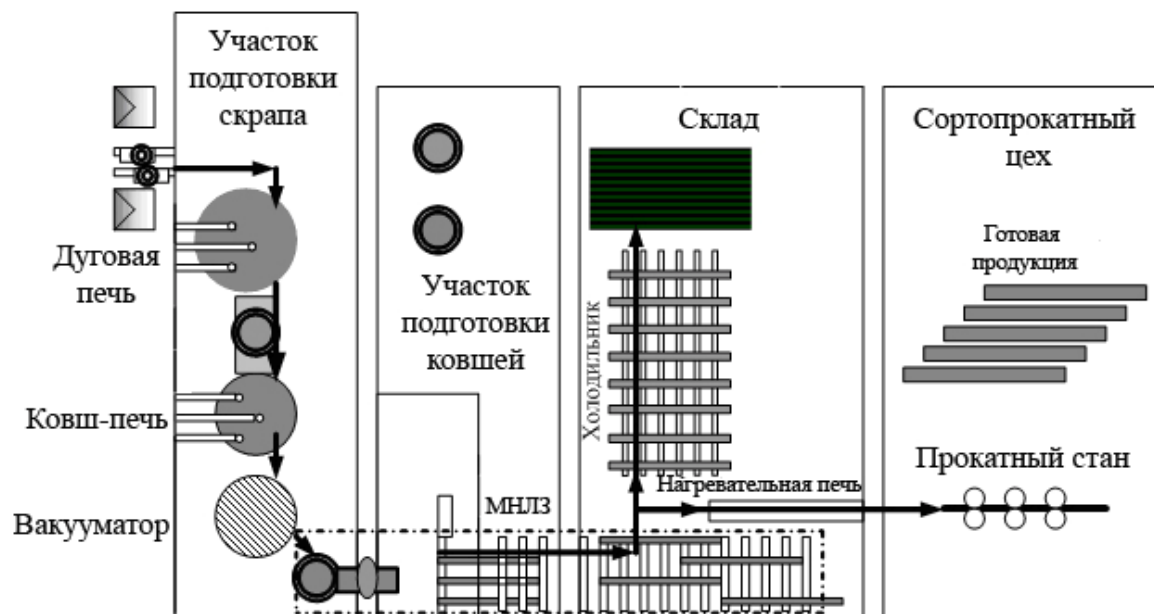


Рисунок 1 – Схема современного мини металлургического завода для производства длинномерного проката

В металлургической практике широкое применение концепция микро металлургических заводов получила для заводов по обработке цветных металлов [5,6]. Технологическая структура таких заводов предполагает переработку цветного лома и его переплав в специализированных цехах с получением заготовки высокого качества, которая затем перерабатывается до конечной продукции методами обработки металла давлением (прокатка, прессование и пр.).

Весьма успешно концепция построения микро металлургических модулей реализована на ОАО «Артемовский завод по производству цветных металлов» (ОАО «АЗОЦМ»), что позволило предприятию в кратчайшие сроки провести серьезную модернизацию технологического цикла выплавки и разлива меди и ее сплавов [7]. Важнейшим элементом реконструкции стало сооружение на предприятии рафинирующей

отражательной печи вместимостью 120 т, которая обеспечивает до 120-150 т жидкой рафинированной меди в сутки.

На ОАО «АЗОЦМ» для получения рафинированной меди применяют разнообразное вторичное медное сырье. Содержание меди во вторичном сырье колеблется в широких пределах. При этом состав вторичного медного сырья также весьма разнообразен. Например, стружка содержит механические примеси железа, оксидов кремния, алюминия, которые накапливаются в ней при механической обработке, сборе и хранении. Медная стружка может содержать до 10% землистого засора и до 15% стальных присадок. Крупный лом представлен отработанными автомобильными и тракторными радиаторами, корабельными винтами, теплообменниками, различными трубами. Крупный лом засорен черными металлами до 50%, а лом теплообменного оборудования накипью (карбонатами металлов).

Рафинирующая печь оснащена двумя горелками, работающими на воздушно-газовой смеси или дополнительной кислородной для ускорения расплавления лома. Выше уровня зеркала расплава расположены пять дутьевых фурм. В задней стенке печи вмонтированы продувочные фурмы, которые во время плавки посредством наклона печи погружаются под зеркало и в них подается воздух или газ в зависимости от протекания того или иного технологического процесса. В процессе рафинирования меди используются специальные флюсы. Загружаемые флюсы при расплавлении взаимодействуют с расплавом и образующиеся в результате химической реакции продукты взаимодействия переходят в шлак. Шлак после каждой присадки флюса подлежит удалению с поверхности расплава через шлаковое окно. Удаление шлака производят специальными скребками.

Из печи огневого рафинирования жидкий металл в зависимости от производственной программы и назначения поступает на одну из линий по производству медной продукции (рисунок 2).

В связи с тем, что завод изготавливает свыше 50 марок медных сплавов на практике реализована оригинальная технология передачи жидкой меди из печи по специальным желобам (рисунок 3). В этих желобах созданы все условия для минимизации негативных факторов воздействия на расплав. Стабильность температуры расплава обеспечивается с помощью работы газовых горелок, которые расположены в съемных крышках желобов, и оптимального подбора необходимых футеровочных материалов. Для предотвращения насыщения меди газами установлено ограничение по содержанию СО в атмосфере желобов в пределах 2,5-3,5 %. Это обеспечивает дополнительный экономический эффект за счет энергосбережения вследствие исключения цикла охлажде-

ния меди (в слитках) и ее последующего расплавления (на участке производства сплавов).

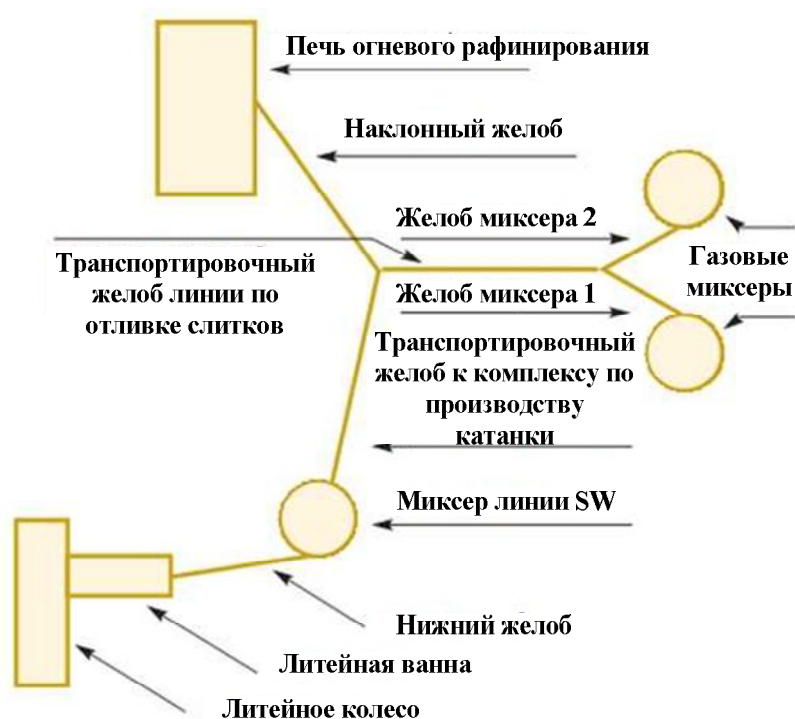


Рисунок 2 – Схема транспортировки жидкой меди к различным технологическим линиям получения продукции



Рисунок 3 – Желоб для транспортировки рафинированной меди

Перемещение жидкого металла от плавильного агрегата по транспортировочным желобам составляет от 4 до 7 минут. Скорость движения металла регулируется с помощью угла наклона печи, при этом выбирается такая скорость движения металла по транспортировочным желобам, чтобы обезопасить труд плавильщиков, избежать переливов и разбрызгивания металла. Система желобов позволила обеспечить новые технологические преимущества, заключающиеся в возможности получения из металла одной плавки заготовок для прокатки медной катанки, а также круглых и плоских слитков на машинах полунепрерывной разливки (МПНЛЗ). Это обеспечивает рост производительности печи, поскольку снижается время ее простоев вследствие значительной продолжительности технологического процесса разливки. Соответственно достигается экономия энергетических и трудовых ресурсов.

Параллельно со сливом на линию транспортировочных желобов по производству медных слитков на МПНЛЗ металл из печи сливается в зафутерованный и разогретый до 800°C промежуточный ковш полезной емкостью 5,5 т. После слива металла в промковш зеркало металла покрывают измельченным древесным углем для предотвращения газонасыщения и остывания расплава. Для того чтобы снижение температуры было минимальным промковш накрывают футерованной крышкой. Скорость перемещения промковша с металлом из одного плавильного цеха в другой составляет до 10 км/ч. За время транспортировки металла и его заливки в разливочный агрегат температура металла снижается с 1190°C до 1170°C , что позволяет без дополнительных затрат на подогрев металла производить процесс разливки.

Для производства медных слитков на МПНЛЗ используются два газовых миксера полезной вместимостью 6 т каждый. В настоящее время на ОАО «АЗОЦМ» получают медные слитки круглого сечения (максимальным диаметром 400 мм) и плоские слитки (максимальным размером 240×1300 мм) массой до 11 т и длиной до 5 м. На долю производства медных слитков комплекса огневого рафинирования приходится до двух третьих от общего объема выплавки металла в печи огневого рафинирования.

Отливка медных слитков осуществляется непрерывным методом на МПНЛЗ в медные водоохлаждаемые кристаллизаторы через разливочную емкость миксера и систему стопорно-разливочного дозирующего устройства. Охлаждение слитка под кристаллизатором осуществляется водой, подаваемой методом душирования. К особенностям такой разливки следует отнести сравнительно низкую скорость вытяжки заготовки и высокую интенсивность отвода тепла от разливаемого металла, что в совокупности с высокой теплопроводностью меди обуславливает достаточно сложные условия работы стенок кристаллизатора. При этом про-

цесс затвердевания слитка меди и большинства ее сплавов обычно заканчивается в пределах кристаллизатора, имеющего длину 300-550 мм [8].

Анализируя особенности технологического построения рассмотренного металлургического комплекса ОАО «АЗОЦМ» и сравнивая его с классическим построением мини-заводов, следует выделить некоторые характерные особенности, существо которых сводится к следующему:

- проведение определенной части технологических операций рафинирования металла непосредственно в плавильном агрегате или на выпуске металла из него;
- минимизация времени пребывания металла в разливочном ковше, что обеспечивает снижение потерь тепла жидким металлом;
- применение для доводки металла (рафинирование, усреднение) специальных емкостей типа промежуточный ковш или миксер, что позволяет гармонизировать процесс разливки в части его сопряжения с циклом выплавки;
- применение для разливки метода непрерывного литья, базирующегося на машинах полунепрерывной разливки, что позволяет осуществлять разливку при рациональных скоростях для выбранных сечений заготовки;
- быстрая окупаемость оборудования, используемого для микро металлургических заводов.

В настоящее время на территории Украины имеется достаточно большое количество предприятий, не интегрированных в современную схему микро-завода, с электродуговыми и индукционными печами. Часть из них работает на литейный сектор, а часть вообще не использует плавильные мощности, сохранив лишь свою механосборочную составляющую. Кроме того, есть пустующие промышленные площадки, на которых когда-то существовали предприятия интересующего нас сектора и их использование для строительства микро-заводов вполне возможно и экономически оправдано.

Оценивая привлекательность таких предприятий и площадок для развития сектора микро-заводов необходимо отметить следующие положительные моменты:

- рассредоточенность их практически по всей территории страны, в отличие от более компактного расположения крупных металлургических предприятий в восточной ее части. Это является достаточно важным фактором способствующим развитию данного типа предприятий ориентированных на региональный рынок сырья и сбыта продукции;
- наличие основных и крайне необходимых для технологического процесса зданий, сооружений, коммуникаций и развитой транспортной

инфраструктуры, а также плавильных участков и цехов с соответствующим технологическим и вспомогательным оборудованием;

- обеспеченность необходимыми трудовыми и энергоресурсами (для случая сохранения проектных объемов производства);

- наличие определенного портфеля заказов и рынка сбыта продукции;

- заинтересованность местной власти в развитии производства способствующего решению проблем занятости, обеспечивающего поступления в местный бюджет, содействующего в решении ряда коммунальных проблем региона. Особенно рациональной на наш взгляд представляется схема, когда часть собственности таких предприятий принадлежит местным советам.

Подходы к техническому перевооружению таких предприятий, в зависимости от их специализации, активности на рынке производства и реализации металлопродукции, технического состояния, оснащенности необходимыми технологическими агрегатами и их единичной мощности могут быть разные и требуют достаточно глубоких исследований.

В качестве выводов по проведенным исследованиям можно отметить, что в целом практика промышленного применения концепции микро металлургических заводов подтверждает высокий потенциал таких построений. Уже сейчас можно утверждать, что прототипом современного микро металлургического завода может быть технологическое построение характерное рассмотренному в работе ОАО «АЗОЦМ».

Однако применительно к конкретной технологической схеме и условиям обеспечения вторичным сырьем представляется весьма актуальной проблематика доработки функциональных схем сопряжения основных технологических агрегатов, в том числе и за счет их модернизации и усовершенствования, что и будет основной задачей при проведении дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Смирнов А.Н. Металлургические мини-заводы / А.Н. Смирнов, В.М. Сафонов, Л.В. Дорохова, А.Ю. Цупрун. // Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 469 с.

2. Запускалов Н. «Микрозавод» – новая концепция в металлургии // Черные металлы. 2004. - №11. – С.10-24.

3. Cabai F., Lumley P. The micro mill - a solution to local needs. // Millennium Steel. 2002. – P.115-118.

4. Swaney R.U., Cignetti N.P. Development of steelmaking technology for small-sized special grades // Metallurgical plant and Technology International. 1991. – P.42-49.

5. Кац А.М. Теплофизические основы непрерывного литья слитков цветных металлов и сплавов. / А.М. Кац, А.Г. Шадек // – М.: Металлургия, 1983. – 208 с.

6. Уткин Н.И. Производство цветных металлов / Н.И. Уткин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2004. – 442 с.

7. Савенков Ю.Д. Рафинированная медь Украины / Ю.Д. Савенков, В.И. Дубоделов, В.А. Шпаковский, В.А. Кожанов, Е.В. Штепан. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2008. – 176 с.

8. Гридін С.В. Дослідження явищ усадки при формуванні мідних зливків / С.В. Гридін, Д.В. Спирідонов, Ю.Д. Савенков, А.Н. Смірнов // Металознавство та обробка металів. – 2009. – №2. – С.35-39.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Петрушовым С.Н.

*д.т.н. Садовой А.В.,
к.т.н. Волянский Р.С.
(ДГТУ, Днепропетровск, Украина),
аспирант Назарова Е.С.
(ЗНТУ, Запорожье, Украина) e-mail: nazarova@zntu.edu.ua*

СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАТЯЖЕНИЕМ ПОЛОСЫ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Розроблено систему оптимального керування натягом смуги, що прокатується, враховуючи змінні технологічні параметри. Досліджено її властивості за допомогою комплексу взаємопов'язаних багатовимірних моделей електромеханічного обладнання станів холодної прокатки.

Ключові слова: оптимальне керування, стан холодної прокатки, комплекс взаємопов'язаних багатовимірних моделей.

Разработана система оптимального управления натяжением прокатываемой полосы, учитывающая переменные технологические параметры. Исследованы ее свойства с помощью комплекса взаимосвязанных многомерных моделей электромеханического оборудования станов холодной прокатки.

Ключевые слова: оптимальное управление, стан холодной прокатки, комплекс взаимосвязанных многомерных моделей.

Постановка задачи. При настройке электромеханических комплексов, а также при автоматизированном выборе лучших проектных решений широко используются компьютерные модели. Это позволяет проводить необходимые предварительные эксперименты при модернизации существующих систем управления и проектировании новых без остановки производственного оборудования, что сокращает затраты времени и средств. При синтезе системы управления электроприводом моталки стана холодной прокатки возникает необходимость удовлетворения жестких требований точности воспроизведения желаемых траекторий движения, быстродействия, запаса устойчивости, надежности, технологичности изготовления и обслуживания [1]. В связи с этим актуальной является задача разработки системы оптимального управления, обеспечивающей выполнение поставленных требований и обладающей свойствами низкой чувствительности к широкому спектру дестабилизи-

рующих факторов, вызванных переменными параметрами и упругими связями кинематических передач, и исследование её свойств с использованием комплекса взаимосвязанных многомерных моделей электро-механического оборудования станов холодной прокатки [2].

Решение. Объектом управления является электропривод моталки, обеспечивающий стабилизацию натяжения полосы во всех режимах работы, что является необходимым условием обеспечения качественного ведения технологического процесса [1]. Кинематическая схема моталки с учетом взаимосвязи с прокатной клетью через прокатанный металл приведена на рисунке 1.

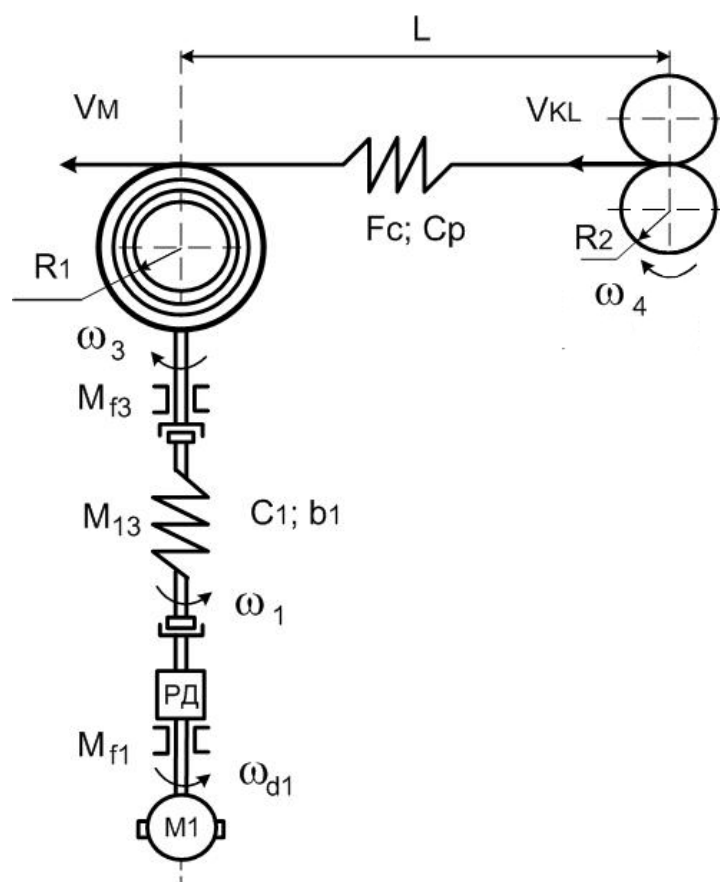


Рисунок 1 – Кинематическая схема моталки

В соответствии с приведенной кинематической схемой система уравнений динамики объекта управления в поэлементной форме имеет вид [4]

$$\left\{ \begin{array}{l} pF_c = C_p R_1 \omega_3 - C_p R_2 \omega_4 - \frac{F_c R_2 \omega_4}{L}; \\ p\omega_3 = \frac{1}{J_M} M_{13} + \frac{b_1(\omega_1 - \omega_3)}{J_M} - \frac{F_c R_1}{J_M} - \frac{k_{f3}\omega_3}{J_M}; \\ pM_{13} = C_1(\omega_1 - \omega_3); \\ p\omega_1 = \frac{1}{J_{dl} i_p} M_{dl} - \frac{1}{J_{dl}} M_{13} - \frac{k_{f1}}{J_{dl}} \omega_1; \\ pM_{dl} = \frac{C\Phi}{R_d T_d} U_{dl} - \frac{1}{T_d} M_{dl} - \frac{(C\Phi)^2}{R_d T_d i_p} \omega_1; \\ pU_{dl} = \frac{k_B}{T_\mu} U_y - \frac{1}{T_\mu} U_{dl}. \end{array} \right. \quad (1)$$

где ω_{dl} - угловая скорость двигателя М1; ω_1, ω_3 - угловые скорости торцов шпинделя; ω_4 - угловая скорость валков клетки; J_{dl} - момент инерции ротора двигателя М1 и редуктора, J_M - момент инерции моталки; M_{f1}, M_{f3} - моменты внешнего трения; M_{13} - упругий момент; C_1 - жесткость упругого элемента; C_p - жесткость транспортируемого материала; b_1 - коэффициент внутреннего демпфирования; F_c - сила натяжения прокатываемой полосы; L - расстояние между осями вращающихся механизмов; i_p - передаточное число редуктора, R_1 - радиус рулона; R_2 - радиус валка клетки; k_B, T_μ - коэффициент усиления и постоянная времени управляемого преобразователя; U_{dl}, U_y - напряжения на выходе и входе управляемого преобразователя питания двигателя М1.

Для облегчения обобщенного исследования упругодиссипативного объекта управления целесообразно осуществить направленное нормирование системы (1). В качестве базовых переменных приняты U_{\max} - максимальное напряжение управления преобразователем; ω_{\max} - скорость идеального холостого хода двигателя; M_{\max} - момент короткого замыкания двигателя при напряжении U_{\max} ; F_{\max} - технологически максимально допустимое натяжение полосы

$$\omega_{\max} = \frac{U_{\max}}{C\Phi} i_p; M_{\max} = C\Phi \frac{U_{\max}}{R_d}; U_{\max} = k_B \cdot U_{y \max}.$$

Тогда система уравнений (1) преобразуется к виду

$$py_i = \sum_{k=1}^6 a_{ik} y_k + C + m_6 u, \quad (i=1, \dots, 6), \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{F_c}{F_{\max}}; \quad y_2 = \frac{\omega_3}{\omega_{\max}}; \quad y_3 = \frac{M_{13}}{M_{\max}}; \quad y_4 = \frac{\omega_{dl}}{\omega_{\max}}; \quad y_5 = \frac{M_{dl}}{M_{\max}}; \quad y_6 = \frac{U_{dl}}{U_{\max}}; \\ a_{11} &= -\frac{R_2 \omega_4}{L}; \quad a_{12} = C_p R_1 \frac{\omega_{\max}}{F_{\max}}; \quad a_{21} = -\frac{R_1 F_{\max}}{J_M \omega_{\max}}; \quad a_{22} = -\left(\frac{b_1}{J_M} + \frac{k_{f3}}{J_M} \right); \\ a_{23} &= \frac{M_{\max}}{J_M \omega_{\max}}; \quad a_{24} = \frac{b_1}{J_M}; \quad a_{32} = -\frac{C_1 \omega_{\max}}{M_{\max}}; \quad a_{34} = \frac{C_1 \omega_{\max}}{M_{\max}}; \quad a_{44} = -\frac{k_{f1}}{J_{dl}}; \\ a_{45} &= \frac{M_{\max}}{J_{dl} \omega_{\max}}; \quad a_{54} = -\frac{1}{T_{\text{я}}}; \quad a_{55} = -\frac{1}{T_{\text{я}}}; \quad a_{56} = \frac{1}{T_{\text{я}}}; \quad a_{66} = -\frac{1}{T_{\mu}}; \quad m_6 = \frac{1}{T_{\mu}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Из множества траекторий движения системы (2) выделим невозмущенное движение под действием программного управления u^* как решение дифференциальных уравнений

$$py_i^* = \sum_{k=1}^6 a_{ik} y_k^* + C + m_6 u^*, \quad (i=1, \dots, 6). \quad (4)$$

Реальное движение объекта управления отличается от желаемого на величину отклонения

$$\eta_k = y_k - y_k^*, \quad (k=1, \dots, 6). \quad (5)$$

Тогда возмущенного движение объекта управления (1), полученные путем вычитания уравнений (4) из уравнений (2) можно представить следующим образом

$$p\eta_i = \sum_{k=1}^6 a_{ik} \eta_k + m_6 U, \quad (i=1, \dots, 6), \quad (6)$$

где $U = u - u^*$ - дополнительное стабилизирующее управление, представляющее собой отклонение реального управляющего воздействия u от программного u^* ; a_{ik}, m_6 - коэффициенты.

Для синтезируемой системы уравнений качество управления может быть задано функционалом Летова

$$I = \int_0^{\infty} \left(\sum_{i,k=0}^6 w_{ik} \eta_i \eta_k + c U^2 \right) dt, \quad w_{ik} = w_{ki}, \quad (7)$$

экстремальное значение которому на траекториях движения (6) доставляет оптимальное управление

$$U = -\text{sat} \frac{g}{m_6} \sum_{i=0}^6 v_{i6} \eta_i, \quad (8)$$

гарантируя при этом экспоненциальный характер управляемого движения регулируемой переменной $\eta_1 = -\exp\left(\frac{1}{g}t\right)$ при траектории не возмущенного движения $y_1^* = 1(t)$ и обеспечивая замкнутой системе астатические свойства за счет наличия в своем составе интегральной составляющей $\eta_0 = \frac{1}{p} \eta_1$ [3].

Оптимальное управление (8) в развернутом виде

$$U = -\text{sat} \frac{g}{m_6} (v_{06} \eta_0 + v_{16} \eta_1 + v_{26} \eta_2 + v_{36} \eta_3 + v_{46} \eta_4 + v_{56} \eta_5 + v_{66} \eta_6). \quad (9)$$

Коэффициентами алгоритма управления (9) являются коэффициенты функции Ляпунова

$$V = \sum_{i,k=0}^6 v_{ik} \eta_i \eta_k, \quad v_{ik} = v_{ki}, \quad (10)$$

которые связаны между собой соотношениями

$$v_{ik} = \frac{V_{in} V_{kn}}{V_{nn}}, \quad (i,k=0,1,2,\dots,6). \quad (11)$$

Коэффициенты (11) определяются соответственно минорами i -ых, k -ых и n -ых элементов 1-го столбца определителя коэффициентов системы (6) [3]

$$\begin{aligned} v_{06} &= (-1)^6 \Delta, \\ v_{i6} &= (-1)^{i+6} M_{i1}, \quad i=1,2,\dots,6, \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & a_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{vmatrix}. \quad (13)$$

Тогда искомые коэффициенты алгоритма оптимального управления определяются выражениями

$$\begin{aligned} v_{06} &= -a_{66}(a_{11}a_{23}a_{32}a_{55}a_{44} - a_{11}a_{23}a_{32}a_{45}a_{54} - a_{11}a_{55}a_{43}a_{24}a_{32} + \\ &+ a_{11}a_{55}a_{43}a_{34}a_{22} - a_{55}a_{43}a_{34}a_{12}a_{21}); \quad v_{16} = -a_{22}a_{43}a_{34}a_{55}a_{66} - \\ &- a_{32}a_{23}a_{44}a_{55}a_{66} + a_{32}a_{23}a_{54}a_{45}a_{66} + a_{32}a_{43}a_{24}a_{55}a_{66}; \\ v_{26} &= -a_{12}a_{43}a_{34}a_{55}a_{66}; \quad v_{36} = -a_{12}(a_{23}a_{44}a_{55}a_{66} - a_{23}a_{54}a_{45}a_{66} - \\ &- a_{43}a_{24}a_{55}a_{66}); \quad v_{46} = a_{12}a_{23}a_{34}a_{55}a_{66}; \quad v_{56} = -a_{12}a_{23}a_{34}a_{45}a_{66}; \\ v_{66} &= a_{12}a_{23}a_{34}a_{45}a_{56}. \end{aligned} \quad (14)$$

Следует отметить, что весовые коэффициенты функционала (7) однозначно связаны с коэффициентами функции Ляпунова (10) соотношениями

$$w_{ik} = \frac{m_6^2}{c} v_{i6} v_{k6} = g \quad v_{i6} v_{k6}, \quad i, k = 0, 1, \dots, 6. \quad (15)$$

Выполнив в алгоритме управления (9) замену координат возмущенного движения в силу системы дифференциальных уравнений (6) и перейдя от относительных значений переменных состояний к их именованным значениям, получим в окончательном виде алгоритм оптимального управления натяжением прокатываемой полосы

$$U_y = U_{y\max} \text{sat} \frac{g}{m_6} \left(\left(\frac{\gamma_{06}}{p} + \gamma_{16} \right) (F_C^* - F_C) - \gamma_{26} p F_C - \gamma_{36} p \omega_3 - \right. \quad (16)$$

$$\left. - \gamma_{46} (\omega_1 - \omega_3) - \gamma_{56} p \omega_1 - \gamma_{66} p I_{dl} \right).$$

В коэффициенты алгоритма оптимального управления натяжением прокатываемой полосы входят переменные технологические параметры: угловая скорость валков клетки ω_4 и радиус рулона R_1 .

Согласно (11) регулятор натяжения будет иметь вид (рисунок 2)

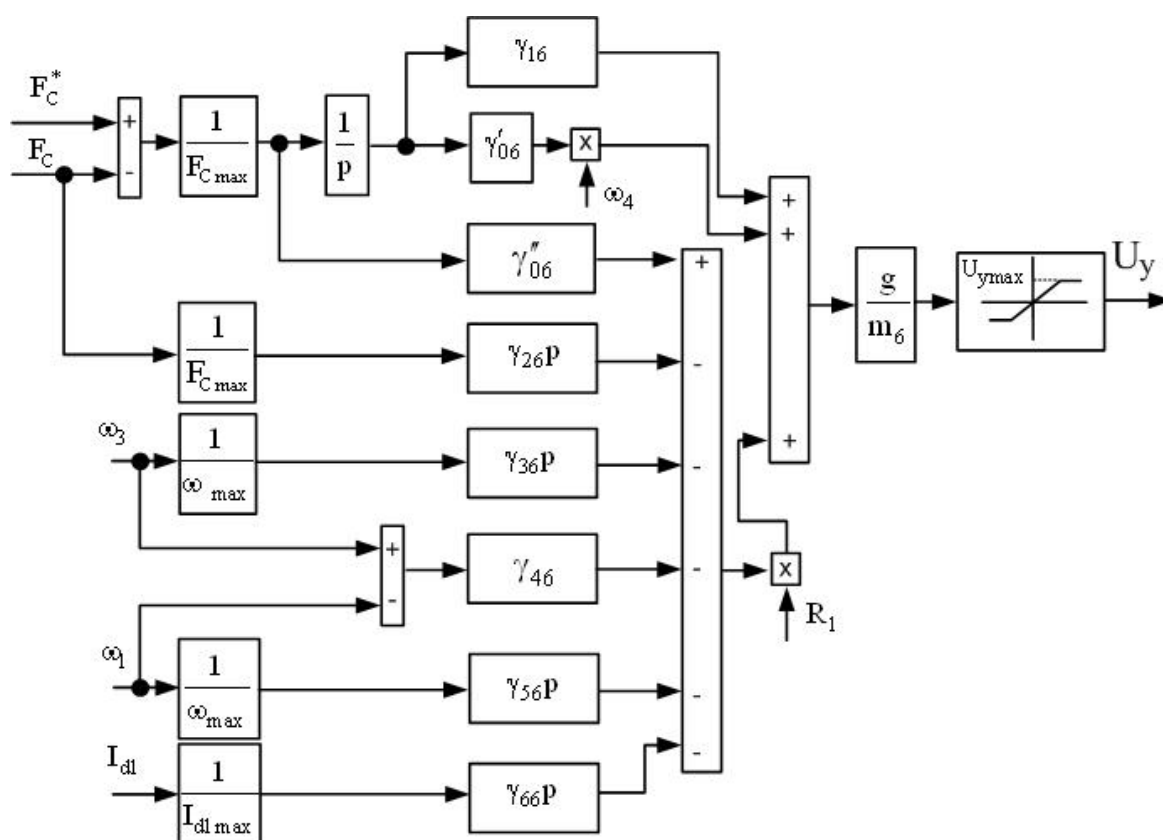


Рисунок 2 – Структурная схема регулятора натяжения с жесткими обратными связями

Из анализа значений коэффициентов (3) системы (2) видно, что скорость клетки ω_4 входит в состав коэффициента a_{11} , а радиус рулона R_1 - в состав коэффициентов a_{12}, a_{21} . Так как эти коэффициенты уравнений динамики участвуют в расчете коэффициентов функции Ляпунова, разделим слагаемые коэффициента γ_{06} на две составляющие: γ'_{06} - с учетом переменной скорости ω_4 и γ''_{06} - с учетом переменного радиуса рулона R_1 . Аналогичным образом учтем изменение коэффициентов ре-

Для исследования и оценки свойств системы оптимального управления, синтезированной аналитически, использован комплекс компьютерных моделей намоточно-размоточного механизма, двигателя постоянного тока, упругостей первого и второго рода [2]. Структура компьютерной модели синтезированной системы управления натяжением полосы приведена на рисунке 3, а.

[illegible]

Согласно технологической инструкции ТИ 226-П.ХЛ 1-20-05 «Дрессировка холоднокатаных полос на станах 1700 №1 и №2» натяжение создается между клетью и разматывающим устройством с момента захвата переднего конца полосы валками. При выходе из рабочей клетки передний конец полосы подается к моталке и заправляется в зев ее барабана, создается необходимое натяжение, все механизмы стана переводятся на максимальную для данного режима скорость. При дрессировке особое внимание обращается на натяжение полосы, которое кон-

тролируется при постоянной скорости стана по показаниям амперметров и должно быть постоянным в течение всего времени дрессировки полосы. После окончания дрессировки рулона стан останавливается, разводятся валки клетки, пропускается задний конец полосы и подматывается в рулон.

На рисунке 3, б показаны переходные процессы (F_C – натяжение прокатываемой полосы, ω_3 – угловая скорость моталки, ω_4 – угловая скорость клетки) при заправленном конце полосы в барабан моталки, с 0 с до 5 с устанавливается необходимое натяжение полосы, с 5 с до 120 с производится дрессировка с постоянным натяжением, с 120 с до 130 с снимается задание на натяжение. При этом задание по скорости клетки в момент времени 0 с – 10 с соответствует заправочной скорости стана, 10 с – 30 с разгон клетки до рабочей скорости, 30 с – 80 с – работа при постоянной скорости, 80 с – 100 с – торможение до пониженной скорости, 100 с – 110 с – работа на пониженной скорости.

Выводы. Исходя из анализа результатов моделирования, разработанная система оптимального управления натяжением прокатываемой полосы за счет полной наблюдаемости объекта управления, учета влияния переменных технологических параметров обеспечивает отработку задающего воздействия без перерегулирования и компенсирует влияние варьирования толщины полосы, упругостей шпинделя и полосы на динамику электропривода моталки. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании нового и реконструкции существующего технологического оборудования прокатного производства.

Библиографический список

1. Лимонов Л. Г. Автоматизированный электропривод промышленных механизмов / Л. Г. Лимонов – Х.: Изд-во «ФОРТ», 2009. – 272 с.
2. Назарова О. С. Моделювання електромеханічних процесів в прокатному обладнанні за допомогою бібліотеки підсистем / О. С. Назарова, В. И. Бондаренко, А. В. Пирожок // Електроінформ, 2010. - №2-3. – С. 22-24.
3. Садовой А. В. Системы оптимального управления прецизионными электроприводами / А. В. Садовой, Б. В. Сухинин, Ю. В. Сохина. – К.: ИСИМО, 1996. – 298 с.
4. Борцов Ю. А. Автоматизированный электропривод с упругими связями / Ю. А. Борцов, Г. Г. Соколовский. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 288 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.

д.т.н. Смирнов А.Н.
(ГВУЗ «ДонНТУ», г. Донецк, Украина),
Максаев Е.Н.
(ПАО «АМК», г. Алчевск Украина),
к.т.н. Куберский С.В., к.т.н. Эссельбах В.С.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ВЫТЯГИВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

Запропоновано основні підходи до модернізації системи витягання безперервнолитого сляба двохструмкової МБЛЗ реалізація яких дозволить зменшити прослизання приводних роликів, знизити ймовірність виникнення коливань рівня металу в кристалізаторі, а також підвищити якість слябової заготовки та вихід придатної металопродукції.

Ключові слова: безперервне розливання, сляб, витягаюча система, приводний ролик, тиск на безперервно литу заготовку, притиснення, прослизання, коливання рівня, якість.

Предложены основные подходы к модернизации системы вытягивания непрерывнолитого сляба двухручьевого МНЛЗ реализация которых позволит уменьшить проскальзывание приводных роликов, снизить вероятность возникновения колебаний уровня металла в кристаллизаторе, а также повысить качество слябовой заготовки и выход годной металлопродукции.

Ключевые слова: непрерывная разливка, сляб, вытягивающая система, приводной ролик, давление на непрерывнолитую заготовку, прижатие, проскальзывание, колебания уровня, качество.

Среди многообразия проблем решаемых отечественными и зарубежными учеными-металлургами особое место занимают вопросы повышения качества и выхода годной конкурентоспособной металлопродукции.

Основным направлением развития металлургии Украины сегодня следует считать ввод новых мощностей и совершенствование технологии производства, позволяющих существенно повысить качество стальных заготовок и получаемого из них проката.

Одним из основных технологических решений способствующих снижению издержек отечественного производства и повышающих его эффективность является непрерывная разливка стали.

Способ непрерывного литья уже давно доказал свою высокую эффективность и практически полностью заменил технологию разлива стали в изложницы особенно при производстве сталей массового назначения как на крупных интегрированных предприятиях так и на новых металлургических мини-заводах.

Стабильность процесса непрерывной разлива стали в значительной степени зависит от надежности работы основных функциональных систем, в том числе вытягивающей роликовой системы МНЛЗ. Так, резкие колебания поверхности и всплески на мениске металла в кристаллизаторе, приводящие к сбоям в работе системы автоматического поддержания уровня и аварийным ситуациям (переливам металла, «подвисаниям корочки» и т.п.) могут быть в значительной степени связаны с недостаточным прижатием приводных роликов к поверхности сляба, жесткостью и состоянием роликовой проводки технологической оси ручья и т.п.

Поэтому основной задачей проведенных исследований было определение оптимальных параметров работы вытягивающей системы МНЛЗ с целью повышения качества и увеличения выхода годных непрерывнолитых слябов.

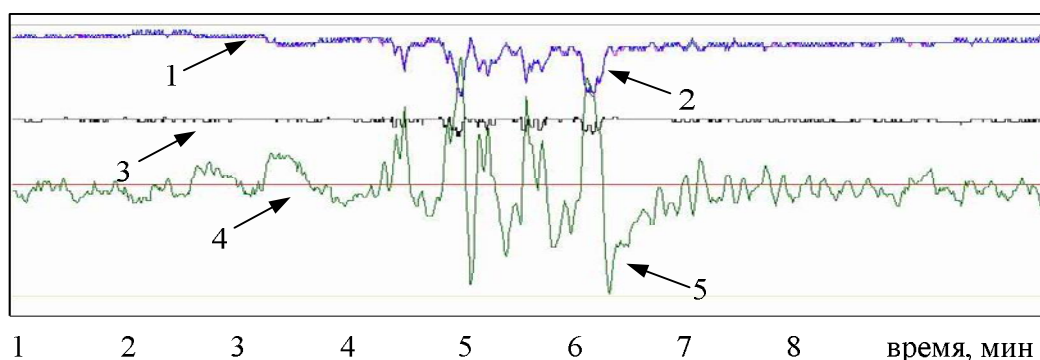
Исследования проводились в современном конвертерном цехе ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (ПАО «АМК») где в ходе широкомасштабной реконструкции, произведенной в условиях действующего производства [1,2] были сооружены две современные слябовые МНЛЗ оснащенные новейшими системами автоматизации и механизмами в соответствии с проектными решениями специалистов фирмы «Siemens-VAI» [3,4].

Обе МНЛЗ оборудованы устройствами автоматического поддержания уровня металла в кристаллизаторах с электромагнитными датчиком слежения, гидравлическими приводами управления стопорными механизмами, а также системой раннего оповещения о прорыве «Mold Expert». Принцип действия этой системы основан на определении аварийных и предаварийных ситуаций по изменениям показаний температуры двух рядов термопар, вмонтированных в стенки кристаллизатора, расчётному тепловому потоку охлаждающей воды, стабильности положения уровня металла в кристаллизаторе и т.д.

В настоящее время на ПАО «АМК» в процессе разлива на МНЛЗ слябов толщиной 200 и 220 мм имеют место случаи прекращения вытягивания заготовки и проскальзывания приводных роликов по ее поверхности при снижении скорости разлива либо разгоне приводов после технологических или аварийных остановок. Наиболее часто проскальзы-

вания происходят при разливке слабов шириной от 1000 до 1200 мм из низкоуглеродистых сталей. При отработке технологии непрерывной разливки в период пуска новых МНЛЗ в эксплуатацию остановки вытягивания наблюдались в основном при разгоне приводов после перековшёвок, технологических остановок, а также при выводе хвостовой части сляба из зоны вторичного охлаждения, что неоднократно приводило к «замораживанию» сляба в ручье. По мере износа роликового оборудования сегментов (более 80 % регламентного пробега) описанное явление приобрело постоянный характер. В настоящее время проскальзывание наблюдается на протяжении целых серий плавов даже при постоянной скорости разливки. Это приводит к значительным потерям производства, обусловленным увеличением количества обрезки немерных слабов и времени простоев при удалении «замороженных» слабов из сегментов МНЛЗ в результате «заклинивания» заготовки в машине или прорывов. Основной причиной прорывов в этом случае является неравномерное формирование корочки сляба вследствие колебаний уровня.

Особое внимание в данной работе было уделено кратковременным проскальзываниям приводных роликов, вызывающих динамические рывки вдоль технологической линии заготовки и влияющих на колебания жидкой стали в кристаллизаторе (амплитуда до 80 мм) (рисунок 1).



1,2 – Уставка и текущее положения стопора промковша
3 – Скорость разливки
4,5 – Уставка и текущий уровень металла в кристаллизаторе

Рисунок 1 – Характер колебаний некоторых параметров разливки по причине проскальзывания вытягивающих приводных роликов

Процесс разливки в этом случае становится крайне нестабильным, а аварийные автоматические остановки ручья в результате срабатывания системы «Mold Expert» приводят к значительному росту обрезки. Кроме того, приводные ролики, проскальзывающие из-за слабого прижатия к непрерывнолитому слябу подвергаются дополнительному износу. Определяющим фактором проскальзывания являются резкие колебания скорости и усилий в системе приводов МНЛЗ (рисунок 2).

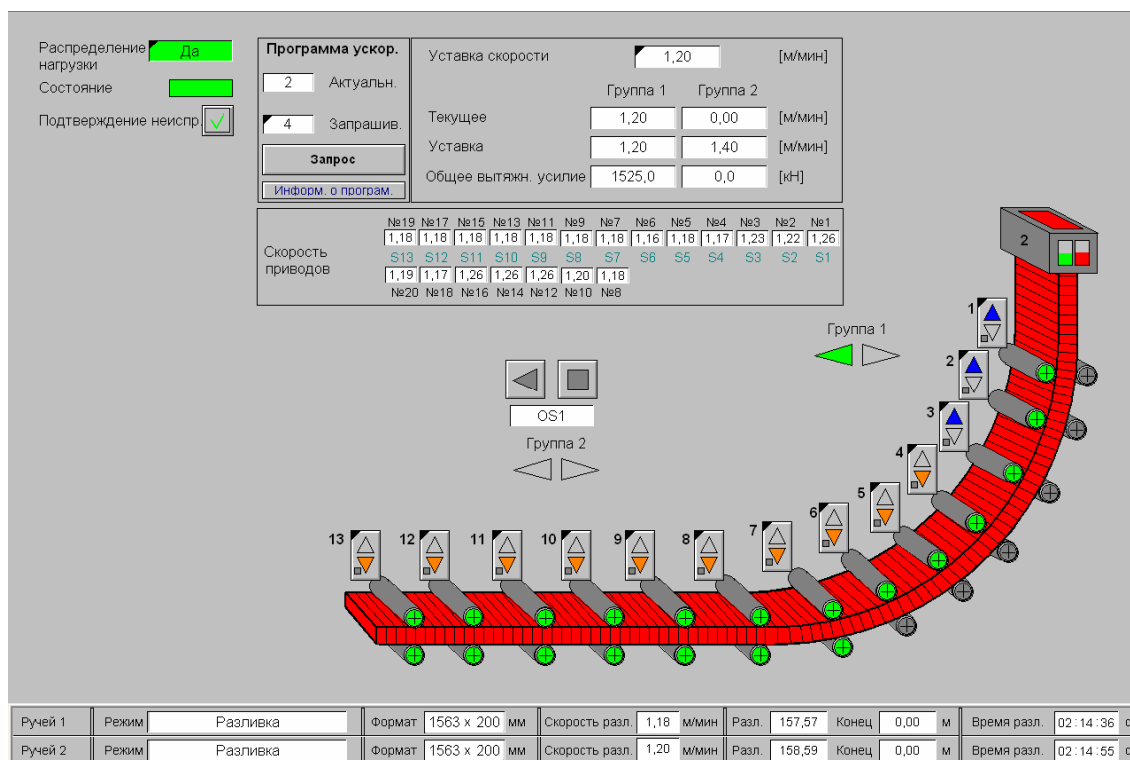


Рисунок 2 – Основные параметры разливки и скорости вращения приводных роликов вытягивающей системы МНЛЗ

В ходе исследований было установлено, что при обеспечении в 13 сегменте давления приводного ролика на горячий сляб на уровне 200 бар (максимально допустимое давление) заметно снижаются колебания уровня металла в кристаллизаторе. Между тем такой прием является крайней мерой и не соответствует номинальным технологическим параметрам. На практике давление 200 бар предусмотрено для перемещения затравки по ручью в начале разливки. Кроме того, такое давление приводит к неравномерному перераспределению усилий вытягивания сляба в системе приводов вдоль ручья.

Гидравлическая схема управления верхними приводными роликами слябовой МНЛЗ (рисунок 3) обеспечивает распределение давления в цилиндрах прижимных роликов по двум линиям (для затравки – РЕ с давлением 200 бар и давлением на вытягиваемый сляб – РН, которое рассчитывается в зависимости от параметров разливки) равное для всех сегментов.

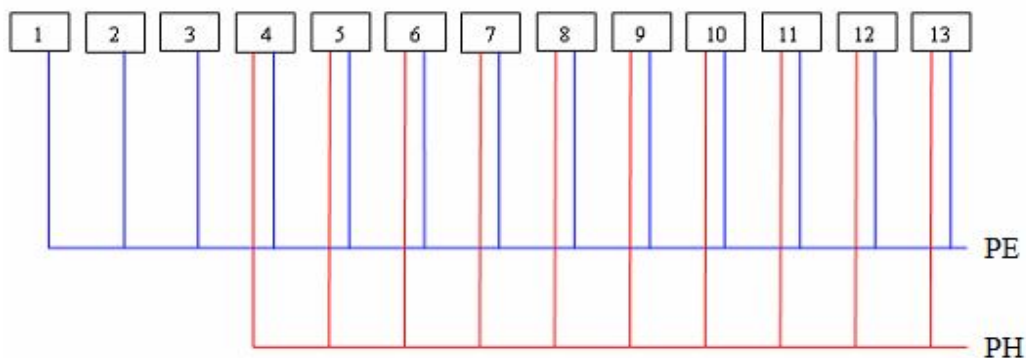


Рисунок 3 – Схема распределения гидравлических линий давления к сегментам при заведении затравки РЕ и на горячий слаб РН

Первые три сегмента давление на горячий слаб оказывают только пассивно.

Расчёт давления приводных роликов на непрерывнолитую заготовку (с 4 по 13 сегмент) разделом «СС Explorer» программы 1 уровня осуществляется по эмпирической формуле (1), которая получена на основании расчёта ферростатического давления и толщины твердой корки слитка при средних параметрах разливки для 4 сегмента. В этом месте толщина корочки заготовки имеет наименьшее значение в сравнении со всеми прижимными роликами, входящими в состав 5-13 сегментов.

$$\text{Set Point} = (P_{\max} - P_{\min}) \times (W - W_{\max}) + P_{\max}, \quad (1)$$

где P_{\max} – максимальное давление (65 бар);

P_{\min} – минимальное давление (20 бар);

W – сечение кристаллизатора (используемое при разливке);

W_{\max} – максимальное сечение кристаллизатора (1,8 м).

На основании рекомендаций специалистов «Siemens-VAI» возможно изменение давления в режиме «ручного выбора оператора» в первом уровне управления процессом на 10-20 % в соответствии с кривой, изображённой на рисунке 4, но на короткий промежуток времени (переков-шовка, технологическая остановка или пониженная скорость разливки).

Рабочий диапазон относительно расчёта алгоритма (1) соответствует прямой – 80%.

При резких изменениях скорости ручья на участке вытягивания заготовки следует рассматривать два основных негативных фактора, отрицательно влияющих на дальнейшую стабильность процесса разливки.

Первый связан с той частью заготовки, которая пребывает как в твёрдом, так и в жидком состоянии. На начальном этапе снижения скорости вследствие динамичности жидкой фазы повышается величина межроликового выпучивания, создавая дополнительное сопротивление вытягиванию приводов. Второй фактор связан с повышенной усадкой уже закристаллизовавшейся части сляба, что способствует снижению контактной поверхности заготовки и нижних приводных роликов. При продолжении разливки на пониженной скорости, формирующаяся более толстая корочка сляба, на всём участке кристаллизации требует большего усилия приводов для загиба и разгиба заготовки.

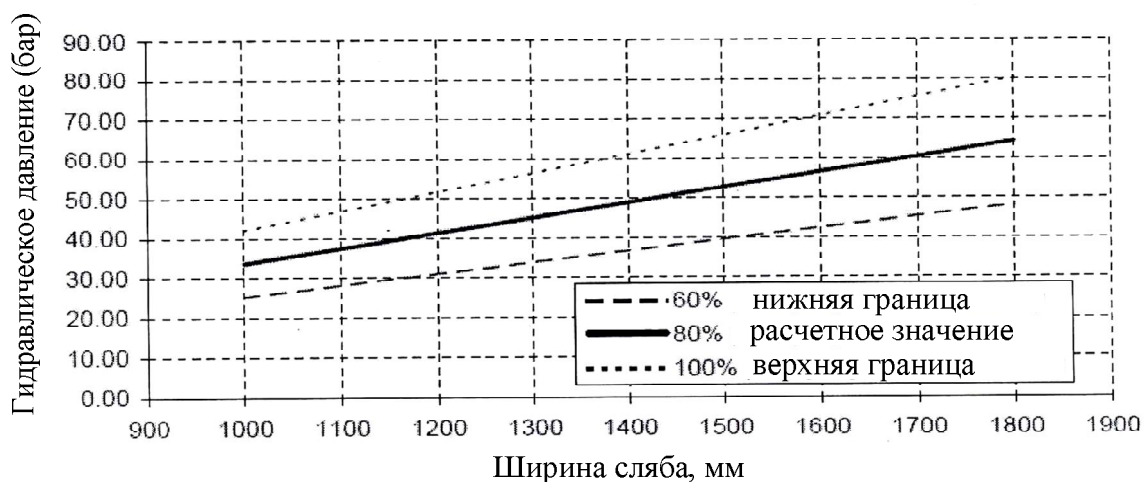


Рисунок 4 – График изменения давления на горячий сляб в соответствии с формулой (1) и возможные пределы его изменения в ручном режиме

Исследованиями было установлено, что повышение давления гидравлических приводных роликов на горячий сляб на 5-10 бар в большинстве случаев положительно влияет на поведение металла в кристаллизаторе, но усложняет автоматизацию процесса, особенно при горячем изменении сечения, т.к. алгоритм предусматривает связь с формулой (1) только в автоматическом режиме управления. Кроме того было отмечено, что данные условия в некоторых случаях не достаточно эффективны, по сравнению с тем как стабилизируется процесс с давлением 200 бар приводным роликом 13 сегмента, а увеличение давления на горячий сляб всех сегментов выше рекомендуемого предела становится опасным в районе 4-го.

Обобщая рассмотренные данные, можно предложить два основных этапа модернизации схемы работы гидравлики приводных роликов на базе существующей системы автоматизации.

Первый этап заключается в усовершенствовании автоматического алгоритма управления давлением линии РН в программе 1 уровня, используя рекомендации графика 4 и расчёты термальных графиков горячего ручья программы 2 уровня (рисунок 5), которые позволяют определить глу-

бину проникновения жидкой фазы в ручье, учитывая перемещение вдоль ручья разнотемпературных участков вплоть до окончания ЗВО.

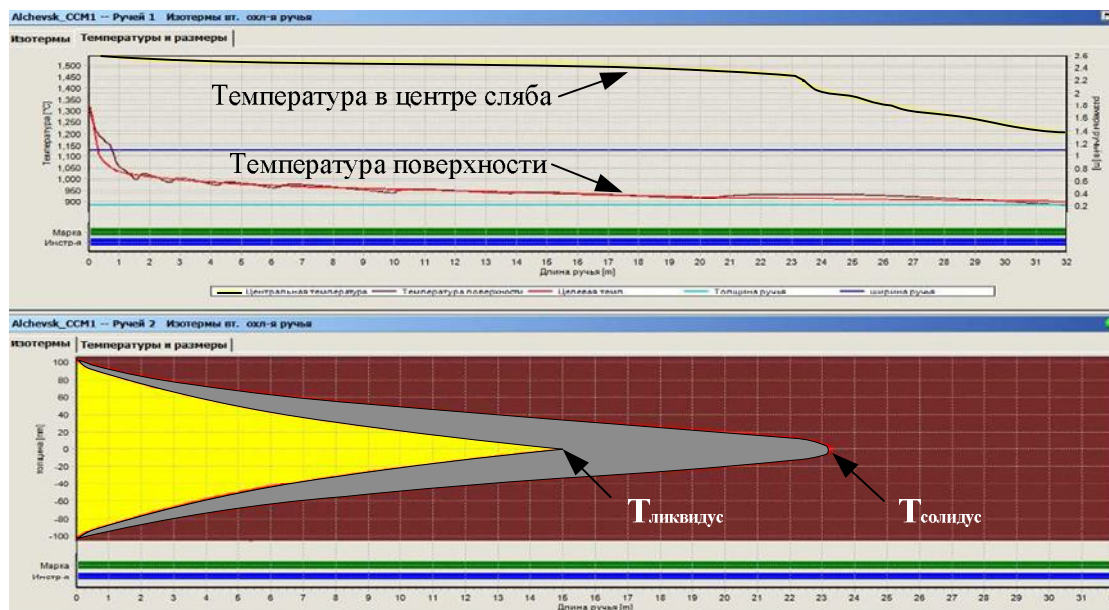


Рисунок 5 – Изотермы по сечению сляба вдоль зоны первичного и вторичного охлаждения из расчёта программы 2 уровня

Положение точки $T_{\text{солидус}}$ вдоль ручья, зависящее от скорости, температуры и характера охлаждения стали может служить определяющим параметром выбора величины давления на непрерывнолитой сляб. Максимальная толщина корочки (t_{max}) в актуальном 4 сегменте может быть определена положением точки $T_{\text{солидус}}$ на глубину $S_{\text{min}} \leq 11$ м (положение 4 сегмента и выше) и соответствовать верхнему пределу давления на горячий сляб. Предположительно полная кристаллизация слитка (например, при перековшовке) будет иметь место непосредственно под кристаллизатором, т.е. в начале ЗВО (глубина 0 м) и в этом случае давление приводного ролика в 4-м сегменте будет соответствовать 100% в соответствии с графиком, представленным на рисунке 4. В то время как t_{min} в том же 4 сегменте определяется положением $T_{\text{солидус}}$ при $S_{\text{max}} = 32$ м и давление роликов на сляб должно соответствовать нижнему пределу значений (80% относительно графика на рисунке 4).

Таким образом, диапазон изменения давления составляет $100 - 80 = 20\%$ на участке проникновения $T_{\text{солидус}} - \Delta S = 32$ м. Для шага 1 м плавного изменения давления это будет соответствовать величине $20/32 = 0,625\%$ на 1 м металлургической длины. Тогда используя формулу (1) можно рассчитать необходимые параметры вытягивающей системы по всей длине технологической оси. Так для сляба шириной 1800 мм в области его полного затвердевания (100% твердой фазы) возможно увеличение давления роликов на сляб до 20% в сравнении с номиналом,

а соответствующие значения P_{\min} и P_{\max} составят 24 и 78 бар. Давление роликов на участки сляба имеющие жидкую фазу должно быть меньше и в соответствии с расчетами составит для середины металлургической длины МНЛЗ (16 м) – $P_{\min} = 22$ бар, $P_{\max} = 75$ бар, а в конце (32 м) – $P_{\min} = 20$ бар, $P_{\max} = 65$ бар. Аналогичные расчеты можно осуществить для любой ширины сляба.

Второй этап может быть реализован в соответствии с опытом работы МНЛЗ других металлургических предприятий. В качестве аналога наиболее привлекательной является конструкция МНЛЗ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» разработанная фирмой «SMS DEMAG» позволяющая получать слябы толщиной 190, 250 и 300 мм и шириной 1400-2700 мм. МНЛЗ оснащена современными системами автоматики и механизмами, позволяющими получать слябы из трубной стали классов прочности от X80 до X120 для толстолистого стана 5000 [5]. Гидравлическая схема этой машины даёт возможность производить регулирование давления нажимных роликов в каждом сегменте в зависимости от ширины заготовки и ферростатического давления у приводного ролика. Оптимальное давление приводных роликов каждого сегмента на сляб определяется в зависимости от текущих условий разливки и контролируется АСУТП.

Поскольку модернизация на базе имеющейся гидравлической схемы по распределению давления на цилиндр приводного ролика каждого сегмента требует крупных дополнительных вложений, то предлагается разделить 10 приводных сегментов для горячего ручья на две группы давления, внедрив в схему одну дополнительную линию. Таким образом, линия 1 группы РН давления, рассчитываемого по формуле (1) должна быть связана с сегментами 4-9, новая линия РН-1 с давлением превышающим РН за счёт дополнительного эмпирического коэффициента должна обеспечивать давлением приводные ролики в сегментах 10-13 (рисунок 6).

Кроме того, можно предложить конструктивное дополнение в горизонтальных сегментах АСТС.

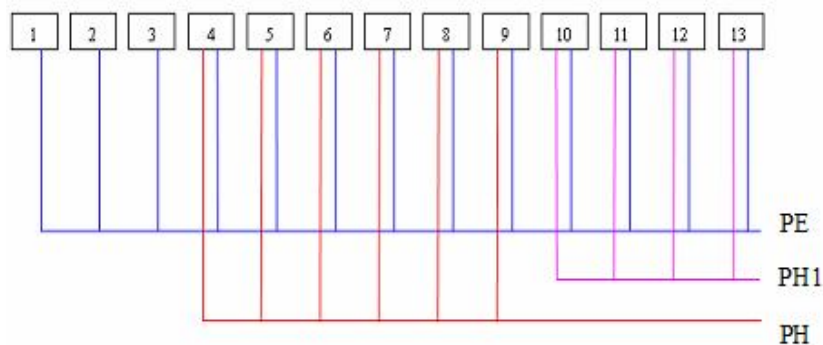


Рисунок 6 – Схема распределения двух групп линий давления горячего ручья РН и РН1 к сегментам

При недостаточной площади контакта приводного ролика с поверхностью слябовой заготовки происходит постоянная неравномерная радиальная выработка, которая будет присуща в большей степени приводным роликам горизонтальных сегментов по внешнему радиусу. Замеры горизонтальных отклонений оси внешней дуги подтвердили, что приводные ролики горизонтальных сегментов имеют значительную выработку и находятся ниже оси на 1-1,5 мм. При этом общее тянущее усилие ручья уменьшается, концентрируя нагрузку на одном или двух приводах. Учитывая конструктивную особенность горизонтального сегмента, обеспечить пассивное давление на поверхность горячего ручья снизу можно только с помощью настройки положения ролика, что потребует значительного времени простоя МНЛЗ.

Достаточно эффективным может быть также внесение некоторых дополнений в конструкцию узла настройки положения нижнего приводного ролика, а именно установка под бандажами упругой эластичной прокладки, которая сможет обеспечивать правильное положение ролика даже при небольшой выработке (рисунок 6). Естественно, что настройка приводного ролика, учитывая упругость материала должна осуществляться в плюсовом допуске. В качестве материала, возможно, использовать полиуретан СКУ-ПФЛ-100 или другие композиции, имеющие необходимые свойства.

Таким образом, в результате проведенных исследований предложены основные подходы к модернизации системы вытягивания непрерывнолитого сляба двухручьевого МНЛЗ ПАО «Алчевский металлургический комбинат», реализация которых позволит уменьшить проскальзывание приводных роликов, снизить вероятность возникновения колебаний уровня металла в кристаллизаторе, а также повысить качество слябовой заготовки и выход годной металлопродукции.

Дальнейшие исследования предполагается сосредоточить на внедрении предложенных мероприятий в условиях конвертерного цеха ПАО «Алчевский металлургический комбинат», с целью уточнения предложенных параметров и усовершенствования технологии получения качественного непрерывнолитого сляба.

Библиографический список

1. Дорофеев В.Л. *Коренная реконструкция ОАО «Алчевский металлургический комбинат» в условиях действующего производства* / Дорофеев В.Л., Завгородний М.С., Тихонюк Л.С., Шевченко Т.Г., Писмарев К.Е. и др. // *Металлург.* - 2008. – №12. – С.11-15.
2. *Alchevsk Steel Works/Ukraine – The faster way to a modernized plant* / Shevchenko T., Mosolov V., Pismarev K. e.a. // *Proceeding 10th Con-*

tinuos Casting Conference: CCC 08. 26-27 May 2008. – Linz. – Siemens-VAI: 2009. – P.1-9.

3. *Next Generation Level 2 Systems for Continuous Casting / C.Federspiel, W.Oberaigner, J.Bogner e.a. // Proceedings 5th European Continuous Casting Conference. Nice, June 20-22, 2005. – Nice: ATS, 2005. – P.130-137.*

4. *Новаторские решения и практические результаты технологии непрерывного литья слябов / Х.-П. Нарцт, С. Келлерер, К. Штахельберг и др. // Черные металлы. – 2003. – №11. – С.34-38.*

5. *Тахаугдинов Р.С. Развитие непрерывной разливки стали в ОАО ММК / Р.С. Тахаугдинов, Бодиев Ю.А., Горосткин С.В., Юречко Д.В., Корнеев М.В. // Сталь. – 2008. – №7. – С. 24-27.*

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Петрушовым С.Н.

*д.т.н. Кравченко В.М.
(ПГТУ, г. Мариуполь, Украина),
к.т.н. Сидоров В.А.
(ДонНТУ, г. Донецк, Украина),
к.т.н. Буцукин В.В.
(ПГТУ, г. Мариуполь, Украина, butsukin@mail.ru)*

ОСОБЕННОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН И РАЗВИТИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ

Зроблена спроба на основі матеріалів, отриманих в ході дослідження вібраційної активності редуктора головної лінії обтискової кліті, проаналізувати дію сезонного чинника на працездатність цього устаткування, встановити період знімання інформації, що забезпечує успішне застосування автоматизованої системи технічної діагностики даних вузлів.

Ключові слова: *головна лінія обтискової кліті, редуктор, сезон, працездатність, вібраційна діагностика*

Предпринята попытка на основе материалов, полученных в ходе исследования вибрационной активности редуктора главной линии обжимной клетки, проанализировать воздействие сезонного фактора на работоспособность этого оборудования, установить период съёма информации, обеспечивающей успешное применение автоматизированной системы технической диагностики данных узлов.

Ключевые слова: *главная линия обжимной клетки, редуктор, сезон, работоспособность, вибрационная диагностика*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Одной из тенденций в развитии современного металлургического оборудования и тяжелых машин других отраслей промышленности является внедрение автоматизированных систем технической диагностики (АСТД) [1-3]. Такие системы обеспечивают обслуживающий персонал данными о техническом состоянии узлов оборудования, позволяют, в ряде случаев, своевременно выявить их предаварийное состояние и принять меры к предупреждающему ремонту. Важным условием успешного функционирования АСТД является установление периодически-

сти съема и фиксации информации о техническом состоянии узлов, соответствующего особенностям их устройства и условий эксплуатации. При излишне частом фиксации параметров нерационально возрастают объемы информации, которую необходимо фиксировать и хранить в бумажном и электронном виде, усложняется её анализ. При относительно редкой фиксации параметров узлов, охваченных АСТД, может быть пропущен момент перехода от стадии нормального износа к стадии интенсивного (аварийного) износа и вместо ремонта предупредительного приходится выполнять ремонт аварийный, сопровождающийся существенными экономическими потерями.

Анализ исследований и публикаций. Одним из существенных факторов, оказывающих влияние на частоту возникновения отказов оборудования, который необходимо учитывать при определении периодичности съема и фиксации информации о техническом состоянии узлов, является изменение температуры окружающей среды, связанное с сезонными климатическими изменениями. Наиболее ярко «сезонный фактор» проявляется при эксплуатации горного оборудования, эксплуатирующегося на открытых площадках. Так, например, частота поломок металлоконструкций экскаваторов в зимний период может увеличиваться в 2,5 – 6,0 раз по сравнению с летним периодом [3]. Оборудование, эксплуатирующееся в закрытых помещениях, менее подвержено перепадам температур и, соответственно, «сезонный» фактор в его работе проявляется менее ярко. Однако опыт, накопленный авторами в ходе многолетних исследований металлургических машин, позволяет утверждать, что не учитывать этот фактор при исследованиях и разработках АСТД металлургического оборудования нельзя. По нашему мнению, применительно к работе металлургического оборудования, можно выделить два сезонных периода увеличения числа отказов узлов - весенний (переход от относительно низких температур в пространстве цеха к более высоким) и осенний - при переходе от температур относительно высоких (до $+40^{\circ}\text{C}$ летом) к более низким. В первом случае в узлах оборудования, собранных в зимний период при относительно низких температурах, увеличиваются, из-за теплового расширения, зазоры, уменьшается вязкость смазок и, соответственно, несущая способность смазочного слоя, что приводит к увеличению интенсивности износа сопрягаемых элементов узлов. Во втором случае в узлах, собранных при относительно высоких летних температурах, уменьшаются зазоры что, в сочетании с повышением вязкости смазок, может привести к ухудшению смазки узлов. Если при летней сборке зазоры в узлах были занижены по сравнению с требованиями технической документации возможно даже полное разрушение отдельных элементов конструкций. Такая ситуация проявилась в осенний период при начале эксплуатации прокатного стана

одного из металлургических предприятий Донецкого региона. При резком похолодании произошло разрушение обоймы одной из зубчатых муфт привода ножниц. Причина разрушения – недостаточный осевой люфт обоймы. При монтаже не были учтены изменения размеров сопрягаемых деталей при похолодании.

Влияние сезонного фактора на работоспособность узлов металлургических машин изучено, по нашему мнению, недостаточно полно. В связи с этим актуальной представляется задача сбора информации о периодичности отказов изделий и влиянии нарастания износа на показатели работы оборудования, которые могут быть использованы как диагностические факторы при проектировании АСТД.

Постановка задачи. В статье предпринята попытка на основе материалов, полученных в ходе исследования вибрационной активности редуктора ЦОС-120 главной линии обжимной клетки 350, проанализировать воздействие сезонного фактора на работоспособность этого оборудования, установить период съёма информации, обеспечивающий успешное применение АСТД данных узлов.

Изложение материала и его результаты. Исследование вибрационной активности редуктора ЦОС-120 главной линии обжимной клетки 350 выполнено в период февраля – мая. Измерения параметров вибрации проводилось при работе оборудования в режиме рабочего хода, при помощи виброметра 107В и пьезоэлектрического датчика. Крепление датчика осуществлялось при помощи магнита. Схема размещения точек измерения вибрационных параметров редуктора ЦОС – 120 приведена на рисунке 1, результаты измерения в хронологическом порядке – в таблице 1.

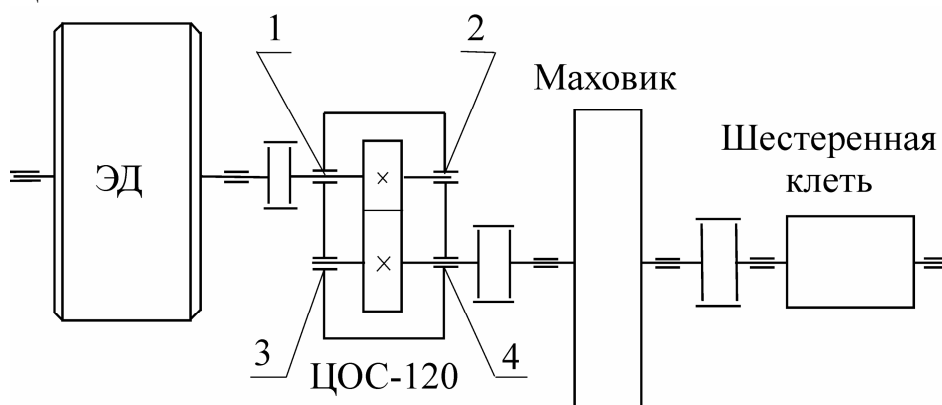


Рисунок 1 – Расположение точек измерения параметров вибрации редуктора ЦОС-120: 1 и 2 – подшипники быстроходного вала редуктора со стороны, соответственно, электродвигателя и шестеренной клетки; 3 и 4 – подшипники тихоходного вала редуктора со стороны, соответственно, электродвигателя и шестеренной клетки; ЭД – электродвигатель

Таблица 1 – Результаты измерения параметров вибрации редуктора ЦОС-120

Параметры вибрации	Направление измерения	Дата измерения						
		19.02.08	03.03.08	08.04.08	14.04.08	21.04.08	19.05.08	20.05.08
Точка измерения 1								
СКЗ, мм/с	вертикальное	2,6	3,5	2,2	3,6	2,95	1,5	1,7
СКЗ, мм/с	горизонтальное	2,3	2,1	0,84	1,1	1,89	1,18	1,08
СКЗ, мм/с	осевое	2,9	2,5	1,16	1,89	2,14	1,5	1,9
СКЗ/ПИК, м/с ²	вертикальное	6/–	5,8/25	3,5/8,9	4/12	3,9/12	2,4/8	2,3/8
СКЗ/ПИК, м/с ²	горизонтальное	6,8/–	5,2/20	1,7/5,7	2,7/9,5	2,5/8,7	2,1/6,6	1,5/5,9
Точка измерения 2								
СКЗ, мм/с	вертикальное	2	2,3	2,17	2,55	2,75	1,8	1,5
СКЗ, мм/с	горизонтальное	1,7	2,5	1,0	2,43	2,86	0,98	1,6
СКЗ, мм/с	осевое	2,2	2,7	1,25	2,9	3,24	3	2,1
СКЗ/ПИК, м/с ²	вертикальное	3,9/–	4,1/13	4/10	5,8/20	3/13	2/10	3/12
СКЗ/ПИК, м/с ²	горизонтальное	3,7/–	3,8/13	3/10	5/14	3/12	3,6/11	2,3/7
Точка измерения 3								
СКЗ, мм/с	вертикальное	1,4	1,4	0,64	1,53	1,21	1,3	1,1
СКЗ, мм/с	горизонтальное	2,8	1,8	1,02	1,35	2,26	1,6	1
СКЗ, мм/с	осевое	1,8	2,3	1,61	2,1	2,26	1,4	2,1
СКЗ/ПИК, м/с ²	вертикальное	4,9/–	4,5/15	1,5/4,8	2,1/7,7	2,2/7,5	2,9/10	2,7/8
СКЗ/ПИК, м/с ²	горизонтальное	4,8/–	4/14	1,5/4,3	1,9/7,3	2,1/6,3	2/6,9	2/7
Точка измерения 4								
СКЗ, мм/с	вертикальное	2,2	1,0	0,45	1,34	1,17	0,8	1,1
СКЗ, мм/с	горизонтальное	1,1	1,3	0,57	1,28	1,26	0,7	1,0
СКЗ, мм/с	осевое	2	3,1	1,35	2,06	3,46	2,1	1,3
СКЗ/ПИК, м/с ²	вертикальное	2/–	2,4/9	1,4/5	4/11	3/10	2,5/7	2,5/7
СКЗ/ПИК, м/с ²	горизонтальное	2,2/–	2,1/7	1,8/5,6	2,4/9	2/7,5	3/8	2/7

Условные обозначения: СКЗ – среднеквадратичное значение виброскорости; СКЗ/ПИК – среднеквадратичное/пиковое значение виброускорения.

Измерения проводились в вертикальном (V), горизонтальном (H), осевом (A) направлениях. Проводились измерения общих параметров вибрации и частотной формы вибрационного сигнала, при рабочей частоте вращения. Контролируемый частотный диапазон: при измерении виброскорости 2...400 Гц; при измерении виброускорения 10...4000 Гц.

В период наблюдений 3 апреля 2008 г. произошла плановая остановка прокатного стана, во время которой было осуществлена замена быстроходного вала вышеуказанного редуктора из-за обнаружения начальной стадии разрушения сепараторов подшипников, при визуальном осмотре оборудования во время предшествовавшего текущего ремонта 27 марта 2008 г.

Из данных таблицы 1, основываясь на рекомендациях по определению технического состояния оборудования на основе результатов их вибрационной диагностики, приведенных в работах [1,4], можно сделать вывод, что для обследований 19 февраля и 3 марта 2008 г., предшествовавших выходу из строя быстроходного вала, техническое состояние

редуктора характеризуется как удовлетворительное. Отклонения значений виброскорости в двух последовательных обследованиях до $\pm 50\%$ явление достаточно распространенное в практике вибродиагностирования и может быть объяснено неизбежным изменением усилия затяжки резьбовых соединений под влиянием вибрации и ремонтных воздействий со стороны обслуживающего персонала, проведенных в период времени между указанными датами.

Осмотр подшипников быстроходного вала, проведенный после его замены, позволил установить следующее.

1. На беговой дорожке одного из рядов роликов подшипника со стороны обжимной клетки присутствуют следы схватывания (рисунок 2). Размеры повреждения позволяют предположить о наличии данного дефекта в скрытом виде при установке подшипника и дальнейшем интенсивном развитии при снижении демпфирующих свойств масляной пленки при повышении температуры окружающего воздуха.

2. Внутреннее кольцо подшипника со стороны электродвигателя имеет многочисленные трещины (рисунок 3) и следы проворота на посадочной поверхности. Это результат воздействия динамических (ударных) нагрузок из-за повышенных зазоров, ослабления посадки внутреннего кольца подшипника при сборке и повышение момента сопротивления при работе подшипника.

3. На роликах обоих подшипников просматриваются цвета побежалости от темно-желтого до темно-синего цвета, что соответствует температуре нагрева поверхности $230...270\text{ }^{\circ}\text{C}$.

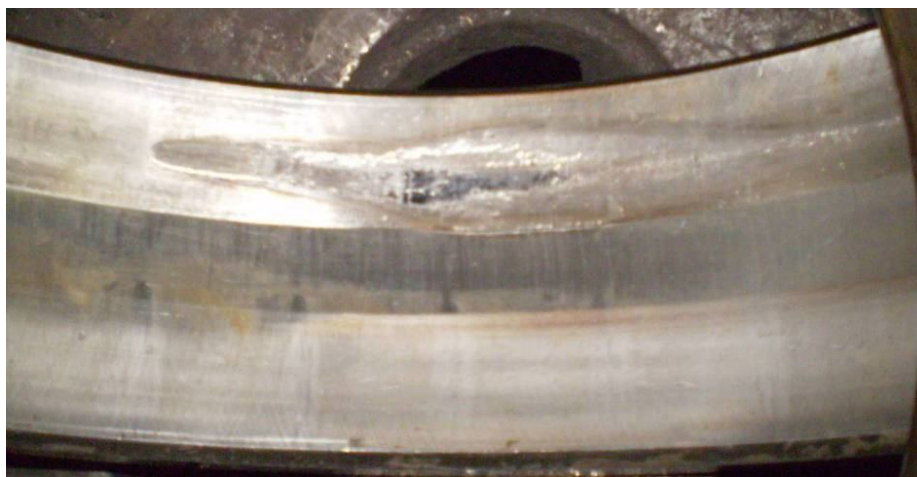


Рисунок 2 – Повреждения на беговой дорожке наружного кольца подшипника



Рисунок 3 – Трещины и следы проворота на посадочной поверхности внутреннего кольца подшипника

Изложенное позволило сделать вывод о том, что разрушение деталей подшипника произошло в результате неблагоприятного сочетания комплекса параметров определяющих его работоспособное состояние: ослабление резьбовых соединений, износ посадочных мест. Иницирующим событием послужило изменение температуры окружающей среды (рисунок 4).

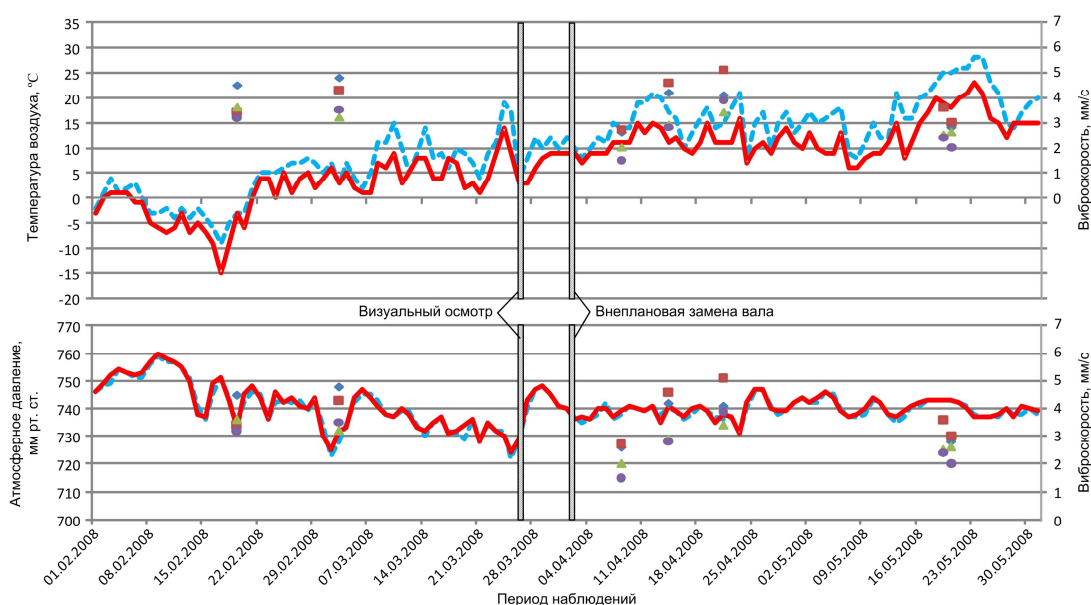


Рисунок 4 – Сопоставление температуры воздуха и атмосферного давления в Донецком регионе с уровнем вибрации редуктора ЦОС-120 за период наблюдения с февраля по май 2008 г.: --- и — — температура и атмосферное давление, соответственно утром и вечером;
◆, ■, ▲ и ● — точки измерения (таблица 1), соответственно 1, 2, 3 и 4

Как видно из приведенных графиков на рисунке 6 в период с 1 февраля по 3 марта 2008 г. (дата второго измерения параметров вибрации редуктора) произошло скачкообразное изменение температуры воздуха в Донецком регионе с минусовых на плюсовые значения. Далее до даты визуального осмотра подшипников редуктора – 27 марта 2008 г. – температура воздуха продолжила скачкообразные изменения, но уже ниже нулевого значения не опускалась. Именно в эти периоды, когда температура воздуха повышалась выше 0 до 10...15 °С в прокатном цехе наблюдался "парниковый эффект" – температура воздуха в закрытом производственном помещении поднималась еще выше. В период времени с 27 марта по 14 апреля 2008 г. (дата третьего измерения параметров вибрации редуктора) температура воздуха сохраняла относительно стабильное значение. До конца мая месяца 2008 г. температура воздуха продолжила скачкообразное изменение в сторону повышения значения.

Изложенное позволяет сделать вывод, что для предупреждения аварийных отказов в работе металлургического оборудования, эксплуатирующегося в закрытых производственных помещениях, в весенний и осенний периоды необходимо уменьшать периодичность диагностирования оборудования, особенно по параметрам вибрации. Это позволит не пропустить момент перехода от стадии нормального износа к стадии интенсивного (аварийного) износа элементов составных частей диагностируемого оборудования и вместо ремонта предупредительного не придется выполнять ремонт аварийный, сопровождающийся существенными затратами.

Таким образом, было определено, что развитие повреждений подшипников носило лавинообразный характер, связанный с изменением внешних условий работы, в частности изменения температуры окружающей среды и изменением свойств масляной пленки в узлах трения. Это увеличило и динамические удары по внутреннему кольцу одного из подшипников, в дополнении к ослаблению резьбовых соединений и износу посадочных мест подшипников. Разрушение деталей подшипника произошло в результате неблагоприятного сочетания комплекса параметров определяющих его работоспособное состояние: ослабление резьбовых соединений, износ посадочных мест. Иницилирующим событием послужило изменение температуры окружающей среды (рисунок 4).

Данные наблюдений 14.04 и 21.04 свидетельствуют, что после замены дефектного узла быстроходного вала новым в первое время показатели виброактивности нового узла остаются на уровне, приблизительно соответствующем показателям заменённого узла в период его нормальной работы до аварийного выхода из строя. Уменьшение виброактивности нового узла, зафиксированное наблюдениями 19.05 и 20.05 указывает на развитие приработки элементов привода.

Выводы и направление дальнейших исследований.

1. Период наблюдений вибрационных характеристик редуктора ЦОС-120 главной линии обжимной клетки 350 прокатного стана не обеспечил гарантированной возможности фиксации изменений параметров вибрации редуктора, позволяющей выявить предаварийное состояние подшипников быстроходного вала редуктора. Использование дополняющего метода диагностирования – визуального осмотра позволило своевременно обнаружить, провести внеплановую замену быстроходного вала редуктора и предупредить развитие аварийной ситуации.

2. Установлено, что возникновение и развитие дефектов подшипников быстроходного вала редуктора обусловлено изменением температуры окружающей среды, что свидетельствует о влиянии "сезонного фактора" на техническое состояние механического оборудования эксплуатирующегося в закрытых производственных помещениях.

3. Влияние "сезонного фактора" на работоспособность металлургического оборудования практически еще не изучено. В связи с этим актуальной представляется задача сбора информации об отказах, изменении скорости износа элементов составных частей металлургического оборудования в весенний и осенний периоды. Эти данные могут быть использованы как критерии для определения периодичности диагностирования оборудования и как диагностические факторы для дополняющих методов диагностирования. Это позволит принимать правильные решения о необходимости предупредительной замены изношенных составных частей оборудования для предотвращения аварийных отказов и внеплановых остановок оборудования.

Библиографический список

1. Веренев В.В. *Диагностика и динамика прокатных станов* / Веренев В.В., Большаков В.И., Путноки А.Ю., Коринь А.А., Мацко С.В. – Днепропетровск: ИМА – пресс. – 2007. – 144 с.

2. Кравченко В.М. *Техническое обслуживание и диагностика промышленного оборудования* / Кравченко В.М. – Донецк: ООО «Юго – Восток, ЛТД», 2004. – 504 с.

3. Смирнов А.Н. *Диагностирование технических устройств опасных производственных объектов* / Смирнов А.Н., Герике Б.Л., Муравьев В.В. – Новосибирск: Наука, 2003. – 244 с.

4. Голуб Е.С. *Диагностирование судовых технических средств: [справочник]* / Голуб Е.С., Мадорский Е.З., Розенберг Г.Ш. – М.: Транспорт, 1993. – 150 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.

*Петрищев А.С.
(ЗНТУ, г. Запорожье, Украина),
д.т.н. Григорьев С.М.
(ЗНТУ, г. Запорожье, Украина)*

ТЕРМОДИНАМИКА ИСПАРЕНИЯ ОКСИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МОЛИБДЕНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МОЛИБДЕНОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Досліджено і порівняно між собою пружності пари оксидних з'єднань молібдену. Прослідковано механізм випаровування. Встановлена залежність швидкості сублімації триоксиду молібдену з молібденового концентрату КМо від температури. Виявлений вплив вмісту супутніх домішок в концентраті на швидкість випаровування оксидів молібдену. Проведений аналіз і порівняння одержаних результатів з процесами випаровування технічно чистого триоксиду молібдену. Показаний ступінь засвоєння тугоплавких легувальних елементів розплавом сталі при використанні металізованого молібденового концентрату.

Ключові слова: пружність пари, сублімація, молібден, оксиди, молібденовий концентрат, вигар, ступінь засвоєння, розплав сталі.

Исследованы и сопоставлены между собой упругости паров оксидных соединений молибдена. Выполнен анализ физико-химических условий сублимации MoO_3 . Установлена зависимость скорости сублимации триоксида молибдена из молибденового концентрата (КМо) от температуры. Выявлено влияние содержания сопутствующих примесей в концентрате на скорость испарения оксидов молибдена. Проведен анализ и сравнение полученных результатов с процессами испарения технически чистого триоксида молибдена. Показана степень усвоения тугоплавких легирующих элементов расплавом стали при использовании металлизированного молибденового концентрата.

Ключевые слова: упругость паров, сублимация, молибден, оксиды, молибденовый концентрат, угар, степень усвоения, расплав стали.

Ориентация на преимущественно экстенсивное использование природных ресурсов экономически оправданная в недалеком прошлом, в современных условиях не только нецелесообразна, но и невозможна. Доступность и сравнительная дешевизна природных ресурсов, которая имела место в период экстенсивного экономического роста, не стимулировала формирования прогрессивного с позиций современной техно-

логической структуры металлургии, комплексного использования сырья и материалов, что привело к чрезмерной энерго- и материалоемкости конечного продукта. Эти тенденции особенно проявились в металлургии редких металлов и легирующих материалов на их основе. В настоящий период эта проблема усугубляется отсутствием сырьевых источников для производства тугоплавких легирующих материалов, а их дефицит восполняется импортными поставками [1].

Ситуация, которая сложилась с образующимися отходами и их последующей переработкой характеризуется низкой степенью использования ценных дефицитных редких и тугоплавких элементов, а также отсутствием на практике надежных технологий их утилизации из техногенных отходов. Высокая летучесть высших оксидных соединений тугоплавких легирующих элементов, в том числе оксидов молибдена, при повышении температуры приводит к существенным потерям ценных легирующих элементов при выплавке стали в результате угара, что значительно затрудняет их утилизацию из техногенных отходов производства специальных и быстрорежущих сталей и снижает эффективность производства металлопродукции. Проблема уменьшения убытков в результате угара остро стоит на многих металлургических предприятиях [2].

Цель настоящей работы заключалась в углублении представлений о зависимости давления паров оксидных соединений молибдена от температуры и других факторов для разработки и оптимизации технологических параметров восстановления металлооксидных молибденсодержащих рудных концентратов и техногенных отходов с целью использования полученного продукта в качестве легирующего материала.

Наиболее достоверное значение температуры плавления молибдена составляет $2895 \pm 10\text{K}$, а наиболее надежное значение температуры кипения – 5100K [3].

Известно, что наиболее устойчивые оксиды молибдена – MoO_2 и MoO_3 . Ряд оксидов между соединениями MoO_2 и MoO_3 менее определенного состава. В литературе известно о существовании оксидов следующего состава: MoO_2 , Mo_4O_{11} , $\text{Mo}_{10}\text{O}_{29}$, Mo_8O_{23} , $\text{Mo}_{11}\text{O}_{32}$, Mo_9O_{26} , MoO_3 [4].

Диоксид молибдена MoO_2 (66,67 % ат. O) имеет искаженную кристаллическую решетку рутила, которая по структуре изоморфна диоксиду вольфрама [4].

Твердый диоксид молибдена при температуре $2250 \pm 50\text{K}$ и давлении 1 ат. разлагается на молибден и газообразный кислород, также известны результаты исследований, в которых некоторая часть твердого диоксида молибдена возгоняется без разложения, но большая ее часть разлагается на газообразную MoO_3 и твердый молибден [4].

Область гомогенности фазы на основе соединения MoO_2 составляет $\text{MoO}_{1,9-2,03}$ [4].

Обращаясь к работе [5] можно заметить, что данные близки к значениям, которые получены в работе [4]: температура плавления MoO_2 – 1927°C , разложения – 1977°C .

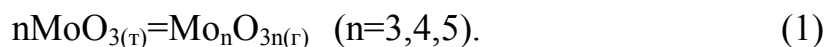
Структура трехоксида молибдена орторомбическая. Область гомогенности фазы на основе оксида MoO_3 составляет $\text{MoO}_{2,95-3,00}$. Температура плавления триоксида молибдена гораздо ниже, чем у металла, и составляет $791 - 795,2^\circ\text{C}$. Температура кипения MoO_3 равна 1155°C [4]. Обращаясь к данным работы [5] получаем довольно близкие значения температуры кипения к [4], температура плавления MoO_3 – $801 \pm 2^\circ\text{C}$, кипения – 1257°C .

Триоксид молибдена – белое с зеленоватым оттенком вещество, при нагреве желтеющее и заметно возгоняющееся при температурах ниже температуры плавления [4].

Обнаружена область гомогенности на основе соединения Mo_4O_{11} в интервале составов $\text{MeO}_{2,65-2,75}$ и установлено, что оксид этого состава разлагается при пониженном давлении и температуре выше 926°K . При температуре 1075°K образуется новая фаза [4]. Оксид Mo_4O_{11} имеет моноклинную модификацию до 615°C , орторомбическую в интервале температур $615 - 800^\circ\text{C}$ [4], температура плавления – $824 \pm 10^\circ\text{C}$ [5].

Оксиды Mo_8O_{23} и Mo_9O_{26} менее стабильны. Mo_8O_{23} разлагается при температуре $785 - 800^\circ\text{C}$ [4]. В работе [5] приводится температура разложения Mo_8O_{23} – 700°C . Mo_9O_{26} разлагается при $800 \pm 10^\circ\text{C}$ на жидкость + $(\text{MoO}_3 + \text{Mo}_4\text{O}_{11})$ [5].

Результаты работы [6] свидетельствуют о присутствии явления полимеризации при испарении MoO_3 , при этом авторами сделан вывод, что насыщенный пар триоксида молибдена состоит из молекул Mo_3O_9 , Mo_4O_{12} , и Mo_5O_{15} , то есть испарение триоксида молибдена происходит по схеме

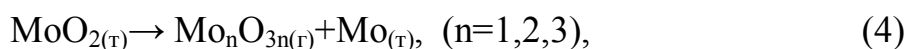


Посредством рентгенофазного анализа остатка после сублимации $\text{MoO}_{2(\text{т})}$ показано, что двуоксид молибдена диспропорционирует. Пар над $\text{MoO}_{2(\text{т})}$ содержит $\text{MoO}_{2(\text{г})}$ (29%) и $\text{MoO}_{3(\text{г})}$ (71%), т.е. испарение идет по реакциям [6]



Из сравнения структур остатка вещества после испарения и исходного двуоксида молибдена, а также масс-спектрального анализа па-

рогазовой фазы сделан вывод, что испарение $\text{MoO}_{2(\text{т})}$ в области температур 1540 – 1770K происходит по схеме



На рисунке 1 приведены зависимости давления пара над оксидами молибдена от температуры [6].

Одновременное присутствие на рисунке 1 нескольких зависимостей парциального давления того или иного компонента от температуры объясняется собранием результатов различных источников с использованием отличающихся друг от друга методов исследования в разных температурных интервалах.

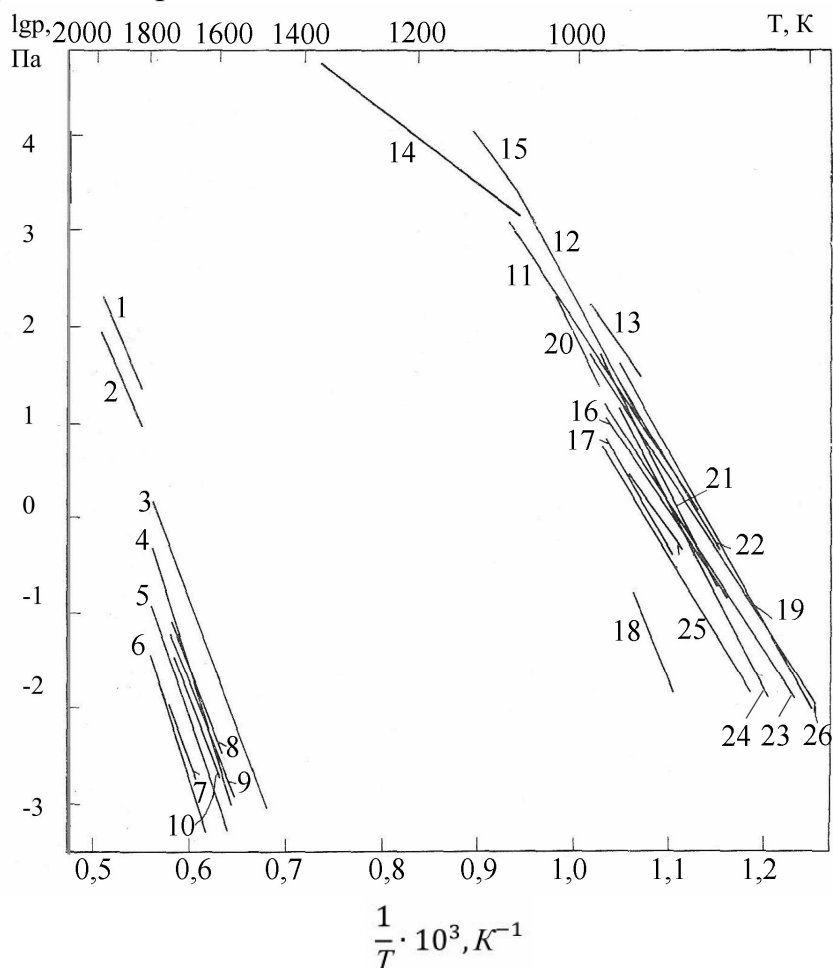


Рисунок 1 – Температурная зависимость давления пара над MoO_2 (1 – 10) и MoO_3 (11 – 26)

1 – $P(\text{MoO}_3)$; 2 – $P(\text{MoO}_2)$; 3 – $P(\text{MoO}_3)$; 4 – $P(\text{Mo}_2\text{O}_6)$; 5 – $P(\text{MoO}_2)$; 6 – $P(\text{Mo}_3\text{O}_9)$; 7 – $P(\text{Mo}_3\text{O}_9)$; 8 – $P(\text{Mo}_2\text{O}_6)$; 9 – $P(\text{MoO}_3)$; 10 – $P(\text{MoO}_2)$; (11-15) – $P_{\text{общ.}}$; 16 – $P(\text{Mo}_3\text{O}_9)$; 17 – $P(\text{Mo}_4\text{O}_{12})$; 18 – $P(\text{Mo}_5\text{O}_{15})$; (19 – 22) – $P_{\text{общ.}}$; 23 – $P(\text{Mo}_3\text{O}_9)$; 24 – $P(\text{Mo}_4\text{O}_{12})$; 25 – $P(\text{Mo}_5\text{O}_{15})$; 26 – $P_{\text{общ.}}$.

Из рисунка 1 видно, что результаты исследований различных авторов относительно давления паров над MoO_2 и MoO_3 удовлетворительно совпадают, образуя экспоненциальную тенденцию увеличения давления паров от температуры. При этом давление паров над MoO_3 более чем на три порядка выше, чем над MoO_2 , что подтверждает гораздо большую летучесть триоксида молибдена.

На рисунке 2 а,б изображена зависимость парциального давления компонентов соответственно над оксидом молибдена MoO_2 и MoO_3 от температуры [6]. При этом подтверждается четкая тенденция нарастания парциального давления компонентов системы с увеличением температуры.

Кривые на рисунке 2 свидетельствуют о том, что давление паров над MoO_3 (б) значительно выше суммарного давления паров компонентов над MoO_2 (а). По описанной зависимости давление паров над MoO_3 превышает атмосферное уже при температурах больше 1600 К, что может вызвать высокую скорость сублимации триоксида молибдена при данных температурах. Над диоксидом молибдена в качестве паров присутствуют оксиды Mo_2O_6 , MoO_3 , MoO_2 и Mo_3O_9 . Указанная выше последовательность описывает тенденцию уменьшения парциального давления паров оксидов от Mo_2O_6 до Mo_3O_9 (рисунок 2 а).

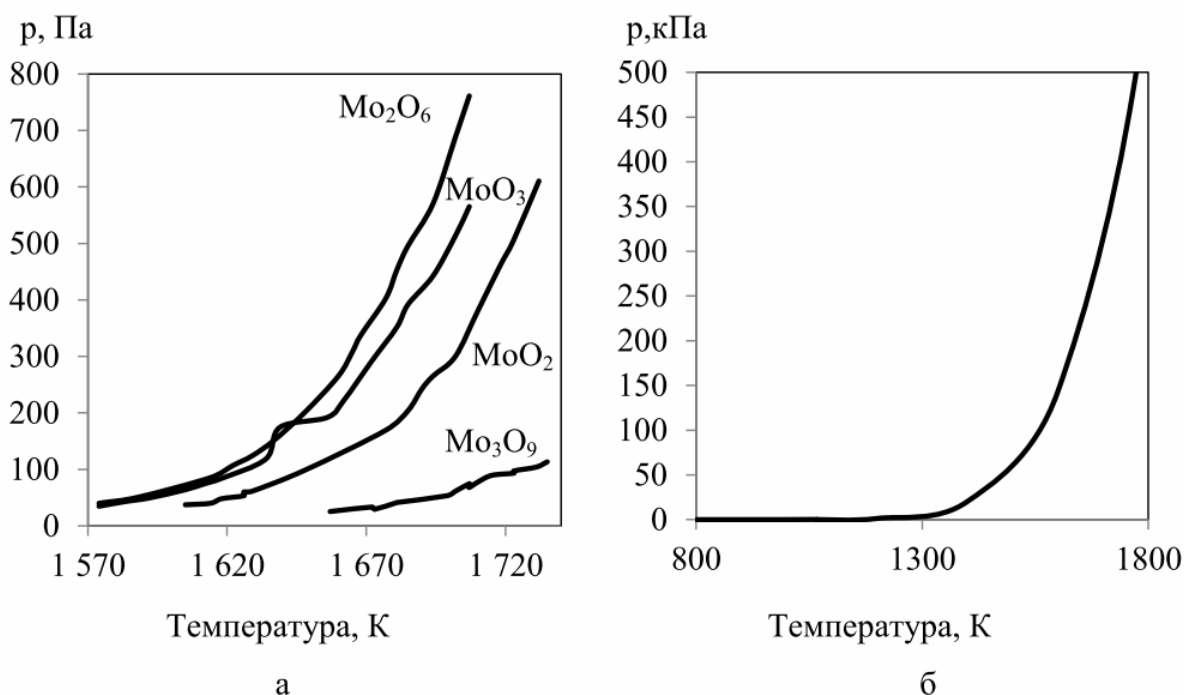


Рисунок 2 – Зависимость парциального давления компонентов над оксидом молибдена MoO_2 (а) и MoO_3 (б) от температуры

Относительный состав пара над $\text{MoO}_{3(\text{т})}$ при различных температурах приведен на рисунке 3,а [6]. Прослеживается тенденция повышения процентного содержания оксидов Mo_4O_{12} и Mo_5O_{15} по отношению к Mo_3O_9 с повышением температуры. При температуре около 960 К содержание Mo_4O_{12} превышает Mo_3O_9 , содержание которого падает в исследуемом температурном интервале от 75% до 35%. Содержание Mo_5O_{15} в паре над MoO_3 наименьшее, однако при температуре выше 950 К интенсивно возрастает.

Скорость сублимации $\text{MoO}_{3(\text{т})}$ (остаточное давление $2 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст.), рассчитанная из данных по общему давлению пара [6], приведена на рисунке 3,б. Характер зависимости скорости сублимации $\text{MoO}_{3(\text{т})}$ аналогичен характеру увеличения давления паров над данным оксидом. Скорость сублимации, каждый раз при увеличении температуры на 50 К, повышается примерно на порядок, что описывает характер больших потерь Мо в процессе сублимации MoO_3 .

Скорость испарения трехокси молибдена в интервале температур 1073 – 1423 К с учетом движения внешней газовой среды исследована Файзером [3]. Даже при малых скоростях потока газа-носителя скорости испарения чистой трехокси молибдена, полученные Файзером, достаточно высоки и возрастают от 12 кг/(м²·ч) при 1173 К до 109 кг/(м²·ч) при 1373К. Наличие примесей в молибденовых огарках снижает абсолютную скорость испарения MoO_3 , о чем свидетельствуют данные полученные Дитцом [3]. Так при температуре 1273 К и скорости потока воздуха 2,3 м/с скорость испарения MoO_3 имеет величину от 10 до 20кг/(м²·ч).

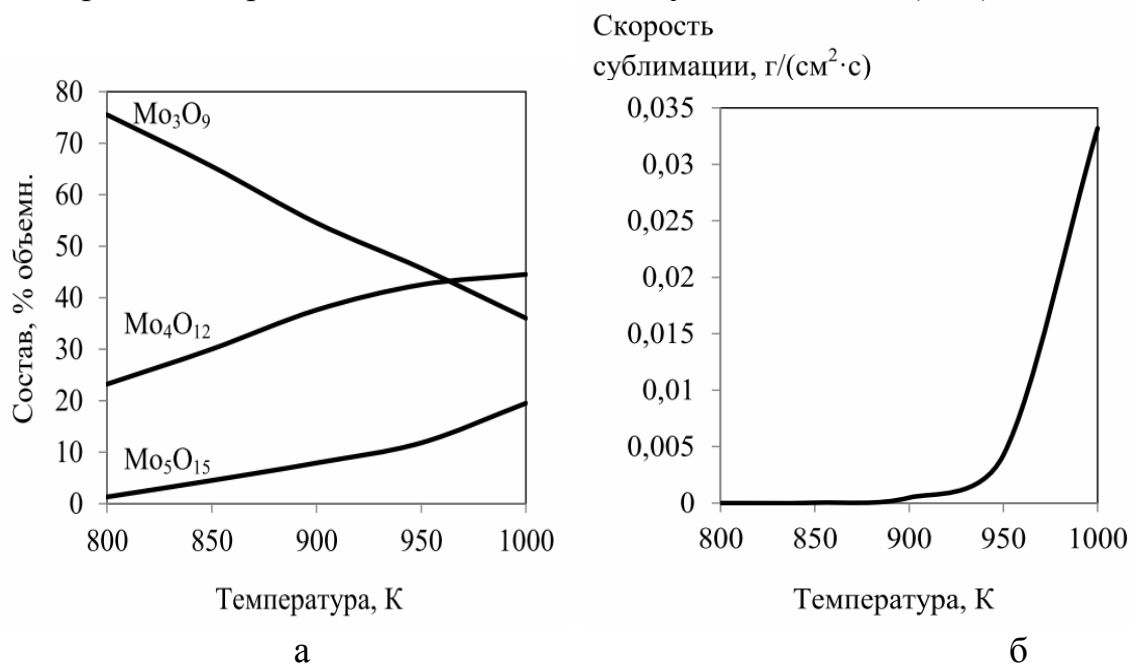


Рисунок 3 – Зависимость состава пара над $\text{MoO}_{3(\text{т})}$ (а) и скорости сублимации $\text{MoO}_{3(\text{т})}$ (б) от температуры

В качестве исследуемого образца использован молибденовый концентрат (КМо), технология получения и сферы применения которого описаны в работе [7]. Летучесть технической трехокиси молибдена (КМо), содержащей 82,7% MoO_3 , исследовали в изотермическом режиме в течении 5 минут.

Результаты проведенных опытов представлены на рисунке 4. В пределах температур 1073 – 1273К скорости испарения MoO_3 из концентрата хорошо укладываются на прямую. Эту зависимость можно выразить уравнением: $\lg i(\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})) = -862,85/T + 0,3247$, где T – температура, К.

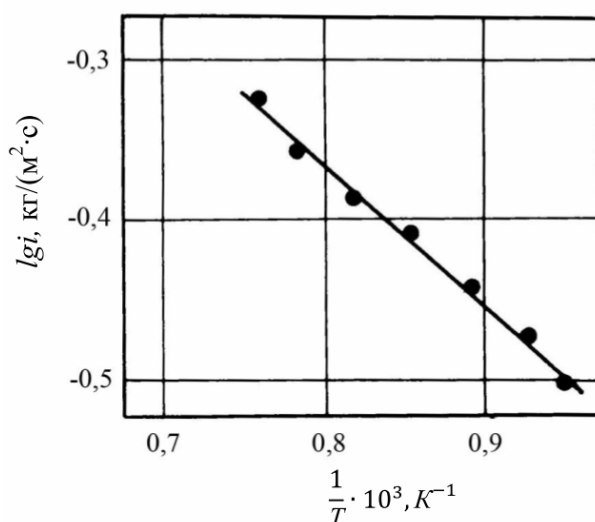


Рисунок 4 – Зависимость логарифма скорости испарения трехокиси молибдена из обожженного молибденового концентрата от обратной температуры [8]

Эти данные ниже полученных Файзером, так как им применялся чистый триоксид молибдена. Они также ниже приведенных Дитцом, так как в настоящих опытах меньше скорость потока воздуха. Кроме того, огарки содержат меньше примесей, чем испытанный в ходе испытаний концентрат.

Проведенные исследования подтверждают, что для получения легирующего материала, позволяющего уменьшить потери молибдена посредством угара при выплавке стали, необходимо обеспечить условия перехода триоксида молибдена в диоксид, обладающий значительно меньшей упругостью паров, с последующим довосстановлением до молибдена свободного или других соединений, не склонных к сублимации при повышенных температурах. Установленные в данной работе закономерности, позволяют глубже понять природу угара, обуславливающего высокие безвозвратные потери ценных легирующих элементов при вы-

плавке стали, с целью его минимализации. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации и совершенствования уже существующих технологий, получивших развитие в данном направлении.

Разработка технологии получения концентрата молибденового металлизированного (КММ) [7] и применение его в качестве легирующего материала в промышленных условиях завода “Днепроспецсталь” при выплавке стали Р6М5 с расходом 31 кг/т дали возможность повысить степень усвоения таких элементов, как Мо, W, Cr, V по сравнению с использованием комплекса КМо и ФМо60 с 86,8; 87,4; 78,4; 73,5 до 95,0; 94,8; 91,4; 82,3 % мас. соответственно. Причиной является сокращение количества триоксида молибдена в составе лигатуры, уменьшение окислительного потенциала шихты и увеличение скорости растворения в расплаве стали относительно стандартного ферромolibдена. По качеству металл, выплавленный с использованием КММ, не уступает металлу, полученному с использованием КМо и ФМо60, а сквозная степень использования основных легирующих элементов при производстве других сталей (АР6М5, А11Р3М3Ф2, Р6М5К2, 10Р6М5) – на уровне стали Р6М5 и на 4-10% выше аналогичных показателей действующей технологии, что подтверждает высокие технико-экономические показатели использования КММ в сталеплавильном производстве.

Выводы

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о значительно большей (на несколько порядков) упругости паров триоксида молибдена относительно диоксида молибдена. При этом давление паров MoO_3 приближается к атмосферному уже при 1600 К. Также прослеживается полимеризация MoO_3 в процессе парообразования. Проведенные эксперименты по измерению скорости сублимации триоксида молибдена из молибденового концентрата свидетельствуют о влиянии примесей в сторону понижения скорости сублимации. Однако полученная зависимость предполагает значительную скорость испарения MoO_3 , которая возрастает от 0,33 кг/(м²·с) при 1073 К до 0,44 кг/(м²·с) при 1273 К. Проведенные исследования подтверждают, что для получения легирующего материала, позволяющего уменьшить потери молибдена посредством угара при выплавке стали, необходимо обеспечить условия перехода триоксида молибдена в диоксид, обладающий значительно меньшей упругостью паров, с последующим довосстановлением до молибдена свободного или других соединений, не склонных к сублимации при повышенных температурах. Разработка технологии получения концентрата молибденового металлизированного (КММ) и применение его в качестве легирующего материала в промышленных условиях завода “Днепроспецсталь” при выплавке стали Р6М5 с расходом 31 кг/т дали возможность повысить степень усвоения таких элементов, как Мо, W, Cr, V по

сравнению с использованием комплекса КМо и ФМо60 с 86,8; 87,4; 78,4; 73,5 до 95,0; 94,8; 91,4; 82,3 % мас. соответственно, что подтверждает эффективность использования КММ в сталеплавильном производстве.

Дальнейшие исследования будут направлены на отработку предложенных технологических режимов при производстве других легированных марок стали содержащих Мо, W, Cr, V.

Библиографический список

1. Грищенко С.Г. Состояние ферросплавной промышленности Украины в 2003-2006 гг. / Грищенко С.Г. // *Сталь*. - 2007. - №11. - С. 96-99.
2. Сосонкин О.М. Уменьшение угара металла при выплавке стали в высокомоощных дуговых печах / Сосонкин О.М. // *Сталь*. - 2008. - №8. - С. 40-42.
3. Зеликман А.Н. Молибден / Зеликман А.Н – М.: Металлургия, 1970. - 440 с.
4. Корнилов И.И. Взаимодействие тугоплавких металлов переходных групп с кислородом / Корнилов И.И., Глазова В.В. – М.: Наука, 1967. – 256 с.
5. Физико-химические свойства окислов. Справочник / [Самсонов Г.В., Борисова А.Л., Жидкова Т.Л и др.] – М.: Металлургия, 1978. – 472 с.
6. Казенас Е.К. Давление и состав пара над окислами химических элементов / Казенас Е.К., Чижигов Д.М. – М.: Наука, 1976. – 342 с.
7. Григорьев С.М. Разработка и оптимизация многофункциональной системы зависимостей технико-экономических показателей производства металлизированного молибденового концентрата / С.М. Григорьев, Ю.И. Нагорный, С.Ю. Былим // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. - 2006. - №1. - С. 101-103.
8. Влияние соотношения кислорода и углерода в шихте на содержание некоторых элементов в металлизированном молибденовом концентрате / Григорьев С.М., Пивень А.Н., Острик П.Н. [и др.] // *Сталь*. - 1986. - №10. - С. 82-84.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.

*к.т.н. Семирягин С.В.,
Божанова Е.С.,
к.х.н. Пожидаева Э.Ю.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

О МОЛЕКУЛЯРНОСТИ И ПОРЯДКЕ РЕАКЦИЙ В ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКЕ

У роботі детально розглянуті основні поняття хімічної кінетики: молекулярність реакції, порядок реакції, швидкість реакції, механізм реакції. Приведено визначення хімічної кінетики через поняття інтермедіант. На прикладі металургійних процесів розглянуті особливості складних гетерогенних реакцій. Приведені основні стадії дифузійно-кінетичного механізму відновлення оксидів заліза газоподібними відновниками. Детально розглянуті найбільш ефективні методи визначення порядків реакцій.

Ключові слова: *хімічна кінетика, молекулярність реакції, порядок реакції, інтермедіанти, швидкість реакції, гетерогенні реакції в металургійних процесах, лімітуюча стадія реакції.*

В работе подробно рассмотрены основные понятия химической кинетики: молекулярность реакции, порядок реакции, скорость реакции, механизм реакции. Приведено определение химической кинетики через понятие интермедии. На примере металлургических процессов рассмотрены особенности сложных гетерогенных реакций. Приведены основные стадии диффузионно-кинетического механизма восстановления оксидов железа газообразными восстановителями. Подробно рассмотрены наиболее эффективные методы определения порядков реакций.

Ключевые слова: *химическая кинетика, молекулярность реакции, порядок реакции, интермедии, скорость реакции, гетерогенные реакции в металлургических процессах, лимитирующая стадия реакции.*

Постановка проблемы в общем виде. В связи с особой ролью, которую играет в химической кинетике порядок реакции, являясь своеобразным «диагностическим» критерием, есть необходимость рассмотреть методы его определения и отличия от молекулярности реакции; применить современные методы (компьютерные программы) для выяснения механизма электрохимических процессов.

Целью данной работы является рассмотрение основополагающих понятий химической кинетики, таких как молекулярность и порядок реакции, особенностей протекания сложных реакций в металлургических процессах, методов определения порядка реакции для практического применения при извлечении малых количеств металлов из многокомпонентных смесей.

Анализ последних достижений и публикаций. Превращения исходных веществ в конечные являются общим предметом рассмотрения в химической кинетике и в химической термодинамике, но подходы к исследованию в этих двух важнейших разделах современной физической химии существенно различаются.

Термодинамика позволяет судить о том, возможно ли превращение конкретных исходных веществ в конкретные продукты и каков будет состав смеси в состоянии равновесия. Кинетика же решает вопрос о том, с какой скоростью реакционная система будет стремиться к этому состоянию. В отличие от классической термодинамики, где переменная времени не фигурирует, в химической кинетике она входит в явном или неявном виде во все основные уравнения. Однако в последние десятилетия благодаря фундаментальным работам брюссельской школы в области термодинамики необратимых процессов (Т.Де Донде, И.Пригожин) эти различия между термодинамикой и кинетикой начинают терять свои четкие очертания, что соответствует современному пониманию физико-химической реальности окружающего мира [1].

Второе отличие кинетики и термодинамики – в их подходе к тому пути, по которому происходит превращение исходных веществ в продукты реакции. В химической термодинамике для определения состава равновесной смеси необходимо задать только начальное и конечное состояние системы, при этом результат расчета не зависит от конкретного способа перехода исходных веществ в продукты. Для химической кинетики, наоборот, принципиально важно, как образуются конечные продукты: непосредственно из исходных веществ или из промежуточных (интермедиантов), в которые сначала превращаются исходные вещества, ведь относительная реакционная способность интермедиантов определяет характер всего процесса в целом и его развитие во времени. Здесь уместно привести образное и точное определение химической кинетики, которое принадлежит Нобелевскому лауреату Н.Н.Семенову: химическая кинетика есть не что иное, как физика и химия интермедиантов.

Важный параметр в кинетике – это время протекания процесса. Величина скорости реакции, ее зависимость от времени, в значительной степени определяются отклонением системы от равновесия. В системах, близких к состоянию равновесия, скорость процесса со временем моно-

тонно уменьшается до нуля при равновесии. Если отклонения от равновесия значительны, то в системе возможно возникновение немонотонных, а в некоторых случаях и колебательных процессов. В них скорость может менять знак; иногда при незначительном воздействии на систему наблюдается резкое изменение скорости, возникают сохраняющиеся в течение продолжительного времени, неравновесные структуры, влияющие на скорость. В некоторых системах, при больших отклонениях от равновесия, возможны взрывные процессы (примером могут служить цепные реакции), т.е. процессы, скорость которых неограниченно возрастает со временем

Совокупность всех реакций, которые в данных условиях могут реально протекать в реакционной системе и в сумме реализуют стехиометрическое превращение исходных веществ в конечные продукты, принято называть механизмом химической реакции.

Для элементарных реакций, которые идут в одну стадию, главной характеристикой является их молекулярность, т.е. минимальное число частиц, необходимое для реализации данной реакции. В сложных многостадийных реакциях учитывается не только прямое направление элементарной реакции, но и обратное, если только оно термодинамически возможно.

Для простых химических реакций наиболее корректным является следующее определение скорости: это число элементарных актов, происходящих в единицу времени в единице реакционного пространства. При этом число элементарных актов выражают не в абсолютных единицах, а в молях, ммольях, мкмольях и т.п. Реакционным пространством может быть не только объем, но и поверхность как, например, в гетерогенном катализе, и поэтому скорость реакции выражают в молях/л·с, или $\text{М} \cdot \text{с}^{-1}$, либо в молях/ $\text{м}^2 \cdot \text{с}$. В химической кинетике постулативно вводится следующее утверждение: скорость простой реакции пропорциональна произведению концентраций каждого из веществ (частиц), реализующих эту реакцию, в степенях, равных ее молекулярности по данному веществу (частице).

Для простой реакции $aA + bB = dD$, имеем:

$$W = kC_A^a C_B^b, \quad (1)$$

где W – скорость реакции; k – константа скорости;

C_A, C_B – концентрации реагирующих веществ А и В соответственно.

Уравнение (1) является математическим выражением фундаментального кинетического закона действующих масс, или основного постулата химической кинетики. Необходимо обратить внимание на то, что в выражение (1) для скорости простых реакций входят concentra-

ции только исходных веществ, но не продуктов; при этом величины a и b , по своему физическому смыслу отвечающие молекулярности реакции по реагентам A и B , могут быть лишь целыми положительными числами, сумма которых не превышает трех [1]. Реакций с молекулярностью большей трех не обнаружено, что связано с крайне малой вероятностью одновременного столкновения четырех и более частиц [2].

В химической кинетике любые уравнения, которые связывают скорость реакции с концентрациями компонентов реакционной смеси, называют кинетическими уравнениями. Это относится как к простым, так и к сложным реакциям, но в случае сложных реакций кинетическое уравнение может быть любым: дробно-линейным, полиномиальным или каким-либо иным [1].

Так как большинство химических процессов многостадийно, даже случайное совпадение наблюдаемого кинетического закона с законом мономолекулярной, бимолекулярной или тримолекулярной реакций еще не может служить доказательством подлинности того или иного механизма реакции. Поэтому для характеристики кинетики экспериментально изучаемых химических реакций введено понятие о порядке реакции.

В отличие от молекулярности реакции, порядок реакции определяется по уравнению, выражающему зависимость скорости реакции от концентрации реагирующих веществ [3].

Для сложной реакции общего вида



наблюдаемую скорость, определенную по убыли концентрации реагента A_1 (или A_2) или росту концентрации продукта A_3 (или A_4), обычно представляли в виде:

$$W_{\text{эсп.}} = k_{\text{эсп.}} C_{A_1}^{n_1} C_{A_2}^{n_2} \quad (3)$$

Показатели степени n_1 и n_2 при текущих концентрациях названы В.Оствальдом порядками реакции по веществам A_1 и A_2 соответственно, а общий кинетический порядок реакции определялся как сумма порядков по этим веществам. Порядок реакции по веществам никак не связан со стехиометрическими коэффициентами в уравнении реакции, хотя в некоторых случаях они могут и совпадать. Для сложных реакций совпадение между молекулярностью и порядком реакции является скорее исключением, чем правилом. Хотя для сложной реакции о молекулярности можно вести речь только в применении к ее отдельным элементарным стадиям.

Следует отметить, что в отличие от порядка реакции молекулярность – понятие теоретическое, отражающее реальный механизм проте-

кания элементарной реакции. Большинство реальных химических реакций являются сложными, а стехиометрические уравнения, их описывающие, просто отражают сохранение материального баланса, понятие молекулярности к ним неприменимо. Для описания таких реакций используют понятие порядка реакции.

Численные значения порядков реакции как эмпирических параметров могут быть любыми, в том числе нулевыми, дробными и отрицательными. Кроме того, в отличие от простых реакций, в кинетическое уравнение для сложных реакций могут входить концентрации продуктов реакции и посторонних веществ [4].

В многостадийных реакциях общая скорость процесса определяется или лимитируется стадией, которую также называют контролирующей стадией. В последовательных процессах контролирующей (лимитирующей) будет стадия с самой малой константой скорости. В параллельных реакциях, когда вещества реагируют по нескольким направлениям, скорость всего процесса, в основном, определяется скоростью наиболее быстрой стадии. Она и будет контролирующей. В установившейся многостадийной последовательной реакции все стадии протекают с одинаковой скоростью, определяемой лимитирующим процессом.

Интенсификация большинства металлургических процессов возможна только при выяснении механизма сложных гетерогенных реакций, лежащих в их основе. В литературе, посвященной металлургии термином «гетерогенные реакции» обычно определяют многостадийные гетерофазные взаимодействия, протекающие на границе оксид металла – металл – шлак – газовая фаза.

Отличительной особенностью всех гетерогенных процессов является их сложность и многостадийность. Обычно гетерогенная реакция состоит, по меньшей мере, из трех стадий.

Первая стадия – это перенос реагирующих веществ в реакционную зону, т.е. к поверхности раздела фаз.

Второй стадией является собственно гетерогенная химическая реакция (например, восстановление оксидов металлов водородом).

Наконец, третья стадия заключается в отводе продуктов реакции из реакционной зоны. Так как скорости процессов во всех стадиях пропорциональны величине поверхности, то скорости гетерогенных реакций должны зависеть от соотношения между величинами поверхности раздела фаз и объема.

Для оценки скоростных возможностей каждого из звеньев реальный процесс разбивают на ряд стадий, включающих внешнюю и внутреннюю массопередачи и химико-адсорбционное звено.

В качестве примера можно привести диффузионно-кинетический механизм восстановления оксидов железа газообразными восстановителями, который был предложен еще в прошлом веке С.Т. Ростовцевым и затем уточнялся и совершенствовался многими исследователями [5].

Основой модели являлась схема трехстадийного процесса, в котором сопряжены: 1) химическая реакция, включающая в себя адсорбцию газа на поверхности оксида. Собственно химическое реагирование, образование зародышей новой фазы и твердофазную диффузию; 2) диффузионный газообмен между газом-восстановителем и его оксидом в порах оксида металла и в слое восстановленного вещества; 3) диффузионный газообмен между восстановительным газом и его оксидом.

Следует отметить, что предложенная модель является упрощенной схемой, грубым приближением, лишь обобщенно характеризующим процесс восстановления. Каждый этап процесса восстановления, описываемый диффузионно-кинетическим механизмом, может включать различные последовательные и параллельные стадии, т.е. в свою очередь является сложным процессом.

В работе [2] рассмотрены основные методы определения порядка реакции. Это способ избыточных концентраций, дифференциальный способ (способ логарифмирования), интегральный метод, метод подстановки, графический способ, способ определения времени полупревращения (частный случай способа Оствальда-Нойеса).

В работе [1] предложено решение в общем виде прямой кинетической задачи для произвольного n-го порядка односубстратной реакции, для которой

$$W = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A^n . \quad (4)$$

Отсюда после интегрирования получено

$$\frac{1}{n-1} \left(\frac{1}{C_A^{n-1}} - \frac{1}{C_{0,A}^{n-1}} \right) = kt . \quad (5)$$

Это уравнение является общим в том смысле, что из него могут быть получены уравнения для реакций различных порядков. В этом можно убедиться, подставив в уравнение (5) соответствующее значение n. (Некоторые затруднения вызывает случай n=1, но они легко обходятся при раскрытии неопределенности типа 0/0.)

Для решения обратной кинетической задачи линеаризировать уравнение (5), содержащее два параметра – k и n, не удастся, и поэтому при определении их величин приходится использовать методы нелинейного регрессионного анализа и компьютерную обработку экспериментальных данных. Тем не менее, это уравнение позволяет найти порядок реакции n и константу скорости k, если исследована зависимость

времени превращения реагента $\tau_{1/p}$ на $1/p$ часть от его начальной концентрации. Действительно, принимая, что $p = (C_{0,A} - C_A)/C_{0,A}$, получим из (5) уравнение

$$\tau_{1/p} = \frac{\left(\frac{p}{p-1}\right)^{n-1} - 1}{(n-1)C_{0,A}^{n-1}k}, \quad (6)$$

которое легко линеаризируется

$$\ln \tau_{1/p} = a - (n-1) \ln C_{0,A}, \quad (7)$$

где $a = \ln \frac{[p/(p-1)]^n - 1}{(n-1)k}$. Представление экспериментальных дан-

ных в координатах уравнения (7) дает прямую, по наклону и начальной ординате которой находят значения обоих параметров – n и k .

Для приближенной оценки порядка реакции n иногда удобно использовать два характеристических времени процесса

$$\tau_{1/2} = \frac{2^{n-1} - 1}{(n-1)C_{0,A}^{n-1}k} \quad \text{и} \quad \tau_{3/4} = \frac{4^{n-1} - 1}{(n-1)C_{0,A}^{n-1}k}, \quad (8)$$

отношение которых приводит к уравнению

$$n = 1 + \frac{\ln \left(\frac{\tau_{3/4}}{\tau_{1/2}} - 1 \right)}{\ln 2}. \quad (9)$$

Вероятно, последний способ дает лишь приближенную оценку порядка реакции всего по двум точкам экспериментальной кинетической кривой, и для более надежного его определения необходимо максимально использовать всю доступную информацию. Такой способ нахождения n состоит в представлении кинетических данных в логарифмических координатах уравнения (4)

$$\ln \left(-\frac{dC_A}{dt} \right) = \ln k + n \ln C_A, \quad (10)$$

откуда одновременно определяют константу скорости k и порядок реакции n . Когда определение текущих концентраций с достаточной точностью затруднено, повысить надежность метода можно, используя данные для начальной скорости как функции начальной концентрации.

В случае двухсубстратных реакций для определения порядка реакции по каждому из реагентов применяют классический «метод изолирования», который был предложен Оствальдом. В экспериментальном отношении он состоит в определении скорости реакции в условиях

большого избытка одного из реагентов, например В. Когда его текущая концентрация практически равна начальной, тогда

$$\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right) = \ln k C_{0,B}^{n_B} + n_A \ln C_A, \quad (11)$$

откуда находят n_A . затем аналогичный эксперимент проводят с избытком А и определяют n_B .

Наконец, используя стандартные приемы линейного регрессионного анализа, можно сразу определить величины порядка реакции по обоим реагентам, если измерять начальную скорость реакции при произвольном варьировании начальных концентраций $C_{0,A}$ и $C_{0,B}$ [1].

$$\ln\left(-\frac{dC_A}{dt}\right)_0 = \ln k + n_A \ln C_{0,A} + n_B \ln C_{0,B} \quad (12)$$

Константы скорости реакций разных порядков отличаются размерностями, следовательно, их сравнение между собой не имеет физического смысла. Для таких процессов необходимо сравнивать величины скорости [2].

Величины порядков реакции дают очень ценную, хотя и качественную, а зачастую неоднозначную информацию о том, каков характер изучаемого процесса: относится ли он к реакциям сложным, или его можно считать простой реакцией. Необходимо также отметить, что нахождение эмпирического кинетического уравнения и определение экспериментальных порядков реакции по отдельным компонентам реакционной смеси являются начальным этапом в решении центральной проблемы химической кинетики – установления наиболее вероятного механизма сложной химической реакции.

В многостадийных реакциях общая скорость процесса определяется или лимитируется стадией с самой малой константой скорости. Такая стадия называется лимитирующей. В установившейся многостадийной реакции все стадии протекают с одинаковой скоростью, определяемой лимитирующим процессом. Выявление лимитирующей стадии в сложной многостадийной реакции – одна из важных задач химической кинетики.

Выводы. На основании рассмотренного выше литературного обзора планируется апробирование программы IVA [6], позволяющей осуществить исследования влияния определенных параметров на кинетику электродного процесса, осложненного различными предшествующими и последующими химическими реакциями. Это позволит разобраться в механизме электродных процессов, установить последовательность протекания различных стадий, определить лимитирующие звенья, а также использовать полученные результаты для интенсификации извле-

чения следовых количеств редких металлов из многокомпонентных смесей методом амальгамного электролиза.

Библиографический список

1. Романовский Б.В. Основы химической кинетики: учебник для вузов/Б.В.Романовский. – Москва: Экзамен, 2006. – 415с.
2. Теоретические основы общей химии:[учебник для студентов технических университетов и вузов]/А.И.Горбунов, А.А.Гуров, Г.Г. Филиппов, В.Н. Шаповал.//Под ред. А.И. Горбунова. – М.:Изд-во МГТУ им.Баумана, 2001. – 720с
3. Стромберг А.Г. Физическая химия: учеб.пособие для вузов/А.Г.Стромберг, Д.П.Семченко.–Москва: Высш.школа,1973. – 480с.
4. Бокиштейн Б.С. Краткий курс физической химии: учеб. пособие/ Б.С.Бокиштейн, М.И. Менделеев. –М.: «ЧеРо», 1999. – 232 с.
5. Карабасов Ю.С., Физико-химия восстановления железа из оксидов/ Карабасов Ю.С., Чижикова В.М. – М.: Металлургия, 1986. – 200 с.
6. Семирягин С.В Изучение электрохимического поведения ионов металлов на примере Pb^{2+} и Y^{3+} методом инверсионной вольтамперометрии / С.В. Семирягин., И.В. Смирнова, Е.С. Божанова / Сборник научных трудов ДонГТУ. -2010. - № 31. - С.127-130.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.

к.т.н. Огинский И. К.
(Национальная металлургическая академия Украины,
г.Днепропетровск, Украина, oginskyu@googlemail.com)

СМЕЩЕННЫЙ ОБЪЕМ ПРИ ПРОКАТКЕ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВОМ КАЛИБРЕ

Виконано аналіз об'ємної течії металу, виявлено характерні об'єми осередку деформації, встановлено функціональний взаємозв'язок між ними, встановлено механізм утворення зміщеного об'єму при прокатці у чотирьохвалковому калібрі. Виконано аналіз встановлених взаємозв'язків між зміщеним об'ємом та іншими характерними (суміжними) об'ємами. Використання виявлених взаємозв'язків дозволяє створити більш точні методи розрахунку кінематичних і енергосилових параметрів прокатки для вирішення прикладних задач.

Ключові слова: прокатка, чотирьохвалковий калібр, зміщений об'єм, одиничний об'єм, остаточний об'єм.

Выполнен анализ объемного течения металла, выявлены характерные объемы очага деформации, установлена функциональная взаимосвязь между ними, установлен механизм образования смещенного объема при прокатке в четырехвалковом калибре. Выполнен анализ установленных взаимосвязей между смещенным объемом и другими характерными (смежными) объемами.. Использование выявленных взаимосвязей позволяет создать более точные методы расчетов кинематических и энергосиловых параметров прокатки для решения прикладных задач.

Ключевые слова: Прокатка, четырехвалковый калибр, смещенный объем, единичный объем, остаточный объем.

Определение смещенного объема при прокатке вызывало интерес еще на ранних этапах создания основ теории прокатки. Основоположителем метода определения работы прокатки на основе смещенного объема является Финк, с его именем связывают термин «смещенный объем при прокатке». Предложенная Финком логарифмическая зависимость для определения работы деформации на основе смещенного объема была проста по своей структуре и одновременно неточной. Это вызвало необходимость поиска новых решений, известно много работ в этом направлении (авторами их являются: Киссельбах-Гульст, Прейслер, Вейс, Кирхберг, Герман, Зибель, Грасгоф, Кодрон, Пупе, Виногра-

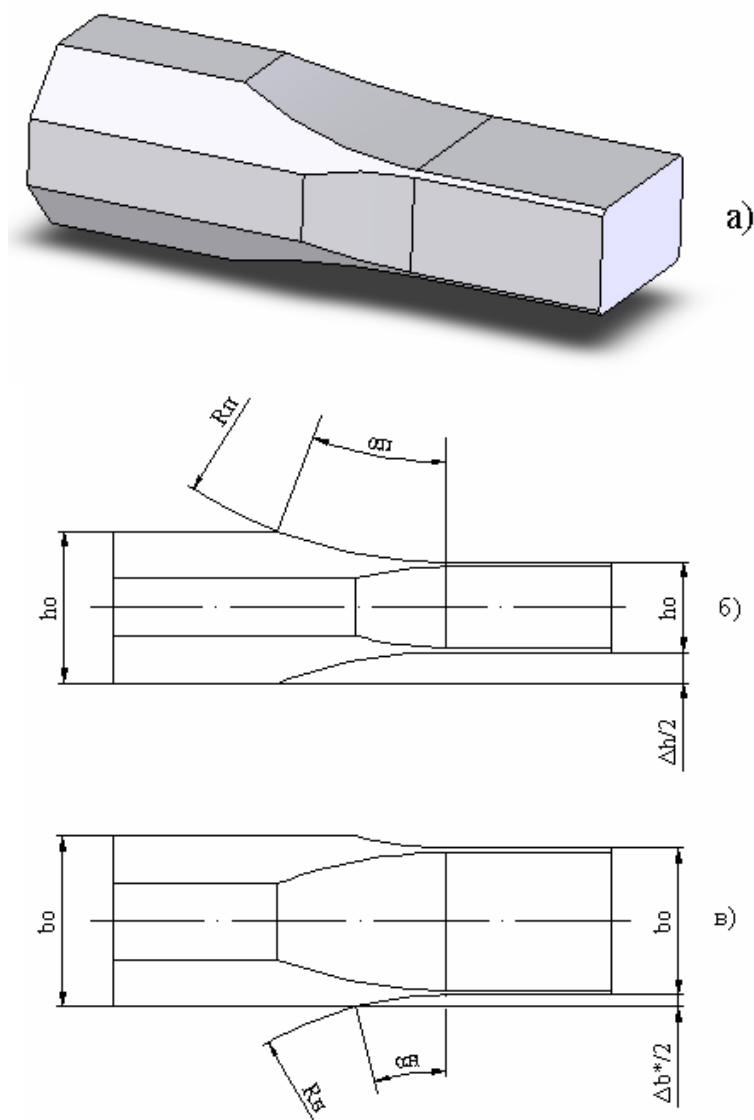
дов, Гавриленко, Верещагин, Лисс, Петров и другие), но достоверных методов определения смещенного объема создано не было и для определения энергосиловых параметров при прокатке большее распространение получили методы на основе контактного взаимодействия металла с инструментом [1]. Методы на основе объемного течения металла обладают более широкими возможностями по сравнению с методами второй группы, необходимым условием для их успешного использования является физически корректное определение признаков перемещения металла в очаге деформации, к которым относится и смещенный объем. Определение смещенного объема при прокатке в четырехвалковом калибре представляет собой еще более сложную задачу, поскольку процесс включает дополнительные деформационные и кинематические особенности [2-4].

Целью настоящей работы является анализ и развитие методов определения смещенного объема при прокатке. В основе предлагаемых подходов лежит исследование объемного течения металла при прокатке и выявление, в частности, смещенного объема, как составляющей энергетических параметров. На основе изучения механизма объемного течения металла становится возможным внести уточнения в недостаточно раскрытые вопросы теории прокатки и в конечном итоге достичь необходимой точности решения прикладных задач.

Формула Финка для определения смещенного объема при прокатке не содержит какие-либо параметры, характеризующие объемное течение металла. Все полученные другими авторами зависимости являются упрощенными и также не отражают какой-либо картины перемещения металла в очаге деформации, исследователям не удалось выявить смещенный объем среди других объемных признаков. У Финка смещенный объем является функцией линейных характеристик, среди результатов других исследователей виден аналогичный подход. В теории прокатки используется ограниченное число объемных признаков очага деформации и процесса в целом. К числу объемных параметров можно отнести условия сохранения объема и постоянства секундных объемов, в какой-то мере, и фактор формы. Первое условие, строго говоря, не является технологическим параметром, поскольку оно исходит из свойств материала. Фактор формы (отношение длины очага деформации l_d к средней высоте раската h_c) является в большей степени классификационным признаком и дает представление об относительной высоте очага деформации, в технологических расчетах он не нашел прямого использования. Условие постоянства секундных объемов можно назвать условным объемным параметром, поскольку он включает площади, объем (в привычном понимании) в условие постоянства секундных объемов не входит. При прокатке в четырехвалковом калибре использование пло-

щадей в качестве характеристик объемного течения металла становится недопустимым.

Для построения модели смещенного объема при прокатке в четырехвалковом калибре вводятся дополнительные объемные параметры и обозначения, их суть поясняется рисунками 1-4 на примере прокатки прямоугольной полосы.

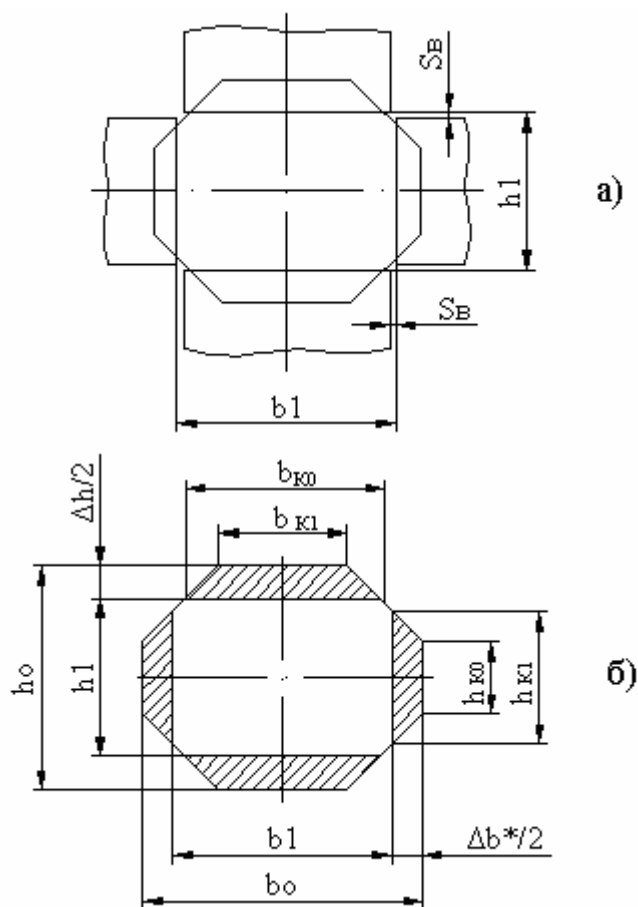


а) общий вид; б) вид со стороны не приводного вала;
в) вид со стороны приводного вала

Рисунок 1 – Четырехвалковый очаг деформации с примыкающими внешними зонами

Используются общепринятые обозначения геометрических и деформационных параметров с дополнением их индексами «п» и «н», относящимися к приводным и не приводным валкам, соответственно. На

рисунке 1 представлен четырехвалковый очаг деформации с примыкающими внешними зонами при прокатке прямоугольной полосы. Входной границей очага деформации является плоскость, соответствующая углу α_{II} , выходной – плоскость осей горизонтальных и вертикальных валков (оси пар валков находятся в одной плоскости). На рисунке 2 представлены схема прокатки в четырехвалковом калибре: а) калибр и задаваемый раскат; б) размеры раската до прокатки и после; заштрихованные области в сумме представляют собой смещенную площадь. Ширина контактной поверхности металла с валком обозначена размерами h и b с индексами «к»; обжатие со стороны неприводных валков – Δb^* .

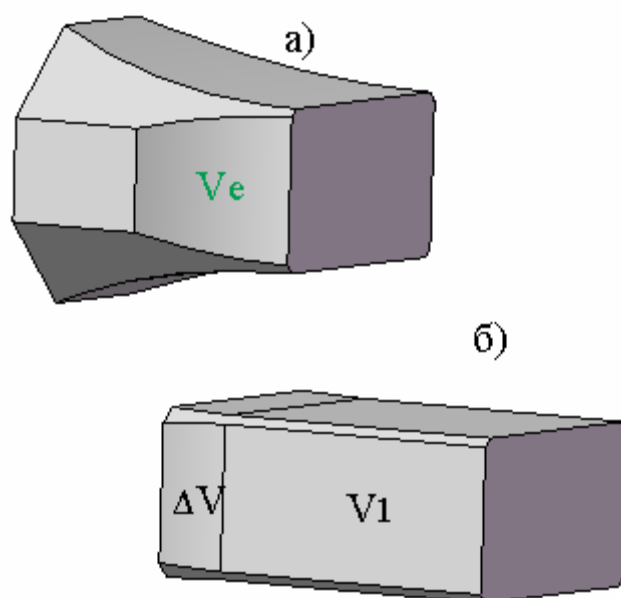


а) калибр и задаваемый раскат;
б) размеры раската до прокатки и после

Рисунок 2 – Схема прокатки в четырехвалковом калибре
(заштрихованные области - смещенная площадь при прокатке)

В работах Финка и его последователей смещенный объем определялся по отношению к произвольному деформируемому объему металла, без комплексного учета параметров очага деформации и он не был пред-

назначен для использования его в качестве какой-либо удельной характеристики работы. Это ограничивало применимость метода, не позволяло использовать его для развития и создания других энергетических характеристик. Учитывая сказанное, введем понятие единичный смещенный объем, который будет соотноситься с объемом металла, находящегося в границах очага деформации. Единичным смещенным будем называть объем, смещенный за период поворота приводного валка на угол α_{II} , вводится также понятие «единичный объем» – объем металла, находящегося в границах очага деформации (V_E на рисунках 3а, 4а).



- а) единичный объем V_e в четырехвалковом очаге деформации;
 б) объем металла, вышедшего из очага деформации V_1 и остаточный объем ΔV

Рисунок 3 – Характерные объемы четырехвалкового очага деформации

Единичный объем может быть представлен в виде двух характерных частей – одна за время поворота валка на угол α_{II} металла выходит за пределы плоскости валков (V_1 на рисунках 3б, 4б), вторая остается в очаге деформации, в его выходной области (ΔV на рисунках 3б, 4б). Указанная особенность была выявлена ранее в результате анализа и подтверждена экспериментально [5]. Среди приведенных на рисунках 1-4 параметров основными являются те, которые содержат величину объема, к дополнительным относятся линейные, угловые и безразмерные. Каждая из названных величин имеет свое происхождение, они возника-

ют в ходе преобразования исходного (базового) объема V_E . Принимаем допущение, что опережение металла на контакте с приводным валком отсутствует ($S_{II} = 0$). В теории прокатки в качестве еще одного допущения часто рассматривают плоскую задачу, принимая, что уширение равно нулю. В рассматриваемом случае нет необходимости прибегать к названному допущению, поскольку поперечное перемещение металла ограничено неприводными валками.

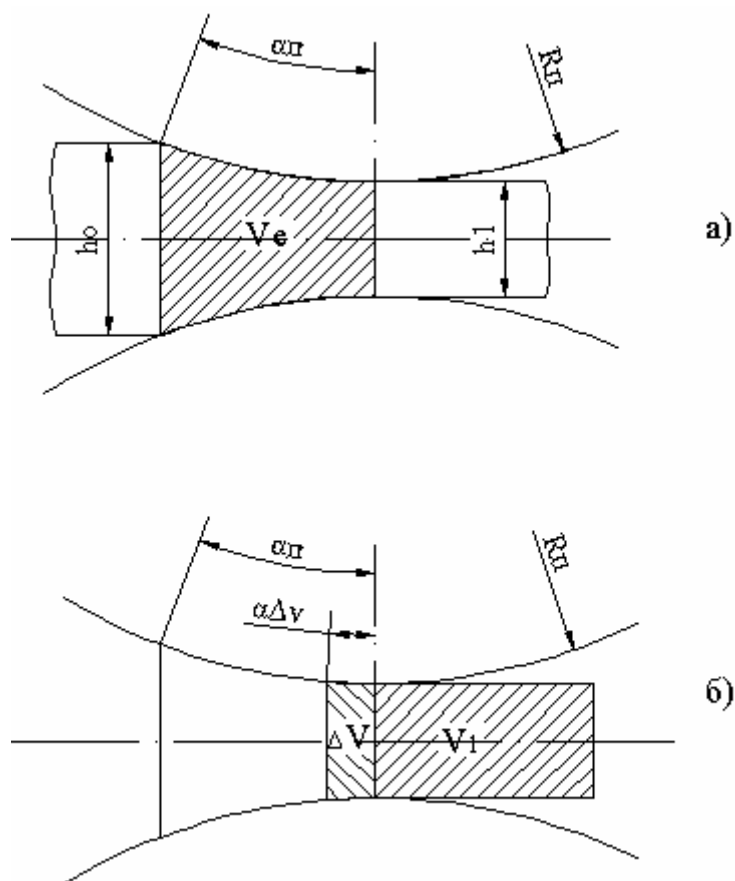


Рисунок 4 – V_e – единичный объем, ΔV – остаточный объем, V_1 – объем, вышедший из очага деформации за период поворота приводного валка на угол α_{II}

При выявлении собственно смещенного объема необходимо исходить из той постановки, которая изначально была в основе метода. Смещенный объем должен иметь своего рода «энергетическое наполнение», то есть, напрямую соответствовать величине затраченной работы. В четырехвалковом калибре названный объем складывается из объемов, смещенных приводными ($V_{СП}$) и неприводными ($V_{СН}$) валками, то есть:

$$V_C = V_{СП} + V_{СН}. \quad (1)$$

При определении $V_{СН}$ следует исходить из того, достаточно очевидного, факта, что работа, затачиваемая на образование названного объема осуществляется за счет приводных валков (соответственно увеличенного момента прокатки). Поэтому есть все основания считать, что весь объем металла, смещенный не приводными валками в продольном направлении за период поворота приводных валков на угол $\alpha_{П}$, является составной частью суммарной единичной работы A_E . Объем, смещенный не приводными валками, будет иметь вид:

$$V_{СН} = \Delta F \theta_{\alpha_{П}} R_H, \quad (2)$$

где $\theta_{\alpha_{П}}$ – угол, на который повернется не приводной валок при повороте приводного на угол $\alpha_{П}$.

Кинематическая взаимосвязь между парами валков определена условием, что за период поворота приводного валка на угол $\alpha_{П}$ и, соответственно, прохождения им расстояния $l_{1e} = R_{П} \alpha_{П}$, не приводной пройдет такое же расстояние, то есть:

$$R_{П} \alpha_{П} = R_H \theta_{\alpha_{П}}, \quad (3)$$

откуда

$$\theta_{\alpha_{П}} = \frac{R_{П}}{R_H} \alpha_{П}. \quad (4)$$

Для выявления смещенного объема со стороны приводных валков $V_{СП}$ рассмотрим очаг деформации в продольно-вертикальном сечении, проходящем через ось симметрии. Объем $V_{СП}$ формируется в пределах объема V_0 (рисунок 5), который численно равен V_1 и расположен в пределах пространства V_E . Объем V_0 , в свою очередь, включает характерные части (рисунок 6): две, примыкающие к валкам V_C^* , и среднюю V_0^* . Объемы V_C^* при повороте валка на угол $\alpha_{П}$ перемещаются в направлениях, показанных на рисунке 7, за счет этого находящийся в центральной части очага деформации объем V_0^* , получает приращение

по длине до размера l_{1e}^* , который численно равен $l_{1e} = R_{II} \alpha_{II}$. Объемы V_C^* в сумме представляют собой смещенный объем $V_{СП}$.

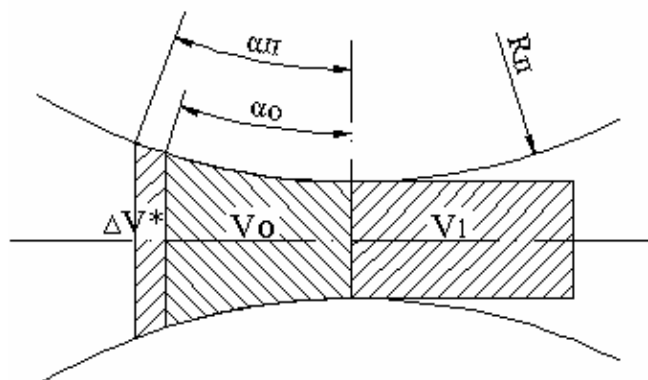


Рисунок 5 – ΔV^* – объем, равный по величине остаточному объему ΔV ;
 V_1 – объем, вышедший из очага деформации за период поворота
 приводного валка на угол α_{II} ;
 V_0 – объем, которому предстоит выйти из очага деформации за период
 поворота приводного валка на угол α_{II}

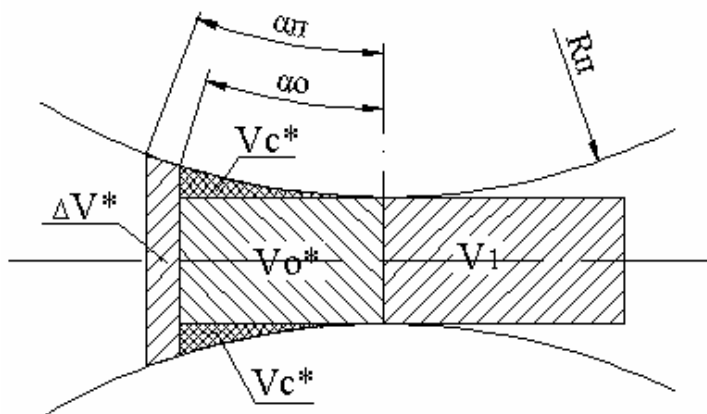


Рисунок 6 – V_C^* и V_0^* – составляющие объема V_0 : $V_C^* + V_0^* = V_0$

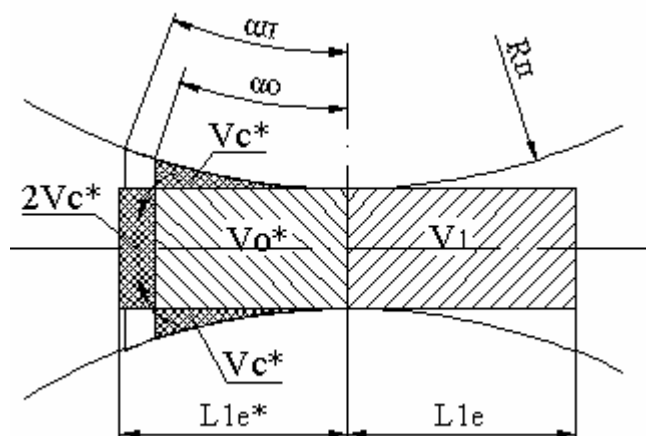


Рисунок 7 – V_C^* – составляющие смещенного объема $V_{СП}$;

$$2V^* = V_{СП}; L_{1e}^* = L_{1e}.$$

Изложенный подход может быть применен для более широкого класса задач, связанных с прокаткой в четырехвалковом калибре других простых профилей (круг, шестигранник и др.), а также фасонных – двутавровой балки, швеллера, рельсов и других фланцевых профилей.

Выводы

Получило дальнейшее развитие представление об особенностях объемных перемещений металла при прокатке в четырехвалковых калибрах. В результате анализа объемного течения металла выявлены характерные объемы очага деформации, установлена функциональная взаимосвязь между ними, установлен механизм образования смещенного объема при прокатке в четырехвалковом калибре. Установленные закономерности позволяют расширить представление о физической стороне процесса прокатки, взаимосвязях характерных объемов очага деформации. На основе уточнения механизма объемных перемещений металла и установления взаимосвязей объемных параметров становится возможным внести уточнения в недостаточно раскрытые вопросы теории прокатки.

Библиографический список

1. Полухин П.И. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке / [Полухин П.И., Николаев В.А., Полухин В.П. и др.] – М.: Металлургия, 1974. – 290 с.
2. Поляков М.Г. Деформация металла в многовалковых калибрах / Поляков М.Г., Никифоров Б.А., Гун Г.Я. – М.: Металлургия, 1979. – 242 с.

3. Нехаев Н.Е. Экспериментальные исследования формоизменения при прокатке полосовых профилей в четырехвалковых калибрах / Н.Е. Нехаев, М.К. Измайлова, О.А. Важнова // Сб. научн. тр. «Обработка материалов давлением». – Краматорск. – 2010. – № 2 (23). – С. 204-208.

4. Гринавцев В.Н. Математическая модель деформации фасонного профиля в четырехвалковом калибре / В.Н. Гринавцев // Сб. научн. тр. 5 Международной научно-техн. конф. "Теоретические проблемы прокатного производства". – Днепропетровск: Национальная металлургическая академия Украины. – 2000. – С. 82-84.

5. Огинский И.К. Экспериментальные исследования объемного течения металла при прокатке / И.К. Огинский // Вестник Национального технического университета ХПИ.- Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ ХПИ. – 2010. – № 42. – С. 9-13.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Новохатским А.М.

СТРОИТЕЛЬСТВО

*д.т.н. Должиков П.Н.,
Кирияк К.К.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАПОРНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА

У статті розглядається спосіб стабілізації зсувного масиву методом струменевої цементації, аналіз його стану, визначення нових фізико-механічних характеристик області ковзання зсуву. Визначення коефіцієнта стійкості, виходячи з отриманих фізико-механічних характеристик.

Ключові слова: *зсув, масив, область ін'єктування, стабілізація зсувних процесів, струменова цементація.*

В статье рассматривается способ стабилизации оползневого массива методом струйной цементации, анализ его состояния, определение новых физико-механических характеристик области скольжения оползня. Определение коэффициента устойчивости, исходя из полученных физико-механических характеристик.

Ключевые слова: *оползень, массив, область инъектирования, стабилизация оползневых процессов, струйная цементация.*

Актуальность проблемы. В развитии оползневых явлений ЮБК весьма существенной является форма склона, характерными параметрами которого является высота и его крутизна. Необходимо учитывать, что наблюдаемая форма склона обуславливается совокупным воздействием всей естественно-исторической обстановки. Совершенно очевидно, что при искусственном изменении этой обстановки (подтопление, изменение гидрогеологического режима, подрезки и т.д.) наблюдаемая форма рельефа склона может оказаться уже несоответствующей новым условиям. При таких условиях неизбежно развиваются оползневые явления.

Свойства пород и их динамические характеристики, слагающих склон или толщу откоса, имеет чрезвычайно большое значение. Следует отметить, что склоны и откосы, в нашем случае морское побережье, представлены коренными породами покровными отложениями. Породы

в значительной мере предопределяют собою и степень устойчивости склона, и характер возможного развития оползневых процессов.

Оценка степени опасности по условию развития оползней, как гравитационных, водно-гравитационных и эрозионно-гравитационных процессов для территорий городов и населённых пунктов, и защита от них территорий, отводимых под застройку участков, строящихся и уже построенных зданий и сооружений, сводится к задачам трех типов, существенно различающимся по направленности, масштабам и методам решения [1].

1. Связанные с разработкой рекомендаций по предупреждению и локализацией развития оползней и защите на больших территориях, решаемые преимущественно на основе обобщенных качественных оценок оползневой опасности.

2. По оценке степени оползневой опасности и защите от оползней конкретных участков городских территорий, в первую очередь участков, отводимых под строительство или существующих зданий и сооружений.

3. По определению расчётных показателей для выбора оптимальных вариантов при проектировании противооползневых сооружений инженерной защиты от оползней территорий и объектов.

Необходимость решения задач первого и, в меньшей мере, второго типа регламентирована законодательством Украины об охране окружающей природной среды [2]; согласно «Региональной программы по инженерной защите территорий Автономной Республики Крым от оползневых, абразионных процессов, подтопления и паводков на 2007-2011 гг», которая является частью «Государственной программы социально-экономического развития АРК на срок до 2017г», утвержденной постановлением Кабинета Министров Украины № 1067 от 30.08.2007р; законами о планировании и застройке территорий, защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций на объектах повышенной опасности [3]; Земельным кодексом [4]; и нормативной документацией о планировании и застройке городов [5]; об инженерной защите территорий от оползней и обвалов [6] и другими нормативами.

Анализ предыдущих исследований. Горный Крым ввиду широкого развития экзогенных геологических процессов (ЭГП) с давних пор привлекал внимание ученых России и Украины.

Так, Бессмертным А.Ф. выполнено построение прогнозной модели активности типичного для ЮБК естественного оползня-потока на основе комплекса геофизических признаков деформаций грунтового массива для научного обоснования методических основ геофизических

исследований оползневых склонов. На базе долговременных глубинных наблюдений за физическим состоянием грунтов оползня и деформациями глубинных горизонтов уточнена ФГМ оползневых смещений, которая позволила обосновать использование геофизических методов при пространственно-временном прогнозе оползней Крыма [7].

Ерыш И.Ф. изучал закономерность и механизм типичных оползней Крыма на различных стадиях их развития; определена роль оползнеобразующих факторов – абразии, эрозии, режима обводнения и изменение прочности на развитие типичных оползней; обоснованы виды и эффективность противооползневых мероприятий и последовательность их осуществления в зависимости от механизма и стадии развития типичных оползней; разработана рациональная система изучения факторов, режима и механизма оползней Крыма методами стационарных исследований.[8]

В работе [9] рассмотрено формирование минерального и гранулометрического состава, а так же физико-механических и деформационных свойств оползневых отложений в различных геоструктурных условиях; установлена общая направленность процесса выветривания, разуплотнения, денудации и континентальной аккумуляции на склонах.

Цель работы – обоснование применения метода напорной цементации для стабилизации оползневого процесса в условиях ЮБК.

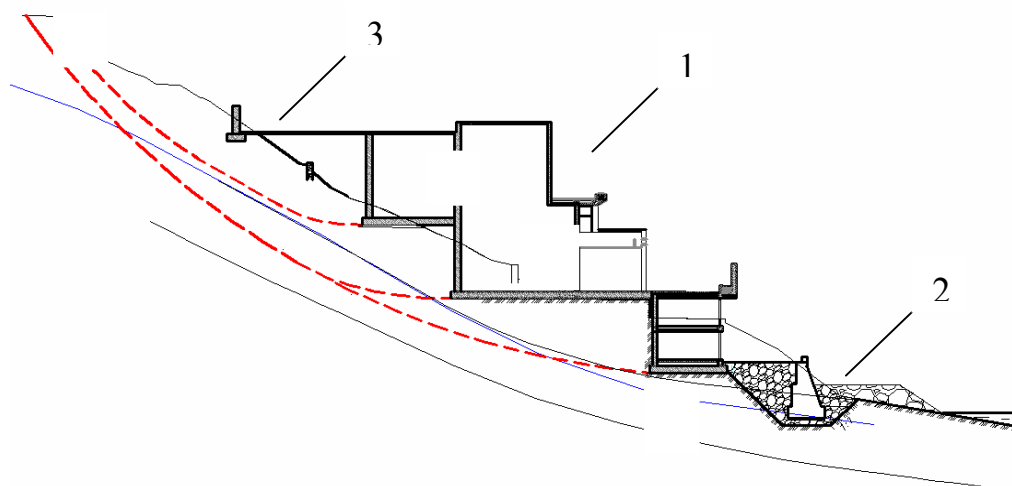
Основная часть. Для стабилизации оползневых процессов, применяются различные методы механического воздействия на оползневой массив. В данной работе рассматривается метод струйной цементации, как способ стабилизации в контексте изменения физико-механических свойств оползневого тела.

В качестве рассматриваемого объекта исследований был выбран оползневой склон в районе г. Алупка. Исследование оползневой системы и инженерно-геологической ситуации были выполнены ЦНТУ «Инжзащита» в 2009 - 2010 годах.

Исследуемая территория расположена на Южном берегу Крыма в районе среднекрутого и крутого берегового откоса восточной экспозиции на абсолютных отметках 0.0 – 31.1 м. Рельеф участка и склона сформирован дендуционными, абразионными, древнеоползневыми и современными оползневыми процессам и осложнен техногенным воздействием.

В геологическом строении исследуемой территории принимают участия коренные флишевые грунты таврической серии, перекрытые древнеоползневыми и современными оползневыми отложениями. Ввиду перепланировки склона под благоустройство территории и строи-

тельство сооружений в пределах изучаемой территории широко распространены техногенные образования. Глубина залегания кровли коренных грунтов в пределах участка, варьируется от 5,5 м до 10,5 м относительно древней поверхности. Сейсмичность относится к зоне интенсивности сотрясений на средних грунтах равной 8-ми баллам. Форма оползневого склона с учетом проектируемого сооружения имеет вид, показанный на рисунке 1.



- 1 – проектируемое сооружение,
- 2 – гидротехническая стена,
- 3 – подпорная стена

Рисунок 1 - Продольный разрез оползневого склона

Расчет коэффициента устойчивости производим по предполагаемым поверхностям смещения (А – Б, А – С, А – Д) используя метод проф. Г.М Шахунянца [8].

Для расчета устойчивости и определения оползневого давления были использованы следующие физико-механические характеристики грунта, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 - Физико-механические характеристики грунта

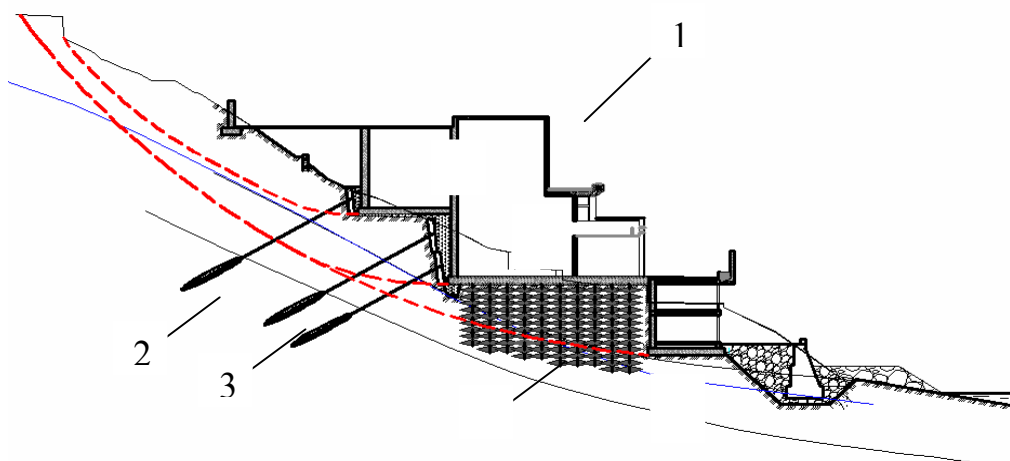
Объемная масса, т/м ³	Угол внутреннего трения, град.	Удельное сцепление, т/м ²
γ	ϕ	c
2,18	18	2,2

После проведения расчетов, по предполагаемым поверхностям смещения, полученные результаты сводим в таблицу 2.

Таблица 2 - Результаты расчета показателей устойчивости

Расчетная кривая	k_{st}	$E_{оп},$ т/м
А – Б	1,15	16,9
А – С	0,77	62,9
А – Д	0,83	100,4

Таким образом, полученные результаты расчета свидетельствуют о необходимости устройства противооползневых сооружений, для достижения нормативного коэффициента устойчивости ($k_{st} = 1,16$) по каждой поверхности смещения.



- 1 – проектируемое сооружение,
- 2 – анкерный ростверк кривая А-Б,
- 3 – анкерный ростверк кривая А-С,
- 4 – область инъектирования

Рисунок 2 - Продольный разрез оползневого склона

Для восприятия оползневого давления подобран анкерный ростверк для каждой кривой, приведенных в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры анкерного ростверка

Расчетная кривая	$E_{оп},$ т/м	Усилие в анкере, т	Угол наклона анкера, град.	Шаг анкеров, м	Кол-во рядов	Воспринимаемая нагрузка, т/м
А-Б	16,9	53,4	30	3	1	16,3
А-С	62,9	53,4	30	1,5	2	62,8

Для восприятия нагрузки полученной по кривой А-Д применяем инъекционный метод стабилизации оползня. Для этого через вертикальные скважины заходками «снизу-вверх» осуществляется инъектирование цементного раствора в грунт. Скважины расположены таким образом, чтобы область инъектирования перекрывала всю зону скольжения (рисунок 2). В соответствии с инженерно - геологическими условиями и технологической схемой нагнетания цементного раствора принимается следующая схема расположения скважин: 0 – 10,0м – диаметр бурения 112 мм; диаметр обсадки 75мм; расстояние 1,5х1,5м, плотность нагнетаемого раствора 1800 кг/м³.

С помощью метода струйной цементации изменяются физико-механические свойства области скольжения. После проведения лабораторных исследований заинъектированных грунтов получены новые характеристики для расчета, приведенные в таблице 4.

Таблица 4 - Физико-механические характеристики грунта после инъекции

Объемная масса, т/м ³	Угол внутреннего трения, град.	Удельное сцепление, т/м ²
γ	ϕ	c
2,96	25	3,5

После выполнения расчета с новыми физико-механическими характеристиками грунта получены показатели устойчивости, результаты приведены в таблице 5.

Таблица 5 - Результаты расчета показателей устойчивости

Расчетная кривая	k_{st}	$E_{оп},$ т/м
А – Д	1,07	31,8

Суммарное оползневое давление по предполагаемым поверхностям смещения (А-Б, А-С) воспринимаемое анкерными ростверками составляет 79,1 т/м. Максимальная нагрузка, полученная по кривой А-Д, составляет 100,4 т/м. Таким образом, остаточное давление по кривой А-Д с учетом восприятия анкерными ростверками составляет 21,3 т/м, которое стабилизируется при помощи цементации грунта.

Выводы

1. Исходя из систематизации наработанных результатов, а также анализа физико-механических свойств сходных оползневых участков, были определены физико-механические характеристики данного оползневого склона и рассчитан коэффициент устойчивости при помощи метода обратного расчета.

2. Применен комбинированный метод стабилизации оползневых процессов с целью изменения физико-механических свойств оползня. При помощи метода струйной цементации грунтов вязкопластические деформации зоны скольжения были переведены в упруго-жесткие, получены новые физико-механические свойства грунтов, удовлетворяющие условиям стабилизации оползня.

Библиографический список

1. Черный Г.И. О классификации математических моделей для различных задач механики горных пород / Г.И. Черный // “Труды VIII сессии Совета по народнохозяйственному использованию взрыва”. - К.: Наукова думка, 1970. – С. 20 – 26.

2. Законодавство України про охорону навколишнього природного середовища (за станом на 1 квітня 2000 р.). – К.: Парламентське видавництво, 2000. – 144 с.

3. Закон України. Про планування та забудову територій від 20 квітня 2000 року № 1699-III.

4. Земельний кодекс України (зі змінами та доповненнями станом на 1 квітня 1998 року). – К.: Право, 1998. – 42 с.

5. Держкомістобудування України / Система містобудівельного кадастру населених пунктів України. – К.: Знання, 1994. – 39 с.

6. ДБН В.І.І-3-97. Інженерний захист територій будівель та споруд від зсувів та обвалів. Основні положення. Видання офіційне. – К.: Держбуд України, 1998. – 40 с.

7. Бессмертный А. Ф. Комплексные геофизические исследования оползней и построение прогнозных моделей их активности (на примере

Южного берега Крыма): Автореф. дис... к-та геолог. наук:04.00.22 / КНУ. – К., 2004. – 20 с.

8. Рудько Г.И. Оползни и другие геодинамические процессы горно-складчатых областей Украины (Крым, Карпаты): монография / Г. И. Рудько, И. Ф. Ерыш – К.: Задруга, 2006. – 624 с.

9. Аносова Л.А. Закономерности формирования оползневых отложений /Л.А. Аносова, И.Г. Коробанова, А.К. Копылова. – М.: Наука, 1976. –184 с.

*д.т.н. Голоднов А.И.,
Балашова О.С.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СЖАТЫХ СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Розроблена інженерна методика визначення несучої здатності стислих зварних елементів з урахуванням впливу не пружних властивостей сталі та залишкового напруженого стану. Розглядається деформований стан конструкцій. За даними проведеного математичного експерименту отримані рівняння, які дозволяють визначити коефіцієнт подовжнього вигину в залежності від розрахункового опору сталі, гнучкості та ексцентриситету прикладання навантаження. Значення залишкових напружень в перетинах елементів визначаються за відомими методиками.

Ключові слова: залишкові напруження, стиснуті сталеві елементи, несуча здатність

Разработана инженерная методика определения несущей способности сжатых сварных элементов с учетом влияния неупругих свойств стали и остаточного напряженного состояния. Рассматривается деформированное состояние конструкций. По данным проведенного математического эксперимента получены уравнения, позволяющие определить коэффициент продольного изгиба в зависимости от расчетного сопротивления стали, гибкости и эксцентриситета приложения нагрузки. Значения остаточных напряжений в сечениях элементов определяются по известным методикам.

Ключевые слова: остаточные напряжения, сжатые стальные элементы, несущая способность

Анализ исследований и публикаций. Как известно, технологические процессы изготовления стальных конструкций сопровождаются локальным термическим разогревом (сварка, резание с применением высокотемпературного нагрева, нагрев и т.п.) и вызывают появление остаточного напряженного состояния (ОНС). Остаточные напряжения (ОН) не связаны с действием внешних сил,

являются внутренними напряжениями первого рода, которые уравниваются в объеме элемента и вызывают его деформацию [1].

Остаточные сжимающие напряжения (ОСН), сосредоточенные по кромкам поясов двутавровых элементов, приводят к раннему образованию пластических зон в этих частях сечения и, вследствие удаленности их от осей симметрии, снижению несущей способности. Экспериментально подтверждено снижение несущей способности сжатых двутавровых элементов до 37%. Неблагоприятное влияние ОН определяет разграничение коэффициентов продольного изгиба для расчета сжатых элементов одного профиля. Различие в величинах коэффициентов продольного изгиба для стальных конструкций двутаврового и Н-образного сечения без ОН и с ОСН на кромках поясов свыше 49 МПа может достигать 15...17 % (см. ДБН В.2.3-14:2006 [2]). В нормах проектирования стальных конструкций (СНиП II-23-81* [3]) методика определения коэффициента продольного изгиба не учитывает наличие ОНС. ОН возникают и при предварительном напряжении, которое применяется в различных конструкциях для улучшения их свойств: расширения области упругой работы материала, перераспределения усилий, уменьшения деформативности, повышения устойчивости. Предварительное напряжение осуществляется на стадии изготовления, монтажа или в процессе эксплуатации [1, 4-7].

Постановка задачи. Основной задачей является разработка инженерной, ориентированной на действующие нормы, методики расчета сжатых сварных элементов с учетом неупругих свойств стали и наличия ОНС.

Цель работы – усовершенствование методики расчета сжатых сварных элементов с учетом влияния остаточного напряженного состояния (ОНС).

Изложение материала и его результаты. Математический эксперимент был выполнен для получения зависимостей для коэффициента продольного изгиба. При этом были учтены результаты ранее выполненных расчетов [1]. В процессе проведения математического эксперимента были выполнены расчеты сжатых элементов различных гибкостей ($20 \leq \lambda \leq 120$) с различным эксцентриситетом приложения нагрузки ($0,272 \leq m \leq 2,72$). Расчетные сопротивления сталей изменялись в пределах от 205 МПа до 410 МПа. Начальный эксцентриситет приложения нагрузки принят равным 1 см. Его величина была обусловлена монтажным допуском в соответствии с [6]. Вид ОНС принимался как с ОСН на кромках поясов, обусловленными сваркой поясных швов, так и ОРН на кромках поясов, обусловленными наплавкой холостых валиков или прогревом кромок.

Всего было просчитано более 500 моделей элементов. В результате анализа полученных данных было установлено следующее (с учетом данных [1]):

- влияние ОН на поведение элементов под нагрузкой для всего диапазона изменения прочностных свойств материала характеризуется похожими зависимостями: зоны ОРН, расположенные на кромках поясов, способствуют увеличению, а зоны ОРН в районе поясных швов способствуют снижению величин критических сил;

- наиболее существенные расхождения в величинах критических сил для сжатых сварных элементов с поясными сварными швами и без поясных швов наблюдаются в диапазоне величин гибкости от 60 до 80;

- для элементов с зонами ОРН на кромках поясов расхождения начинаются с величин гибкости, превышающих 40;

- влиянием ОНС на устойчивость элементов можно пренебречь при условии, когда прогиб элемента при критической нагрузке (величине несущей способности) не превышает 20% от величины начального эксцентриситета (это соответствует величине относительного эксцентриситета m примерно 2,5...2,7).

В процессе выполнения математического эксперимента были установлены следующие зависимости:

- формула для коэффициента продольного изгиба для такого состояния сжатого элемента, при котором в наиболее напряженном сечении, напряжения не превышают предела упругой работы стали (сечение работает упруго, развитие пластических напряжений отсутствует), $\varphi_{el} = f_1(\bar{R}, m, \bar{\lambda})$;

- формула для коэффициента, учитывающего развитие пластических деформаций в наиболее напряженном сечении, $\gamma_{pl} = f_2(\bar{R}, m, \bar{\lambda})$;

- формула для коэффициента, учитывающего увеличение прогиба при развитии пластических деформаций, $\gamma_{ben} = f_3(\bar{R}, m, \bar{\lambda})$.

В приведенных выше функциях приняты следующие обозначения: $\bar{R} = R_y / 410$ – относительное расчетное сопротивление стали (пределы изменения $205 \leq R_y \leq 410$); $m = e \cdot A / W_c$ – относительный эксцентриситет (e – эксцентриситет; A – площадь сечения; W_c – момент сопротивления сечения для наиболее сжатого волокна); $\bar{\lambda} = \lambda / 100$ – относительная гибкость сжатого элемента (пределы изменения гибкости $20 \leq \lambda \leq 120$).

Такой подход был принят по следующим соображениям. Известно, что коэффициент продольного изгиба зависит от гибкости,

которая, в свою очередь, зависит от приведенной длины элемента и радиуса инерции сечения. При условии упругой работы материала можно считать, что для различных сечений, но с одинаковыми параметрами $(\bar{R}, m, \bar{\lambda})$, величина коэффициента продольного изгиба будет одинакова.

В результате последовательной аппроксимации полученных данных методом наименьших квадратов были получены формулы для определения коэффициента продольного изгиба для такого состояния сжатого элемента, при котором в наиболее напряженном сечении напряжения не превышают предела упругой работы стали, формулы для коэффициента, учитывающего развитие пластических деформаций, и формулы для коэффициента, учитывающего увеличение прогиба.

Формула для коэффициента продольного изгиба для такого состояния сжатого элемента, при котором в наиболее напряженном сечении напряжения не превышают предела упругой работы стали, имеет вид:

$$\varphi_{el} = f_1(\bar{R}, m, \bar{\lambda}) = b_1 \cdot \bar{R}_y + c_1. \quad (1)$$

В этой формуле:

$$b_1 = (0,0109 \cdot \bar{\lambda}^2 - 0,0896 \cdot \bar{\lambda} + 0,0232) \cdot m^2 + (-0,0608 \cdot \bar{\lambda}^2 + 0,436 \cdot \bar{\lambda} - 0,108) \cdot m + (0,0952 \cdot \bar{\lambda}^2 - 0,639 \cdot \bar{\lambda} + 0,146); \quad (2)$$

$$c_1 = (-0,069 \cdot \bar{\lambda}^2 + 0,0967 \cdot \bar{\lambda} + 0,0635) \cdot m^2 + (0,308 \cdot \bar{\lambda}^2 - 0,409 \cdot \bar{\lambda} - 0,364) \cdot m + (-0,378 \cdot \bar{\lambda}^2 + 0,456 \cdot \bar{\lambda} + 0,785). \quad (3)$$

Коэффициент, учитывающий развитие пластических деформаций, зависит, в первую очередь, от формы поперечного сечения. Для элементов двутаврового и коробчатого сечений, деформирующихся в плоскости меньшей жесткости, формула для коэффициента γ_{pl} имеет вид:

$$\gamma_{pl} = f_2(\bar{R}, m, \bar{\lambda}) = b_2 \cdot \bar{R}_y + c_2. \quad (4)$$

В этой формуле:

$$b_2 = (-0,320 \cdot \bar{\lambda}^2 + 0,456 \cdot \bar{\lambda} - 0,07) \cdot m^2 + (1,138 \cdot \bar{\lambda}^2 - 1,672 \cdot \bar{\lambda} + 0,248) \cdot m + (-0,196 \cdot \bar{\lambda}^2 + 0,288 \cdot \bar{\lambda} - 0,039); \quad (5)$$

$$c_2 = (0,153 \cdot \bar{\lambda}^2 - 0,105 \cdot \bar{\lambda} - 0,102) \cdot m^2 + (-0,464 \cdot \bar{\lambda}^2 + 0,207 \cdot \bar{\lambda} + 0,558) \cdot m + (0,126 \cdot \bar{\lambda}^2 - 0,227 \cdot \bar{\lambda} + 1,062). \quad (6)$$

Для другой формы поперечного сечения формулы (5)-(6) будут иметь другой вид.

Как и коэффициент, учитывающий развитие пластических деформаций, коэффициент, учитывающий увеличение прогиба, зависит от формы поперечного сечения. Для элементов двутаврового и коробчатого сечений, деформирующихся в плоскости меньшей жесткости, формула для коэффициента γ_{ben} имеет вид:

$$\gamma_{ben} = f_3(\bar{R}, m, \bar{\lambda}) = a_3 \cdot m^2 + b_3 \cdot m + c_3. \quad (7)$$

В этой формуле:

$$a_3 = (-0,496 \cdot \bar{R}^2 + 4,534 \cdot \bar{R} - 1,181) \cdot \bar{\lambda}^2 + (1,018 \cdot \bar{R}^2 - 4,179 \cdot \bar{R} + 0,924) \cdot \bar{\lambda} + (-0,0354 \cdot \bar{R}^2 + 0,509 \cdot \bar{R} - 0,053); \quad (8)$$

$$b_3 = (2,498 \cdot \bar{R}^2 - 19,07 \cdot \bar{R} + 5,385) \cdot \bar{\lambda}^2 + (-5,263 \cdot \bar{R}^2 + 18,696 \cdot \bar{R} - 5,150) \cdot \bar{\lambda} + (0,645 \cdot \bar{R}^2 - 2,968 \cdot \bar{R} + 0,7); \quad (9)$$

$$c_3 = (-1,583 \cdot \bar{R}^2 + 17,467 \cdot \bar{R} - 5,312) \cdot \bar{\lambda}^2 + (4,191 \cdot \bar{R}^2 - 16,312 \cdot \bar{R} + 6,003) \cdot \bar{\lambda} + (-0,623 \cdot \bar{R}^2 + 3,047 \cdot \bar{R} - 0,0089). \quad (10)$$

Формулы (8)-(10) для другой формы поперечного сечения будут иметь другой вид.

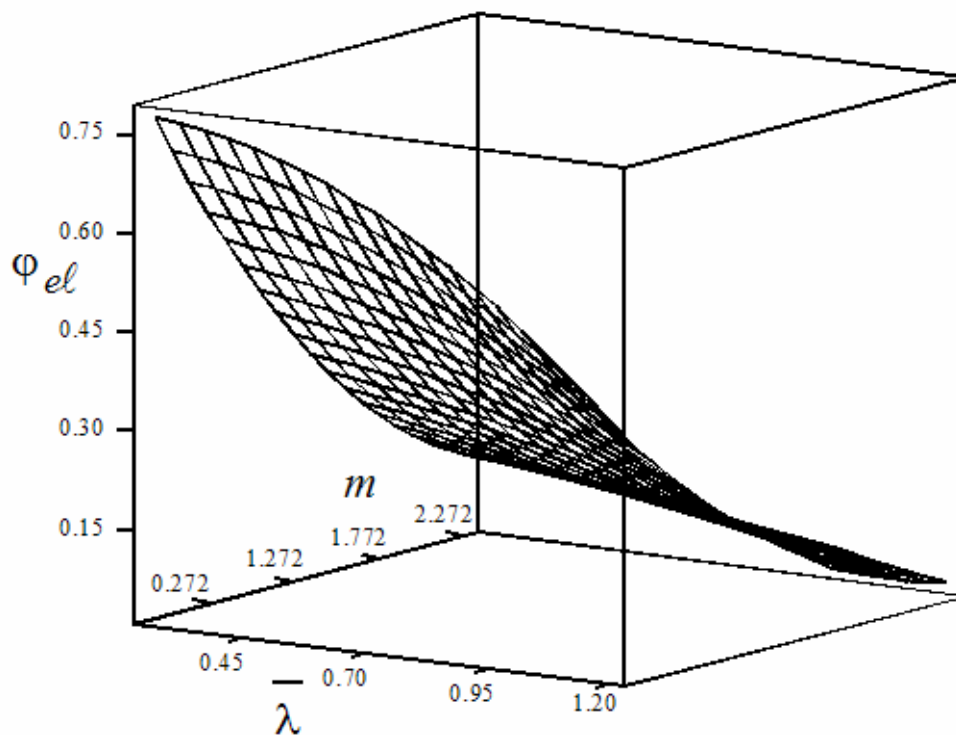
Зависимости для установленного интервала варьируемых функций при относительных расчетных сопротивлениях стали равных 0,5, 0,75 и 1, полученные по формулам (1), (4) и (7), приведены на рисунках 1, 2, 3.

В общем виде формулу для вычисления коэффициента продольного изгиба для интервала величин гибкости $20 \leq \lambda \leq 120$, расчетных сопротивлений стали $205 \leq R_y \leq 410$ МПа и относительных

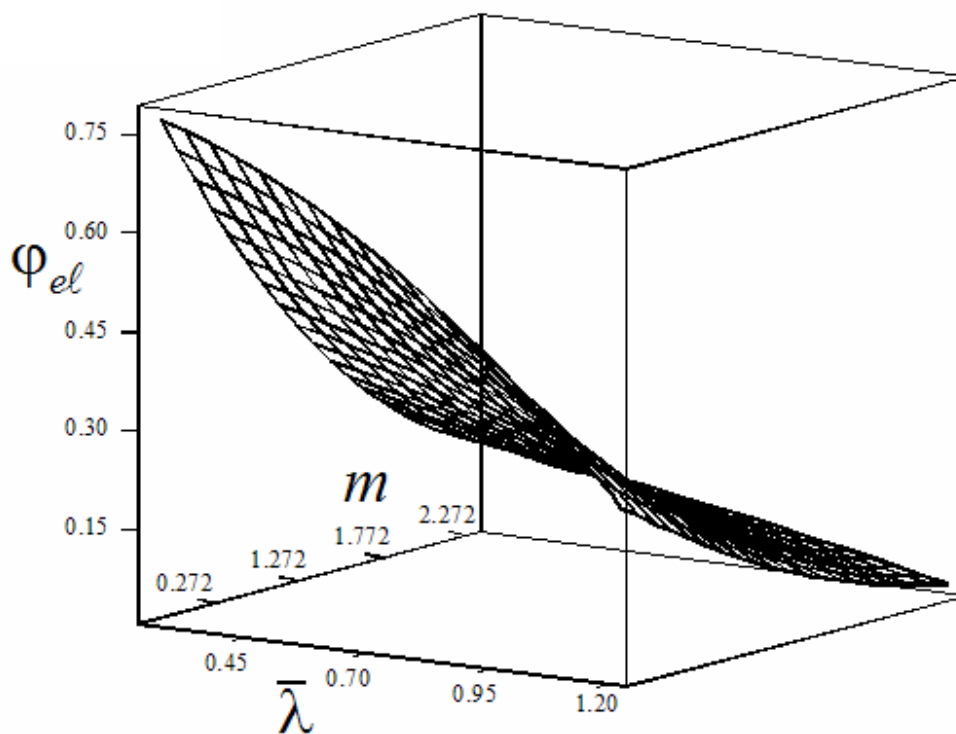
эксцентриситетов $0,272 \leq m \leq 2,7$ можно записать в виде:

$$\varphi_{e,t} = \varphi_{el} \cdot \gamma_{pl}. \quad (11)$$

$$\bar{R} = 0.5$$



$$\bar{R} = 0.75$$



$$\bar{R} = 1$$

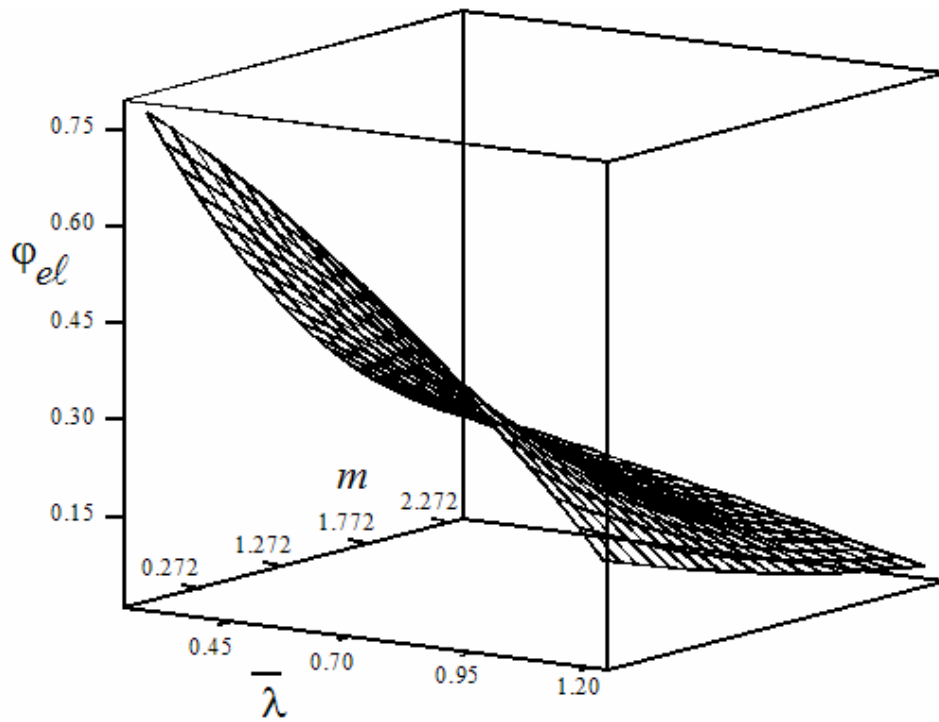
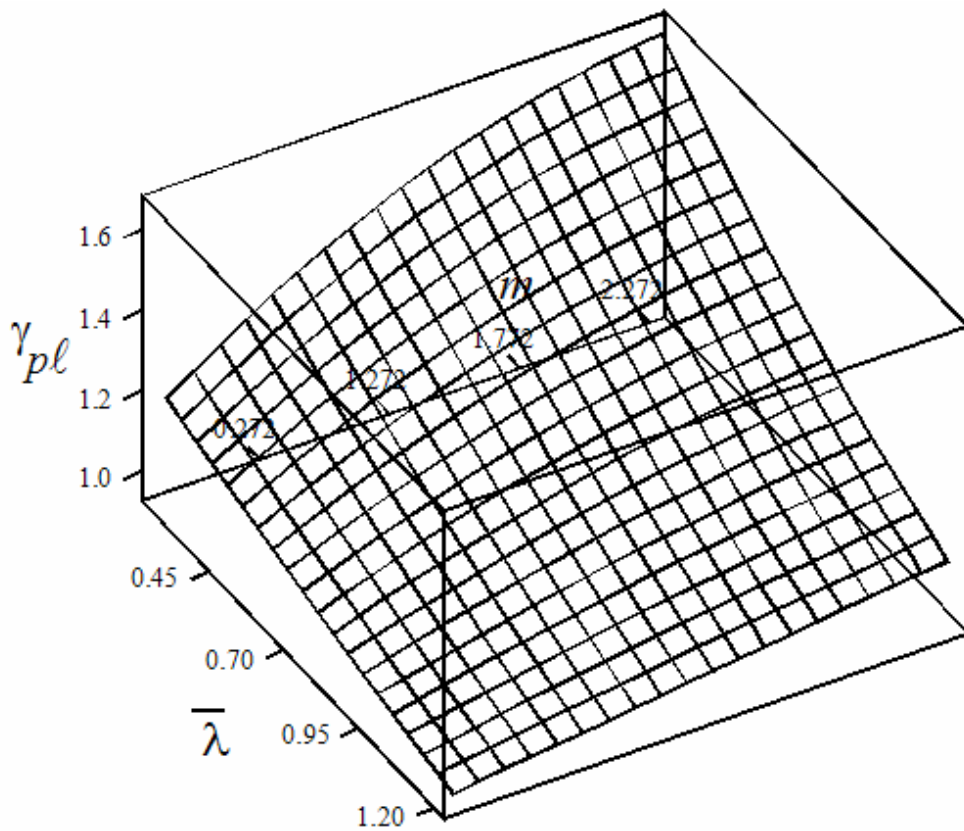
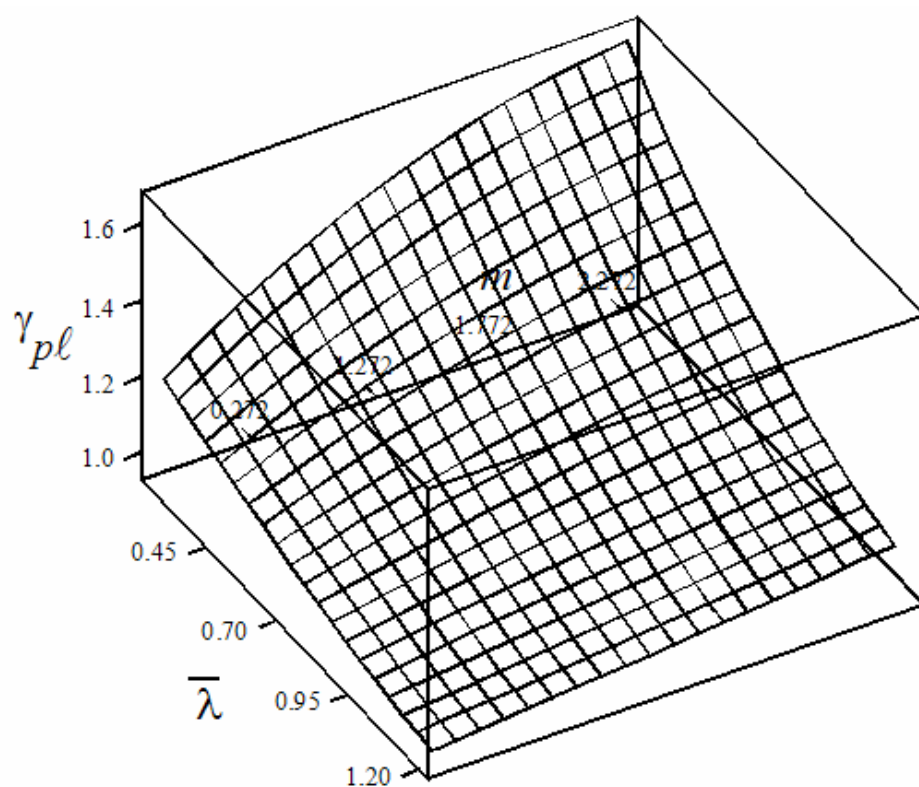


Рисунок 1 - Зависимости $\varphi_{el} = f_1(\bar{R}, m, \bar{\lambda})$ для установленного интервала варьируемых функций

$$\bar{R} = 0.5$$



$$\bar{R} = 0.75$$



$$\bar{R} = 1$$

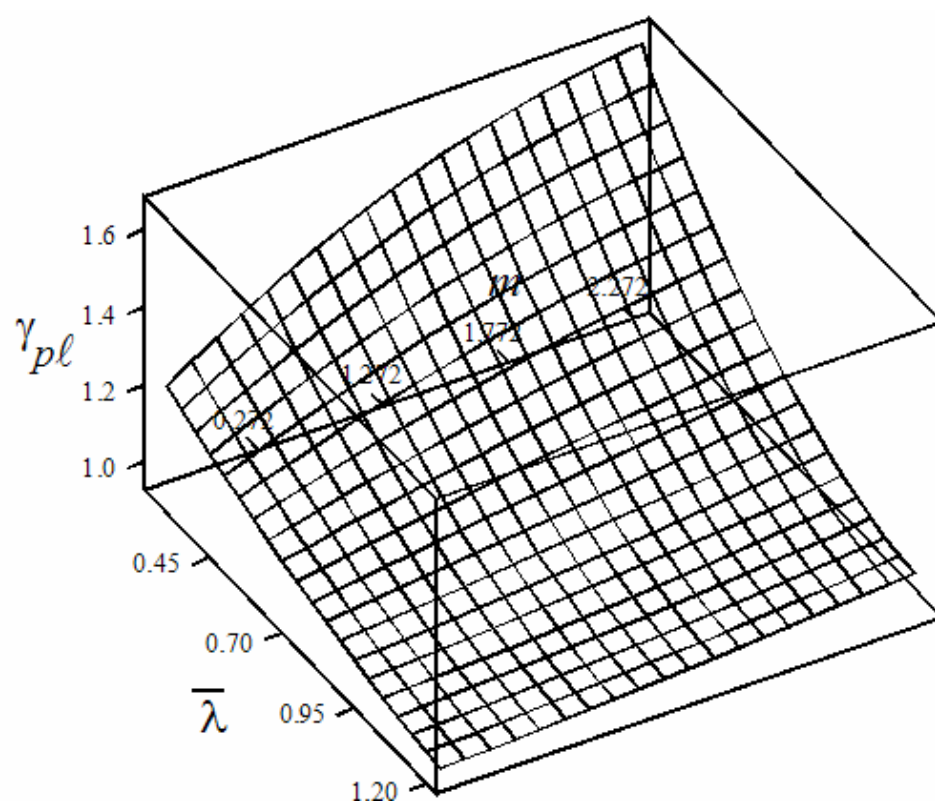
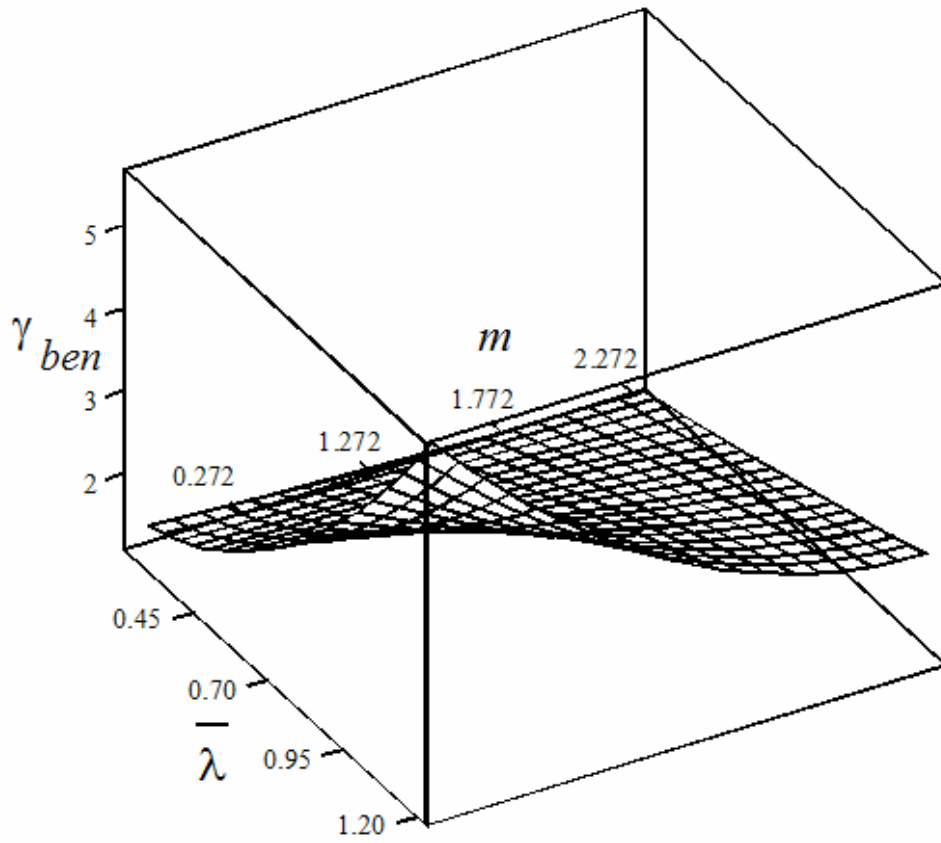
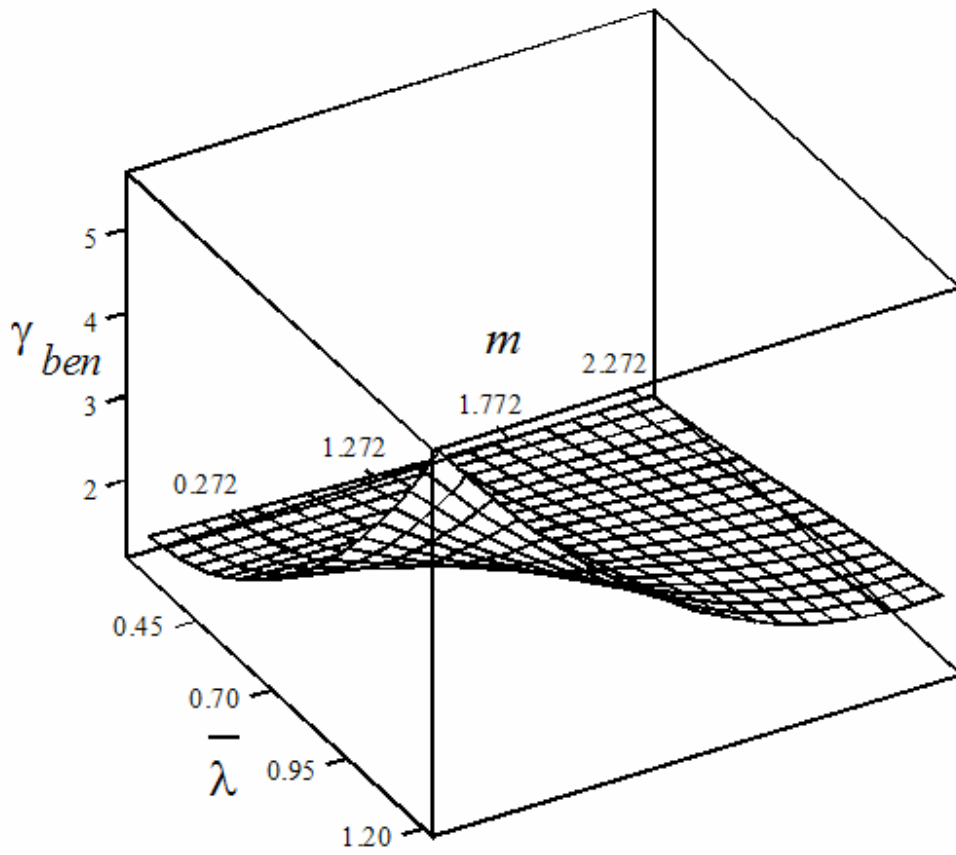


Рисунок 2 - Зависимости $\gamma_{pl} = f_2(\bar{R}, m, \bar{\lambda})$ для установленного интервала варьируемых функций

$$\bar{R} = 0.5$$



$$\bar{R} = 0.75$$



$$\bar{R} = 1$$

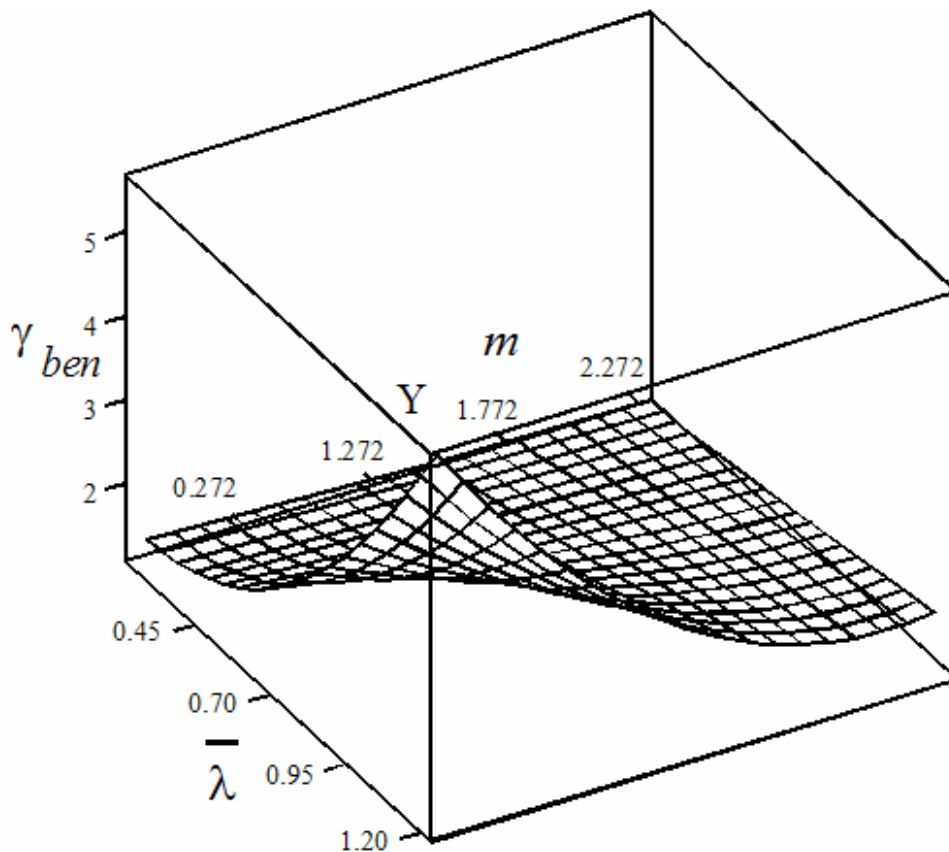


Рисунок 3 - Зависимости $\gamma_{ben} = f_3(\bar{R}, m, \bar{\lambda})$ для установленного интервала варьируемых функций

Аппроксимирующие функции были подвергнуты последующей статистической обработке с целью определения математического ожидания $K_{el} = \varphi_{el} / \varphi_{el,exp}$, $K_{pl} = \gamma_{pl} / \gamma_{pl,exp}$, $K_{ben} = \gamma_{ben} / \gamma_{ben,exp}$ и среднеквадратического отклонения (здесь $\varphi_{el}, \gamma_{pl}, \gamma_{ben}$ – величины коэффициентов, полученные соответственно по формулам (1), (4), (7); $\varphi_{el,exp}, \gamma_{pl,exp}, \gamma_{ben,exp}$ – соответствующие величины коэффициентов, полученные в ходе проведения математического эксперимента).

В ходе выполненных расчетов (обработке подверглась выборка из 216 значений) φ_{el} и $\varphi_{el,exp}$ математическое ожидание коэффициента $K_{el} = 1,0002$, а его среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,0351$. Математическое ожидание коэффициента $K_{pl} = 0,9972$ для выборки из 216 значений γ_{pl} и $\gamma_{pl,exp}$, а его среднеквадратическое отклонение $\sigma = 0,0102$. Математическое ожидание коэффициента $K_{ben} = 1,005$ для

выборки из 216 значений γ_{ben} и $\gamma_{ben,exp}$, а его среднеквадратическое отклонение $\sigma=0,0765$. Полученные данные статистической обработки свидетельствуют о достаточно высокой точности полученных аппроксимирующих функций.

Затем были подвергнуты последовательной обработке данные о величинах несущей способности для элементов с ОНС различных видов, что позволило получить выражение для коэффициента условий работы:

$$\beta_{f,rs} = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{str}^{(f)'}(\sigma_{com}^{(f)}, \sigma_{res,str}^{(f)})}{R_y^f} \cdot \beta_\lambda \cdot \beta_m}, \quad (12)$$

где $\sigma_{str(com)}^{(f)'}$ – замененные прямоугольные ОРН (ОСН) на кромках поясов (ОРН принимаются со знаком «плюс», ОСН – со знаком «минус»); $\sigma_{res,str}^{(f)}$ – растягивающие напряжения в поясах при предварительном напряжении вытяжкой поясов способом упреждающего разогрева; β_λ – коэффициент, учитывающий влияние гибкости; β_m – коэффициент, учитывающий влияние эксцентриситета приложения нагрузки.

Коэффициенты β_m и β_λ можно определить по следующим формулам:

$$\beta_m = 1,08 - 0,318 \cdot m - 0,0299 \cdot m^2. \quad (13)$$

$$\beta_\lambda = -5,126 \cdot \bar{\lambda}^2 + 7,1765 \cdot \bar{\lambda} - 1,185. \quad (14)$$

Тогда несущая способность сжатого элемента с учетом влияния ОНС определяется по формуле:

$$N = \gamma_c \cdot \beta_{f,rs} \cdot \varphi_{e,t} \cdot R_y^f \cdot A. \quad (15)$$

Таким образом, предложенная методика учета ОНС, возникающего в сварных элементах, при расчетах на устойчивость позволяет использовать рекомендуемые действующими нормами [3] подходы, дополняя их в части учета влияния ОНС. Для элементов без ОНС вычисленные коэффициенты продольного изгиба близки к тем, что приведены в таблице 72 [3].

Выводы

На основе проведенных исследований можно сделать выводы.

1. Остаточные напряжения неизбежно возникают в элементах стальных конструкций в процессе изготовления вследствие применения технологических операций, связанных с локальным разогревом.

2. Обычно влияние неупругих свойств стали и ОНС на несущую способность сжатых элементов производится путем увеличения или

уменьшения коэффициента продольного изгиба $\varphi(\varphi_e)$. Такой способ требует применения формул для определения степени влияния ОНС на величину коэффициента $\varphi(\varphi_e)$, основанных, как правило, на данных экспериментальных исследований.

3. Предложена инженерная методика учета влияния неупругих свойств стали и ОНС путем увеличения или уменьшения расчетного сопротивления стали с помощью соответствующих коэффициентов. Методика позволяет путем несложных расчетов оценить степень влияния ОНС на несущую способность сжатых элементов с достаточной для практических целей точностью.

Библиографический список

1. Голоднов А.И. *Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках* / Голоднов А.И.. – К.: Сталь, 2008. – 150 с.

2. ДБН В.2.3-14:2006. *Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування* / Мінбуд України. – К.: Мінбуд України, 2006. – 359 с.

3. СНиП II-23-81*. *Стальные конструкции* / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.

4. А.с. 729327 СССР, МКИ E04 C 21/12. *Способ предварительного напряжения металлических колонн* / И.И. Набоков, Е.П. Лукьяненко, В.А. Нелидов, В.А. Муляев (СССР); опубл. 25.04.80, Бюл. № 14. – 2 с.

5. *Методические рекомендации по применению облегченных предварительно напряженных сварных двутавров для реконструкции промышленных предприятий* / [Набоков И.И., Голоднов А.И., Лукьяненко Е.П. и др.]. – К.: НИИСП Госстроя УССР, 1988. – 45 с.

6. СНиП 3.03.01-87. *Несущие и ограждающие конструкции* / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1989. – 192 с.

7. Балашова О.С. *К расчету сжатых сварных элементов различного сечения* / О.С. Балашова // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. - 2010. - Вып. 30. – С. 241–248.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

*д.т.н. Дрозд Г.Я.,
Бизирка И.И.
(ЛНАУ, г. Луганск, Украина)*

ОСАДОК СТОЧНЫХ ВОД КАК МОДИФИКАТОР АСФАЛЬТОБЕТОНА

Наведені експериментальні результати з отримання композитних в'язучих матеріалів на основі нафтового бітуму та відходів очищення стічних вод – депонованих осадів стічних вод (ОСВ). Досліджені основні фізико-хімічні властивості бітума і асфальтобетонів, модифікованих домішками осадів стічних вод та їх складових.

Ключові слова: осад стічних вод, утилізація, асфальтобетон.

Приведены экспериментальные результаты по получению композитных вяжущих материалов на основе нефтяного битума и отходов очистки сточных вод – депонированных осадков сточных вод (ОСВ). Исследованы основные физико-химические свойства битума и асфальтобетонов, модифицированных добавками осадков сточных вод и их составляющих.

Ключевые слова: осадки сточных вод, утилизация, асфальтобетон.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Для кардинального решения проблем экологии и снижения ресурсоемкости производства необходимо обеспечить кругооборот сырья, утилизировать вторичные ресурсы. Это обусловлено, прежде всего, огромными объемами накопленных (депонированных) отходов ОСВ (в Луганской области свыше 200тыс.т., в Украине около 500млн.т. [1]).

Такие отходы, будучи крупнотоннажными, характеризуются относительной однородностью химического и физического состава и одинаковым происхождением. Крупнотоннажным потребителем отходов может служить дорожно-строительная отрасль. Битум и минеральный порошок – основные структурообразующие компоненты асфальтобетона определяют его свойства и являются достаточно дефицитными материалами. Все дорожные покрытия подвергаются воздействию климатических и эксплуатационных факторов. В результате износа покрытий появляются выбоины, трещины, выкрашивания, колеиность и т.п. На ремонт и содержание дорог в стране расходуется более 60% всех по-

требляемых органических вяжущих и минеральных материалов. Поэтому задачей материаловедения является ресурсосбережение как основной источник материального обеспечения дорожного строительства и создание мощной отраслевой индустриальной базы по переработке и использованию техногенных отходов данного типа.

Такие органоминеральные смеси, достаточно сложные по составу, с успехом могут применяться в составах экологически чистых дорожных покрытий, характеризующихся повышенной стойкостью и долговечностью [2].

Анализ последних достижений и публикаций.

Наиболее полно вопрос утилизации ОСВ в асфальтобетон освещен в работе [3]. В ней показана возможность использования этого органоминерального отхода в качестве компонента (аналога минерального порошка) асфальтобетона. При замене минерального порошка на органоминеральный порошок получается асфальтобетон с высокими физико-механическими свойствами. Остается открытым вопрос, за счет чего ОСВ, являющиеся органоминеральным веществом конкурирует с чистым минеральным порошком? Ведь нарушаются материаловедческие каноны, предписывающие тщательную очистку минеральных составляющих от органических включений.

Цель работы - изучить состав ОСВ и влияние его компонентов на свойства асфальтового вяжущего и асфальтобетон.

Материалы и методики исследований.

Использовали: а) депонированный в течение 10 лет ОСВ Октябрьских очистных сооружений г. Луганска (соотношение: минеральная часть – 79%; органическая -21%) высушенный при температуре 105⁰С и измельченный до фракции минерального порошка ($\approx 0,071$ мм); б) золу после сжигания ОСВ; в) минеральный порошок по ГОСТ Р52129-2003; г) имитатор органического загрязнения – высушенный и измельченный яичный белок; д) органическое вяжущее – битум дорожный БНД 60/90.

Исследовали: свойства асфальтового вяжущего на основе битума с добавками: минерального порошка, органоминерального порошка (ОСВ), золы от сжигания ОСВ и белкового компонента. Количество добавки каждого компонента к битуму составляло 5, 10, 20, 40, 50%. Изучали пенетрацию по ГОСТ 11501; температуру размягчения по кольцу и шару (ГОСТ 11506) и растяжимость (дуктильность) по ГОСТ 11505.

Результаты и их обсуждение.

Все осадки сточных вод являются органоминеральным комплексом, образующимся в процессе биологической очистки жидкости с последующим осаждением взвеси. В зависимости от времени хранения количество минеральной части может достигать 80%, а органическая часть представлена трудноокисляемой органикой.

Минеральная составляющая осадков сравнительно хорошо изучена и может быть охарактеризована химическим составом, представленным в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав минеральной части осадков сточных вод [1,4]

Хим. состав	Содержание, % масс.					
	Украина			Россия		
	Луганск	Донецк	Артемовск	Новосибирск	Омск	Москва
SiO ₂	46,3	33,8	54,2	56,2	54,6	55,3
Al ₂ O ₃	10,05	8,9	9,1	12,4	9,6	12,1
Na ₂ O	0,8	1,8	1,5	-	1,7	1,2
K ₂ O	0,95	1,0	-	-	1,75	1,3
CaO	6,1	12,5	7,3	6,4	13,2	7,6
MgO	1,94	3,6	4,5	4,5	3,4	3,9
TiO ₄	0,4	-	-	1,8	0,7	1,7
MnO	-	-	-	0,3	0,1	0,2
Fe ₂ O ₃	9,25	7,2	5,7	6,0	6,8	6,5
SO ₃	1,6	1,8	2,0	2,7	-	1,7
P ₂ O ₅	1,84	-	-	4,5	-	2,2
Содержание органических веществ, (п. п. п.) %	21,1	47,0	41,2	60,1	60,5	59,8

Минеральная часть осадков представлена преимущественно алюмосиликатами – монтмориллонитом – (Ca, Mn, Na ...)(Al, Mg)₂*

*(OH)₂[(Si, Al)₄xO₁₀]*n*H₂O, каолинитом – Al₄(OH)₈[Si₄*O₁₀], иллитом – (Ca, Mg ...)(Mg, Fe²⁺)*(OH)₂[(Si, Al)₄O₁₀]*4H₂O; карбонатами – кальцитом CaCO₃; кварцем, кремнеземом – SiO₂ [3].

Органическая часть осадка изучена очень слабо ввиду большого разнообразия органических составляющих и по современным представлениям состоит из белково-, жиро-, углеводоподобных веществ в сумме 80-85% и лигнино–гумусового комплекса соединений – 15-20% [5]. Оценим влияние каждого из компонентов осадка на температуру размягчения в сравнении с битумом и минеральным порошком (таблица 2).

Таблица 2 – Физико-механические свойства битумного вяжущего, модифицированного различными добавками

Вид добавки	Температура размягчения, °С по кольцу и шару следующих составов:					
	Исходный битум БНД 60/90	Битум + 5%	Битум + 10%	Битум + 20%	Битум + 40%	Битум + 50%
Минеральный порошок	47,5	47,5	48	48	54	58
Органо-минеральный порошок (ОСВ)	47,5	48	49	50,5	55	59,5
Зола ОСВ	47,5	48	48	51	54	60
Белок	47,5	49,5	50	52	55	61

В таблице 3 и 4 приведены данные по растяжимости (диктулометрии) и пенетрации модифицированных добавками асфальтовых вяжущих.

Таблица 3 – Растяжимость (см) битума и битума, модифицированного добавками при 25°С

Вид добавки	Битум БНД 60/90	Битум + 5%	Битум + 10%	Битум + 20%	Битум + 40%	Битум + 50%
Минеральный порошок	94	40	37	27,5	22,5	14,5
Органо-минеральный порошок (ОСВ)	94	44	40	27	22	14
Зола ОСВ	94	26	22	19,5	11	6
Белок	94	26	13	5	3	2

Таблица 4 – Глубина проникновения иглы при пенетрации, *0,1мм при 25⁰С

Вид добавки	Битум БНД 60/90	Битум + 5%	Битум + 10%	Битум + 20%	Битум + 40%	Битум + 50%
Минеральный порошок	59	55	51	47,5	40	31
Органо-минеральный порошок (ОСВ)	59	56	53	47,5	38	30
Зола ОСВ	59	51	50	45	34	28
Белок	59	56	53	46	37	29

Исследование модифицированного асфальтового вяжущего с добавками ОСВ, а также его минеральной и органической составляющей в пределах от 5 до 50% по массе показали, что во всех случаях введение этих добавок независимо от качественного состава уменьшает пенетрацию и растяжимость при 25⁰С и заметно повышает температуру размягчения вяжущего (таблица 2-4). Органическая составляющая не ухудшает качество асфальтового вяжущего, вероятно, из сродства к органическому вяжущему – битуму.

На основе битума БНД 60/90 с добавками минерального порошка и ОСВ с содержанием добавок по 6% масс. были изготовлены и испытаны образцы асфальтобетона (таблица 5).

Таблица 5 – Физико-механические свойства асфальтобетона с различным видом добавок

№ п/п	Состав ас-фальтобетона (плотный, тип Б)	Объем-ный вес, г/см ³	Водо-насы-щен-ность, %	Набу-хание, %	Предел прочности, МПа при температуре		Коэффи-циент водоус-то-чивости
					20 ⁰ С	50 ⁰ С	
1	Щебень - 35% Отсев дробле-ния щебня – 59% Мине-ральный по-рошок – 6%	2,29	1,71	0,8	6,6	2,2	0,85

Продолжение таблицы 5

№ п/п	Состав ас- фальтобетона (плотный, тип Б)	Объем- ный вес, г/см ³	Водо- насы- щен- ность, %	Набу- хание, %	Предел прочности, МПа при температуре		Кoeffи- циент водоус- то- чивости
					20 ⁰ С	50 ⁰ С	
2	Щебень – 35% Отсев дробле- ния щебня – 59% ОСВ – 6%	2,28	2,93	0,13	5,6	2,9	0,91
3	Требования ДСТУ Б В.2.7 -119-2003		1,5-3,5	Не более 0,85	2,4	1,2	Не менее 0,85

Как следует из таблицы 5, образцы с добавкой 6% ОСВ вместо традиционного минерального порошка соответствуют требованиям ДСТУ и имеет лучшие в сравнении с контрольным составом (с минеральным порошком) прочность при 50⁰С, меньшее набухание и более высокий коэффициент водостойкости.

Выводы

1. Осадки сточных вод можно рассматривать как сырьевой ресурс и заменитель традиционного минерального порошка в дорожно-строительной отрасли.

2. Органо-минеральный порошок на основе ОСВ является модификатором асфальтобетона, повышающим долговечность дорожного полотна в условиях повышенных летних температур.

3. В структурообразовании такого строительного материала как асфальтобетон, эффективную роль, вероятно, играет наряду с минеральной и органическая составляющая органо-минеральной добавки.

Библиографический список

1. Дрозд Г.Я. Предложения по вовлечению депонированных осадков сточных вод в хозяйственный оборот: Матер. Международного конгресса "ЭТЭВК - 2009". - Ялта, 2009. – С.230-242.

2. Дрозд Г.Я. Утилизация осадков сточных вод в дорожном строительстве / Г.Я. Дрозд, Р.В. Бреус // Вісті автомобільно-дорожнього інституту - №1 (8), 2009. – Горлівка: ДНТУ. – С. 186-193.

3. Бреус Р.В. Зниження об'ємів накопичених відходів водоочищення – осадів стічних вод, шляхом їх утилізації в асфальтобетонів: Автореф. дис. ...к.т.н., Харків: УНДІЕП, 2007. – 21с.

4. Симонов А.Д. Сжигание осадков сточных вод коммунального хозяйства в псевдооживленном слое катализатора / А.Д. Симонов, Н.А. Языков, А.В. Трачук и др. // Альтернативная энергетика и экология. - №6 (86). - 2010. – С.61-66.

5. Яковлев С.В., Водоотведение и очистка сточных вод/ С.В. Яковлев, Ю.В. Воронов. – Москва: АСВ, 2004. – 704 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

д.т.н. Югов А.М.,
Белов Д.В.
(ДонНАСА, г. Макеевка, Украина,
e-mail Belov-DV@mail.ru)

СПОСОБ ВОЗВЕДЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ КУПОЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

У даній статті приводяться основні чинники, що ускладнюють зведення монолітних залізобетонних купольних конструкцій за допомогою традиційних опалубних систем. Запропонована принципово нова опалубка, яка дозволяє вирішити деякі технічні труднощі при зведенні залізобетонних куполів. Детально показано улаштування опалубки і принцип її роботи на різних стадіях використання. Відбиті універсальність, висока технологічність і основні переваги підйомної опалубки перед пневматичною.

Ключові слова: монолітний купол, опалубка куполу, кружала, бетонування, підйомна опалубка, технологія зведення.

В данной статье приводятся основные причины, затрудняющие возведение монолитных железобетонных купольных конструкций с помощью традиционных опалубочных систем. Предложена принципиально новая опалубка, которая позволяет решить некоторые технические трудности при возведении железобетонных куполов. Детально показано устройство опалубки и принцип её работы на различных стадиях использования. Отражены универсальность, высокая технологичность и основные преимущества подъемной опалубки перед пневматической.

Ключевые слова: монолитный купол, опалубка купола, кружала, бетонирование, подъемная опалубка, технология возведения.

Уменьшение массы конструкций и сооружений является одной из основных тенденций в строительстве. Снижение массы означает уменьшение объема материала, необходимости его добычи, переработки, транспортировки и монтажа. Поэтому вполне естественен интерес, который возникает у строителей и архитекторов к новым формам конструкций, что дает особенно большой эффект в покрытиях [1].

Железобетонные монолитные купола получили широкое распространение. Для них имеются вполне надежные методы расчета и конструирования.

В купольных оболочках наиболее полно используются пластические и прочностные возможности материала, что, по сравнению с покрытиями из линейных и плоских конструкций, снижает расход бетона на 30–35% и стали на 20–25%.

Благодаря шарообразной форме конструкции и как следствие, меньшей площади поверхности, достигается минимальная степень потери тепла зимой и проникновения жары летом по сравнению с прямоугольными системами. Также куполу требуется меньше затрат для обогрева, чем традиционным зданиям, что позволяет экономить 30–40% на отоплении и кондиционировании, держать тепловой и энергетический баланс на низком экономическом уровне, что существенно снижает эксплуатационные затраты [2].

Однако возведение куполов требует устройства сложной опалубки, стоимость которой соизмерима со стоимостью собственно оболочки. Предложения по возведению куполов с пневматической опалубкой к настоящему времени нашли применение для куполов до 30 м. При устройстве деревянной опалубки оборачиваемость её крайне мала и при этом трудно соблюсти точные геометрические размеры элементов, что является обязательным в данной конструкции [3].

Поэтому **целью** статьи является разработка усовершенствованных организационно-технологических решений возведения большепролетных монолитных купольных сооружений за счет применения принципиально нового конструктивно-технологического решения купольной опалубки.

В данной статье предлагается вариант способа возведения монолитных куполов с использованием подъемной опалубки.

Основная задача подъемной опалубки – упрощение технологии изготовления куполов больших пролетов.

Порядок работы опалубочной системы.

I Стадия.

При устройстве нижнего опорного кольца купола в нем выполняют симметричные ниши, делящие его на сегменты 1, рисунок 1. Стенки ниш имеют углубления для последующего замоноличивания. Через них проходят роликовые пути 2 к опорному шарниру 3. В геометрическом центре конструкции монтируется временная опора 4 с подъемным кольцом 5, лебедкой 6 и тросами 7. Кружала 8 собираются из сегментов, количество которых зависит от пролета купола [4].

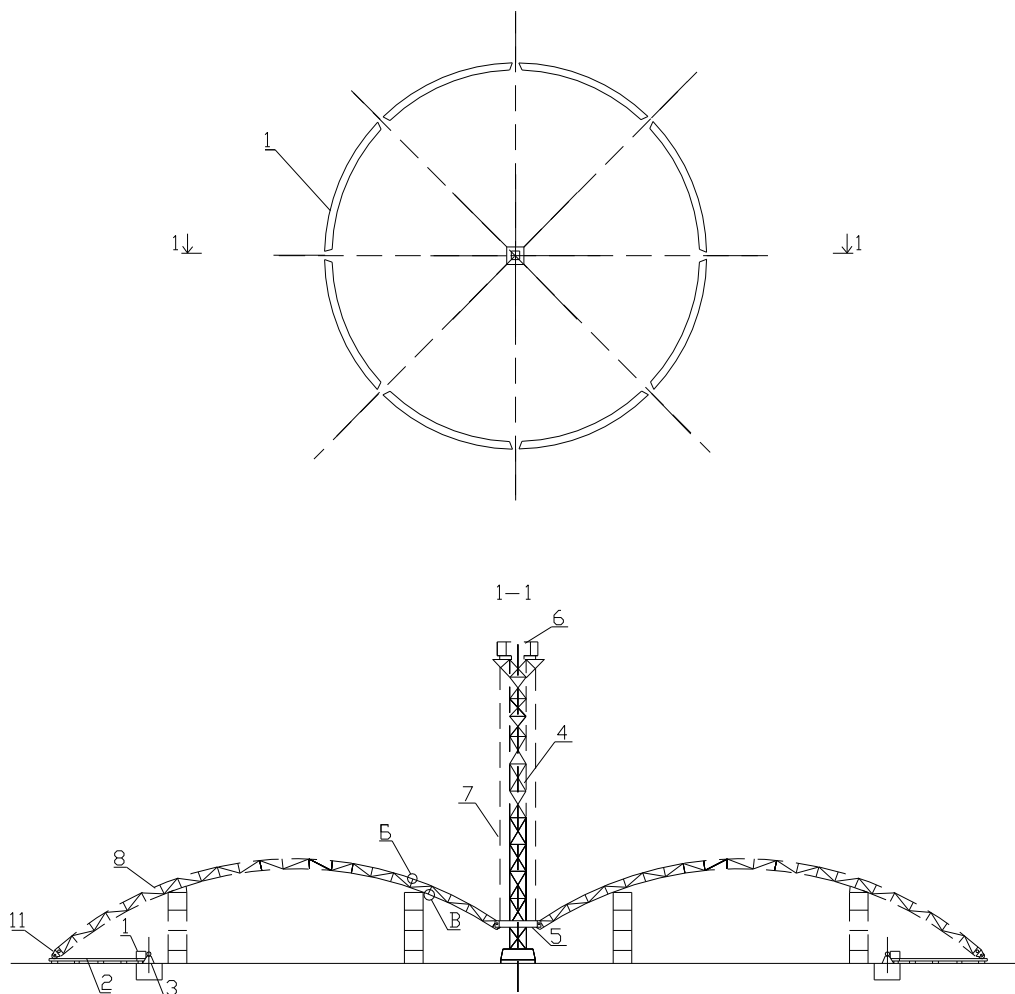


Рисунок 1 - Монтаж кружал и временной опоры купола

1- сегменты опорного кольца; 2- роликовые пути; 3- опорный шарнир; 4- временная опора; 5- подъемное кольцо; 6- лебедка; 7- тросы; 8- кружала

В зависимости от требуемых параметров купольного сооружения регулируется кривизна кружал путем изменения расстояния «а» с помощью скобы-шарнира 9 в верхнем поясе кружал, рисунок 2.

II Стадия.

После сборки кружал 8 выполняется монтаж палубы опалубки 10 рисунок 3. Палуба выполнена из тонколистового металла в виде секторов-секций, соединенных между собой. Палуба 10 свободно лежит на кружалах 8. В двух симметричных секторах палуба частично не устраивается.

Последовательно укладывают слои облицовки, паро-, теплоизоляции, гибкую сварную сетку и бетонную смесь. Во избежание

сползания бетонной смеси на вертикальных участках в момент подъема, на опалубку укладывают тканевую сетку.

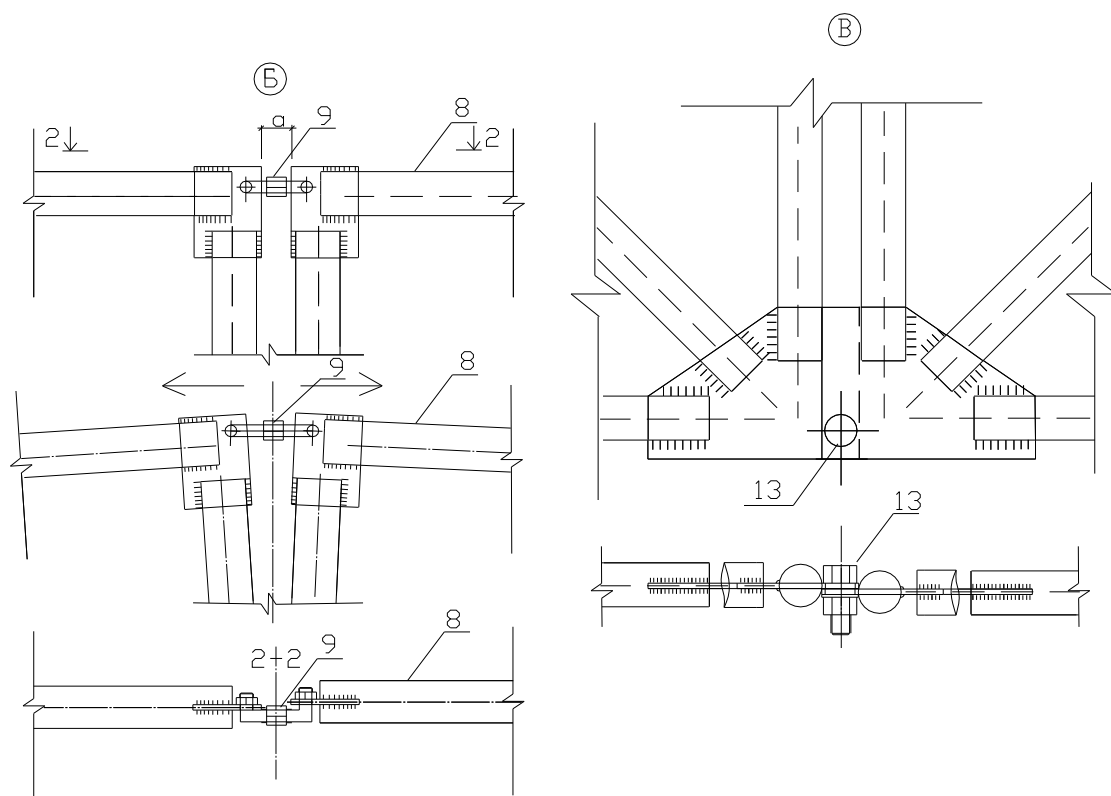


Рисунок 2- Узлы соединения секций кранов

Б – верхний узел; В – нижний узел; 8 – кран; 9- скобы-шарнира; 13- нижний шарнир

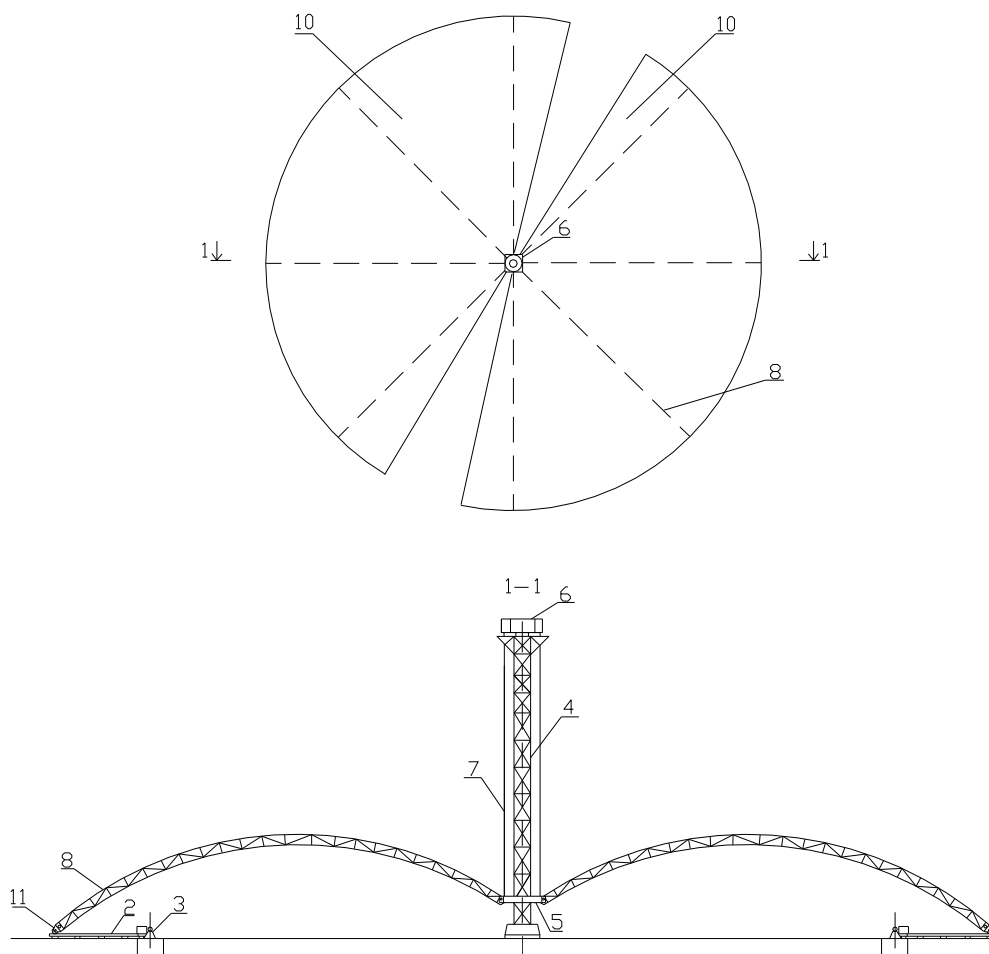


Рисунок 3 - Смонтированная опалубка до подъема

2 – роликовые пути; 3 – опорный шарнир; 4- временная опра; 5- подъемное кольцо; 6 - лебедка; 7- тросы; 8- кружала; 10 – палуба опалубки; 11 – ролик

III Стадия.

Подъемная лебедка 6 с помощью тросов 7 поднимает кольцо 5, которое свободно скользит по временной опоре 4. При этом верхний конец кружала 8 поворачивается в шарнирах подъемного кольца 5, а нижний конец с помощью ролика 11 подходит к опорному шарниру 3 в крайнюю проектную точку. Палуба опалубки 10 при подъеме совершает свободное скольжение по кружалам, при этом края «пустых» секторов по мере подъема подходят друг к другу и смыкаются в конце подъема.

Третья стадия работы опалубки представлена на рисунке 4.

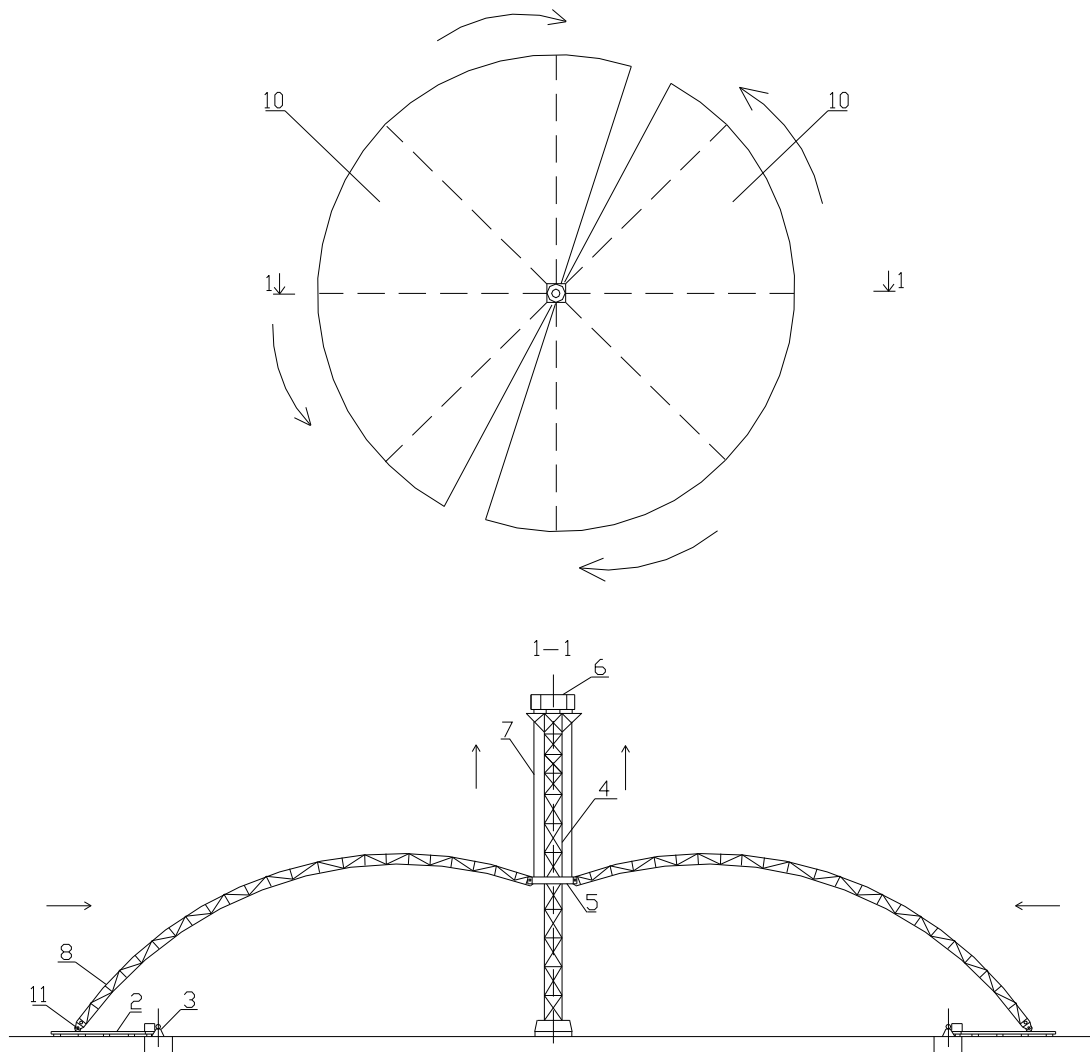


Рисунок 4 - Опалубка при подъеме

2 – роликовые пути; 3 – опорный шарнир; 4- временная опора;
 5- подъемное кольцо; 6 - лебедка; 7- тросы; 8- кружала;
 10 – палуба опалубки; 11 – ролик.

IV Стадия.

При окончании подъема производится фиксация ролика 11 в опорном шарнире 3, закрепления концов кружал в верхних и нижних фиксаторах. Выполняется замоноличивание ниш в нижнем опорном кольце, рисунок 5.

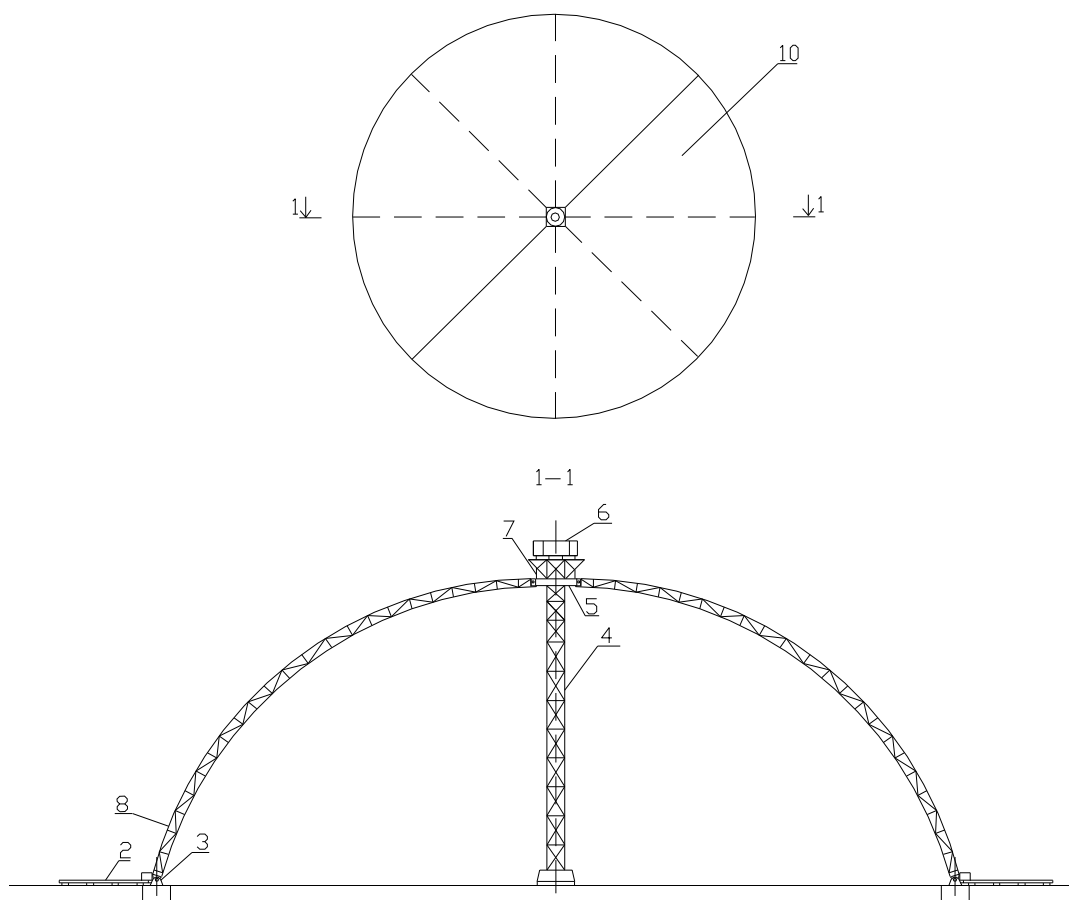


Рисунок 5 - Опалубка после подъема

2 – роликовые пути; 3 – опорный шарнир; 4- временная опра;
 5- подъемное кольцо; 6 - лебедка; 7- тросы; 8- кружала;
 10 – палуба опалубки

V Стадия.

После набора бетоном необходимой прочности производится распалубка в такой последовательности. С помощью шпренгеля-съемника 12 создается разгружающее усилие в середине кружала. Это дает возможность демонтировать шарнир 13 в нижней части секции кружала и скобу-шарнир 9 в верхней части, рисунок 2, после чего производят поворот половин кружал в опорном шарнире 3 и в верхнем шарнире подъемного кольца 5. По мере демонтажа половин кружал опускают подъемное кольцо 5. Демонтаж кружал и временной опоры 4 производят по секционно, рисунок 6.

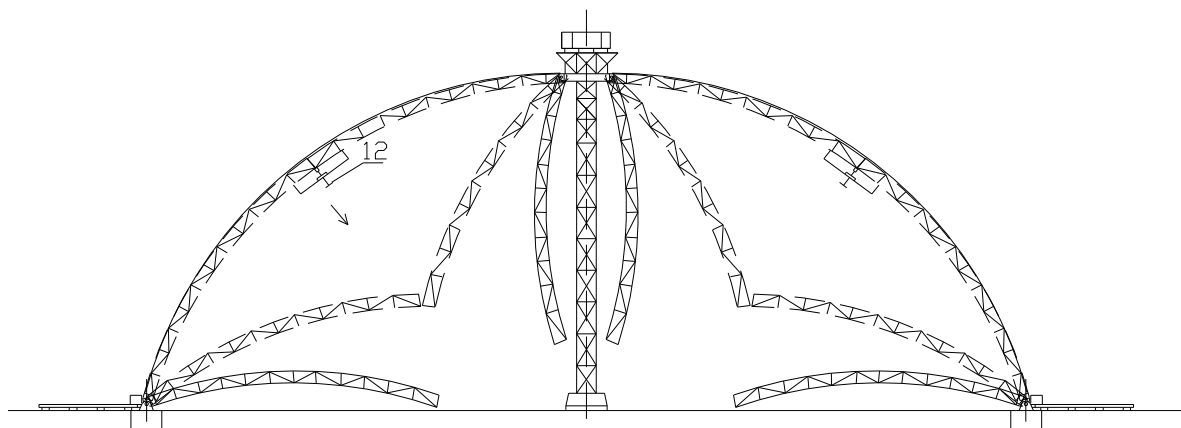


Рисунок 6 - Демонтаж опалубки
12 – шпренгель-съемник

Основные выводы. Возведение купольных объектов с помощью предложенной принципиально новой подъемной опалубки дает возможность снизить трудоемкость опалубочных работ, значительно увеличить пролет купольного объекта, повысить оборачиваемость и универсальность опалубки. Технология не требует сложной спецтехники, опалубка собирается из легких элементов.

Подъем бетонной смеси купола происходит не с использованием пневмосистемы, как в пневмоопалубке, а механически. При этом нет необходимости в поддержании избыточного давления воздуха под опалубкой в процессе набора бетоном распалубочной прочности (2-3 дня).

Стальная палуба опалубки не ограничивает пролет купольного сооружения, при этом опалубочные, бетонные и арматурные работы проходят внизу в удобных условиях. Сборные секции кружал позволяют выполнять купольные объекты с различными пролетами и формами. Опалубка изготавливается из относительно недорогих материалов, проста и технологична в использовании.

Библиографический список

1. Липницкий М.Е. Купола / Липницкий М. Е. – Ленинград. - 1973. - 128с.
2. Тур В.И. Купольные конструкции / В. И. Тур. – Москва. - 2004. - 94 с.
3. Зверев А.Н. Большепролетные конструкции покрытий общественных и промышленных зданий/ А.Н. Зверев. – Санкт-Петербург. - 1998.- 60с.
4. Пат. України МПК E04G 11/04 Опалубка для зведення великопролітних куполів. Белов Д.В., Югов А.М.- № и 2009 09928; Заявл.29.09.2009; Опубл. 02.02.2010.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

*д.т.н. Дрозд Г.Я.,
к.т.н. Бреус Р.В.,
к.т.н. Рогулин В.В.
(ЛНАУ, г. Луганск, Украина),
к.т.н. Соколенко В.М.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Наведені результати натурних обстежень експериментальних дорожніх покриттів на основі нових складів асфальтобетону з використанням комунальних відходів – осадів стічних вод.

Ключеві слова: асфальтобетон, осадки стічних вод, дорожні покритті, натурне обстеження.

Приведены результаты натурных обследований экспериментальных дорожных покрытий на основе новых составов асфальтобетона с использованием коммунальных отходов – осадков сточных вод.

Ключевые слова: асфальтобетон, осадки сточных вод, дорожные покрытия, натурное обследование.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Среди множества проблем в стране есть такие, которые трудно связать между собой. Например, экологическая проблема: накопление отходов, обуславливающая загрязнение окружающей природной среды и выведение из хозяйственного оборота под складирование больших земельных площадей. Или проблема качества автомобильных дорог.

В Украине их протяженность составляет около 170 тыс.км, более половины из них имеет асфальтобетонное покрытие, которое по качеству не соответствует требованиям ДСТУ. Не только строительство новых, но и ремонт эксплуатируемых дорог требуют огромных материальных затрат и ресурсов. Это не только деньги, но и строительные материалы: щебень, песок, дефицитные битум и минеральный порошок. При желании проблему качества дорог можно решить параллельно с экологической проблемой путем использования отходов в качестве вторичного сырья для замены минерального порошка в асфальтобетоне на органоминеральный порошок из осадков сточных вод [1, 2].

Анализ последних достижений и публикаций.

Впервые попытку использовать осадок сточных вод в натуральном (влажном) виде предприняли в Беларуси в конце прошлого столетия для приготовления битумоминеральных смесей, где осадок выступал в роли эмульгатора. Разработанная технология широко используется при ямочном ремонте. На основании теоретических и экспериментальных работ разработаны ТУ РБ 05548406.171-98 «Смеси асфальтобетонные холодные с осадком городских сточных вод и асфальтобетон» [3]. Однако необходимость использования специального дорогостоящего оборудования – эмульгаторной установки при производстве асфальтобетонных смесей ограничило применимость данной технологии. При этом количество утилизированного осадка в объеме 12-16% при влажности около 95% составляет примерно 2-3% по сухому веществу.

Увеличение эффективности использования осадков в асфальтобетоне (6-8% по сухому веществу или 132-175 кг на 1 м³ а/б смеси) и отказ от эмульгаторной установки может быть достигнуто путем предварительной подготовки осадка по технологии, приведенной на рисунке 1 [1, 2].

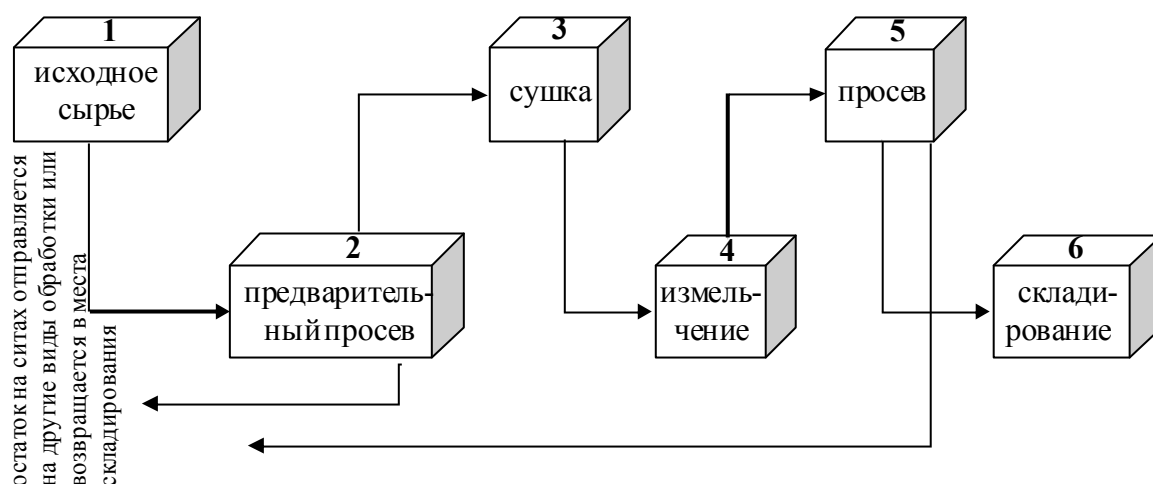


Рисунок 1 – Технологическая схема по подготовке ОСВ к утилизации в дорожном строительстве

Это позволяет использовать стандартный парк оборудования асфальтобетонных заводов.

Разработаны составы асфальтобетонов, в которых в качестве компонента, аналога минерального порошка, выступает осадок сточных вод [4, 5]. Физико-механические параметры образцов асфальтобетона приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства образцов асфальтобетона с различным содержанием добавки ОСВ

№ п/ п	Состав асфальтобетона (плотный, тип Б)	Водо-насы- щение, %	Набу-хание, %	Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре			Коэффи-циент водо-устойчи- вости
				20°С	50°С	водо- нас сост.	
1	Щебень – 35%; Песок из отсева дроб- ления щебня – 65% (контроль)	0,6	0,12	6,40	2,05	5,56	0,87
2	Щебень – 35%; Песок из отсева дроб- ления щебня – 63%; ОСВ – 2%.	0,55	0,15	6,10	1,65	5,70	0,93
3	Щебень – 35%; Песок из отсева дроб- ления щебня – 61%; ОСВ – 4%.	0,97	0,15	6,25	1,92	5,60	0,89
4	Щебень – 35%; Песок из отсева дроб- ления щебня – 59%; ОСВ – 6%.	0,65	0,06	7,40	3,0	6,80	0,91
5	Щебень – 35%; Песок из отсева дроб- ления щебня – 57%; ОСВ – 8%.	1,22	0,18	8,0	3,3	6,9	0,86
	Требования ДСТУ Б В.2.7-119-2003 (марка II, верхние слои)	1,5- 3,5	не бо- лее 0,85	2,4	1,2	-	не ме- нее 0,85
	Требования ДСТУ Б В.2.7-119-2003 (марка II, нижние слои)	не бо- лее 10	-	1,5	-	-	не ме- нее 0,6

Как следует из таблицы 1, разработанные составы асфальтобетонов с утилизированным ОСВ, по своим свойствам превосходят требования ДСТУ.

Несмотря на эффективность утилизации ОСВ в асфальтобетон как с экологической, так и с технической точек зрения, данный способ не нашел широкого использования на практике. Это объясняется отсутствием нормативно-правового сопровождения технологии (отсутствие ТУ на органоминеральный порошок и дополнений к существующим ДСТУ), что является следствием настороженного отношения специалистов и материаловедов к необычной, органику содержащей добавке.

Для исследования разработанных составов модифицированных осадком сточных вод асфальтобетонов в эксплуатационных условиях, было осуществлено строительство экспериментальных участков дорожных покрытий с разной степенью их эксплуатационной нагрузки [6, 7]:

1. г. Луганск, Площадка гаража для тяжелой техники на территории МДПМК-34, 2005 г.;

2. Участок автодороги I категории длиной 100 м (объездная дорога г. Луганска), 2008 г.;

3. г. Антрацит, Участок городской дороги длиной 260 м на промышленно-складской улице, 2010 г.

Цель работы - оценить техническое состояние экспериментальных дорожных покрытий со сроком эксплуатации 6, 3 и 1 год.

Результаты и их обсуждение.

Визуальный осмотр всех экспериментальных покрытий выявил их отличное состояние (рисунки 2-4).



Рисунок 2 – Площадка для тяжелой техники в г. Луганске (МДПМК-34).
Эксплуатация 6 лет



Рисунок 3 – Экспериментальный участок обьездной автодороги вокруг г. Луганска. Эксплуатация 3 года



Рисунок 4 – Экспериментальная городская улица г. Антрацит. Эксплуатация 1 год

Результаты лабораторных испытаний вырубок асфальтобетона из экспериментальных покрытий приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Физико-механические свойства вырубков асфальтобетона

Объект*	Состав асфальтобетона	Объемный вес, г/см ³	Водо-насы- щение, %	Набу-хание, %	Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре		Коэффи-циент водоустойчи- вости
					20°C	50°C	
1	Щебень – 35%; Песок из отсева дробления щебня – 59%; ОСВ – 6%	2,29	1,71	0,13	5,4	2,9	0,88
2	Щебень – 35%; Песок из отсева дробления щебня – 60%; ОСВ – 5%.	2,30	2,1	0	6,6	2,5	1,3
3	Щебень – 35%; Песок из отсева дробления щебня – 58%; ОСВ – 7%.	2,25	2,93	0,8	3,45	2,0	0,91
	Требования ДСТУ Б В.2.7-119-2003 (марка II, верхние слои)		1,5-3,5	не бо- лее 0,85	2,4	1,2	не ме- нее 0,85

* 1 – площадка для тяжелой техники в г. Луганске (МДПМК-34).
Эксплуатация 6 лет;
2 – экспериментальный участок объездной автодороги вокруг г. Луганска. Эксплуатация 3 года;
3 - Экспериментальная городская улица г. Антрацит. Эксплуатация 1 год.

Выводы

1. Результаты натурных обследований экспериментальных асфальтобетонных покрытий, модифицированных техногенными отходами (осадками сточных вод) свидетельствуют о высоком их качестве, не уступающим по своим показателям покрытиям из традиционных асфальтобетонов.

2. Положительные результаты эксперимента, основанного на вовлечении в хозяйственный оборот техногенных отходов, позволяют утверждать, что имеется возможность совместного эффективного реше-

ния экологической и технической проблемы с максимальной пользой для общества.

3. Накопленный опыт в реализации проекта «отходы в дороги» должен явиться отправной точкой для создания соответствующего нормативно-правового сопровождения, что будет способствовать широкой реализации способа утилизации данного вида отходов.

Библиографический список

1. Бреус Р.В. Зниження об'ємів накопичених відходів водоочищення – осадів стічних вод, шляхом їх утилізації в асфальтобетон // Автореф. дис. канд. техн. наук – Харків: УНДІЕП, 2007. – 21с.

2. Пат. № 26095. Україна. МПК C0271/52-1/56, 7C04B26/26 – № и200612901. Спосіб утилізації осадів міських стічних вод / Р.В. Бреус, Г.Я. Дрозд; Заявл. 06.12.2006; Опубл. 10.09.07, Бюл. №14.

3. В. Новак. Применение городских осадков сточных вод при выпуске асфальтобетонных смесей // Строительство и недвижимость. - №2. - 2009. – С. 8-11.

4. Дрозд Г.Я. Техничко-екологические записки по проблеме утилизации осадков городских и промышленных сточных вод // Г.Я. Дрозд, Н.И. Зотов, В.Н. Маслак. – Донецк: ИЭП НАН Украины, 2001. – 340с.

5. Пат. № 17974. Україна. МПК C04B26/26 – № и200604831. Асфальтобетонна суміш / Р.В. Бреус, Г.Я. Дрозд, Э.С. Гусенцова; заявл. 03.05.2006; Опубл. 16.10.2006, Бюл. №10.

6. Дрозд Г.Я. Утилизация осадков сточных вод в дорожном строительстве / Г.Я. Дрозд, Р.В. Бреус // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: Науково-виробничий збірник. АДІ ДонНТУ. – Горлівка, 2009 - №1. – С. 186-193.

7. Дрозд Г.Я. Утилизация осадков сточных вод предприятиями «Водоканала» - новый поход к решению проблемы / Г.Я. Дрозд, Р.В. Бреус, В.В. Рогулин // Водопостачання та водовідведення. - №5, 2010. – С. 51-57.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

*к.е.н. Гайко Є.Ю.
(ХНАМГ, м. Харків, Україна),
к.т.н. Гайко Ю.І.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)*

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНВЕСТИЦІЙНОГО РОЗВИТКУ МІСЬКОГО КОМУНАЛЬНОГО СЕКТОРУ НА ОСНОВІ КОНЦЕСІЙНОГО МЕХАНІЗМУ

В статті наведено схему організаційно-економічних заходів зі стимулювання інвестиційної діяльності на основі впровадження концесійного механізму. Деталізовано чотири підсистеми: економічну, управлінську, організаційну, законодавчу, на основі яких ґрунтується програма інвестиційного розвитку.

Ключові слова: концесія, інвестиційна діяльність, житлово-комунальне господарство, моніторинг.

В статье приведена схема организационно-экономических мероприятий по стимулированию инвестиционной деятельности на основе внедрения концессионного механизма. Детализированы четыре подсистемы: экономическая, управленческая, организационная, законодательная, на основе которых базируется программа инвестиционного развития.

Ключевые слова: концессия, инвестиционная деятельность, жилищно-коммунальное хозяйство, мониторинг.

Постановка проблеми. Становище, в якому сьогодні знаходиться українська економіка, не дозволяє нехтувати таким потенційно могутнім чинником зростання і підвищення її ефективності, як залучення приватних вітчизняних і іноземних інвестицій з використанням концесійної схеми. Науково обґрунтована концесійна політика припускає певну форму поведінки владних структур, підпорядковану досягненню встановленої мети і розраховану на певний період часу. Стратегічні цілі концесійної політики реалізуються через програму (план) організації концесій, безпосередньо концесійні проекти, зміст договорів і, звичайно, управління концесіями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз низки програм розвитку об'єктів комунальної сфери [1,2,3] показав наступне. Данні програми в містах є, по суті, довгими переліками інвестиційних пропо-

зицій, джерелами фінансування яких мають бути передбачувані державні, приватні і іноземні інвестиції (за якими найчастіше стоять лише протоколи про наміри). Українським є маркетингове опрацювання даних проєктів: зазвичай вони відображають лише намір існуючих підприємств комунальної сфери збільшити виробничі потужності без чіткої перспективи реалізації своєї продукції (надання послуг), не говорячи вже про опрацювання питання про якісне і повне задоволення потреб міського населення.

Надмірна кількість програм розвитку, що одночасно розробляються для тієї чи іншої галузі житлово-комунальної сфери призвела до явної переваги в них "паперового" елемента над реально-економічним. Часто це призводить до того, що розробники нових програм йдуть від аналізу виконання тих, що вже діють, тому що на практиці це звелось б до констатації їх невиконання з неприємними наслідками.

Під впливом зростаючого недофінансування зміст такого роду програм з кожним роком стає все більш вузьким, "точковим". Але це суперечить самій природі таких соціально-економічних систем як місто. Адже сам сенс їх існування полягає в тому, щоб забезпечувати рівноправну взаємодію і динамічну рівновагу між усіма сферами міського життя [4].

Все вищевикладене дозволяє стверджувати, що в процесі залучення інвестицій на регіональному (міському) рівні залишається невирішеним питання формування адекватного методичного забезпечення процесу прийняття управлінських рішень щодо надання комунальних об'єктів в концесію та оцінки ефективності інвестиційних проєктів, що реалізуються на концесійній основі.

Поза сумнівом, проблема інвестиційної привабливості проєктів, що реалізується на концесійній основі й інвестиційного клімату, особливо на регіональному і місцевому рівні, впливає із загального стратегічного завдання, що стоїть перед суспільством і державою, – досягнення гармонійного поєднання інтересів з поліпшення якості життя громадянина і інтересів підприємницького сектора (бізнесу), що переслідує мету приросту капіталу, прибутку. Дуалізм думок в підході до передбачуваного кінцевого результату або результату, який дасть те або інше інвестиційне вливання в міську інфраструктуру для різних верств населення, зрештою, і зумовлює деяку «стриманість» заходів щодо залучення інвестицій в міську економіку і в цілому неактивну інвестиційну політику на рівні міста [5].

Відсутність системних перетворень проєктів, що реалізуються у житлово-комунальному господарстві як на державному рівні, так і на рівні місцевих органів виконавчої влади та органів місцевого самоврядування, недосконалість нормативно-правової бази й непослідовність у

прийнятті рішень не дозволили досягти бажаного результату для створення фінансово-спроможних та ефективно працюючих у ринкових умовах підприємств житлово-комунального господарства, які б надавали споживачам послуги необхідного рівня та якості.

Як наслідок вищезгаданих негативних чинників – низький рівень експлуатаційної безпеки системи житлово-комунального господарства.

Мета статті: запропонувати систему організаційно-економічних заходів з розвитку міської комунальної інфраструктури на основі впровадження концесійного механізму.

Виклад основного матеріалу. Одним з основних питань у ході реалізації проектів на концесійній основі є забезпечення на регіональному та місцевому рівні демократичної, гнучкої та ефективної організації управління, запровадження механізму оптимального самодостатнього функціонування суб'єктів ЖКГ в системі місцевого самоврядування, здійснення ефективного адміністративного контролю у сфері становлення і розвитку ЖКГ.

Все це зумовило необхідність розробки цілісної системи організаційно економічних заходів з розвитку міської комунальної інфраструктури на основі впровадження концесійного механізму (рисунок 1).

Організаційні заходи. Пропозиції, що надходять від інвесторів, повинні акумулюватися в банку інвестиційних пропозицій, створеному міською радою і її виконавчими органами. Оцінка і відбір інвестиційних проектів для реалізації мають відбуватися з урахуванням різних кількісних і якісних характеристик проектів, при цьому повинні розглядатися соціальні (включаючи екологічні) і бюджетні види ефектів від інвестицій.

Ініціація і розробка проектних пропозицій, процедура їх конкурсного відбору і реалізації повинні ґрунтуватися на стратегії розвитку житлово-комунальної сфери. У цьому випадку інвестиційні проекти будуть зорієнтовані на їх досягнення і, отже, стануть повніше відповідати вимогам ефективності, що висуваються до них. Таким чином, досягається принцип узгодженості цілей міської соціально-економічної політики з інтересами інвесторів, і створюються передумови стійкого інвестиційного забезпечення розвитку комунальної сфери.

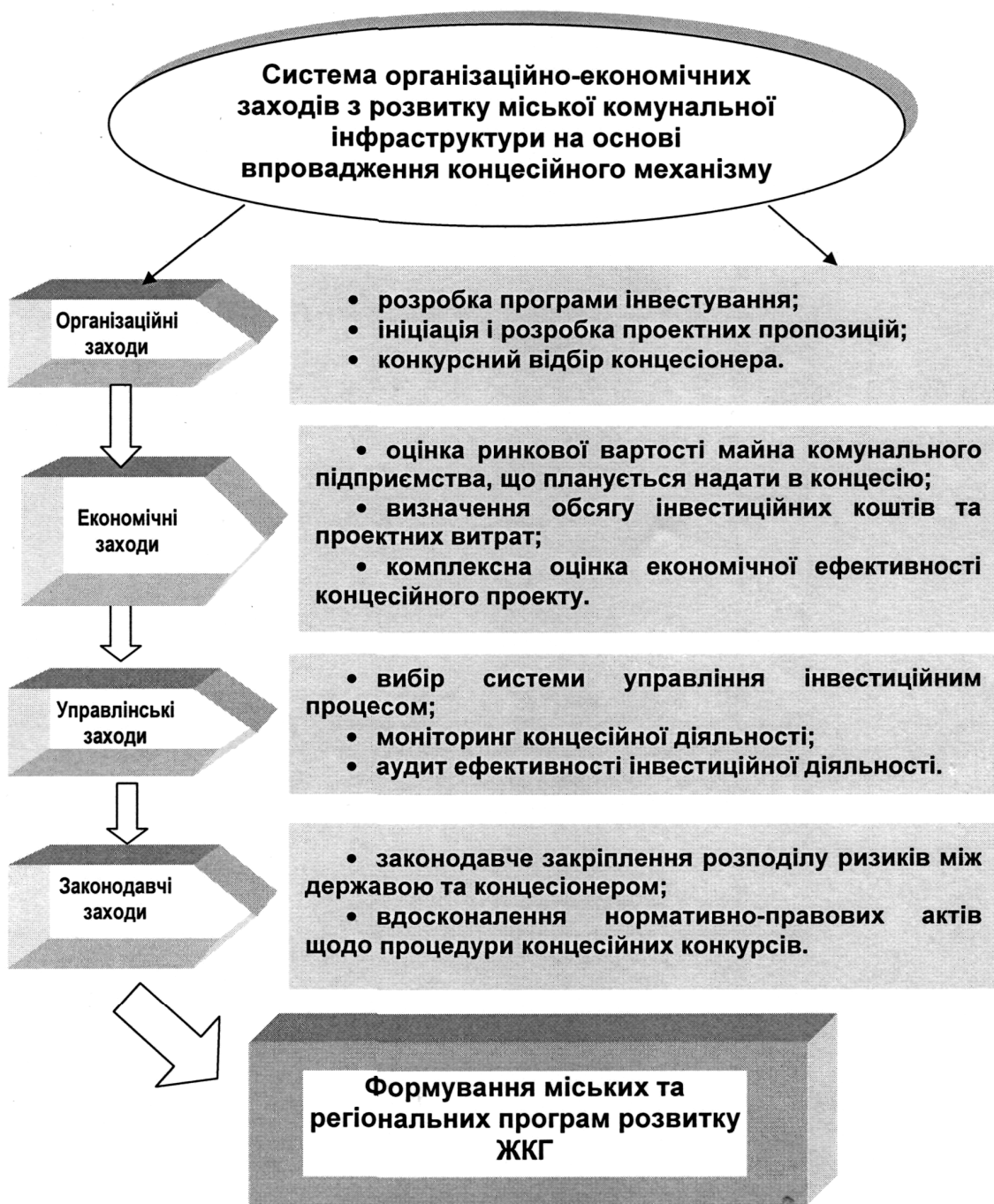


Рисунок 1 – Система організаційно-економічних заходів з розвитку міської комунальної інфраструктури

Найбільш ефективною діяльністю відділу інвестицій у складі міськвиконкомів буде тоді, коли він виконуватиме три основні функції. Перша функція – створення передумов для інвестиційного розвитку міста та робота з потенційними клієнтами: пошук інвесторів, реципієнтів, гарних

задумів та цікавих ідей, що потребують впровадження, моніторинг інвестиційних можливостей міста та інвестиційних потреб міських підприємств. Відділ інвестицій не повинен функціонувати ізольовано, натомість має співпрацювати з іншими відділами для розроблення комплексної інвестиційної програми розвитку міста. Він мусить акумулювати інформацію та проводити аналіз перешкод на шляху залучення інвестицій у міську економіку. Найпершим і найпростішим завданням відділу є розробка єдиної форми заявки, тобто інвестиційної пропозиції, яку мають подавати клієнти до відділу.

Друга функція - безпосередня робота над складанням та просуванням інвестиційних проектів, що реалізуються на концесійній основі. Необхідно надати консультативну та практичну допомогу аплікатам у підготовці заявок та проектів на одержання інвестицій, провести внутрішню діагностику проекту, його експертну оцінку на предмет доцільності впровадження та очікуваної ефективності. Саме експерти відділу інвестицій повинні робити експертний висновок щодо якості бізнес-проекту, а також залучати на контрактній основі зовнішніх експертів.

Третя функція – супровід проектів, що реалізуються на концесійній основі з точки зору захисту інвестицій та досягнення кінцевих результатів.

Пропонований підхід до обґрунтування прийняття інвестиційних рішень здатний значною мірою зменшити рівень суб'єктивності, присутній в існуючих методичних напрацюваннях з відбору інвестиційних проектів, його доцільно застосовувати для попередньої експертизи і відбору інвестиційних проектів розвитку комунальної сфери.

Успіх реалізації концесійного проекту не в останню чергу залежить від того, яким чином буде визначено концесіонера, адже він виконує всі проектні роботи та займається довгостроковою експлуатацією об'єкту. Існує декілька методів надання концесій: 1) конкурсні змагання; 2) прямі переговори; 3) конкурентні переговори, які поєднують в собі елементи двох попередніх способів. Законодавство України [6] декларує, що відбір концесіонера має відбуватися на основі конкурсу. Багато країн, які впроваджували інфраструктурні концесії, використали саме конкурсний метод. Прихильники концесійних конкурсів наводять три головні переваги: гарантується прозорість процедури надання концесії; забезпечується ринковий механізм відбору найкращої пропозиції та зниження вартості будівництва; викликає зацікавлення серед більш широкого кола потенційних інвесторів.

Економічні заходи. З метою визначення ринкової вартості права укладення концесійної угоди необхідно визначити «собівартість» товару, що пропонується – концесійного об'єкту, основних його складових, тому що власник об'єкту – держава чи місцеві органи влади – мають не

тільки можливість отримання доходів від його комерційного використання, але й суттєве обтяження з видатків на його утримання та відновлення. Тому першим кроком необхідно здійснити макроекономічний аналіз структури витрат на створення та відновлення об'єкту концесії, враховуючи інженерну, транспорту, соціальну та інші складові інфраструктури. При цьому важлива не тільки загальна оцінка вартості капіталізованих в об'єкті витрат з різних джерел, але й їхня диференціація за місцезнаходженням та функціональним призначенням, характеристика ефективності його використання та можливість її підвищення. Другим кроком є визначення розміру потенційного прибутку від використання концесійного об'єкту. Визначення вартості об'єктів, що підлягають переданню в концесію, а отже і вартості видатків концесіонера у вигляді концесійних платежів, необхідно проводити з урахуванням значущості проекту для приймаючої сторони: чим важливіший проект для економіки країни чи регіону, чим більший економічний, соціальний, екологічний та інші ефекти від його реалізації, чим більше проект стимулює технічний прогрес та конкурентоспроможність підприємства, тим більше держава повинна бути зацікавлена у впровадженні цього проекту та тим менше повинна бути вартість реалізації проекту для концесіонера. У випадку надання в концесію підприємств, що з тих чи інших причин є нерентабельними, вартість об'єкта концесії повинна бути найменшою. Ця обставина буде додатковим стимулом для концесіонера.

Забезпечення прийняття рішення щодо реалізації міських інвестиційних програм, пов'язаних з розвитком комунальних об'єктів та в цілому житлово-комунальної сфери, зумовлюється вдосконаленням методів комплексної оцінки даних проектів на основі ризик-аналізу, формування адекватної системи цільових показників для оцінки комерційної та економічної ефективності для всіх учасників проекту [7].

Отже, достатньо обґрунтовано можна стверджувати, що проблему оцінки ефективності інвестицій, які призначені для розвитку комунальної сфери, слід розглядати, перш за все, як проблему визначення ступеня досягнення мети або цільових установок, що стоять перед міською територіальною громадою. Для оцінки досягнення цільових установок необхідна така система домінантних критеріїв, яка б повною мірою їм відповідала, тобто для даного підходу властива багатокритеріальність оцінювального апарату.

Управлінські заходи. Моніторинг концесійної діяльності повинен бути спрямований на забезпечення дотримання сторонами концесійного договору всіх його положень. Основним принципом такого моніторингу повинна бути неупередженість, здійснення контролю не повинно бути підпорядковане якомусь одному учаснику концесій. Тому вважається доцільність створення окремого утворення у вигляді

громадської організації. До функцій такої організації можуть належати наступні:

- ведення реєстрів концесійних договорів на регіональному рівні та ознайомлення з ними громадськості;
- загальний контроль за реалізацією концесій та діяльності основних її учасників;
- арбітражні функції;
- аналіз сплати концесіонером відповідних концесійних платежів та моніторинг норми прибутку концесіонера;
- проведення економічних, фінансових, технічних досліджень з питань активізації інвестиційної діяльності на основі концесійного механізму.

Аудит адміністративної діяльності або аудит ефективності розуміється як сукупність статистичних, ревізійних і аналітичних дій, спрямованих на визначення рівня ефективності вкладень в процесі реалізації запланованих цілей, встановлення чинників, що перешкоджають досягненню максимального результату при використанні певного обсягу трудових, матеріальних і фінансових ресурсів, та обґрунтування пропозицій щодо підвищення ефективності використання відповідних ресурсів. До певної міри аудит ефективності можна віднести і до аудиту ефективності надання міських послуг, тобто і до ефективності функціонування житлово-комунальної сфери. Фактично аудиторські перевірки комунальних підприємств, що дозволяють проаналізувати, окрім результатів фінансово-господарської діяльності, також технологію і організацію виробництва та якості надання послуг, повинні передувати процесу ініціації інвестиційних пропозицій, тим самим сприяти виявленню резервів по зниженню їх собівартості, що розглядається як основне джерело окупності інфраструктурних або інших інвестиційних проектів, що реалізуються на концесійній основі.

Законодавчі заходи. Одною з головних проблем концесійного законодавства є відсутність гарантій з боку держави щодо покриття ризиків інвестора в разі недосягнення проектної потужності об'єкту. Окрім цього, терміни окупності концесійних проектів достатньо великі – це ускладнює прогнозування повернення інвестицій.

Законодавець фактично не надає пільг концесійному підприємству. Концесіонер сплачує мито, ПДВ і акцизний збір при ввезенні матеріальних цінностей на загальних підставах. При цьому, незалежно від наслідків господарської діяльності, концесіонер повинен перераховувати до бюджету ще й концесійні платежі.

Всі ці питання треба вирішувати в законодавчому порядку з урахуванням інтересів держави і концесіонера. Потрібно забезпечити гарантії держави щодо участі в проектах, розподіл ризиків між держа-

вою та приватним інвестором, а тимчасове звільнення від оподаткування зробить концесію більш інвестиційно привабливою для вітчизняних та іноземних інвесторів.

Не зважаючи на прийняті закони «Про концесії», «Про концесії на будівництво та експлуатацію автомобільних доріг», «Про особливості передання в концесію об'єктів водопостачання та водовідведення, які перебувають у комунальній власності» та ряд постанов Кабінету Міністрів, які деталізують вимоги законів, можна стверджувати, що законодавство про концесії все ще знаходиться в стані розробки. Вдосконалення концесійного законодавства є важливим для приведення його у відповідність принципам міжнародної практики. Оскільки концесійні проекти є довгостроковими (мінімум 10 років), а необхідні інвестиції значними, це робить інвестора дуже чутливим до умов концесійного договору, так само як і до інституційного середовища в цілому. Для перехідних економік, таких як Україна, ця проблема є дуже важливою та вимагає додаткових зусиль від уряду, щоб забезпечити сприятливі умови договорів, а також виконання цих договорів.

Висновки.

1. В процесі залучення інвестицій на регіональному (міському) рівні залишається невирішеним питання формування адекватного методичного забезпечення процесу прийняття управлінських рішень щодо надання комунальних об'єктів в концесію та оцінки ефективності інвестиційних проектів, що реалізуються на концесійній основі.

2. Проведені дослідження показали, що негнучкість українського законодавства перешкоджає застосуванню ринкових механізмів надання концесії та негативно відбивається на залученні великих іноземних компаній. Визначення концесійних платежів відповідно до українського законодавства не є орієнтованим на прибуток та встановлюється перед визначенням переможця концесійного конкурсу, що суперечить міжнародній практиці. Процедура визначення концесійного платежу має вдосконалюватися – він повинен встановлюватися в результаті концесійного конкурсу.

3. Ефективне впровадження концесійних проектів неможливе без науково обґрунтованої організації відбору концесіонерів. Алгоритм проведення концесійних конкурсів, який враховує світовий досвід подібних заходів, дозволяє здійснити багатоступеневий відсів претендентів та відібрати найбільш досвідченого претендента та найліпшу програму реалізації проекту.

4. Концесійний платіж має відігравати роль інструмента регулювання, оскільки він створює стимули для зниження витрат. На додаток до регулювання концесійних платежів українське законодавство має бути вдосконалим в частині детального регулювання процедури CONCESSION.

сійного конкурсу, включаючи регулювання інвестиційних зобов'язань концесіонера та якості послуг концесії. Необхідною умовою функціонування відповідних нормативних актів щодо концесії є приведення їхніх положень у відповідність до принципів міжнародної практики.

5. Загальною проблемою інвестиційного розвитку в комунальній сфері є зношеність основних фондів комунальних підприємств, неефективне управління та розподіл коштів, гострий брак інвестицій на вдосконалення мереж. Надання в концесію підприємств ЖКГ слід здійснювати лише після вивчення всіх економічних питань: оцінки стану мереж, вартості основних фондів, обсягу необхідних інвестицій.

6. Запропонована система організаційно-економічних заходів зі стимулювання інвестиційної діяльності на основі впровадження концесійного механізму, яка інтегрує організаційні, економічні, управлінські й законодавчі рекомендації буде сприяти удосконаленню міських і регіональних програм розвитку житлово-комунального господарства та підвищенню ефективності прийняття управлінських рішень.

Бібліографічний список

1. Закон України «Про Загальнодержавну програму реформування і розвитку житлово-комунального господарства на 2009-2014 роки» № 1869-IV від 24.06.2004 р.: [Електронний ресурс] / Верховна рада України. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=1869>.

2. Програма розвитку і реформування житлово-комунального господарства м. Харкова на 2003-2010 рр. №1801/03 від 15.04.2003 р.

3. Програма розвитку і реформування житлово-комунального господарства Харківської області на 2003-2010 рр. №1811/03 від 03.05.2003 р.

4. Белянский А.М. Приоритеты и стратегии в модели реформирования жилищно-коммунального сектора /А.М. Белянский // Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник ХНАГХ. – К.: Техніка, 2004. – Вып. 57– С. 28-35.

5. Онищук Г.И. Концессия как механизм инвестирования ресурсосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве регионов Украины /Г.И. Онищук, Н.Н. Потапова // Коммунальное хозяйство городов: Научно-техн. сб. ХНАГХ. – К: Техніка, 2007. – Вып. 77. – С. 3-11.

6. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Положення про проведення концесійного конкурсу та укладення концесійних договорів на об'єкти права державної і комунальної власності, які надаються в концесію» №642 від 12.04.2000 р.: станом на 12.05.2004: [Електронний ресурс] / Кабінет міністрів України. –

Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=642-2000>.

7. Гайко Ю.І. Методика оцінки концесійних проектів будівництва міської комунальної інфраструктури / Ю.І. Гайко, Є.Ю. Гайко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск, 2010. – Вып.32. – С.310-321.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Должиковим П.М.

*к.т.н. Черных О.А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Наведені результати теоретичних досліджень математичної моделі системи підвалини-фундамент-будівля, отримані параметри напружено-деформованого стану елементів системи з урахуванням реальних даних про інженерно-геологічну будову площадки будівництва, міцності і деформаційних характеристиках матеріалів конструкцій, дефектах й пошкодженнях.

Ключові слова: математична модель, напружено - деформований стан, підвалини-фундамент-будівля.

Приведены результаты теоретических исследований математической модели системы основание-фундамент-здание, получены параметры напряженно-деформированного состояния элементов системы с учетом реальных данных о инженерно-геологическом строении площадки строительства, прочностных и деформационных характеристиках материалов конструкций, дефектах и повреждениях.

Ключевые слова: математическая модель, напряженно-деформированное состояние, основание-фундамент-здание.

Проблема: Реконструкция зданий и сооружений, как правило, сопровождается разработкой проекта усиления строительных конструкций. Назначение элементов усиления минимального сечения возможно только на основе анализа напряженно-деформированного состояния элементов строительных конструкций. Получить параметры НДС реконструируемого здания позволяют математические модели, составленные с определенной степенью адекватности реальному зданию или сооружению.

Анализ исследований и публикаций: Современное состояние развития проектных комплексов и компьютерной техники позволяет научно-проектным организациям получать решения достаточно сложных задач по определению параметров работы строительных конструкций зданий и сооружений [1-3].

Наиболее адекватные результаты можно получить при помощи математического моделирования замкнутой системы **ОСНОВАНИЕ-ФУНДАМЕНТ-ЗДАНИЕ** с учетом реальных данных о инженерно-геологическом строении площадки строительства, прочностных и деформационных характеристиках материалов конструкций, дефектах и повреждениях.

Постановка задачи: В результате длительной эксплуатации здания областного Украинского музыкально-драматического театра в г.Луганске (рисунок 1) в строительных конструкциях образовались дефекты и повреждения. В основном это трещины в кирпичных стенах (рисунок 2).

Для разработки экономически выгодного проектного решения по усилению и реконструкции здания театра необходимо было получить:

инженерно-геологические данные о строительной площадке (рисунок 3);

фактические данные о дефектах и повреждениях строительных конструкций (рисунок 4);

параметры напряженно-деформированного состояния системы основание-фундамент-здание на основе анализа работы достаточно адекватной математической модели системы (рисунки 5, 6).



Рисунок 1 - Главный фасад театра

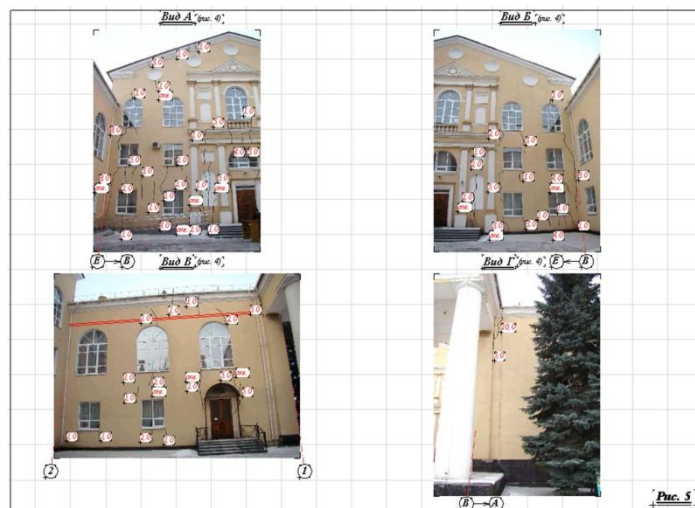


Рисунок 2 - Основные дефекты

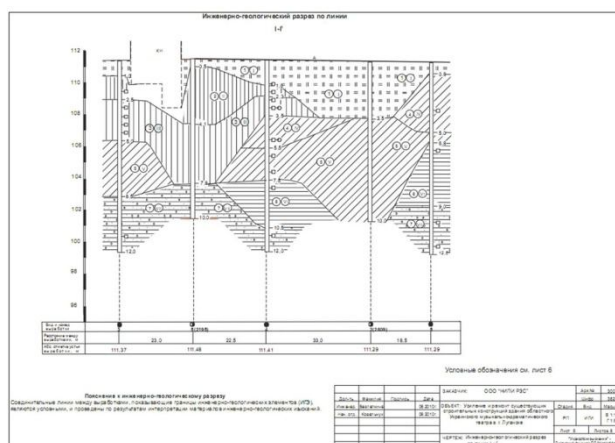


Рисунок 3 - Инженерно-геологический разрез

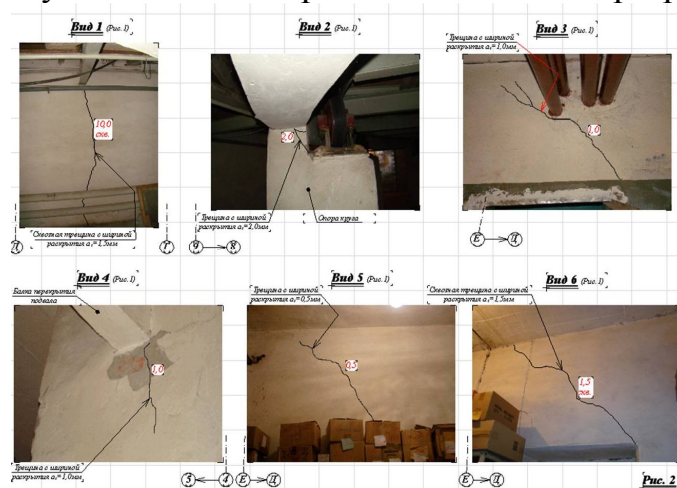


Рисунок 4 - Характерные трещины в кладке стен

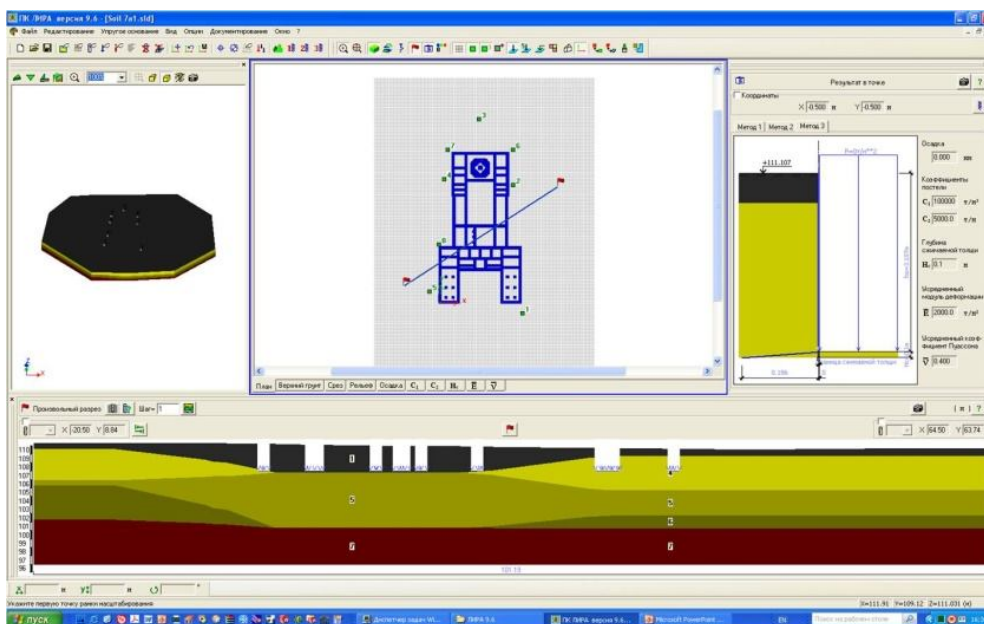


Рисунок 5 - Математическая модель основания

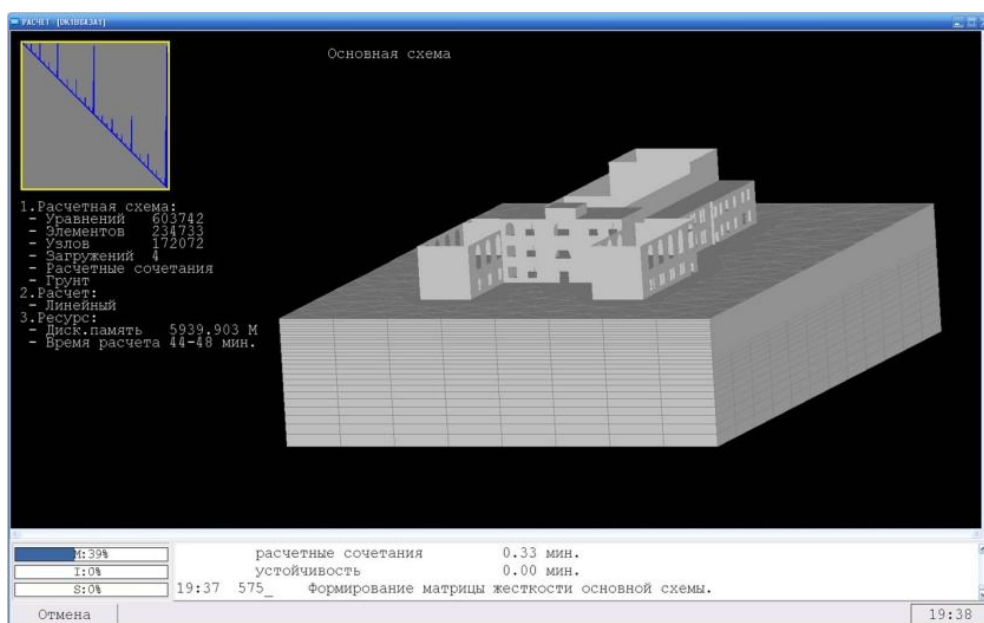


Рисунок 6 - Математическая модель системы
основание-фундамент-здание

Результаты математического моделирования: Получены данные о напряженно-деформированном состоянии системы **основание-фундамент-здание**: схемы деформирования с эпюрами перемещений и поворотов, эпюры напряжений в пластинчатых и объемных конечных элементах, эпюры усилий в стержневых конечных элементах (рисунки 7-9).

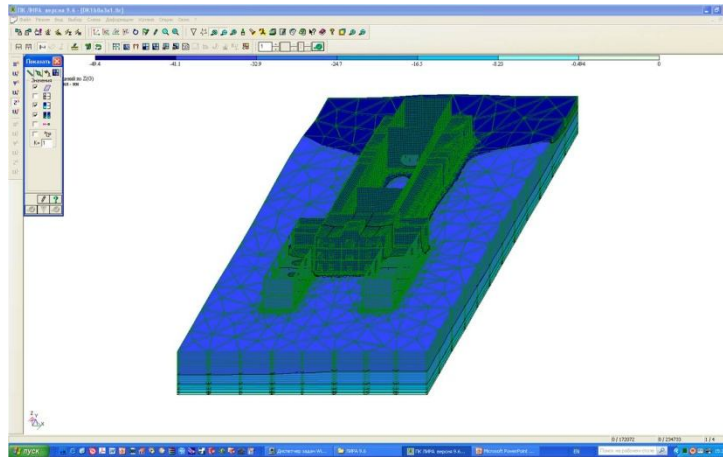


Рисунок 7 - Схема деформирования системы в изометрии. Перемещения вдоль оси Z (вертикальные)

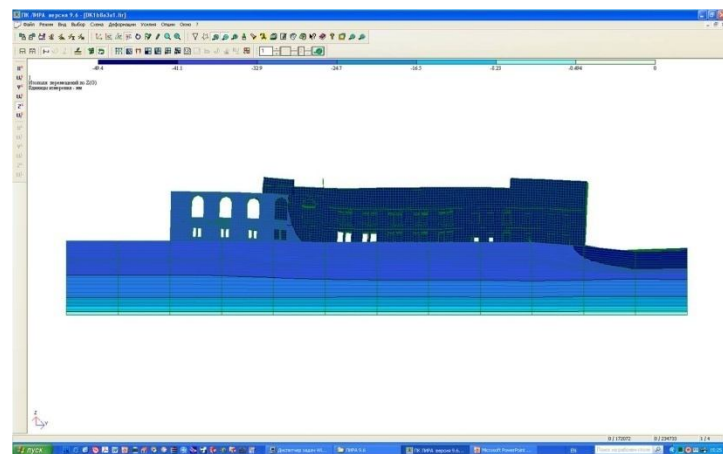


Рисунок 8 - Схема деформирования системы в плоскости YZ. Перемещения вдоль оси Z (вертикальные)

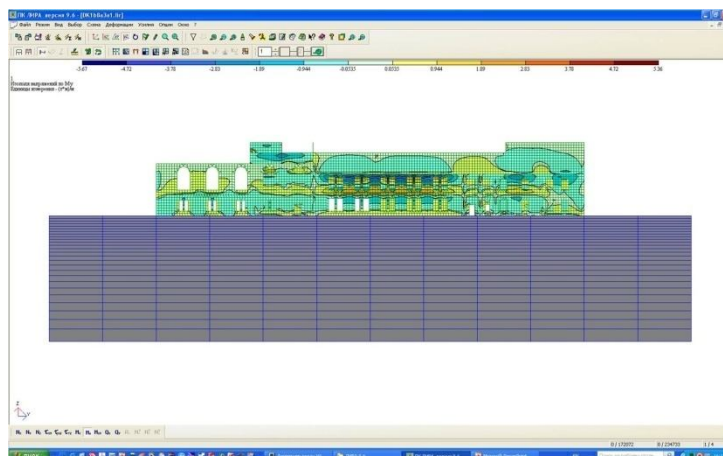


Рисунок 9 - Эпюра моментов M_{xy}

На основании анализа напряженно-деформированного состояния системы разработаны мероприятия по усилению и восстановлению строительных конструкций здания театра. Мероприятия включают решения по усилению каменных стен металлическими полосами и сетками. Сечения элементов усиления и схема их расположения определялись в соответствии с действующими усилиями в строительных конструкциях здания, а также необходимостью восстановления целостности каменных стен (рисунк 10).

Рисунок 10 – Фрагмент проекта усиления здания театра

- применение современных программных комплексов МОНОМАХ и ЛИРА позволили решить проблему по разработке оптимального варианта усиления строительных конструкций здания областного Украинского музыкально-драматического театра в г.Луганске;
- дальнейшее совершенствование компьютерной техники и программных комплексов позволит получать еще более адекватные математические модели систем основание-фундамент-здание, что вызвано необходимостью эксплуатации зданий на стройплощадках со сложными инженерно-геологическими условиями, влиянием порывов инженерных коммуникаций и сейсмических нагрузок. Поэтому необходимо использовать полученные результаты при выполнении студенческих научно-исследовательских работ с целью подготовки современных специалистов, способных решать инженерные задачи повышенной сложности.

Библиографический список

1. Городецкий А.С. Компьютерные модели конструкций / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. - К.: Факт, 2007. - 394 с.
2. Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики / С.Ф. Клованич. - З.: ООО «ИПО» Запорожье», 2009. - 400 с. - (Библиотека журнала «Світ геотехніки», 9-й выпуск.)
3. <http://liraland.com.ua>.
4. <http://www.scadgroup.com>.
5. <http://www.civilfem.com>.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

*к.т.н. Белевцова Н.Л.
(Державний економіко-технологічний
університет транспорту, м. Київ, Україна)*

ТЕРМОПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИЙ СТАН ОБОЛОНОК ОБЕРТАННЯ ПЕРЕМІННОЇ ЖОРСТКОСТІ У КОЛОВОМУ НАПРЯМКУ

Наведені результати розрахунку пружно-пластичного стану оболонок обертання з перемінною жорсткістю у коловому напрямку під дією неосесиметричного навантаження.

Ключові слова: *пружно-пластичний стан оболонок, перемінна жорсткість, неосесиметричні неізотермічні процеси навантаження.*

Приведены результаты расчета упруго-пластичного состояния оболочек вращения с переменной жесткостью в окружном направлении от действия неосесимметричной нагрузки.

Ключевые слова: *упруго-пластичное состояние оболочек, переменная жесткость, неосесимметричные неизотермические процессы нагружения.*

Розглянемо пружно-пластичний напружений стан тонких оболонок обертання з перемінною жорсткістю у коловому напрямку при неосесиметричних неізотермічних процесах навантаження.

Задача розглядається у квазістатичній і геометрично-лінійній постановці на основі теорії простих процесів навантаження без урахування деформацій повзучості [4-6]. На паралельних контурах оболонки допускається довільне закріплення; механічні характеристики матеріалу залежать від температури. Аналогічні задачі, тільки без перемінної жорсткості у коловому напрямку, розв'язувались в роботах [1-4, 7, 8].

Для отримання розв'язувальної системи рівнянь використовуємо статичні, геометричні рівняння із граничними умовами на паралельних контурах [4], а також відношення пластичності у формі закону Гука з перемінними параметрами пружності [5-7], які визначаються із попереднього наближення.

Розв'язувальна система диференціальних рівнянь в частинних похідних, яку отримаємо згідно роботи [2, 5] має вигляд:

$$\frac{\partial \bar{N}}{\partial S} = \Phi \left(\bar{N}, \frac{\partial \bar{N}}{\partial \theta}, \frac{\partial^2 \bar{N}}{\partial \theta^2}, \frac{\partial^3 \bar{N}}{\partial \theta^3}, \frac{\partial^4 \bar{N}}{\partial \theta^4} \right), \quad (1)$$

де \bar{N} - вектор дозволяючої функції, який вибрано аналогічно робіт [2,5].

Використовуючи метод інтегральних відношень [3] дана система диференціальних рівнянь (1) приводиться у кожному наближенні до системи лінійних звичайних диференціальних рівнянь, яка чисельно розв'язується методом Рунге-Кутта із дискретною ортогоналізацією згідно С.К. Годунова [1].

В якості прикладу розглядаємо термопружно-пластичний напружений стан конічної оболонки із перемінною товщиною у коловому напрямку, яка знаходиться під дією неосесиметричного температурного поля, заданого згідно закону:

$$T = 295 + 280 \cos \theta. \quad (2)$$

Геометричні характеристики оболонки (рисунок 1) приймаємо наступними:

$$L = 2R, \beta = \pi/6, R = 10 \text{ см.} \quad (3)$$

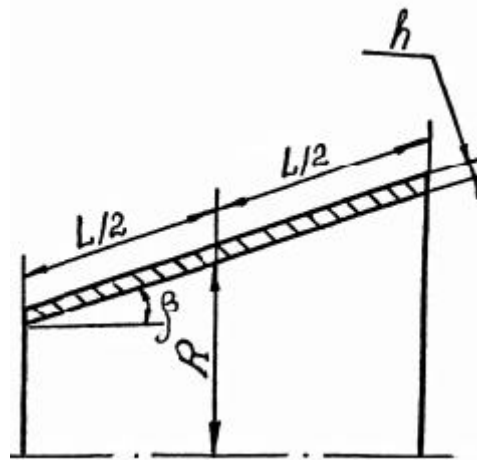


Рисунок 1 – Геометричні характеристики оболонки

Товщина оболонок змінюється вздовж колової координати згідно закону:

$$h = h_0 (\alpha_1 + \alpha \cos \theta), \quad (4)$$

при $h_0 = 0,01R$ і зміні α і α_1 в наступних межах (рисунок 2):

$$\begin{aligned} 1 - \alpha_1 = 1, \alpha = 0; \\ 2 - \alpha_1 = 2, \alpha = 1; \\ 3 - \alpha_1 = 3; \alpha = 2. \end{aligned} \quad (5)$$

Контур оболонки шарнірно закріплено. Матеріал оболонки – сталь ЭІ-395, механічні характеристики якої наведено в роботі [2].

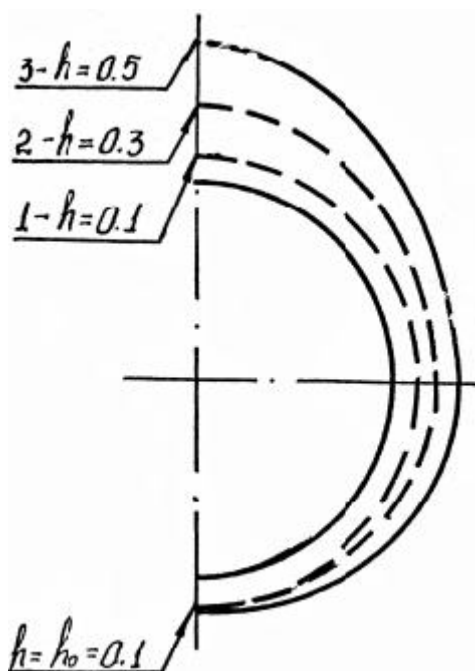


Рисунок 2 – Зміни товщини оболонок вздовж колової координати

Розрахунок оболонки проводився при різних варіантах:

1 – кількість точок по товщині оболонки $K_Z = 3$, по коловій координаті

$K_T = 19$ ($0 \leq \theta \leq \pi$), вздовж меридіану $K_S = 61$;

2 – кількість точок по товщині оболонки $K_Z = 3$, по коловій координаті

$K_T = 37$ ($0 \leq \theta \leq \pi$), вздовж меридіану $K_S = 61$;

3 – кількість точок по товщині оболонки $K_Z = 5$, по коловій координаті

$K_T = 19$ ($0 \leq \theta \leq \pi$), вздовж меридіану $K_S = 61$;

4 – кількість точок по товщині оболонки $K_Z = 3$, по коловій координаті

$K_T = 19$ ($0 \leq \theta \leq \pi$), вздовж меридіану $K_S = 81$;

5 – кількість точок по товщині оболонки $K_Z = 3$, по коловій координаті

$K_T = 19$ ($0 \leq \theta \leq \pi$), вздовж меридіану $K_S = 121$.

Результати обчислення при представленні шуканих функцій чотирма першими гармоніками по косинусам показали, що значення максимальних напружень і деформацій при вищезазначених варіантах відрізняється не більше ніж на 2% відповідно. Врахування двох останніх гармонік призвело до збільшення величин напружень на 10% у порівнянні

із рішенням, де шукані функції було представлено двома першими гармоніками. Тому у подальшому дослідження напружено-деформованого стану оболонки проводився для першого варіанту і рішення представлено чотирма першими гармоніками по косинусам.

Із аналізу результатів розрахунку очевидно, що зона максимальної пластичності з'являється при $S=S_0=0$ і розподіляється приблизно на 1/4 довжини всієї оболонки, а далі оболонка деформується пружно. Максимальні напруження також з'являються на контурі $S=S_0=0$, причому меридіональні і колові напруження – стискаючі, а дотичні – складають приблизно до 30% від максимальних значень меридіональних напружень.

Порівняння результатів пружного і пружно-пластичного рішення показують, що врахування пластичних деформацій зменшує максимальні напруження приблизно на 40%.

На рисунках 3 й 4 наведені значення колових і тангенціальних напружень. Криві 1, 2, 3 на вище згаданих рисунках відповідають різним товщинам в межах, які вказані (5). Данні надаються у зоні максимальної пластичності. Аналіз показує, що із зміною товщини оболонки в межах (5) у порівнянні із постійною товщиною $h=0,1$ см колові напруження на внутрішній поверхні оболонки приблизно вирівнюються і зменшуються при $\theta=0$ на 5% і при $\theta=\pi$ на 20% (рисунок 3, графік а), а на зовнішній поверхні ці напруження збільшуються при $\theta=0$ і при $\theta=\pi$ на 10% (рисунок 3, графік б). Значення меридіональних напружень зменшуються незначно приблизно на 10%, при тому, що дотичні напруження на внутрішній поверхні оболонки при $\theta=\pi/2$ збільшуються приблизно на 40% (рисунок 4).

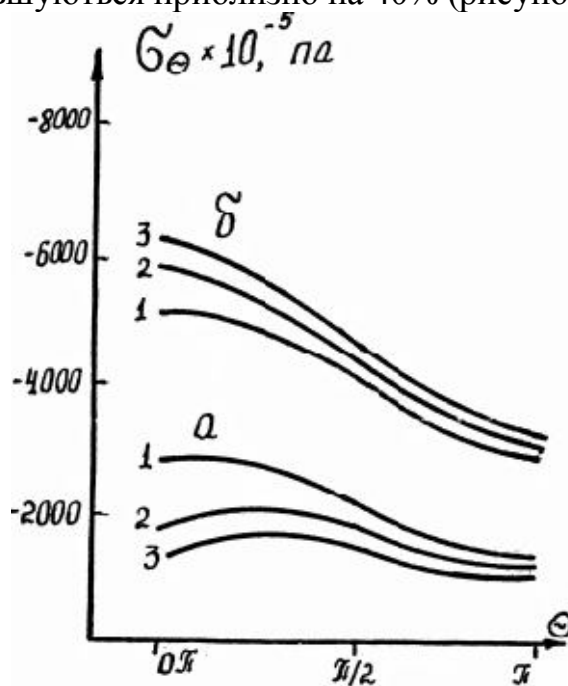


Рисунок 3

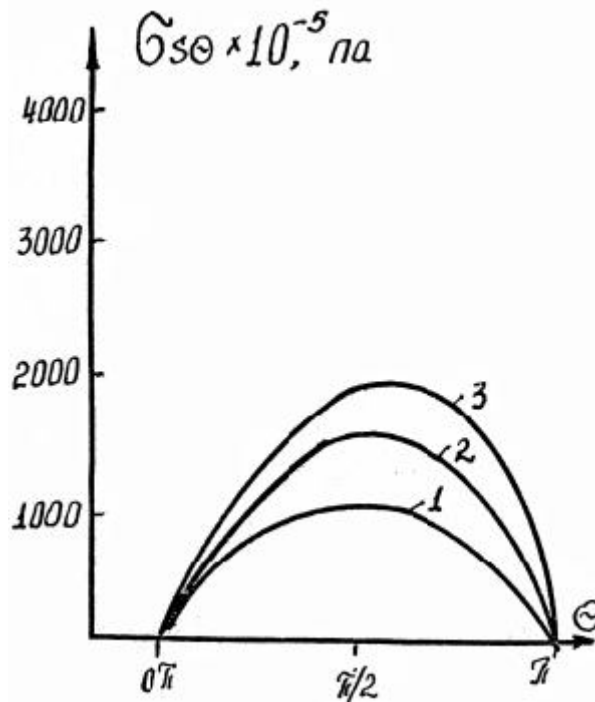


Рисунок 4

Таким чином можна зробити висновок, що зміна товщини в межах (5) призводить до значного зменшення колових напружень на внутрішній поверхні, а для зменшення меридіональних і дотичних напружень при заданому навантаженні (2) необхідно приймати інший закон розподілу товщини вздовж колової координати.

Проведені розрахунки виконувалися при заданій точності 5%.

Бібліографічний список

1. Годунов С. К. О численном решении краевых задач / Годунов С. К. // Успехи математических наук.- 1961.- №3.- вып.16. - С.171 – 174.
2. Григоренко Я. М. Изотропные и анизотропные оболочки вращения переменной жесткости. – Киев: Наук. думка, 1973. – 228с.
3. Канторович Л. В. Приближенные методы высшего анализа/ Л.В. Канторович, В.И. Крылов. - М.: Гостехтеориздат, 1950. – 696с.
4. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек / Новожилов В.В. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 432 с.
5. Белевцова Н.Л. Термоупруго-пластическое напряженное состояние оболочек вращения при неосесимметричной нагрузке с учетом истории нагружения/ Н.Л. Белевцова // Прикладная механика. – К.: 1982.- №7.- Т.18. – С.152 – 158.
6. Белевцова Н.Л. Исследования влияния истории нагружения на напряженное состояние оболочек вращения переменной жесткости

в двух направлениях / Н.Л. Белевцова // Прикладная механика. – К.: 1986. - №4.- Т.22.– С.135 – 138.

7. Шевченко Ю.Н. Пространственные задачи термопластичности / Шевченко Ю.Н. – Киев: Наук. думка, 1980. – 264с.

8. Шевченко Ю.Н. Упругопластическое напряженное состояние незамкнутых оболочек вращения при неизотермических процессах нагружении / Ю.Н. Шевченко // Тепловые напряжения в элементах конструкций.- К.: 1976.- вып.16. - С.67 – 75.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Мочалиным Е.В.

*к.т.н. Долголаптев В.М.,
к.т.н. Симонова И.Н.,
Симонов С.И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЖИЛЫХ ДОМОВ МАССОВЫХ СЕРИЙ ГОРОДА АЛЧЕВСКА

У статті наведено результати експериментальних досліджень житлових будинків типової серії 1-121 в місті Алчевську методом тепловізійної зйомки.

Ключові слова: енергетичний аудит, температурні поля, тепловізор, тепловтрати.

В статье приведены результаты экспериментального исследования жилых домов типовой серии 1-121 в городе Алчевске методом тепловизионной съемки.

Ключевые слова: энергетический аудит, температурные поля, тепловизор, теплопотери.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями. Экономия потребления тепловой энергии, в связи с повышением цен на энергоносители, является приоритетной задачей государственного регулирования, как в большинстве стран мира, так и в Украине. Основная доля использования тепловой энергии приходится на жилищно-коммунальный сектор, так на отопление зданий расходуется более 40% всех топливно-энергетических ресурсов страны. При этом доля энергопотребления на жилищно-коммунальный сектор превышает соответствующие показатели европейских стран более чем в два раза. Одним из путей решения экономии тепловой энергии в ЖКХ является эффективный энергоаудит. Энергетический аудит здания определяется как последовательность действий, направленных на определение энергетической эффективности здания и оценку мероприятий по повышению энергетической эффективности и энергосбережения. Необходимость проведения энергоаудита зданий заложена в современных нормах проектирования, которые требуют осуществлять контроль качества теплоизоляции каждого здания при приемке его в эксплуатацию методом термографического обследования.

Такой контроль поможет выявить скрытые дефекты и возможность их устранения до ухода строителей со строительного объекта. Но это все предусмотрено для вновь строящихся зданий, а для существующих зданий необходимо проводить мониторинг теплового состояния ограждающих конструкций зданий с определением фактических теплотехнических характеристик строительных конструкций в условиях их эксплуатации. Для этих целей существует эффективный метод контроля и определения пространственного распределения тепловых потоков (температур) по поверхности ограждающих конструкций зданий, основанный на применении прибора под названием "тепловизор". Он способен регистрировать на одном кадре более 65 000 значений температур, усредненных на площади в несколько квадратных сантиметров [1].

Анализ последних достижений и публикаций.

Метод тепловизионного контроля используется во всем мире и поэтому накоплен значительный опыт проведения этих исследований.

Очень интересен опыт проведения тепловизионного обследования зданий в России. Так, технологическим институтом "ВЕМО" г. Москва разработана и внедрена в практику система комплексного теплового (тепловизионного) обследования зданий и строительных сооружений в реальных условиях их эксплуатации (в летний и зимний периоды) с определением их количественных характеристик [1, 2, 3]. Методика позволяет произвести тепловой контроль строительных конструкций в натурных условиях их эксплуатации (с определением приведенного сопротивления теплопередаче по стенам и окнам). Кроме того, в случае необходимости, возможно: определение точки росы и координаты плоскости промерзания в ограждающих конструкциях; определение остаточного теплового ресурса здания при аварийном отключении теплоснабжения; выдача рекомендаций по необходимым мероприятиям для устранения сверхнормативных теплопотерь на участках их обнаружения.

За рубежом, за два десятилетия интенсивного развития сформировалась система стандартов и методик по применению тепловидения в строительстве. В Украине, к сожалению, нет значительных успехов в области инфракрасной термографии строительства, а проведенные тепловизионные обследования – пока лишь редкие исключения, не охватывающие всех городов.

Авторами [4] детально описаны экспериментальные исследования жилых домов типовой серии 1-480А – одной из наиболее распространенных в г. Алчевске.

Постановка задач. Главная цель испытаний заключается в обследовании жилых зданий с различными конструктивными схемами типичными для г. Алчевска на предмет определения потерь тепла наруж-

ными ограждениями, накоплении опыта обследования, создании базы результатов испытаний и разработки рекомендаций по фактическому сбережению тепловой энергии.

Диагностика (обследование) зданий заключается в осмотре объектов в инфракрасном диапазоне спектра («тепловая картинка»), измерении температуры в любой их точке, наблюдении динамики тепловых процессов, а также создании банка данных теплового состояния по каждому из наблюдаемых объектов.

Представление основного материала исследований с полным обоснованием полученных результатов.

Авторами на протяжении нескольких лет были проведены экспериментальные исследования теплотехнических характеристик существующего жилого фонда г. Алчевска методом тепловизионной съемки.

Объектом испытаний были элементы наружных стен (стыки, оконные откосы и др.), а также внутренние конструкции зданий. Попутно проверялось и качество отопительных приборов системы отопления.

Натурные обследования проводились при отрицательных температурах наружного воздуха, при отсутствии солнечного облучения, атмосферных осадков, тумана и других подобных явлений.

Термографирование проводилось последовательно по намеченным участкам с покадровой записью термограмм в компьютер и одновременным измерением и фиксацией температур реперных участков.

Термографирование наружной поверхности стен проводилось общим панорамным снимком, охватывающим всю стену или часть стены с вертикальными и горизонтальными стыками.

Данные по проекту с его техническими и строительными характеристиками отражались в протоколе проведения инструментального и тепловизионного обследования.

Тепловизионная регистрация температурных полей поверхности ограждающих конструкций производилась с учетом излучательной способности обследуемой поверхности.

Одновременно со съемкой тепловизором наружной поверхности ограждающих конструкций здания проводились дополнительные измерения и регистрация метеоусловий снаружи здания: температуры воздуха, направления и скорости ветра, а изнутри – температуры, подвижности и влажности воздуха.

В рамках одной статьи невозможно привести результаты исследований всех жилых домов города. Однако некоторые наиболее характерные мы приводим. Наиболее детально, с исследованием как наружных, так и внутренних стен, проводились экспериментальные исследования крупнопанельных жилых зданий типовой серии 1-121. При этом коэффициенты теплопередачи наружной и внутренних поверхностей ограж-

дающих конструкций определялись в реальных условиях. Первый исследуемый дом, приведенный на рисунке 1, располагался по адресу ул. Волгоградская № 149.



Рисунок 1 – Общая панорама исследуемого жилого дома

В банке данных экспериментального исследования этого дома накоплено около сотни кадров тепловизионной съёмки, выполненных на протяжении трех лет, часть из которых приведена на рисунках 2 – 4.

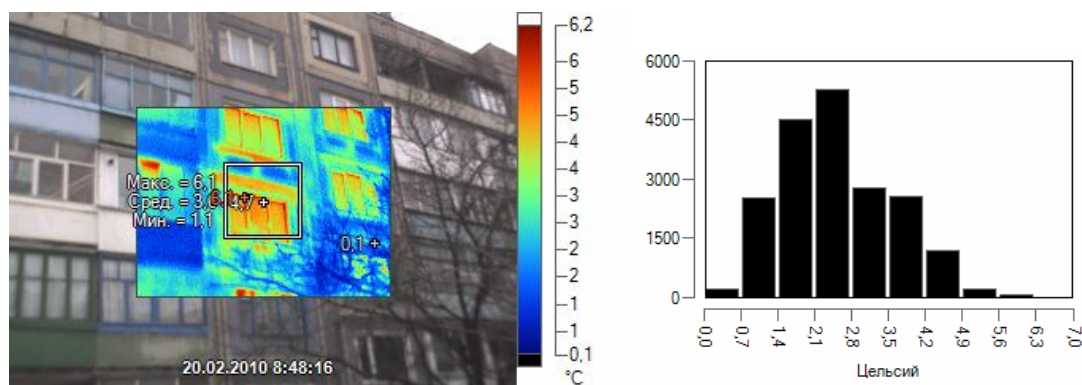


Рисунок 2 – Распределение температурного поля по поверхности стен, охватывающих несколько квартир

Проблема теплопотерь многих жилых домов в городе Алчевске – это неотапливаемые подъезды. Через внутренние стены, которые соприкасаются с неотапливаемым подъездом, происходит интенсивный теплообмен, приводящий к значительным теплопотерям.

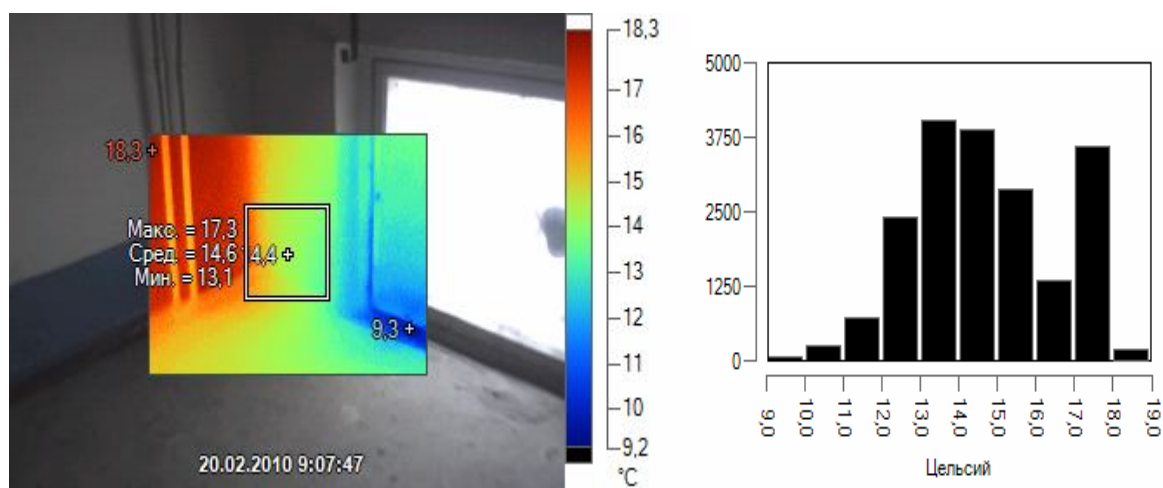


Рисунок 3 – Распределение температурного поля по поверхности внутренней стены, выходящей на лестничную клетку

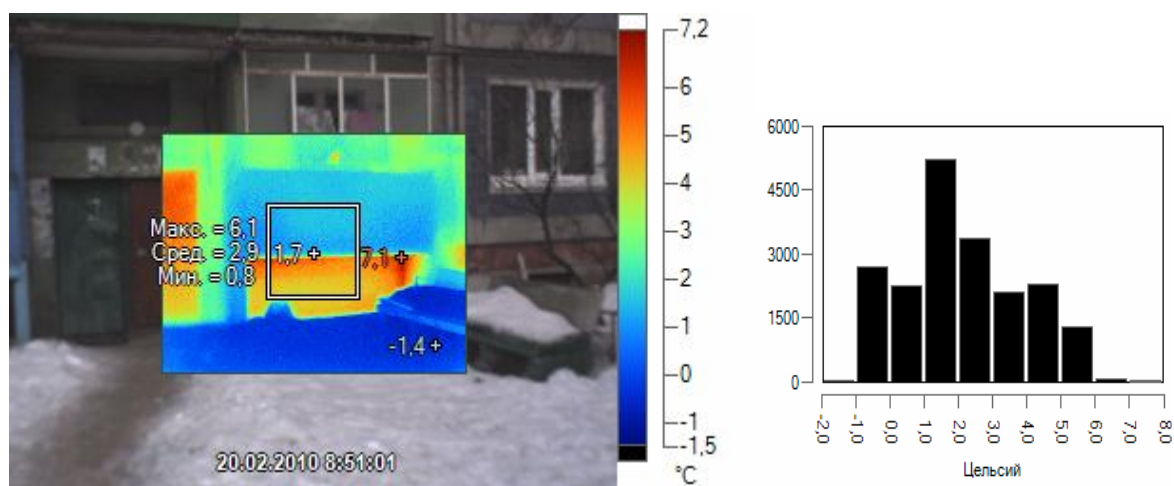


Рисунок 4 – Распределение температурного поля через панели входа в здание и цокольной панели с гистограммой

В исследуемой квартире имеется индивидуальное отопление, поэтому температура внутреннего воздуха была довольно высокой. На основании рассмотренных кадров составлялась таблица определения коэффициентов теплоотдачи наружной поверхности и сопротивлений теплопередачи, таблица 1.

Таблица 1 – Определение коэффициентов теплоотдачи наружной поверхности и сопротивлений теплопередачи

Наружная поверхность стены										
$R_{o.n.}$	α_n	α_k	α_d	ν	C_0	C_1	C_2	t_n	τ_n	t_e
1,14	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	0,5	27
1,07	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	0,6	27
1,00	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	0,7	27
0,95	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	0,8	27
0,90	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	0,9	27
0,85	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	1	27
0,81	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	1,1	27
0,78	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	1,2	27
0,74	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	1,3	27
0,71	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	1,4	27
0,68	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	1,5	27
0,66	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	1,6	27
0,63	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	1,7	27
0,61	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	1,8	27
0,59	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	1,9	27
0,57	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	2	27
0,55	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	2,1	27
0,53	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	2,2	27
0,52	16,42	15,67	0,75	4	5,67	0,92	5,67	-1	2,3	27

Аналогичным образом проводились исследования 9-ти этажных жилых домов 121 серии, расположенных по ул. Гмыри, рисунки 5-7.



Рисунок 5 – Общий вид жилого дома серии 1-121 по улице Гмыри

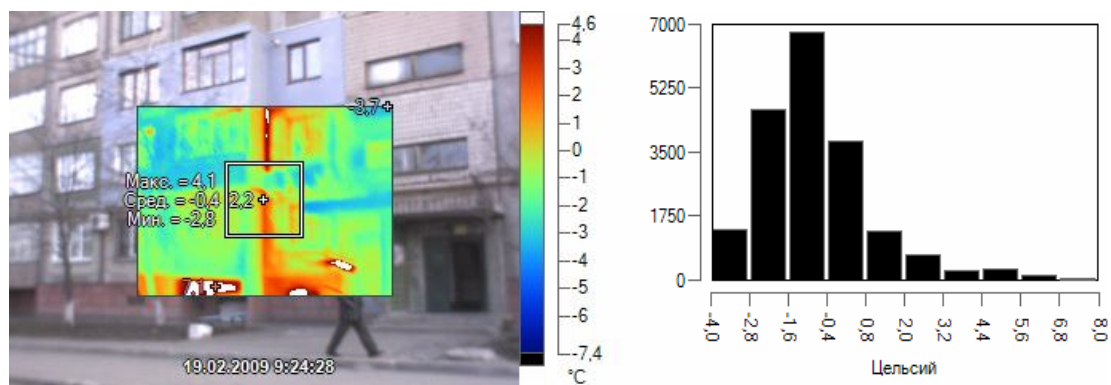


Рисунок 6 – Распределение температуры по поверхностям стеновых панелей первого и второго этажей с гистограммой

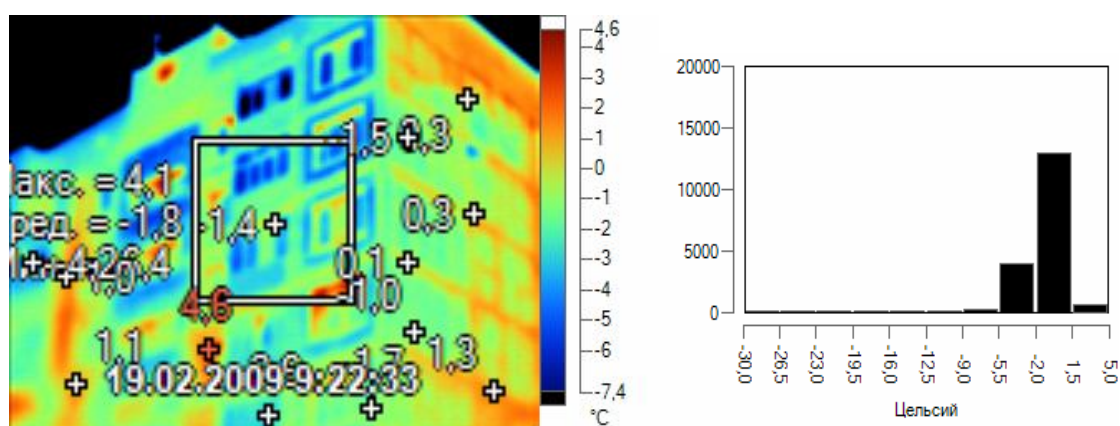


Рисунок 7 – Распределение температурного поля, которое охватывает угол здания с гистограммой

Определение коэффициентов теплоотдачи и сопротивлений теплопередачи наружной поверхности стеновых панелей сводим в таблицу 2.

Таблица 2 – Определение коэффициентов теплоотдачи и сопротивлений теплопередачи наружной поверхности

Наружная поверхность стены										
$R_{o.n.}$	α_n	α_k	α_l	ν	C_0	C_1	C_2	t_n	τ_n	t_{θ}
1,58	13,70	12,98	0,72	3	5,67	0,92	5,67	-4	-2,8	22
1,46	13,70	12,98	0,72	3	5,67	0,92	5,67	-4	-2,7	22
1,36	13,71	12,98	0,72	3	5,67	0,92	5,67	-4	-2,6	22
1,26	13,71	12,98	0,72	3	5,67	0,92	5,67	-4	-2,5	22
1,19	13,71	12,98	0,72	3	5,67	0,92	5,67	-4	-2,4	22
1,12	13,71	12,98	0,72	3	5,67	0,92	5,67	-4	-2,3	22
1,05	13,71	12,98	0,72	3	5,67	0,92	5,67	-4	-2,2	22

Продолжение таблицы 2

Наружная поверхность стены										
$R_{o.n.}$	α_n	α_k	α_l	ν	C_0	C_1	C_2	t_n	τ_n	t_g
1,00	13,71	12,98	0,72	3	5,67	0,92	5,67	-4	-2,1	22
0,95	13,71	12,98	0,72	3	5,67	0,92	5,67	-4	-2	22
0,90	13,71	12,98	0,72	3	5,67	0,92	5,67	-4	-1,9	22
0,86	13,71	12,98	0,73	3	5,67	0,92	5,67	-4	-1,8	22
0,82	13,71	12,98	0,73	3	5,67	0,92	5,67	-4	-1,7	22
0,79	13,71	12,98	0,73	3	5,67	0,92	5,67	-4	-1,6	22
0,76	13,71	12,98	0,73	3	5,67	0,92	5,67	-4	-1,5	22
0,73	13,71	12,98	0,73	3	5,67	0,92	5,67	-4	-1,4	22
0,70	13,71	12,98	0,73	3	5,67	0,92	5,67	-4	-1,3	22
0,68	13,71	12,98	0,73	3	5,67	0,92	5,67	-4	-1,2	22
0,65	13,71	12,98	0,73	3	5,67	0,92	5,67	-4	-1,1	22
0,63	13,71	12,98	0,73	3	5,67	0,92	5,67	-4	-1	22
0,61	13,71	12,98	0,73	3	5,67	0,92	5,67	-4	-0,9	22

Выводы и перспективы дальнейшего развития. Проведенные тепловизионные экспериментальные исследования позволяют быстро, массово и оперативно, в режиме реального времени, не разрушая конструкцию стены, определить фактические сопротивления теплопередачи конструкции, выявлять ее дефекты, а также некачественную теплоизоляцию стен.

Температура поверхностей строительных конструкций зависит от теплофизических свойств их материалов, наличия теплопроводных включений, как конструктивно обусловленных, так и случайных, которые являются технологическими или конструктивными дефектами. Если пользоваться традиционными методами, то для определения теплофизического состояния ограждающих конструкций здания необходимо установить несколько сотен или тысяч термодатчиков. Конечно, большая трудоемкость и высокая стоимость такой работы затрудняет осуществление необходимого контроля теплофизических свойств во время приема зданий в эксплуатацию и, особенно, перед капитальным ремонтом или реконструкцией. Тепловизор позволяет не только одновременно зарегистрировать более 65000 значений температур, усредненных на исследуемой площади ограждающей конструкции (гистограммы к каждому кадру), но и получить тепловой "портрет" здания. Также имеется возможность проанализировать изображение на компьютере и принять экспертный вывод по способу теплоизоляции здания, а после выполне-

ния работ по утеплению – снова снять тепловой "портрет" ограждающей конструкции и проверить качество выполненных работ. После компьютерной обработки изображения и распечатки на цветном принтере тепловые "портреты" могут быть официальными документами состояния конструкции здания.

В результате проведенных натурных экспериментальных исследований создан банк данных теплового состояния жилых зданий первых массовых серий в реальных условиях эксплуатации, для которых экспериментально определены коэффициенты теплоотдачи наружной поверхности и сопротивления теплопередачи ограждающих конструкций. Дальнейшие исследования будут направлены на создание практических рекомендаций по определению теплопотерь обследованных жилых домов города Алчевска.

Библиографический список

1. Бударин О.Н. Тепловой неразрушающий контроль изделий / О.Н. Бударин, А.И. Потапов, В.И. Колганов и др. – М.: Наука, 2002. – 476 с.

2. Васильев Г.П. Результаты натурных исследований теплового режима экспериментального энергоэффективного дома / Г.П. Васильев // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2002. – №6. – С. 3 – 5.

3. Энергетические обследования – способ реального энергосбережения и получения дополнительной прибыли: методическое пособие (нормативные документы, информационно-справочные материалы) / под. ред. Т.Е. Троицкого-Маркова, О.Н. Бударина, В.И. Сучкова, В.Ю. Скоборева. – М.: изд. СК, 2002. – 209 с.

4. Питання енергозбереження при реконструкції житлових будинків: Монографія / Долголаптьєв В.М., Симонова І.М., Симонов С.І., Ніколаєва О.К./ Донбаський державний технічний університет. – Луганськ, СПД Резніков В.С., 2010. – 322 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

*Голубничий А.В.
(КНУБА, м. Київ, Україна)*

ЖАРОСТІЙКІ БЕТОНИ НА ЦЕМЕНТАХ ІЗ ЗАЛІЗОВМІСНИМИ ШЛАКАМИ

Наведено результати досліджень жаростійких бетонів на цементах із залізовмісними кольоровими шлаками. Встановлено, що з застосуванням портландцементних клінкерів, техногенних речовин і шамотного заповнювача можна отримати жаростійкі бетони з класом ІІ8.

Ключові слова: жаростійкі бетони, кольорові шлаки, цемент.

Приведены результаты исследований жаростойких бетонов на цементах с железосодержащими цветными шлаками. Установлено, что с использованием портландцементных клинкеров, техногенных веществ и, шамотного заполнителя можно получить жаростойкие бетоны с классом ІІ8.

Ключевые слова: жаростойкие бетоны, цветные шлаки, цементы.

Аналіз досліджень і публікацій. Проблема застосування залізовмісних речовин (кольорових, паливних, ваграночних та інших шлаків) в наш час відноситься до актуальних з наукової, технічної і екологічної точок зору. Поряд з тим, що вони являють собою цінну сировину, їх розміщення і зберігання призводить до значних фінансових витрат і забруднення оточуючого середовища. В Україні та інших державах СНД проведені значні наукові роботи по вирішенню питання їхнього комплексного використання [1, 2, 3]. Внаслідок їх виконання розроблено технології виробництва мінеральної вати, литих виробів і деяких інших матеріалів. Що дозволяє корисно застосовувати залізовмісні речовини. Але у зв'язку з тим, що запаси таких шлаків перебільшують 200 млн. т і вони щорічно збільшуються приблизно на 10 млн. т проблему не можна вважати вирішеною. Її розв'язанню повинно сприяти широке впровадження таких речовин у технологіях виготовлення цементу і бетонів різного функціонального призначення, що стримується багатьма чинниками, у тому числі недостатнім вивченням систем „ $\text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ ”, „ $\text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$ ”.

Дослідженнями у галузі жаростійких композиційних матеріалів із застосуванням портландцементу, глиноземистого цементу, рідкого скла [4, 5, 6] встановлено, що їхні властивості можна суттєво покращити при

введені тонкомелених силікатних і алюмосилікатних добавок – шамоту, кварцу тощо. Добавки, що вміщують FeO, у жаростійких матеріалах до теперішнього часу не використовуються, а їхній вплив на ці властивості не вивчено. Тому проблема досліджень жаростійких властивостей в'язучих, які належать до систем: „FeO – CaO – SiO₂”, „портландцементний клінкер – залізовмісний шлак” при нагріві з метою застосування залізовмісних шлаків у якості компонентів жаростійких цементів і композиційних матеріалів на їхній основі є актуальною.

Постановка завдання. Головним завданням цієї роботи є дослідження впливу і виду кольорових шлаків на фізико-механічні і жаростійкі властивості цементів і бетонів з їх застосуванням.

Мета роботи – дослідити властивості жаростійких бетонів на цементах з портландцементним клінкером і кольоровими шлаками.

Методики проведення досліджень – дослідження виконані з використанням стандартних методик. Хімічний склад застосованих при проведенні досліджень кольорових шлаків наведено у таблиці 1, а мінеральний склад клінкерів – в таблиці 2.

Таблиця 1 - Хімічний склад кольорових шлаків

№ п/п	Найменування	Вміст основних оксидів , мас. %					
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
1	Побужський	51.95	6.65	11.60	-	22.85	6.55
2	Режський	44.85	8.25	18.20	-	19.45	7.65
3	Уфалійський	43.15	7.90	21.95	-	17.25	8.00
4	Северонікелю	41.05	7.65	25.60	0.90	15.35	7.95
5	Костянтинівський	29.95	8.25	31.80	1.65	13.85	8.10
6	Чимкентський	28.40	8.05	33.85	2.75	12.35	7.90

Таблиця 2 - Мінеральний склад клінкерів

№ п/п	Найменування клінкеру	Мінеральний склад, мас. %			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1	Амвросіївський	57.00	25.00	4.40	11.06
2	Кам'янець-Подільський	58.00	17.00	8.20	13.00

Закономірності змін властивостей жаростійких цементів з портландцементним клінкером і кольоровими шлаками визначено при змінах у них вмісту кольорових шлаків у межах 0...50 мас.%, питомої поверхні цементів – 250...400 м²/кг.

При першому нагріві цементних каменів і композиційних матеріалів з шамотним заповнювачем на цементах з портландцементним клінкером і кольоровими шлаками в інтервалі температур 373...1173 К, у них спостерігаються деформації зсідання (табл. 1). Останнє було обумовлено вилученням із цих матеріалів у діапазоні температур 373...473 К адсорбційно і капілярно зв'язаної води; 473...1173К – хімічно зв'язаної води; 973...1173К – продуктів дисоціації карбонату і сульфату кальцію.

При першому нагріві цих матеріалів в інтервалі температур 373...1173 К їхнє зсідання зростало при підвищенні у кольорових шлаках концентрації SiO₂ за рахунок поменшення FeO. Особливо виразно це спостерігалось при збільшенні у цих залізовмісних речовинах концентрації SiO₂ вище за 35 мас. % і зменшенні FeO нижче за 30 мас.%, що при перерахунку складів кольорових шлаків на систему „FeO – CaO – SiO₂ ” відповідно дорівнює 40 і 35 мас. %. За впливом на підвищення зсідання цементних каменів і композиційних матеріалів при їхньому першому нагріві оксиди кольорових шлаків розташовуються у ряду CaO > SiO₂ > FeO. Аналогічне має місце при наближенні складів скла цих залізовмісних речовин до кристалічних фаз у ряду: CS > S > CFS₂ > CF'S > F'S > F'₂S.

Зсідання цементних каменів і композиційних матеріалів при їхньому першому нагріві зменшується при зворотній зміні у цементах вмісту кольорових шлаків. Показник підвищується при збільшенні питомої поверхні цементів, їхнього вмісту у композиційних матеріалах. Вищевикладене наведено в таблиці 3.

Деформації лінійного зсідання цементних каменів і композиційних матеріалів з шамотним заповнювачем на цементах з портландцементним клінкером і застосованими кольоровими шлаками, які введено у цементу у кількості більш як 20 мас. %, при першому нагріві до 1073К не перевищують відповідно 0.9 і 0.7% (таблиця 3).

Таблиця 3 - Залежність лінійного зсідання цементних каменів і композиційних матеріалів від температури їх нагріву

№ п/п	Вид цементів і шлаків (табл.1)	Склад композиційних матеріалів, кг/м ³			Лінійне зсідання, %x10 це- ментних каменів/ композиційних матеріалів після нагріву до температу- ри, К			
		цемент	шамот	вода	773	873	973	1073
1	1.3.1	410	1400	250	4.2	5.2	6.2	8.0
					2.3	3.0	4.2	5.2
2	1.3.5	410	1400	250	4.0	5.0	6.0	7.7
					2.2	2.9	3.9	5.0
3	1.4.5	410	1400	250	4.2	5.3	6.4	8.2
					2.3	3.1	4.1	5.4
4	2.3.5	410	1400	250	4.6	5.8	7.0	9.0
					2.7	3.7	4.7	6.6
5	1.3.1	500	1300	270	4.5	5.5	6.6	8.8
					2.6	3.6	4.6	6.4

Примітки.

1. Склад цементів: мас.%; клінкер Амвросіївського цементного комбінату – 58 (1,2,3,5), 76 (4); кольоровий шлак – 38 (1,2,3,5), 20(4). Концентрація оксидів заліза у шлаках, мас.%; FeO-11.60(1,5), FeO-31.80 і Fe₂O₃-1.65.(2,3,4).

2. Питома поверхня цементів, м²/кг: 300 (1,2,4,5), 400 (3). В/Ц=0.26.

3. Застосовано шамот з густиною 2350...2400 кг/м³ двох фракцій: з розміром часток менше за 5 мм – вміст у композиційних матеріалах № 1, 2, 3, 4 – 650 кг/м³ і № 5 – 600 кг/м³ ; з розміром часток 5...10 мм – вміст у композиційних матеріалах № 1,2,3,4-750 кг/м³ і №5-700 кг/м³.

При встановленні закономірностей зміни міцності цементних каменів і композиційних матеріалів на шамотному заповнювачу і цементах з портландцементним клінкером і кольоровими шлаками на етапах утворення їхньої первинної структури і першого нагріву виявлено, що вони носять складний і неоднозначний характер. Так, при попередньому твердінні і першому нагріві цих матеріалів до температур 573...593 К їхня міцність підвищується при подібних змінах у цементах вмісту портландцементного клінкеру, їхньої питомої поверхні, концентрації у залізовмісних речовинах CaO і SiO₂. Це особливо відчутно спостерігається при зростанні концентрації SiO₂ вище за 35 мас. % і зменшенні FeO нижче за 30 мас.%, що при перерахунку складів кольорових шлаків на систему „FeO – CaO – SiO₂” відповідно дорівнює 40 і 35 мас. % при визначених складах композиційних матеріалів і цементів, питомої поверхні останніх, температурах першого нагріву цементних каменів і композиційних матеріалів у діапазоні 393...593 К (таблиця 4).

Таблиця 4 - Залежність міцності бетонів від температури їх нагріву

№ п/п	Вид цементів і шлаків (табл.1)	Міцність бетонів при стиску, МПа після їх						
		нагріву до температури, К/залишкова міцність, %						
		473	573	673	773	873	973	1073
1	1.3.1	<u>23.3</u> 109	<u>23.8</u> 111	<u>23.1</u> 108	<u>20.8</u> 97	<u>16.4</u> 77	<u>12.0</u> 56	<u>7.4</u> 35
2	1.3.4	<u>21.8</u> 107	<u>22.4</u> 110	<u>22.0</u> 108	<u>19.8</u> 97	<u>15.7</u> 77	<u>11.4</u> 56	<u>7.5</u> 36
3	1.3.7	<u>28.9</u> 110	<u>29.5</u> 112	<u>28.4</u> 108	<u>20.8</u> 97	<u>20.3</u> 77	<u>14.7</u> 56	<u>8.9</u> 34
4	1.4.5	<u>25.5</u> 109	<u>26.0</u> 111	<u>25.5</u> 109	<u>22.9</u> 98	<u>19.0</u> 81	<u>14.3</u> 61	<u>9.6</u> 41
5	2.3.5	<u>29.7</u> 110	<u>30.2</u> 112	<u>29.2</u> 108	<u>25.9</u> 96	<u>20.0</u> 74	<u>13.8</u> 51	<u>7.6</u> 28

Примітки:

1. Витрати матеріалів, кг/м³: цемент – 410, шамот – 1400, вода – 250.
2. Застосовано шамот з густиною 2350...2400 кг/м³ двох фракцій: з розміром часток менше за 5 мм – вміст у композиційних матеріалах 650 кг/м³; з розміром часток 5...10 мм – вміст у композиційних матеріалах 750 кг/м³.
3. Склад цементів: мас.‰: клінкер Амвросіївського цементного комбінату – 58 (1, 2, 3, 4), 76 (5); кольоровий шлак – 38 (1, 2, 4), 20(5); доменний шлак „МК ім. Ілліча” – 38 (3). Концентрація оксидів заліза у шлаках, мас.‰: FeO – 11.60 (1), FeO – 25.60 і Fe₂O₃– 0.90 (2), FeO – 33.85 і Fe₂O₃– 2.75 (4, 5).
4. Питома поверхня цементів, м²/кг: 300 (1, 2, 4, 5), 400 (3).

За впливом на підвищення міцності цементних каменів і композиційних матеріалів при їхньому попередньому твердінні, а також першому нагріві до температур 573...593 К, оксиди кольорових шлаків розташовуються у ряду: CaO>SiO₂>FeO. Подібне має місце при наближенні складів скла цих залізовмісних речовин до кристалічних фаз у такому ряду: CS>S>CFS₂>CF'S> F'S> F'₂S.

При збільшенні температури першого нагріву вище за 753...773 К міцність цементних каменів і композиційних матеріалів починає зменшуватись. Це спостерігається більш виразно при зниженні у кольорових шлаках концентрації FeO або SiO₂, а також вмісту цих залізовмісних речовин у цементах. Клас бетонів по гранично допустимій температурі застосування – И8 (1073 К) досягається при вмісті у цементах цих залізовмісних речовин у кількості більше за 20 мас. % (таблиця 4).

При першому нагріві цементних каменів і композиційних матеріалів до 1073К їхня залишкова міцність зростає при збільшенні у кольорових шлаках концентрації FeO або SiO₂ за рахунок зменшення CaO. Аналогічне має місце при наближенні складів скла цих

залізовмісних речовин до кристалічних фаз у такому ряду: $F'S > CFS_2 > S > CS$ (таблиця 5).

При повторних нагрівах композиційних матеріалів з шамотним заповнювачем на цементах з портландцементним клінкером і кольоровими шлаками мають місце тільки деформації розширення, коефіцієнт лінійного температурного розширення (КЛТР) цих жаростійких матеріалів підвищується при зростанні у них вмісту цементів, а у кольорових шлаках – концентрації оксидів заліза. Останнє спостерігається досить виразно при збільшенні такої вище за 30 мас. %, що при перерахунку складу кольорових шлаків на систему „FeO – CaO – SiO₂” дорівнює 35 мас. %.

КЛТР цих жаростійких композиційних матеріалів при їхніх повторних нагрівах в інтервалі температур 373...1073 К більший, ніж у шамотного заповнювача ($6.2...6.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), але менший, ніж у цементних каменів ($11.5...12.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) і змінюється у межах $7.5...8.2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Марка по термостійкості жаростійких матеріалів з шамотним заповнювачем на цементах з портландцементним клінкером і такими залізовмісними речовинами дорівнює не менш, ніж $T_1=20$ у випадках, коли вміст останніх у цементах більший за 20 мас.%, але менший за 50 мас.% (таблиця 5).

Таблиця 5 - Залежності експлуатаційних властивостей композиційних матеріалів від виду і вмісту цементів

№ п/п	Вид цементів і шлаків (табл. 1, 3, 4)	Склад композиційних матеріалів, кг/м ³			КЛТРх 10^{-6} K^{-1}	Термо- стійкість, цикли
		це- мент	шамот	вода		
1	2	3	4	5	6	7
1	1.3.1	410	1400	250	7.6	24
2	1.3.4	410	1400	250	7.7	23
1	2	3	4	5	6	7
3	1.3.6	410	1400	250	7.8	22
4	1.3.2	500	1300	270	8.1	25
Примітки. 1. Склад цементів: мас.‰: клінкер Кам'янець-Подільського цементного заводу – 58; кольоровий шлак – 38. Концентрація оксидів заліза у шлаках, мас.‰: FeO-11.60 (1), FeO-25.60 і Fe ₂ O ₃ -0.90 (2), FeO-33.85 Fe ₂ O ₃ -2.75 (3), FeO-15.85 (4). 2. Питома поверхня цементів - 300 м ² /кг. 3. Застосовано шамот з густиною 2350...2400 кг/м ³ двох фракцій: з розміром часток менше за 5 мм – вміст у композиційних матеріалах № 1, 2, 3 - 650 кг/м ³ і № 4- 600 кг/м ³ ; з розміром часток 5...10 мм – вміст у композиційних матеріалах № 1,2,3-750 кг/м ³ і №4-700 кг/м ³ .						

Висновки

1. При першому нагріві цементних каменів і композиційних матеріалів з шамотним заповнювачем на цементах з кольоровими шлаками до 573...593 К їхня міцність незначно підвищується при нагріві до 773 К, а при подальшому збільшенні температури – суттєво зменшується. При зростанні у кольорових шлаках концентрації FeO спостерігаються зворотні зміни міцності цементних каменів і композиційних матеріалів при їх першому нагріві до температури 773К і її збільшення при подальшому підвищенні температури до 1073К. Це підтверджує хімічну стійкість FeO у склах шлаків, близький порядок структур яких наближується до таких у геденбергіту, фаяліту, метасилікату заліза, залізистих монтічеліту і акерманіту і цих кристалічних сполук по відношенню до інших компонентів цементів, продуктів їхньої гідратації і дегідратації при температурах їхнього нагріву у межах 273...773 К. Ці скла і кристалічні фази взаємодіють з продуктом дегідратації цементів – CaO при температурах нагріву цементних каменів у межах 773...1073 К. Залишкова міцність жаростійких матеріалів з шамотним заповнювачем і цементами з класом по гранично допустимій температурі застосування И8 після їхнього першого нагріву до експлуатаційної температури складає 33...41 %.

2. Деформації лінійного зсідання цементних каменів і жаростійких бетонів на цементах з кольоровими шлаками, після їхнього першого нагріву до 1073К не перевищують відповідно 0.9 і 0.7%; КЛТР при повторних нагрівах – $12.6 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$ і $8.2 \cdot 10^{-1} \text{K}^{-1}$. Марка по термостійкості цих жаростійких матеріалів дорівнює $T_1=20$.

Бібліографічний список

1. Горшков В.С. Комплексная переработка и использование металлургических шлаков в строительстве / В.С. Горшков, С.Е. Александров, С.И. Иващенко. – М.: Стройиздат, 1985. – 273 с.
2. Лакерник М.М. Переработка шлаков цветной металлургии / М.М. Лакерник, Э.Н. Мазурчук, С.Я. Петкер и др. – М.: Металлургия, 1977. – 160 с.
3. Шелудяков Л.Н. Комплексная переработка шлаков цветной металлургии / Л.Н. Шелудяков, Э.А. Косьянов. – Алма-Ата: Наука, 1990. – 168 с.
4. Некрасов К.Д. Легкие жаростойкие бетоны на пористых заполнителях / К.Д. Некрасов, М.Г. Масленникова. – М.: Стройиздат, 1982. – 192 с.
5. Некрасов К.Д. Влияние высоких температур на физико-химические свойства гидратированных клинкерных минералов /

К.Д. Некрасов // Физико-химические и технологические основы жаростойких цементов и бетонов. – М.: Наука, 1986. – С. 4–14.

6. Горлов Ю.П. Жаростойкие бетоны на основе композиций из природных и техногенных стекол / Ю.П.Горлов, А.П.Меркин, М.И. Зейфман и др. – М.: Стройиздат, 1986. – 145 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

*Рыженко С.С.
(КНУСА, г. Киев, Украина)*

ВЛИЯНИЕ ПОДАТЛИВОСТИ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В РАМАХ С ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ ПОПЕРЕЧНО ГОФРИРОВАННЫХ ДВУТАВРОВ

Розглянуті існуючі методики проектування фланцевих з'єднань, показані залежності НДС фланців від їх геометричних характеристик, запропонована методика розрахунку рам із БГС з урахуванням жорсткості фланцевих вузлів.

Ключові слова: *фланцеве з'єднання, балки с гофрованою стінкою, контактні поверхні.*

Рассмотрены существующие методики проектирования фланцевых соединений, показаны зависимости НДС фланцев от их геометрических характеристик, предложена методика расчета рам из БГС с учетом жесткости узлов.

Ключевые слова: *фланцевые соединения, балки с гофрированной стенкой, контактные поверхности.*

Фланцевые соединения относятся к наиболее эффективным соединениям элементов рам из балок с гофрированной стенкой. Применение данного типа соединений позволяет уйти сварки при монтаже конструкций, а по сравнению с другими болтовыми соединениями - снизить количество болтов в узлах, что приводит к снижению трудоемкости производства и монтажа. Так как балка с гофрированной стенкой выше балок с плоской стенкой на 20...40%, то и количество болтов по сравнению с фрикционными соединениями значительно ниже.

Следует отметить, что работа БГС отличается от «обычного» двутавра, в котором стенка частично воспринимает изгибающий момент и передает его на фланец. В БГС весь изгибающий момент воспринимается полками, а поперечная сила – стенкой. Такая работа балок приводит к изменению расчетов фланцевых соединений в БГС.

В настоящее время на территории Украины действующие нормативные документы по расчету фланцевых соединений [1], [2] рассматривают работу болтов двух типов: внутренние и наружные, при этом сопряжение полки двутавра с фланцем представлено в виде тавра. Такое предположение работы фланцевого соединения реально отображает

распределение усилий между болтами и фланцами, но для БГС данная методика расчета не является объективной, поскольку болты «внутренней» зоны в них отсутствуют. Сравнительный анализ расчета фланцев по [1], [2] с учетом наличия в них только «наружных» болтов показывает, что болт может воспринимать от 30 до 50% усилия, которое при реальном рассмотрении напряженно деформированного состояния он способен воспринять. Также не учтено влияние изгибающего момента на расчет болтов от изгиба фланцев.

Целью данной работы есть рассмотрение действительного НДС фланцевых соединений рам из элементов БГС и влияния податливости соединений на металлоемкость каркаса.

Достаточно точную оценку местных напряжений в соединении можно получить с помощью МКЭ, применяя его для каждого отдельного узла конструкции. Существующие отечественные программные комплексы позволяют рассмотреть модель фланцевого соединения с большими допущениями: для задания контакта необходимо расстояние между поверхностями соединяемых элементов, поскольку применяются стержневые элементы, описывающие взаимодействие между фланцами и болтами. Также при рассмотрении действительной работы фланца установлено, что необходимо использовать упругопластическую работу элементов соединения, что приводит к значительным изменениям результатов расчетов. Для решения такой задачи используется комплекс NASTRAN NX7, который при решении модели в нелинейной постановке задачи подключает программу ADINA.

Расчетная модель соединения представлена двумя фланцами и растянутыми полками и отображена на рисунке 1. Фланцы соединены в пакет болтами с преднапряжением, соответствующим по величине действующим нормам. Между телом болта и телом отверстия фланца существует зазор – чернота отверстия в 2 мм. Рассмотрены модели фланцев с толщиной 12, 14, 16, 18 и 20 мм; болты приняты М20. Все геометрические характеристики взяты в соответствии с требованиями [3]. Такое представление модели позволяет наиболее близко подойти к реальному напряженно деформированному состоянию соединения. Нелинейная нагрузка, приложенная к полкам фланцев, соответствует напряжению 240 МПа. Для моделирования соединения использовались следующие конечные элементы:

- а) 10 – узловая треугольная призма, каждая сторона которой разбивается дополнительным узлом;
- б) 2 – узловый балочный элемент, моделирующий преднапряжение болтов;
- в) контактные поверхности с нулевой толщиной.

Тело болта разбито на две части и вставлен 2 – узловой элемент с соответствующей жесткостью.

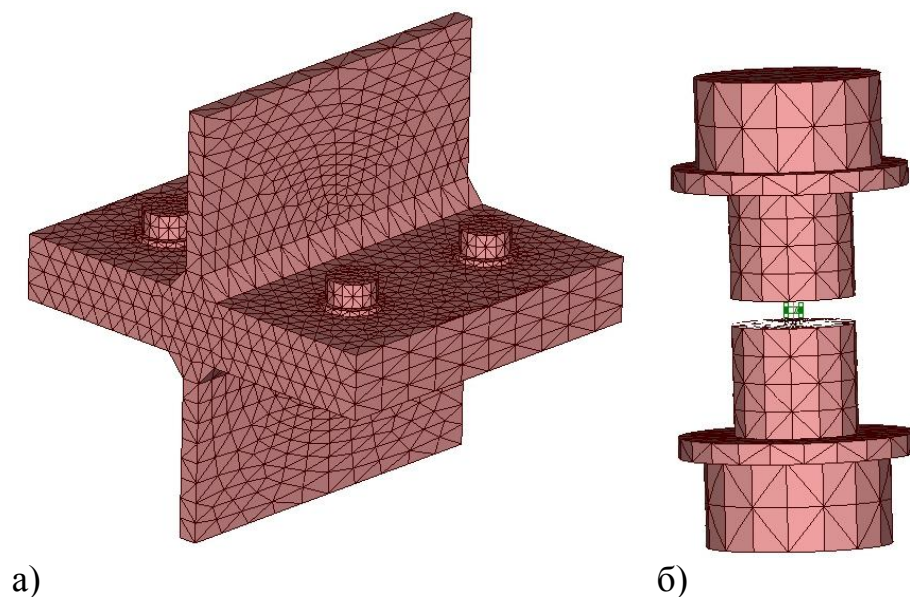


Рисунок 1 – Конечно элементная модель фланцевого соединения:
а) общий вид; б) болт с преднапряжением

Физические характеристики сталей приняты соответственно для фланцев С345, болтов – С1100 и для полок – С 245. Зависимости $\sigma - \varepsilon$ отображены на рисунке 2.

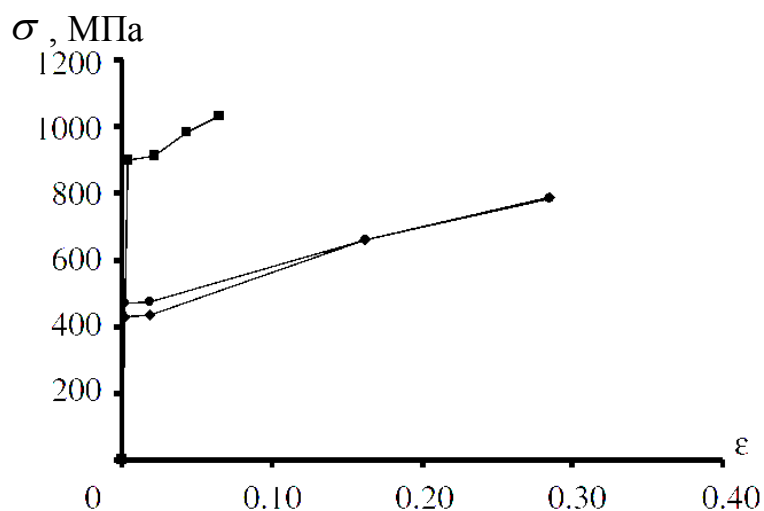


Рисунок 2 – Физические характеристики сталей, используемых во фланцевом соединении

В результате произведенных расчетов установлена нелинейная работа фланцев в районе обжатия их болтами. На рисунке 3 прослеживается зона пластических деформаций во фланце у полки и болтов.

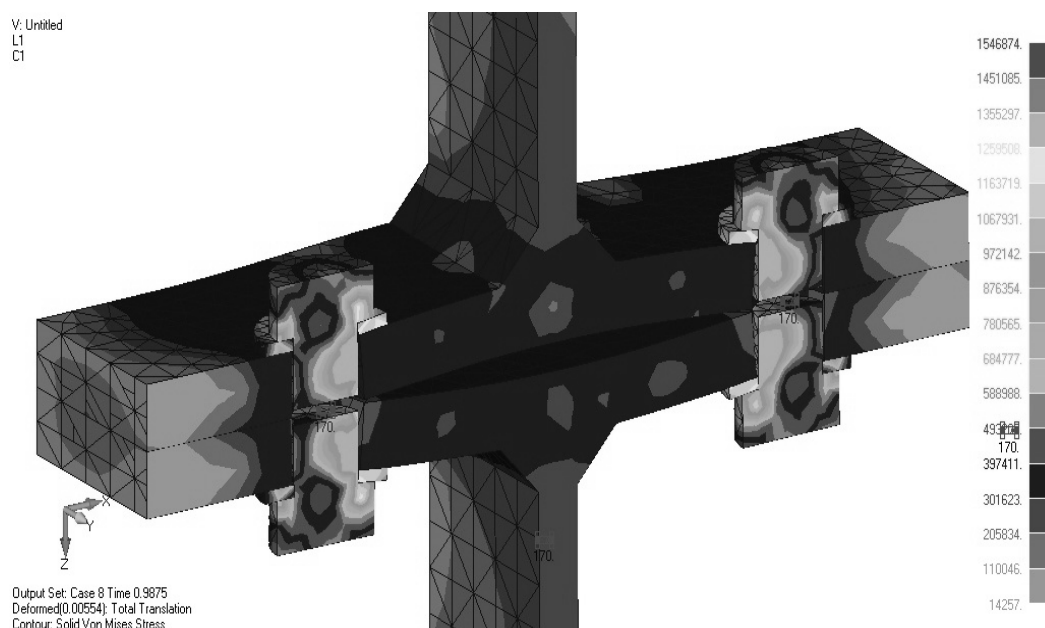


Рисунок 3 – Рассчитанное по 4 – ой теории прочности фланцевое соединение с учетом нелинейного поведения стали

Из результатов расчета видно внецентренное растяжение тела болта, которое обусловлено раскрытием фланцев. В расчетных схемах отечественных норм же говорится, что преднапряженный болт работает только на центральное растяжение. Учет изгибающего момента при расчетах в болтах этих соединений понижает несущую способность их на 17...25%, в зависимости от толщин фланцев. Исходя из этого, можно сказать о необходимости внесения изменений в методику расчетов фланцевых соединений.

Под телом шайбы образуется зона пластических деформаций уже на стадии предварительного натяжения болтов, что приводит к снижению напряжений в теле болта. Данный результат отличается от классического понимания работы высокопрочного болта во фланцевом соединении, поскольку ранее считалось, что усилие в болте является постоянным на протяжении приложения внешней нагрузки после преднапряжения. Из рисунка 4 видим как изменяется напряжение, рассчитанное по 4 – ой теории прочности, в зависимости от приложенной нагрузки на один болт. Существенное влияние на работу болтов оказывает толщина фланцев

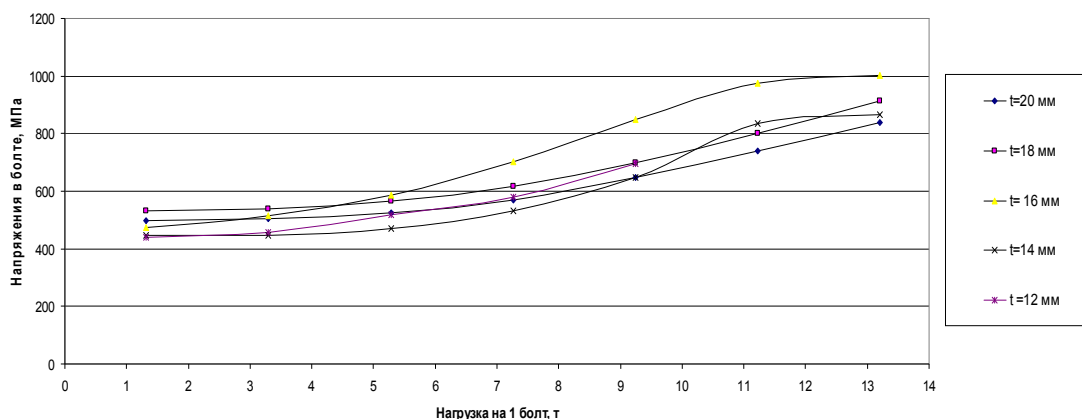


Рисунок 4 – Зависимость напряжений в теле болта от приложенной внешней нагрузки, приведенной к одному болту

При толщине фланца 16 мм и нагрузке на один болт 13,2 т максимальные напряжения в теле болта составляют 1000 МПа. Данную нагрузку болт выдерживает и напряжения не превышают расчетных значений. Максимально допустимая нагрузка на 1 болт, рассчитанная в соответствии с отечественными нормами составляет при данных характеристиках фланцевого соединения не более 50% от выше указанной (в зависимости от толщины фланцев и диаметра болтов). Начальные значения напряжений в теле болта, рассчитанных в соответствии с 4 – ой теорией прочности от величины преднапряжения ниже на 30 – 40%, это обусловлено обжатием болтами фланцев и появлением в них локальных пластических деформаций. Используя данные зависимости можно подбирать толщину фланцевого пакета зная приложенную внешнюю нагрузку, приведенную на 1 болт, а произведенные расчеты станут основой для разработки и внедрении рекомендаций по расчету фланцевых соединений рам из элементов БГС.

При рассмотрении расчетной схемы рам из стержневых элементов необходимо включить в узлы связи конечной жесткости, т.е. учитывать податливость узлов. Это связано с раскрытием фланцев в зоне растянутых полок. Из рисунка 3 видно, что раскрытие происходит под полкой и за болтом не оказывает влияния на поведение соединения. В зависимости от толщины фланцев данное раскрытие составляет от 1 до 4 мм. Используя сортамент гофрированных балок [4], можно определить отношение оптимальной высоты стенки балки к пролету. Для пролетов 24–30 м наиболее рационально применять БГС с высотой стенки 1250 и 1500 мм. При данных высотах несущих конструкций покрытия получаем расход стали однопролетных рам 24–26 кг/м.кв. С применением в рамных узлах соединения колонн с балками покрытия связей конечной жесткости получаем изменение распределения усилий. Изгибающий

момент в карнизном узле снижается в зависимости от соотношения жесткостей колонны и ригеля на 8–10%, в коньковом же узле возрастает, т.е. происходит выравнивание карнизного и пролетного моментов. При новом распределении усилий нет необходимости менять сечения поясов БГС, при пролетах в 18–24 м не делают монтажный стык отдельных отправочных элементов для уменьшения металлоемкости, значительно уменьшается трудоемкость изготовления и монтажа конструкций.

Выводы. На основании произведенного исследования, можно разрешить применение гибких фланцевых соединений в элементах рам из БГС, поскольку данное конструктивное решение узла не только легче, чем предлагаемые в отечественных нормах, но и приводит к уменьшению металлоемкости каркаса в целом на 10–15%, также снижает трудоемкость изготовления и монтажа конструкций.

Библиографический список

1. *Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций. Госстрой СССР, 1989. – 52 с.*
2. *СНиП II–23–81*. Стальные конструкции. Нормы проектирования. – М.: ФГУП ЦПП, 2006. – 90 с.*
3. *Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II–23–81*). ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. – М. - 1989. – 451 с.*
4. *ТУ У В.2.6-28.1-30653953-007:2007. Балки двутавровые гофрированные облегченные. Технические условия. – К. - 2007. – 35 с.*

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

Усенко М.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЛЕГКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ОТКРЫТОГО СЕЧЕНИЯ

Описано методику, проведені експериментальні дослідження та отримані результати визначення залишкового напруженого стану в гнутих профілях відкритого перерізу.

Ключові слова: *холодногнутий швелер, залишковий напружений стан, тензометричні вимірювання.*

Описана методика, проведены экспериментальные исследования и получены результаты определения остаточного напряженного состояния в гнутых профилях открытого сечения.

Ключевые слова: *холодногнутой швеллер, остаточное напряженное состояние, тензометрические измерения.*

В настоящее время разработаны общие принципы расчета строительных тонкостенных конструкций, которые основаны на последних достижениях строительной механики. Эти принципы положены в основу проектирования рациональных тонкостенных элементов, которые широко применяются в промышленном и гражданском строительстве. К таким элементам относятся оболочки, пластинки и тонкостенные стержни. Тонкостенные стержни открытого профиля представляют собой эффективную конструктивную форму, которая совмещает высокую прочность и жесткость с малым весом.

При изготовлении стальных конструкций в результате выполнения операций, связанных с изменением формы изделия – гнутья, прокатывания, профилизации и т. д. неизбежно возникает остаточное напряженное состояние (ОНС) [1].

Анализ исследований и публикаций. Вопросами изучения влияния ОНС в элементах металлических конструкций после изготовления, на их несущую способность, занимались отечественные и зарубежные ученые. Считается, что изучение их начато Родманом В.И. в 1857 г. и Умовым И.А. в 1871 г., а Калауцким Н.В. в 1887 г. были начаты систематические исследования остаточных напряжений и впервые разработан метод их расчета. Большой вклад в исследование остаточных на-

пряжений был внесен в 1930-е годы Давиденковым Н.Н. и Заксом Г. [2, 3] В настоящее время вопросами изучения величин и распределения остаточных напряжений занимаются Голоднов А.И., Иванов А.П., Козлов С.В., Астахов И.В., а также ряд других специалистов в этой отрасли.

Характер распределения деформаций и напряжений, возникающих в элементах после изготовления, лучше всего изучать экспериментально. По результатам правильно поставленного эксперимента можно судить о степени влияния того или иного явления на процесс развития деформаций и напряжений, приемлемости различных гипотез и упрощений, используемых в расчетных методиках, справедливости существующих и т. д. В некоторых случаях исследования остаточных деформаций и напряжений сложных конструкций экспериментальный метод является единственно возможным в виду сложности расчета.

Цель работы – выявить особенности распределения остаточных напряжений в легких металлических конструкциях из гнутых профилей открытого сечения.

Изложение материала и его результаты. В качестве экспериментальных образцов использовались 6 холодногнутых швеллеров 100×50×3 мм по ГОСТ 8278-83 «Швеллеры стальные гнутые равнополочные», изготовленные на ОАО «Запорожсталь». При проведении экспериментальных исследований (поперечный распил швеллера длиной $L = 250$ мм) определялись остаточные напряжения в сечении данного швеллера в состоянии поставки.

На основе анализа существующих методик определения остаточных напряжений в металлических конструкциях был выбран метод измерения деформаций через разрушение путем освобождения элементов конструкций с остаточными напряжениями после разрыва связей, позволяющий производить роспуск швеллера (разрезание ножовкой) без значительных выделений тепла.

Подготовка и проведение испытаний включали в себя следующие этапы:

- разметка, зачистка, обезжиривание и грунтовка мест наклейки тензодатчиков;
- группировка и наклейка тензодатчиков выполнялась согласно инструкции для принятых типов датчиков клеем БФ-2 в местах определения деформаций на подготовленную поверхность;
- подключение тензодатчиков к регистрирующей аппаратуре и съем начальных результатов. В качестве регистрирующей аппаратуры использовалась система информационно-измерительная тензометрическая – СИИТ-3;
- поперечная разрезка участка швеллера, позволяющая освободить элементы с остаточными напряжениями в пределах одного накле-

енного тензодатчика и снятие показаний в процессе и после распиловки. Процесс разрезки образца показан на рисунке 1.

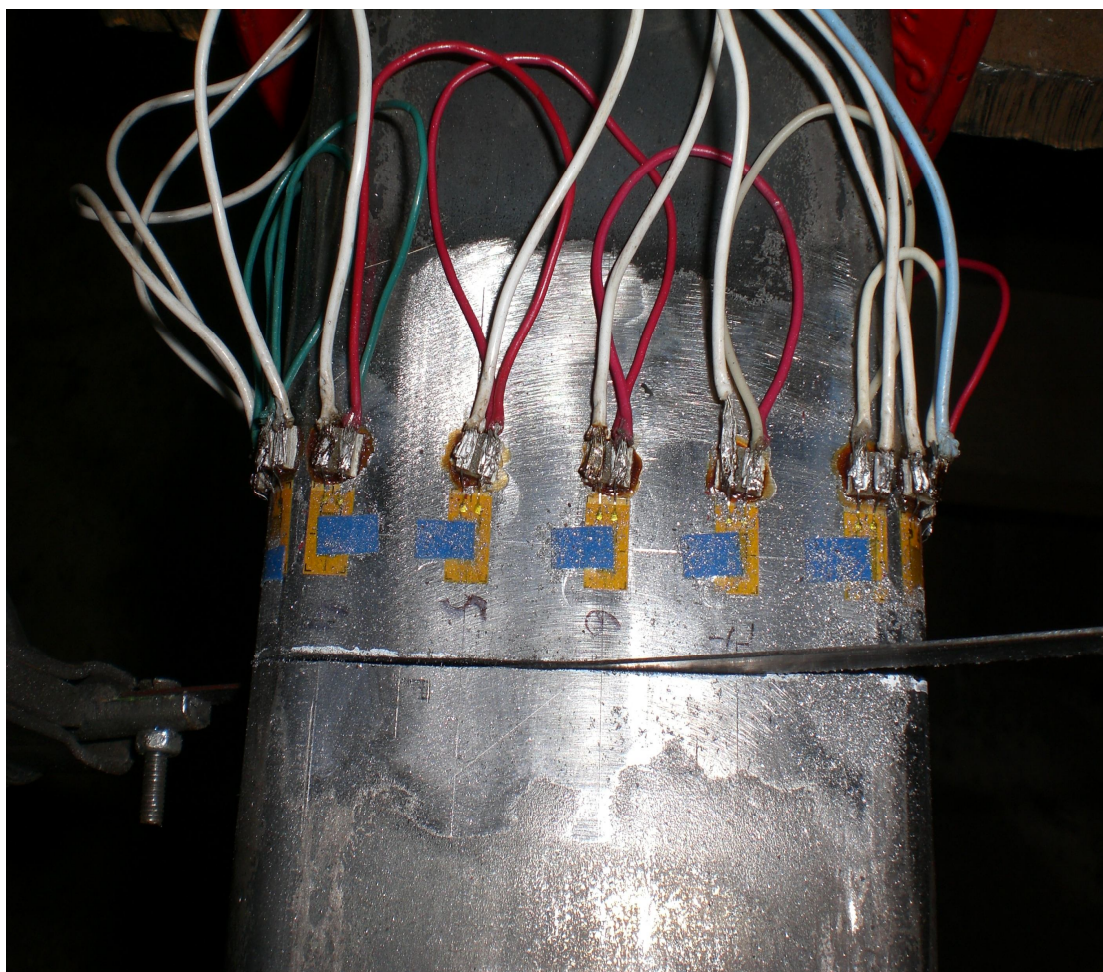


Рисунок 1 – Процесс разрезки образца

После каждого этапа производилась выдержка продолжительностью 15-20 минут, а затем брались отсчеты по всем тензодатчикам исследуемого образца. Окончательный съем показаний проводился после полной распиловки швеллера и выдержки в течение 24 часов [4]. Схема наклейки тензодатчиков показана на рисунке 2.

Как видно из этого рисунка, в сечениях швеллеров после гнутья и правки возникает сложное напряженно-деформированное состояние.

Корреляционная связь находится с помощью статистического анализа экспериментальных данных сопоставляемых параметров для 6 швеллеров. Результаты, полученные с помощью регистрирующей аппаратуры СИИТ-3, обрабатывались по нижеприведенной методике расчета.

1. Определялось среднее значение измеряемых параметров

$$\overline{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n \sigma_i}{n}, \quad (1)$$

где $\overline{\sigma}$ – среднее значение напряжений, n – количество точек, в которых производилось определение напряжений в образце.

2. Определялось среднеквадратичное отклонение найденных параметров

$$X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \overline{\sigma})^2}{n-1}}. \quad (2)$$

3. Вычислялся коэффициент вариации

$$k_X = \frac{X}{\overline{\sigma}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Обобщение результатов вычислений приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Обобщение полученных результатов

Положение тензодатчиков	Среднее напряжение МПа	на- $\overline{\sigma}$,	Средне- квадратичное отклонение σ_σ , МПа	Коэффициент вариации k_σ , %
Полка перо (датчики 0; 12)	53.9		12.73	23.6
Полка обушок (датчики 2; 10)	14.85		1.95	13.13
Стенка обушок (датчики 4; 8)	17.8		5.08	28.4
Стенка середина (датчики 5; 7)	62.55		14.36	22.96

Выводы.

1. Метод измерения деформаций путем освобождения элементов конструкций с остаточными напряжениями после разрыва связей (распиловки образцов) позволяет определить наличие значительных напряжений во всех элементах швеллера.

2. Гнутые металлические профили открытого сечения в исходном состоянии имеют неравномерную линейно-кусочную эпюру остаточных напряжений со средними значениями 17–62 МПа.

3. Большие значения коэффициента вариации остаточных напряжений для исследованных металлических швеллеров свидетельствует о необходимости обоснования и применения достоверных методов контроля этих напряжений.

Библиографический список

1. Давиденков Н.Н. *Механические свойства материалов и методы измерения деформаций* / Н.Н. Давиденков. – К.: Наук. думка, 1981. – 656 с. – (Избранные труды в 2-х т., т. 2).

2. Абрамов В. В. *Остаточные напряжения и деформации в металлах*. / В.В. Абрамов. – М.: Машгиз, 1963. – 356 с.

3. *Сварные строительные конструкции* / [В. Н. Шимановский, Э. Ф. Гарф, В. А. Пермяков и др.]; под ред. Л. М. Лобанова. – К.: ИЭС им. Е. О. Патона, 1997. – 680 с. (Типы конструкций, т. 2).

4. Касаткин Б.С. *Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений: [справ. пособие]*. / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л.М. Лобанов. – К.: Наук. думка, 1981. – 583 с.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

Филатова Л.Н.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ СТАЛЬНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК

Розроблено інженерну методику визначення оптимальних параметрів сталевих балок двотаврового профілю з урахуванням впливу залишкових напружень. Значення величин залишкових напружень в перетинах балок визначаються за відомими методиками.

Ключові слова: залишкові напруження, сталеві балки, оптимальні параметри.

Разработана инженерная методика определения оптимальных параметров стальных балок двутаврового профиля с учетом влияния остаточных напряжений. Значения величин остаточных напряжений в сечениях балок определяются по известным методикам.

Ключевые слова: остаточные напряжения, стальные балки, оптимальные параметры.

Анализ исследований и публикаций. Эффективность конструкций определяется их конструктивными формами [1], теория образования которых опирается на ряд прогрессивных принципов:

- применение предварительного напряжения;
- создание конструктивных форм, обеспечивающих наибольшую концентрацию материала, совмещение функций элементами;
- максимальное использование работы на растяжение отдельных элементов и поверхностей;
- типизация конструктивных решений;
- обеспечение жесткости и аэродинамической прочности систем.

Опираясь на эти принципы, можно не только установить рациональную конструктивную форму сооружения с заданным технологическим процессом и обеспечить ее надежную и долговременную эксплуатацию, но и добиться наибольшей экономии расхода материалов, включая снижение трудоемкости изготовления конструкции и уменьшение затрат на монтаж [1].

Существующие технологические процессы изготовления стальных конструкций сопровождаются локальным термическим разогревом (сварка, резание с применением высокотемпературного нагрева, нагрев

отдельных участков и т.п.), что приводит к появлению остаточных деформаций (ОД) и напряжений (ОН). Эти напряжения не связаны с действием внешних сил, являются внутренними напряжениями первого рода, уравниваемыми в объеме элемента и вызывающими его деформацию [2].

ОН возникают и при предварительном напряжении, которое применяется в различных конструкциях для улучшения их свойств: расширения области упругой работы материала, перераспределения усилий, уменьшения деформативности, повышения устойчивости. Предварительное напряжение осуществляется на стадии изготовления, монтажа или в процессе эксплуатации [2, 3, 4 и др.].

Индустриальные способы предварительного напряжения стержневых элементов (на стадии изготовления) можно разделить на три группы [2]:

- методы с использованием дополнительных элементов типа затяжек;
- методы, основанные на предварительном деформировании элементов с последующей фиксацией сваркой;
- методы предварительного напряжения путем локальных термических воздействий (ЛТВ).

К методам, основанным на предварительном деформировании элементов с последующей фиксацией сваркой, относится метод предварительного напряжения вытяжкой нижнего пояса способом упреждающего разогрева. Предварительное напряжение осуществляется путем приварки к исходному тавру (верхний пояс и стенка) предварительно разогретого нижнего пояса. После сварки и остывания в верхнем поясе и примыкающем участке стенки, которые при эксплуатационной нагрузке воспринимают сжимающие усилия, возникают остаточные растягивающие напряжения (ОРН). В нижней части стенки, где при эксплуатационной нагрузке возникают растягивающие усилия, возникают остаточные сжимающие напряжения (ОСН). В нижнем поясе, который при эксплуатационной нагрузке воспринимает растягивающие напряжения, возникают ОРН. Таким образом, при загрузке эксплуатационной нагрузкой вначале погашаются ОН, возникающие в верхнем поясе и стенке, и, тем самым, увеличивается зона упругой работы материала. Что касается нижнего пояса, то при таком способе предварительного напряжения материал нижнего пояса должен иметь повышенные, по сравнению с материалом исходного тавра, прочностные характеристики [2, 3, 4 и др.].

Постановка задачи. Основной задачей настоящей работы является разработка инженерной, ориентированной на действующие нормы,

методики определения оптимальных параметров сварных балок двутаврового профиля с учетом наличия ОН.

Цель работы – усовершенствование методики определения оптимальных параметров сварных балок двутаврового профиля с учетом влияния остаточного напряженного состояния (ОНС).

Изложение материала и его результаты. Настоящие предложения разработаны в соответствии с рекомендациями действующих нормативных документов [5, 6] и распространяются на изгибаемые элементы с сечениями из составных сварных двутавров, работающие в условиях ограниченной динамики и нормальных температур.

Изготовление и искусственное регулирование ОНС в сечениях сварных двутавров должно осуществляться в заводских условиях.

Компоновка сечений изгибаемых элементов, предварительно напряженных различными способами, начинается с определения расчетной высоты сечения. Такой высотой может быть наибольшая высота h_{opt} , получаемая из условий прочности (в большинстве случаев диктуется экономическими соображениями) или минимальная высота h_{min} , которая обеспечивает необходимую жесткость при полном использовании несущей способности материала [2, 4, 7, 8 и др.].

Приравнивая $h_{opt} = h_{min}$ и решая соответствующие уравнения прочности и деформативности относительно R_y , можно получить оптимальную прочность стали R_{opt} , т.е. на стадии проектирования решать задачу о выборе марки стали оптимальной прочности.

Подбор сечений осуществляется в такой последовательности (алгоритм «ИЗГИБ») [2, 4, 7 и др.].

1. Задаются прочностными и деформативными характеристиками материалов поясов и стенки (при проектировании сечений балок, скомпонованных из различных марок сталей) или принимают марку стали, соответствующую оптимальной прочности.

2. Определяют оптимальную высоту сечения (при проектировании моностальной балки из стали, соответствующей R_{opt}), оптимальную и минимальные высоты h_{opt} и h_{min} без учета влияния ОН и остаточного выгиба [3, 4, 5 и др.].

При проектировании предварительно напряженных балок оптимальную высоту сечения определяют по формуле:

$$h_w^{\text{opt}} = \sqrt{\frac{M \cdot [\bar{\lambda}_w] \cdot \sqrt{\frac{E_w}{R_y^w} \cdot (n_3 + 1)}}{\gamma_c \cdot R_y^f \cdot [1 + \frac{1}{3} \cdot (n_1 + n_2) - \frac{1}{6} \cdot (n_2 \cdot n_3 + \frac{n_1}{n_3})]}}. \quad (1)$$

В этой формуле:

$$n_1 = [\sigma_w^{\text{com}}] / R_y^{f,\text{com}}; \quad (2)$$

$$n_2 = R_y^w / R_y^f; \quad (3)$$

$$n_3 = R_y^f / R_y^{f,\text{com}}, \quad (4)$$

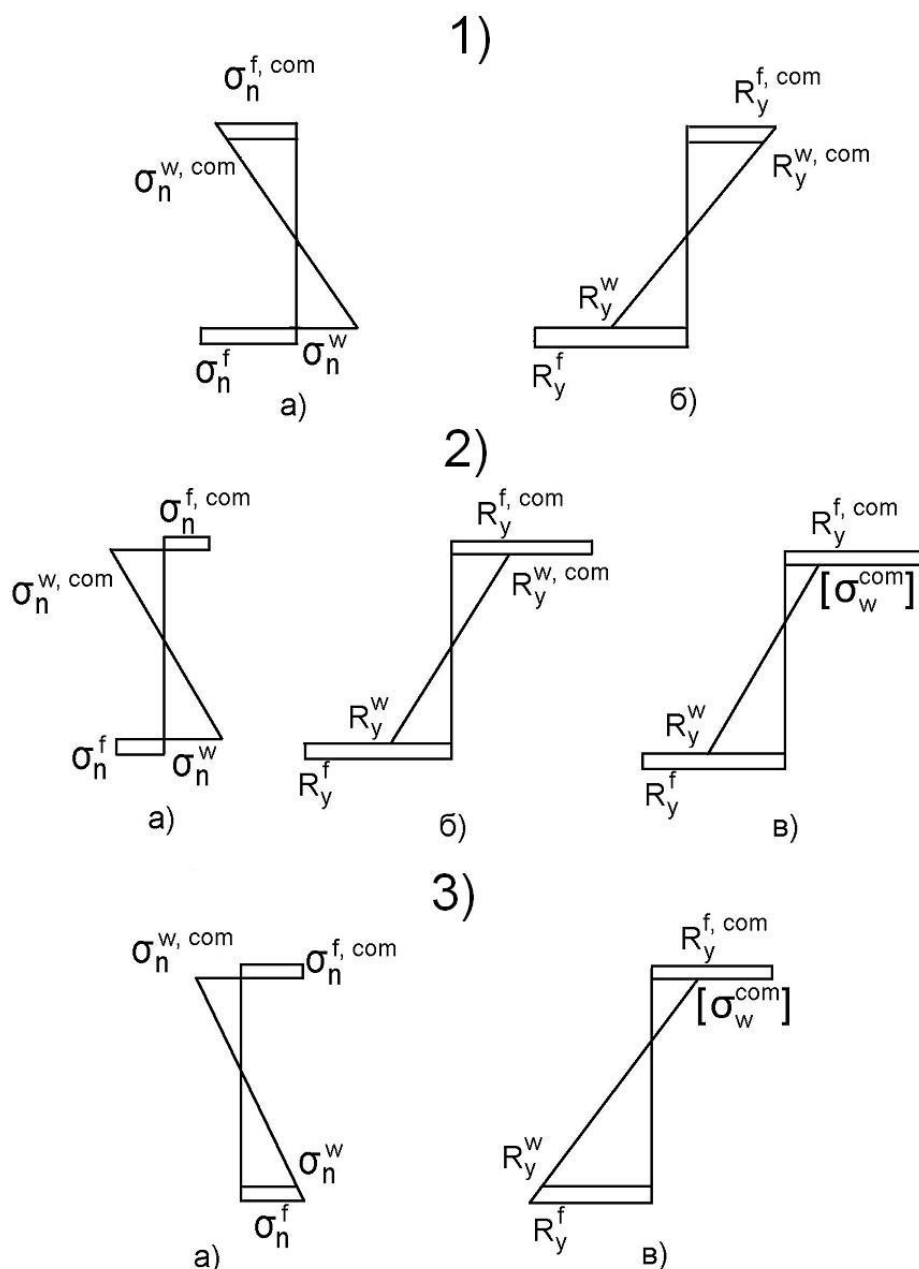
где $0,3 \cdot R_y^w \leq \sigma_w^{\text{com}} \leq R_y^w$ – допускаемые напряжения в стенке, следует принимать близкими к нижнему пределу; $R_y^{f,\text{com}}, R_y^f, R_y^w$ – расчетные сопротивления стали соответственно сжатого, растянутого поясов и стенки; $[\bar{\lambda}_w]$ – предельное значение гибкости стенки, при которой устойчивость стенки не требуется проверять в соответствии с пунктом 7.3 [6]; M – максимальный изгибающий момент в сечениях балки; γ_c – коэффициент условий работы (раздел 4 [6]).

Напряженное состояние сечений балок, предварительно напряженных различными способами, приведено на рисунке 1.

3. Находят минимальную толщину стенки:

$$t_w^{\text{min}} = \frac{h_w \cdot \sqrt{\frac{\sigma_w^{\text{com}}}{E_w}}}{[\bar{\lambda}_w]}, \quad (5)$$

где σ_w^{com} – допускаемые напряжения в верхней части стенки, которые, в зависимости от способа предварительного напряжения, принимаются в соответствии с пунктом 2; для моностальных балок $\sigma_w^{\text{com}} = R_y^w$.



1) балки, предварительно напряженные вытяжкой нижнего пояса;
 2) балки, предварительно напряженные изгибом стенки;
 3) балки, предварительно напряженные вытяжкой участка стенки;
 а) распределение остаточных напряжений после изготовления балок;
 б), в) распределение напряжений в сечениях балок в предельном состоянии соответственно при достижении в сжатой фибре стенки напряжений $R_y^{w, com}$ и с ограничением напряжений $[\sigma_w^{com}]$.

Рисунок 1- Напряженное состояние сечений предварительно напряженных балок

При учете ОН, обусловленных предварительным напряжением ЛТВ, наличием сварочных ОН, высота стенки h принимается равной эффективной высоте ($h_w = h_{ef}$), а напряжения σ_w^{com} определяются по методике, изложенной в монографии [2] или другой известной методике.

4. Назначают толщину стенки в соответствии с сортаментом листового проката и определяют значения средних касательных напряжений:

$$\frac{\tau_x}{R_y^w} = \frac{Q_x}{h_w \cdot t_w \cdot R_y^w} \leq 0,6. \quad (6)$$

5. При отсутствии поперечных ребер находят местные сминающие напряжения и проверяют условие:

$$\frac{\sigma_{loc}}{R_y^w} = \frac{P_{loc}}{t_w \cdot l_{ef} \cdot R_y^w} \leq \gamma_c, \quad (7)$$

где l_{ef} – условная длина распределения нагрузки, определяемая в соответствии с указаниями п.5.13 [5]; P_{loc} – расчетное значение нагрузки (силы).

6. Вычисляют коэффициенты компоновки сечения:

$$\alpha_{\cdot f}^{com} = \frac{M/h_w + N}{R_y^{f,com} \cdot A_w} - \frac{n_1}{3} + \frac{n_2 \cdot n_3}{6}, \quad (8)$$

$$\alpha_f = \frac{M/h_w - N}{R_y^f \cdot A_w} - \frac{n_2}{3} + \frac{n_1}{6 \cdot n_3}, \quad (9)$$

где A_w – площадь стенки; N – продольное усилие в сечении (знак "+" при сжатии, "-" при растяжении).

7. Определяют площади верхнего и нижнего поясов балки:

$$A_f^{com} = \alpha_f^{com} \cdot A_w, \quad (10)$$

$$A_f = \alpha_f \cdot A_w. \quad (11)$$

8. Определяют параметры предварительного напряжения:
для верхнего пояса

$$\beta_f^{\text{com}} = 1 - \frac{(1 - n_1) \cdot (4 \cdot \alpha_f + 1) - 2 \cdot \alpha_f \cdot n_3 \cdot (1 - n_2)}{(4 \cdot \alpha_f^{\text{com}} + 1) \cdot (4 \cdot \alpha_f + 1) - 4 \cdot \alpha_f^{\text{com}} \cdot \alpha_f}; \quad (12)$$

для нижнего пояса

$$\beta_f = 1 - \frac{1 - n_2 - [2 \cdot \alpha_f^{\text{com}} \cdot (1 - \beta_f^{\text{com}}) / n_3]}{4 \cdot \alpha_f + 1}; \quad (13)$$

для кромки стенки, прилегающей к верхнему (сжатому) поясу

$$\beta_w^{\text{com}} = \beta_f^{\text{com}} / n_1; \quad (14)$$

для кромки стенки, прилегающей к нижнему (растянутому) поясу

$$\beta_w = \beta_f / n_2. \quad (15)$$

9. Определяют установившиеся напряжения в стенке

$$\sigma_w = [\sigma_w^{\text{com}}] \cdot (\beta_w^{\text{com}} - 1) \leq R_y^w. \quad (16)$$

Если условие (16) не выполняется, необходимо либо уменьшить расчетное сопротивление материала верхнего пояса, либо увеличить расчетное сопротивление материала стенки и повторить расчет. Если условие (16) выполняется, продолжают расчет по пункту 10.

10. Находят требуемые размеры поясов:

$$b_f^{\text{com}} = \sqrt{A_f^{\text{com}} \cdot \sqrt{\frac{E_f}{R_y^{\text{f,com}}}}}; \quad (17)$$

$$t_f^{\text{com}} = \frac{A_f^{\text{com}}}{b_f^{\text{com}}}; \quad (18)$$

$$b_f = \sqrt{A_f \cdot \sqrt{\frac{E_f}{R_y}}}; \quad (19)$$

$$t_f = \frac{A_f}{b_f}. \quad (20)$$

11. Подбирают сечения поясов, вычисляют геометрические характеристики сечений.

12. Определяют напряжения в поясах и стенке:

$$\sigma_f^{\text{com}} = \frac{M \cdot y_c}{I_x} + \frac{N}{A} \leq \gamma_c \cdot \beta_f^{\text{com}} \cdot R_y^{f, \text{com}}; \quad (21)$$

$$\sigma_f = \frac{M \cdot y_c}{I_x} - \frac{N}{A} \leq \gamma_c \cdot \beta_f \cdot R_y^f; \quad (22)$$

$$\sigma_w^{\text{com}} = \frac{M \cdot (y_c - t_f^{\text{com}})}{I_x} + \frac{N}{A} \leq \gamma_c \cdot \beta_w^{\text{com}} \cdot [\sigma_w^{\text{com}}]; \quad (23)$$

$$\sigma_w = \frac{M \cdot (y_p - t_f)}{I_x} - \frac{N}{A} \leq \gamma_c \cdot \beta_w \cdot R_y^w, \quad (24)$$

где σ_f^{com} , σ_f , σ_w^{com} , σ_w – напряжения от расчетной нагрузки соответственно в сжатом поясе, растянутом поясе, кромке стенки, прилегающей к сжатому и растянутому поясам; I_x , A – момент инерции и площадь сечения; y_c , y_p – расстояния от центра тяжести балки соответственно до сжатой и растянутой граней.

13. Если неравенства (21)–(24) не удовлетворяются, увеличивают размеры поясов и стенки и выполняют расчеты по пунктам 10–12. Расчет считается окончанным, если недонапряжения в поясах или стенке не превышают 5%.

14. Проверяют деформативность балки:

$$f - f_{\text{cur}} \leq [f] \quad (25)$$

где f – прогиб балки, определяется по любой известной методике (см., например, [2]); $[f]$ – допускаемый прогиб, определяется в соответствии с требованиями ДСТУ Б В.1.2-3:2006 [9]; f_{cur} – выгиб балки.

Сечение считается оптимально подобранным, если недонапряжения не более 5%, а прогиб меньше предельного не более, чем на 20%.

Подбор сечений изгибаемых элементов с учетом влияния ОНС, возможен по приведенному выше алгоритму «ИЗГИБ» с учетом некоторых дополнений (алгоритм «ИЗГИБ-ОНС»).

1. Производят вычисления по пунктам 1–12 алгоритма «ИЗГИБ».
2. Определяют ОНС сечения по любому алгоритму (например, [2]).
3. Выполняют проверки прочности сечений по формулам:

$$(\sigma_f^{\text{com}})_2 = \sigma_f^{\text{com}} + \sigma_{H,f}^{\text{com}} \leq \gamma_c \cdot \beta_f^{\text{com}} \cdot R_y^{f,\text{com}}; \quad (26)$$

$$(\sigma_f)_2 = \sigma_f + \sigma_{H,f} \leq \gamma_c \cdot \beta_f \cdot R_y^f; \quad (27)$$

$$(\sigma_w^{\text{com}})_2 = \sigma_w^{\text{com}} + \sigma_{H,w}^{\text{com}} \leq \gamma_c \cdot \beta_w^{\text{com}} \cdot [\sigma_w^{\text{com}}]; \quad (28)$$

$$(\sigma_w)_2 = \sigma_w + \sigma_{H,w} \leq \gamma_c \cdot \beta_w \cdot R_y^w, \quad (29)$$

где напряжения σ_f^{com} , σ_f , σ_w^{com} , σ_w – определяются по формулам (21)– (24), а напряжения $\sigma_{H,f}^{\text{com}}$, $\sigma_{H,f}$, $\sigma_{H,w}^{\text{com}}$, $\sigma_{H,w}$ – по формулам, приведенным в [2] со своими знаками.

Технологические характеристики сварного изделия (высота катета сварного шва, ширина зоны термического влияния при разрезке листов, высота наплавленного валика, ширина зоны термического воздействия) принимаются на этой стадии проектирования по справочным данным.

4. Выполняют расчеты по пунктам 13–14 алгоритма «ИЗГИБ».

Выводы

1. ОНС неизбежно возникает в элементах стальных конструкций в процессе изготовления вследствие применения технологических операций, связанных с локальным разогревом.
2. Разработана инженерная методика определения оптимальных параметров стальных балок двутаврового профиля с учетом влияния ОНС. Значения величин ОН в сечениях балок определяются по известным методикам.

Библиографический список

8. Трофимович В.В. *Оптимальное проектирование металлических конструкций* / В.В. Трофимович, В.А. Пермяков. – К.: Будівельник, 1981. – 136 с.

9. Голоднов А.И. *Регулирование остаточных напряжений в сварных двутавровых колоннах и балках*. – К.: Сталь, 2008. – 150 с.

10. А.с. 1527393 СССР, МКИ E04 C 3/10. *Способ изготовления предварительно напряженной металлической балки* / А.И. Голоднов, Е.П. Лукьяненко, И.И. Набоков (СССР); Опубл. 07.12.89, Бюл. №45. – 2 с.

11. Голоднов А.И. *Принципы компоновки составных двутавровых сечений изгибаемых элементов из сталей различных марок* / А.И. Голоднов, Л.Н. Филатова, И.И. Набоков // *Соврем. проблемы стр-ва: Ежегод. науч.-техн. сб.* / Донецкий ПромстройНИИпроект. – Донецк: ООО «Лебедь», 2001. – С. 234-239.

12. ДБН В.2.3-14:2006. *Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування* / Мінбуд України. – К.: Мінбуд України, 2006. – 359 с.

13. СНиП II-23-81*. *Стальные конструкции* / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 96 с.

14. *Методические рекомендации по применению облегченных предварительно напряженных сварных двутавров для реконструкции промышленных предприятий* / НИИСП Госстроя УССР; Сост. И.И. Набоков, А.И. Голоднов, Е.П. Лукьяненко и др. – К.: НИИСП, 1988. – 45 с.

15. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. *Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування*. – Введено вперше (із скасуванням в Україні розділу 10 СНиП 2.01.07-85); Введ. 01.01.2007. – К.: Мінбуд України, 2006. – 10 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Должиковым П.Н.

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА.
РАДИОТЕХНИКА**

*д.т.н. Заблодский Н.Н.,
к.т.н. Плюгин В.Е.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ И ПРЕИМУЩЕСТВА ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Приведені теоретичні відомості по реалізації об'єктно-орієнтованих проектів електромеханічних перетворювачів енергії. Показані недоліки процедурного підходу в проектуванні, обґрунтовані переваги об'єктно-орієнтованого проектування.

Ключові слова: *системи аналізу і проектування, об'єктно-орієнтований аналіз і проектування, модель водоспаду, класи, об'єкти, процедурне проектування.*

Приведены теоретические сведения по реализации объектно-ориентированных проектов электромеханических преобразователей энергии. Показаны недостатки процедурного подхода в проектировании, обоснованы преимущества объектно-ориентированного проектирования.

Ключевые слова: *системы анализа и проектирования, объектно-ориентированный анализ и проектирование, модель водопада, классы, объекты, процедурное проектирование.*

В условиях роста разнообразия и сложности электромеханических систем, увеличения объемов научно-технической информации особенно большую актуальность приобретает проблема обновления электромеханической фундаментальной науки, направленной на обобщение накопленных знаний, создания принципов структурообразования электромеханических преобразователей энергии, возможности систематизации существующих и предсказания новых структурных разновидностей.

В современной науке проблема определения принципов структурной организации и закономерностей сложных систем является определяющей. Научно-методической основой таких исследований выступает структурно-системный подход, а его преобладающей идеей – учение про еволюцію [1].

Наряду с развитием структурной и системной организации электромеханических преобразователей энергии, теория их расчета и проектирования не претерпела изменений. Более того, новые классы преобра-

зователей, а тем более прогнозируемые, оторваны от математического описания.

Идея представления сложных структур в виде объектов и классов нашла свое отражение в программировании и теории объектного анализа. Между тем, методики расчета и проектирования электромеханических преобразователей энергии (ЭМПЭ), носят прежний, процедурный характер. Целью данной работы является обоснование разработки теоретических основ объектно-ориентированного проектирования электромеханических преобразователей энергии, призванных внести принципы объектного анализа в структурную и системную организацию ЭМПЭ.

Объектно-ориентированный подход основан на систематическом использовании моделей для языково-независимой разработки программной системы проекта, на основе из ее прагматики. Прагматика определяется целью разработки программной системы: для проектирования асинхронного двигателя, для расчета электромагнитного поля в воздушном зазоре, для моделирования переходных процессов пуска электродвигателя и т.п. В формулировке цели участвуют предметы и понятия реального мира, имеющие отношение к разрабатываемой системе. При объектно-ориентированном подходе эти предметы и понятия заменяются их моделями, т.е. определенными формальными конструкциями, представляющими их в программной системе [2 - 4].

Модель содержит не все признаки и свойства представляемого ею предмета (понятия), а только те, которые существенны для разрабатываемой программной системы. Тем самым модель «беднее», а, следовательно, проще представляемого ею предмета (понятия). Но главное в том, что модель есть формальная конструкция: формальный характер моделей позволяет определить формальные зависимости между ними и формальные операции над ними. Это упрощает как разработку и изучение (анализ) моделей, так и их численную реализацию. В частности, формальный характер моделей позволяет получить формальную модель разрабатываемой программной системы как композицию формальных моделей ее компонентов.

Систематическое применение объектно-ориентированного подхода позволит разрабатывать хорошо структурированные, надежные в эксплуатации, достаточно просто модифицируемые программные системы. Этим объясняется интерес программистов к объектно-ориентированному подходу и объектно-ориентированным языкам программирования. Объектно-ориентированный подход в настоящее время является одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений теоретического и прикладного программирования.

В объектно-ориентированном подходе к технологии проектирования внимание концентрируется на самом процессе решения задачи. Оценим преимущества и недостатки наиболее распространенной инженерной технологии – процедурной.

Типичная схема процесса создания проекта (его цикла жизни) показана на рисунке 1.



Рисунок 1 - Схема процедурного процесса создания проекта

Проект разбивается на последовательные этапы, выполняемые относительно независимо друг от друга со строго определенными интерфейсами между этапами. В зависимости от сложности создаваемого проекта могут присутствовать не все указанные этапы, могут быть и другие этапы. Однако всегда можно выделить четыре части: анализ (что делать), проектирование (как делать), изготовление (чем делать), использование (что сделано).

Перечислим три главные проблемы процедурного подхода:

1) Слабая формализация связей между этапами. Специализация этапов приводит к тому, что интерфейсы между ними описываются с разной степенью формализации. Слабая формализация уменьшает надежность проекта и отдаляет от реального объекта.

2) Отсутствие гибкости. Поэтапная последовательная схема жестко связана с нисходящим способом создания проекта. Однако практика показывает, что процесс создания хоть сколь-нибудь сложного проекта неизбежно оказывается циклическим, с возвратами для внесения изменений в предыдущие этапы.

3) Нерациональное использование результатов предыдущих разработок. Нисходящее проектирование вместе со слабой формализацией языков спецификаций приводят к тому, что результаты проектирования, как и готовые части проекта, практически невозможно использовать для других целей. Схема процесса создания проекта по объектно-ориентированной технологии представлена на рисунке 2.

Принципиальное отличие от процедурной схемы состоит в том, что поэтапный цикл жизни проекта заменяется многоуровневым представлением процесса решения задачи, которое получается сочетанием нисходящего и восходящего способов. С одной стороны, идет детализация верхних уровней, с другой стороны из нижних уровней собираются недостающие компоненты верхних уровней. Смежные и другие близлежащие уровни могут пересекаться, т.е. иметь общие компоненты. Таким образом, границы между уровнями размываются, их число становится произвольным и даже неопределенным, а сами уровни теряют свою специфику.

Кроме того, при процедурном подходе к проектированию процесс расчета не является итерационным, а схож с моделью водопада, так что изменения требований означало бы перезапуск всего процесса.

Объектно-ориентированное проектирование основывается на понятии объекта как замкнутой независимой сущности, взаимодействующей с внешним миром через строго определенный интерфейс в виде перечня сообщений, которые объект может принимать.



Рисунок 2 - Схема объектно-ориентированного процесса создания проекта

Объект обладает свойствами, поведением и состоянием. Объекты с одинаковыми свойствами и поведением объединяются в классы. Объектно-ориентированный проект представляет собой совокупность описаний классов. Классы, в свою очередь, представляют собой описания свойств и поведения составляющих их объектов. Свойства представляются другими, как правило, более простыми объектами. Поведение описывается обменивающимися сообщениями объектами. При этом нет разделения между стадиями анализа и проектирования, что улучшает коммуникацию между проектировщиками, от начала и до конца проекта.

Таким образом, объектно-ориентированный подход в проектировании решает такие сложные проблемы, как:

- уменьшение сложности проекта;
- повышение надежности проекта;
- обеспечение возможности модификации отдельных компонентов проекта без изменения остальных его компонентов;
- расширяемость и модульность полученного проекта;

- обеспечение возможности повторного использования отдельных компонентов проекта (объекты являются независимыми благодаря инкапсуляции данных и методов).

Выводы

1) С увеличением объемов научно-технической информации особенно большую актуальность приобретает проблема обобщения накопленных знаний и реализации нового, отличного от существующего процедурного, подхода к проектированию и расчету электромеханических преобразователей энергии.

2) Недостатки процедурного подхода в проектировании состоят прежде всего в слабой формализации связей между этапами проектирования, отсутствием гибкости, нерациональным использованием предыдущих разработок.

3) При процедурном подходе к проектированию задача и полученные результаты отделены друг от друга полным циклом выполнения проекта; при объектно-ориентированном подходе сопоставление результатов с объектом находится на одном этапе выполнения с поставленными задачами проектирования.

4) Показаны главные преимущества объектно-ориентированного подхода в проектировании, приводящие к уменьшению сложности проекта, повышению его надежности, обеспечению возможности модификации отдельных компонентов проекта без изменения остальных его компонентов, а также повторному использованию, расширяемости и модульности полученного проекта.

Библиографический список

1. Шинкаренко В.Ф. *Основы теорії еволюції електромеханічних систем: [монографія]* / Шинкаренко В.Ф. – К.: Наукова думка, 2002. – 288с.

2. *Объектно-ориентированное проектирование электротепломеханических преобразователей* / Заблодский Н.Н., Шинкаренко В.Ф., Плюгин В.Е., Гринь Г.М. // *Техн. Електродинаміка.*–2008. – С. 106 - 112.

3. *Object oriented designing of electro-thermo-mechanical converters with optimum thermodynamic structure* / N.N. Zablodsky, V.E. Plyugin [etc.]// *A Dunajvarosi Foiskola Kozlemeyei.* - 2007. – P. 193 – 200.

4. *Объектно-ориентированное проектирование электромеханических преобразователей энергии с совмещенными функциями* / Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е. // *Сб. наук. праць ДонДТУ. Алчевськ: ДонДТУ, ВПЦ «Лад»*, Вип. 32. - 2011. - С. 359 - 365.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Лушиком В.Д.

*д.т.н. Мочалин Е.В.,
к.т.н. Мурга В.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОЙ РЕФРАКЦИИ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

У роботі представлені результати моделювання рефракції атмосфери в приземному шарі і вплив цієї рефракції на точність спостереження штучних супутників Землі. Показано, що при розрахунку координат положення супутників необхідно враховувати стан тракту розповсюдження лазерного випромінювання.

Ключові слова: *атмосферна рефракція, лазерна локація, тракт розповсюдження променя, штучні супутники Землі.*

В работе представлены результаты моделирования рефракции атмосферы в приземном слое и влияние этой рефракции на точность наблюдения искусственных спутников Земли. Показано, что при расчете координат положения спутников необходимо учитывать состояние тракта распространения лазерного излучения.

Ключевые слова: *атмосферная рефракция, лазерная локация, тракт распространения луча, искусственные спутники Земли.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Среди атмосферных факторов, влияющих на точность лазерной локации, обычно выделяют [1]:

- ослабление оптического сигнала за счет поглощения и рассеяния;
- рефракцию вследствие температурной стратификации земной атмосферы, проявляющейся в наличии нескольких протяженных слоев с разными законами изменения температуры от высоты;
- турбулентное искажение лазерных пучков в атмосфере.

Основными факторами ослабления излучения являются селективное поглощение газовыми компонентами, дисперсное рассеяние различной природы и молекулярное рассеяние.

Преломление лучей при прохождении через различные слои земной атмосферы, которое еще называют земной рефракцией, в отличие от других факторов, легче поддается оценке и коррекции, поскольку

температурная и плотностная стратификация атмосферы достаточно стабильны.

Анализ исследований и публикаций. При исследовании атмосферной рефракции одним из решений может рассматриваться моделирование гидродинамических процессов воздуха вблизи земной поверхности, из которого можно получить распределение скорости, давления и температуры вдоль возможных траекторий лазерного луча.

Математическое моделирование гидродинамических процессов в вязких сплошных средах основано на уравнениях Навье – Стокса или полученных на их основе для расчета осредненных характеристик турбулентных течений уравнениях Рейнольдса. Эти уравнения дополняются уравнением непрерывности сплошной среды, а при расчете совокупных гидродинамических и тепловых задач – уравнением энергии. Вывод и характеристика этих уравнений содержатся в специальных курсах по гидроаэродинамике и теплообмену (например, [2, 3]). Большинство известных решений этих уравнений относятся к техническим системам, где области течения имеют относительно небольшие размеры, а некоторые характерные особенности позволяют внести различного рода упрощающие предположения. В нашем случае область течения достаточно велика, а необходимость учета различных особенностей рельефа местности не позволяет выделить общих и характерных черт для всех возможных ситуаций. Поэтому не представляется возможным использовать известные аналитические результаты для классических течений. С другой стороны, в типичных задачах атмосферной аэродинамики рассматриваются явления больших масштабов, чем те, на которых сказываются локальные особенности рельефа. Поэтому развитые в этой области подходы так же не могут быть применены в наших целях.

Наиболее гибким и универсальным средством теоретического анализа в гидродинамике в настоящее время является численное моделирование, которое позволяет, в частности, относительно легко на одной и той же методологической основе и в рамках одного модельного подхода рассматривать похожие гидродинамические процессы в областях разной конфигурации и с разными граничными условиями. В настоящее время в вычислительной гидродинамике наибольшее развитие получил метод конечных объемов, основы которого изложены в работе [4]. В монографии [5] приведено обоснование основных схемных решений и подходов к аппроксимации в рамках конечно-объемной технологии, которые отражают современные достижения в области вычислительной гидродинамики. Хотя в указанной работе в качестве прикладного аспекта рассматривается другой класс гидродинамических задач, все основные результаты, касающиеся реализации численного решения, вполне могут быть применены в интересах настоящего исследования.

Постановка задачи. Целью данной работы является оценка возможного влияния атмосферной рефракции на точность наблюдения искусственных спутников Земли. Учитывая, что получить точную оценку аналитическими методами затруднительно, в качестве инструмента принят метод численного моделирования параметров атмосферы и тракта распространения луча лазера.

Изложение материала и его результаты. При моделировании турбулентных движений жидкости особую роль играет выбор модели турбулентности, которым определяется состав дополнительных дифференциальных уравнений и замыкающих алгебраических соотношений. Это весьма обширный и специфический вопрос, который мы здесь рассматривать не будем. Заметим только, что компактный, но весьма содержательный обзор в этом направлении содержится в [6].

В качестве модельной задачи будем рассматривать течение воздуха в плоской области, представленной на рис. 1. Для характерных размеров примем следующие значения: $H = 500$ м, $L = 500$ м, $h = 15$ м, $h_0 = 10$ м, $l_1 = 300$ м, $l_2 = 300$ м.

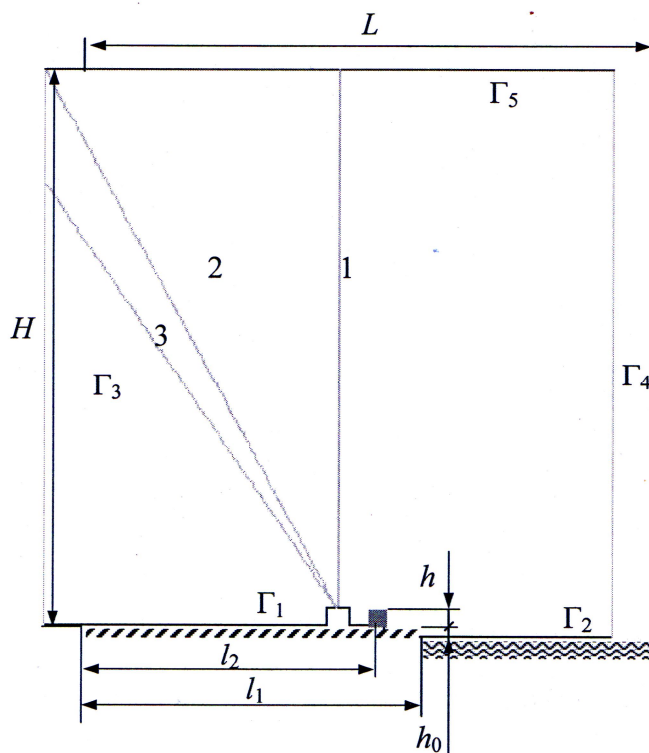


Рисунок 1 - Схема области течения

Цифрами 1,2,3 обозначены рассматриваемые в дальнейшем траектории лазерного луча, выходящего из верхней части здания станции, контуры которого представлены прямоугольником размерами 20×15 м.

Рассматривается случай расположения станции вблизи возвышенного на 10 м берега достаточно большого водоема.

В данном случае весьма затруднительно выставить строго обоснованные граничные условия, особенно на границах, проходящих по воздуху. Поэтому будем стараться определить такие условия, которые, несмотря на некоторую искусственность, не искажают основных локальных особенностей течения и правильно отражают природу его возникновения. Одной из характерных причин возникновения движения воздушных масс в рассматриваемой ситуации является свободная конвекция, обусловленная разностью температур водной поверхности и поверхности земли. Это особенно выражено в теплое время года в дневные часы и в тех случаях, когда поверхность земли не укрыта достаточно густой растительностью, а имеет открытые участки земной, песчаной либо скалистой поверхности большой суммарной площади. Твердые поверхности под солнечными лучами быстро прогреваются до достаточно высоких температур, в то время, как водная поверхность имеет достаточно стабильную температуру, которая в силу большой теплоемкости воды изменяется значительно медленнее.

Рассмотрим ситуацию, когда поверхность земли и здания (граница Γ_1) имеет температуру $T_1 = 313$ К, а поверхность воды (граница Γ_2) – температуру $T_2 = 298$ К. Для скорости на этих границах примем обычное для вязкой среды условие «прилипания» $V = 0$. На верхней границе области (Γ_5) будем считать постоянным статическое давление $p = 95314$ Па. Для втекающих через эту границу внутрь расчетной области воздушных масс будем считать температуру равной $T_5 = 293$ К. Для границ Γ_3, Γ_4 примем условие равенства нулю нормальных производных от всех расчетных величин. С физической точки зрения это соответствует гладким (без трения) адиабатическим стенкам. Это условие является в достаточной степени искусственным, однако позволяет ограничить расчетную область, не внося существенных искажений в свободноконвективное течение на удалении от этих границ.

Что касается выбора модели турбулентности, то стандартная $k - \varepsilon$ модель, обладающая хорошими вычислительными свойствами [6], в данном случае не менее оправдана, чем более современные и затратные модели.

На рисунке 2 представлены расчетные линии тока воздуха в рассматриваемой области. Над более нагретой твердой земной поверхностью возникают восходящие токи воздуха, а над более прохладной водной поверхностью имеют место нисходящие потоки. Их взаимодействие, как в рассматриваемом случае, может приводить к образованию локальных замкнутых рециркуляционных зон.

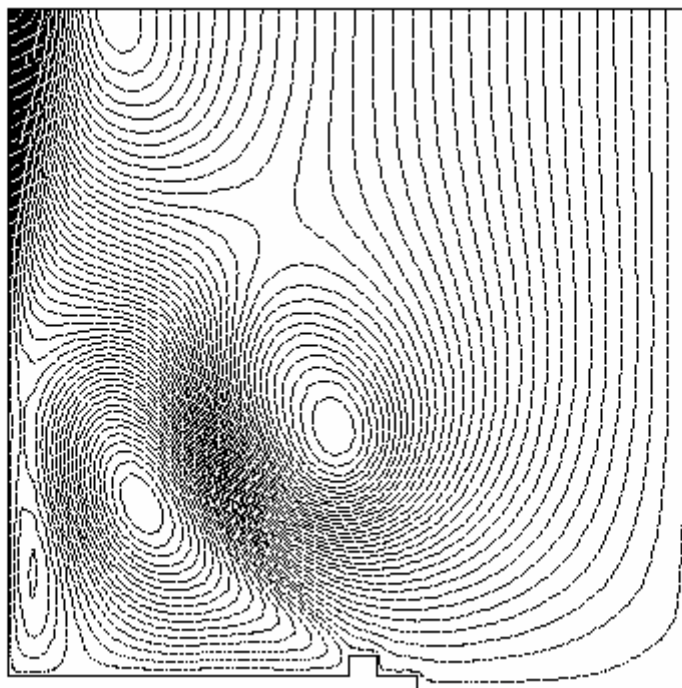


Рисунок 2 - Линии тока свободноконвективного движения воздуха

Характерной особенностью является натекание воздушных масс на берег со стороны воды. Наличие возвышенного берега и стен здания в такой ситуации приводят к отрыву набегающего потока от земной поверхности и образованию зон смешения слоев воздуха в приземной области над зданием. Если рассматривается здание лазерной локационной станции, то эти зоны смешения находятся в области распространения луча.

Резкое изменение температуры воздуха происходит в тонком слое вблизи нагретой поверхности. В большей части остальной области температура лишь на несколько десятых градуса выше значения $T_s = 293$ К. Однако отмеченная выше особенность, связанная с образованием отрывного следа проявляется еще и в появлении температурного шлейфа в зоне смешения потоков (рисунок 3). Хотя изменение температуры в области шлейфа лишь немного больше одного градуса, однако, этого обстоятельства, как будет показано далее, в совокупности с другими факторами будет достаточно, чтобы в определенной степени сказаться на рефракции лазерного луча.

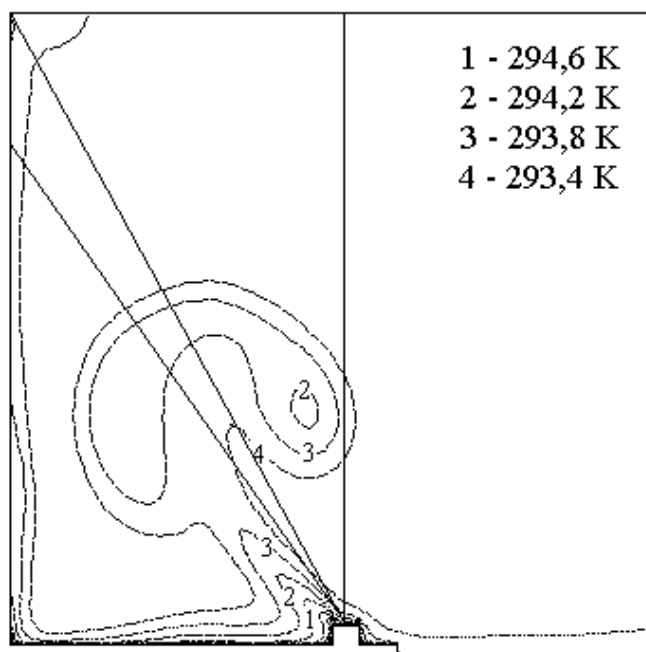


Рисунок 3 - Контурный график распределения температуры

Выводы. На основании полученных данных можно сделать вывод о необходимости учета атмосферной рефракции при расчете угловых координат спутников. Одним из решений проблемы является ввод данных метеонаблюдений в начале каждого сеанса локации как предположения с последующей оперативной коррекцией метео данных.

Библиографический список

1. Основы импульсной лазерной локации: учеб. пособие для вузов / В.И. Козинцев, М.Л. Белов, В.М. Орлов и др.; [под ред. В.Н. Рождественца]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 512 с.
2. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
3. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: в 10-ти т. / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986. – Т.6: Гидродинамика. – 736 с.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
5. Мочалин Е.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил / Е.В. Мочалин, А.А. Халатов. – Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2010. – Т.8: Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах. – 428 с.
6. Белов И.А. Модели турбулентности: [учебное пособие] / И.А. Белов. – Л.: ЛМИ, 1986. – 100 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Заблодским Н.Н.

д.т.н. Лущик В.Д.,
Іваненко В.С.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

ОДНОМАГНІТОПРОВІДНА СИНХРОННА КАСКАДНА МАШИНА З СУМІЩЕНИМИ ОБМОТКАМИ

Розглянуті конструктивні особливості одномагнітопровідних синхронних каскадних машин з суміщеними обмотками, приведені дані експериментальних досліджень, обґрунтовуються переваги багатополюсних синхронних каскадних машин перед тихохідними синхронними машинами серійного виконання.

Ключові слова: магнітопровід, синхронна каскадна машина, двигун, генератор, ротор, суміщені обмотки.

Рассмотрены конструктивные особенности одномагнитопроводных синхронных каскадных машин с совмещенными обмотками, приведены данные экспериментальных исследований, обосновываются преимущества многополюсных синхронных каскадных машин перед тихоходными синхронными машинами серийного исполнения.

Ключевые слова: магнитопровод, синхронная каскадная машина, двигатель, генератор, ротор, совмещенные обмотки.

Вступ. Синхронні каскадні машини (СКМ) відомі давно [1]. Синхронна каскадна машина – це дві електричні машини, які механічно та електрично з'єднанні (рисунок 1). Основна перевага їх – безконтактність. Однак із-за наявності двох магнітопроводів і чотирьох обмоток, по дві на кожний магнітопровід, масогабаритні та енергетичні показники цих двигунів значно гірші, ніж в традиційних синхронних машинах з контактними кільцями.

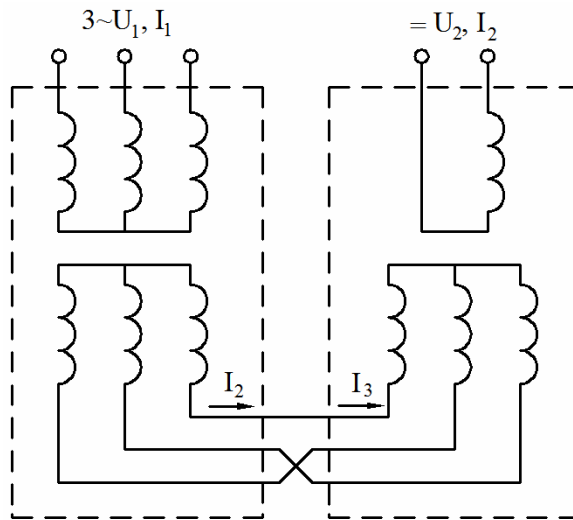


Рисунок 1 – Принципова електрична схема синхронної каскадної машини з двома магнітопроводами

Мета роботи. Багатополюсні синхронні двигуни і генератори зі швидкістю обертання 500 об/хв. і менше мають суттєві недоліки: складну конструкцію ротора, що складається з багатьох полюсів (не менше дванадцяти) з обмоткою збудження у вигляді котушок на кожному полюсі і додатково ще пусковою або демпферною обмоткою в полюсових накінецьниках, а також наявність контактних кілець і щіток для подачі в обмотку ротора струму збудження [2, 3]. Ще дуже актуальною проблемою в синхронних двигунах є їх погані пускові властивості. Тому важливо вишукувати способи усунення цих недоліків. Одним із таких способів, і, на наш погляд, єдино можливим є використання багатополюсних синхронних каскадних машин з суміщеними обмотками (рисунок 2) [5, 6].

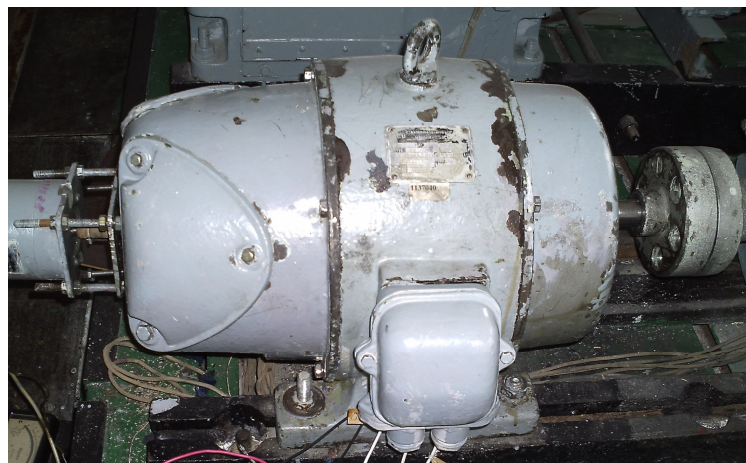
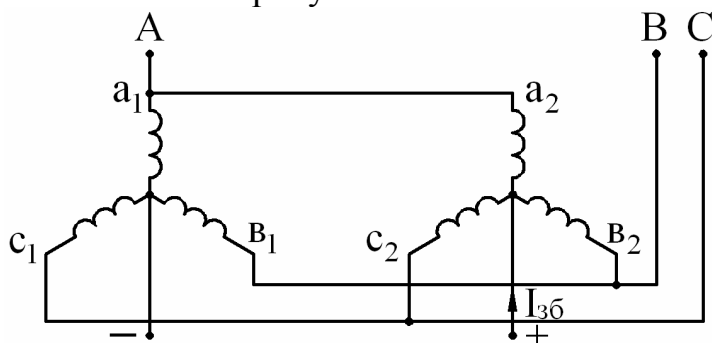


Рисунок 2 – Одномагнітопровідна синхронна каскадна машина з суміщеними обмотками

Матеріал і результати дослідження. Розроблені останнім часом суміщені обмотки [4] і удосконалені для використання в багатополюсних синхронних каскадних машинах з одним магнітопроводом [5, 6] дозволили створити нову одномагнітопровідну синхронну каскадну машину з суміщеними обмотками, зі швидкістю обертання 500 обертів за хвилину та менше.

Статор одномагнітопровідної синхронної каскадної машини з суміщеними обмотками технологічно не відрізняються від статорів синхронних чи асинхронних машин серійного виконання, а ротор при виготовленні значно спрощується. Додаткові переваги – це відсутність контактних кілець та щіток і набагато кращі пускові властивості.

Суміщення обмоток виконується таким чином. Трифазну $2p_1$ -полюсну обмотку статора першого каскаду, яка живиться від трифазної мережі, суміщують з однофазною $2p_2$ -полюсною обмоткою статора другого каскаду, яка живиться постійним струмом, що є струмом збудження. Суміщена трифазно-однофазна $2p_1/2p_2$ -полюсна обмотка в кожній фазі виконується із двох паралельних віток, які з'єднані в дві окремі паралельно з'єднані зірки з двома нульовими виводами з нейтральних точок. Принципова електрична схема такої статорної суміщеної обмотки показана на рисуюнок 3.



Рисуюнок 3 – Принципова електрична схема суміщеної статорної обмотки

При подачі струму збудження в нульові виводи утворюється нерухоме $2p_2$ -полюсне поле. Розроблені суміщені $2p_1/2p_2$ -полюсні обмотки, у яких співвідношення чисел полюсів $2p_1:2p_2=1:2$. Найменше можливе число полюсів $2p_1=4$. При цьому $2p_2=8$. При $2p_1=2$ і $2p_2=4$ в машині будуть виникати магнітні вібрації.

Перший варіант статорної суміщеної обмотки показаний на рисунку 4.

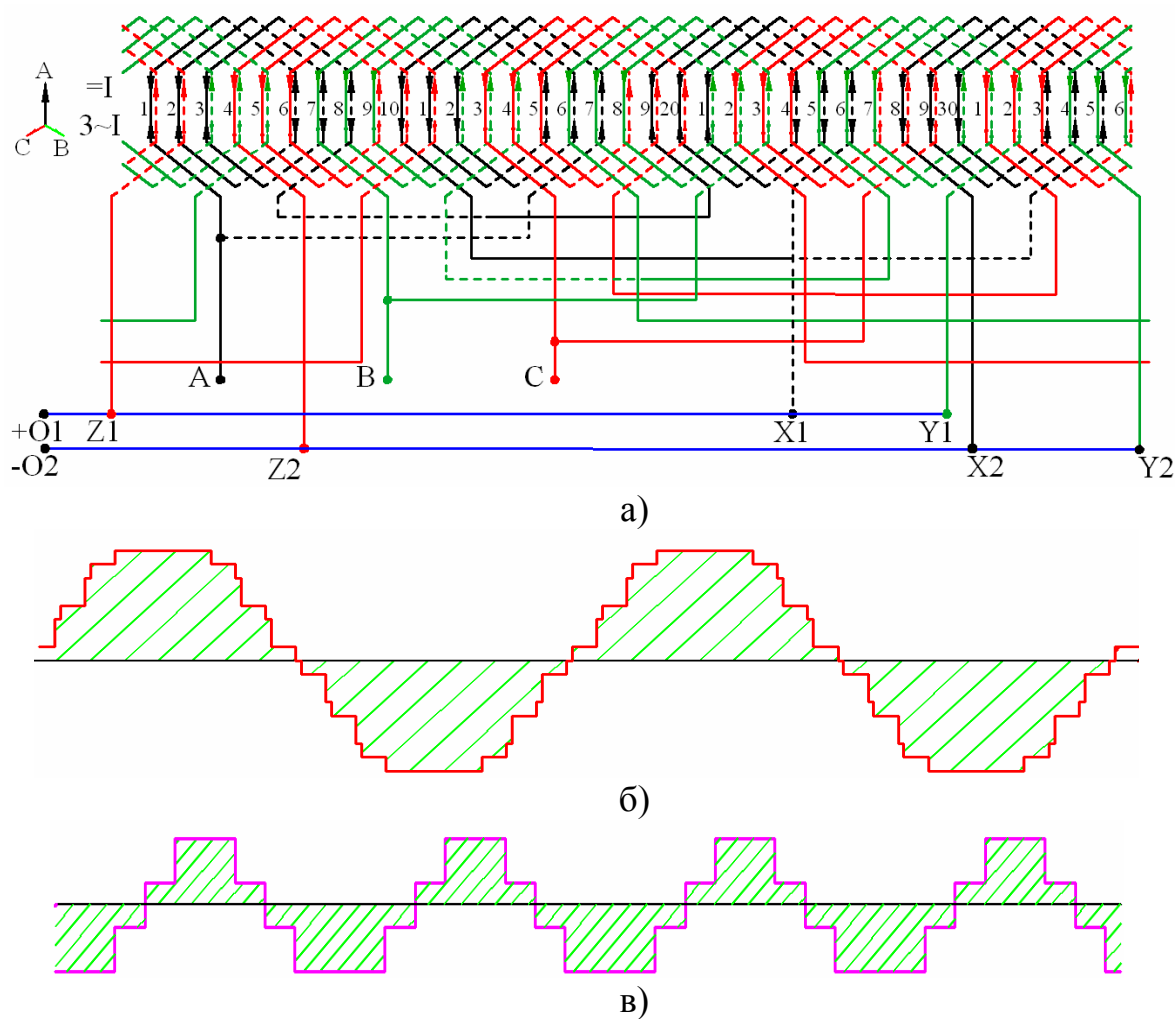


Рисунок 4 – Перший варіант статорної суміщеної обмотки $2p_1/2p_2=4/8$

а) електрична схема обмотки; б) МРС чотирьохполюсного змінного поля; в) МРС восьмиполюсного постійного поля

Роторна суміщена трифазна обмотка, що об'єднує дві трифазні роторні обмотки двох каскадів, повинна утворювати два магнітні поля числом полюсів $2p_1$ і $2p_2$, які обертаються в протилежних напрямках. Така суміщена обмотка теж розроблена з оптимальним співвідношенням обмоткових коефіцієнтів для $2p_1$ - та $2p_2$ -полюсного поля. Обмотка складається з окремих короткозамкнених котушкових груп. Для $2p_1=4$ та $2p_2=8$ число короткозамкнених котушкових груп дорівнює $N = p_1 + p_2 = 2 + 4 = 6$ (рисунок 5).

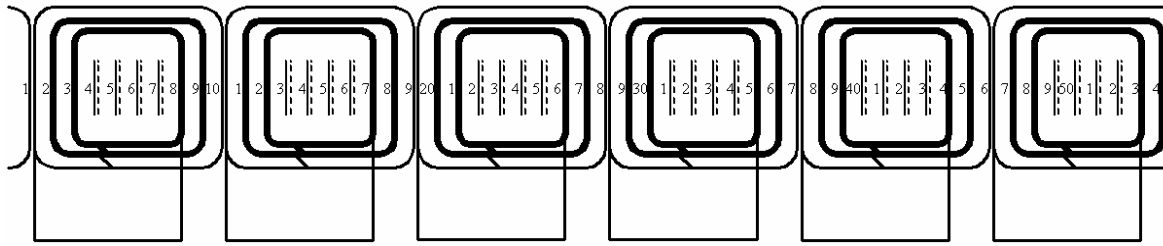


Рисунок 5 – Принципова електрична схема роторної суміщеної обмотки

При швидкості обертання, яка називається каскадною

$$n_k = \frac{60 f_1}{p_1 + p_2} = \frac{3000}{2 + 4} = 500 \text{ об/хв.}$$

$2p_2$ –полюсне поле, створене роторною обмоткою, буде нерухомим відносно статора. При подачі струму збудження $I_{зб}$ в обмотку статора виникає синхронний електромагнітний обертовий момент.

Фото ротора приведено на рисунку 6.

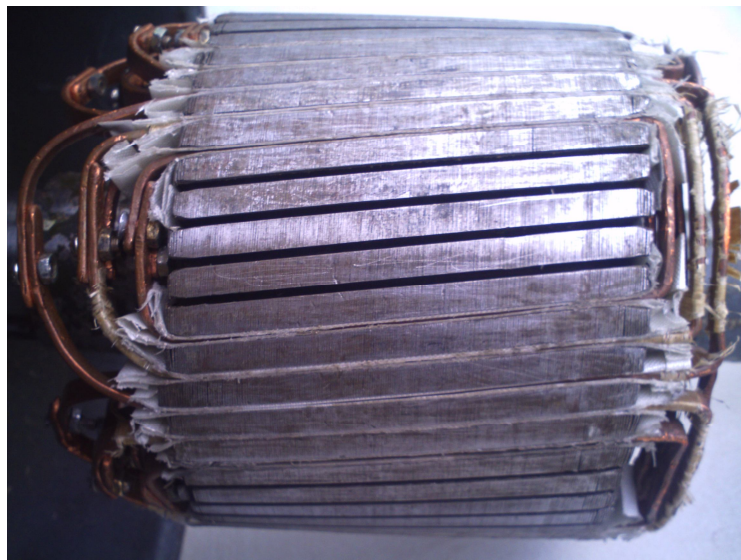


Рисунок 6 – Фото роторної суміщеної обмотки

Якщо розкласти МРС, що створюється роторною суміщеною обмоткою в ряд Фур'є, видно, що вона створює два магнітні поля, які обертаються в різних напрямках і з різною швидкістю.

Експериментальний синхронний каскадний двигун був виконаний на магнітопроводі довжиною $l_\delta = 107 \text{ мм}$, внутрішній діаметр статора $D = 154 \text{ мм}$, зовнішній діаметр статора - $D = 228 \text{ мм}$, $Z_1 = 36$, $Z_2 = 54$.

Було проведено дослідження двох варіантів статорної суміщеної обмотки в двигуновому та генераторному режимі роботи:

1) синхронної машини з $2p_1/2p_2$ -полюсною суміщеною обмоткою на статорі, де $2p_1=4$ – число полюсів, створюване трифазним струмом, і $2p_2=8$ – число полюсів, створюване постійним струмом збудження, що подається в нульові виводи статорної обмотки (рисунок 4);

2) синхронної машини з $2p_1/2p_2$ -полюсною суміщеною обмоткою на статорі, де $2p_1=8$; $2p_2=4$ (рисунок 7).

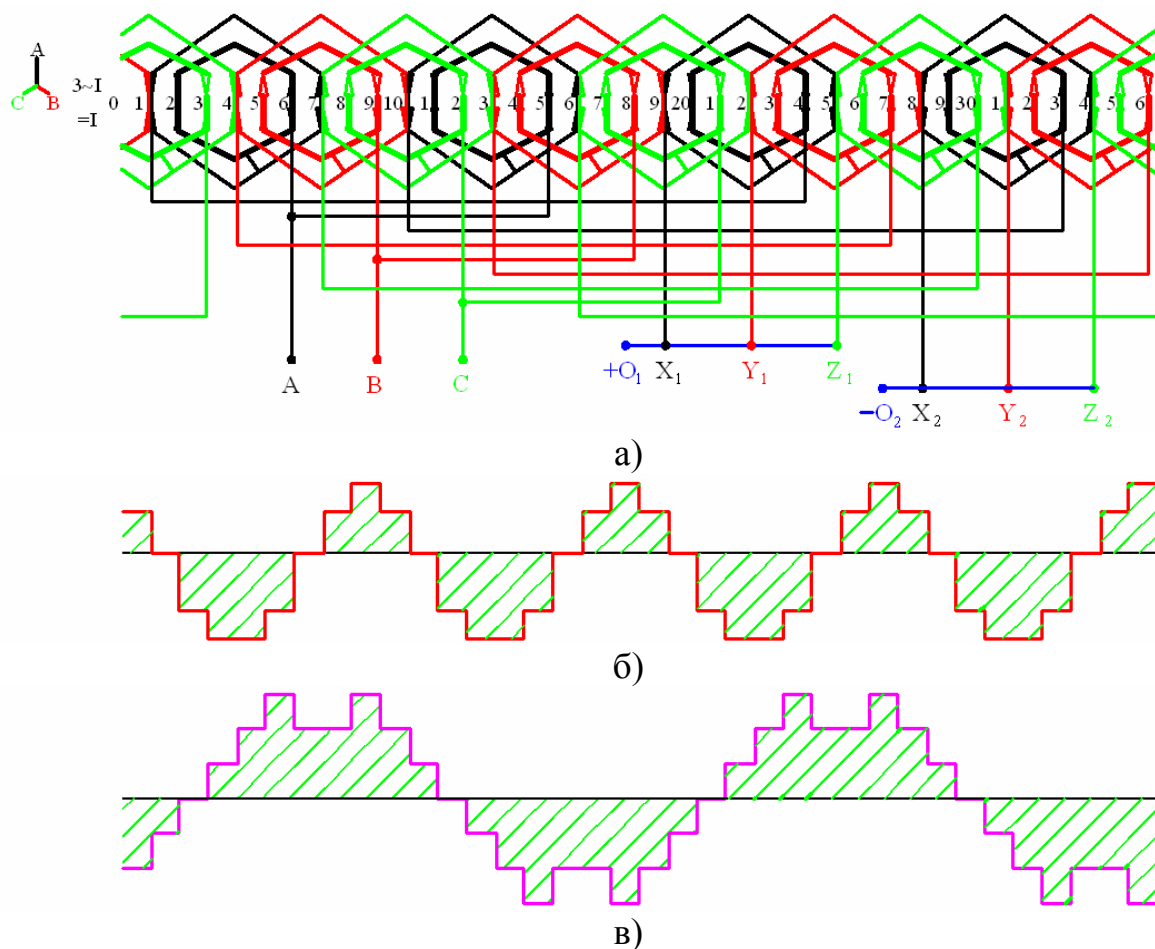


Рисунок 7 – Другий варіант суміщеної обмотки статора $2p_1/2p_2=8/4$

а) електрична схема обмотки; б) МРС восьмиполюсного змінного поля; в) МРС чотирьохполюсного постійного поля

Обмотка ротора в обох варіантах однакова, має 6 котушкових короткозамкнених груп і теж є суміщеною $2p_1/2p_2$ -полюсною обмоткою.

При порівнянні даних досліджень перший варіант виявився кращим. При однакових втратах корисна потужність на валу більша на 15% (таблиця 1).

Таблиця 1 – Експериментальні данні

Тип двигуна	U_1	I_1	P_1	$\cos\varphi$	P_2	ККД	$K_{об1}$
	В	А	Вт	в.з.	Вт	в.з.	в.з.
1-й варіант $2p_1=4$ $2p_2=8$	127	3,9	1075	0,71	770	0,716	0,739 0,844
2-й варіант $2p_1=8$ $2p_2=4$	220	1,9	934	0,74	668	0,715	0,925 0,538
серійний СД	220	2,1	1000	0,76	820	0,82	0,96

На теперішній час ведуться дослідження по удосконаленню та оптимізації обмоткових параметрів багатополюсних синхронних каскадних машин з суміщеними обмотками.

Одномагнітопровідні синхронні каскадні машини з суміщеними обмотками працюють також і в генераторному режимі і мають такі ж масогабаритні та енергетичні показники, як і в двигуновому режимі. Демпферна обмотка на роторі не потрібна, так як її роль виконує роторна суміщена обмотка.

Одномагнітопровідні синхронні каскадні машини з суміщеними обмотками можуть використовуватись і як генератори для гідроелектростанцій та вітроагрегатів і як синхронні двигуни для механізмів з важкими умовами пуску.

Висновки. Розроблено і досліджено одномагнітопровідні синхронні каскадні машини з суміщеними обмотками, які по масогабаритним і енергетичним показникам наближається до показників багатополюсних синхронних двигунів з контактними кільцями. Вони більш прості при виготовленні, безконтактні, мають набагато кращі пускові властивості.

Бібліографічний список

1. Красношанка М.М. Асинхронно-синхронные машины каскадного типа / Красношанка М.М. – Рига: Знание, 1966. - Т. 2. - С. 237-244. - (Труды Третьей Всесоюзной конференции по бесконтактным электрическим машинам).

2. Міліх В.І. Електротехніка та електромеханіка: [навч. посібник] / В.І. Міліх. – К.: Каравела, 2006. – 376 с.

3. Бородай В.А. Раціональні параметри і пускові властивості синхронних двигунів з важкими умовами пуску (привод гірничних машин): автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец.

05.09.01 "Електричні машини та апарати" / В.А. Бородай; Національний університет «Львівська політехніка». — Львів, 2009. — 20 с.

4. Луцик В. Д. Суміщені електричні машини та апарати / В.Д. Луцик. — К.: Техніка, 1993.—203 с. - (Мова рос.).

5. Луцик В. Д. Синхронний каскадний двигун з суміщеними обмотками / В.Д. Луцик, В.С. Іваненко, В.Л. Борзів // Електротехніка і електромеханіка. — Харків, 2011. — №1. - С. 31-32.

6. Луцик В.Д. Синхронний каскадний двигун / Збірник наукових робіт ДонДТУ. - Алчевськ, 2010. — №32. - С. 350-35.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Заблудським М.М.

*Мочалин А.Е.,
д.т.н. Мочалин Е.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ УПРАВЛЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ПАМЯТЮ В WIN32 ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ ТРАССЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Показана можливість суттєвого зниження обчислювальних витрат на обробку цифрових трасерних зображень за новим методом, що забезпечує більшу точність та менші вимоги до реєструючої апаратури. Результат досягається за рахунок оптимального керування віртуальною пам'яттю у сполученні зі структурною обробкою виключень в середовищі WIN32.

Ключові слова: *віртуальна пам'ять, обробка виключень, операційна система, трасерне зображення.*

Показана возможность существенного снижения вычислительных затрат на обработку цифровых трассерных изображений по новому методу, обеспечивающему большую точность и меньшие требования к регистрирующей аппаратуре. Результат достигается за счет оптимального управления виртуальной памятью в сочетании со структурной обработкой исключений в среде WIN32.

Ключевые слова: *виртуальная память, обработка исключений, операционная система, трассерное изображение.*

Введение. При выполнении фундаментальных и прикладных научных исследований, в процессе разработки новой техники и создания новых технологий большое значение имеет экспериментальное определение полей скорости текучих сред в различных областях. Одним из наиболее перспективных и интенсивно развивающихся подходов в этой области является цифровая трассерная визуализация, на которой, в частности, основан метод, получивший международное название Particle image velocimetry (PIV) [1,2]. Составной частью этого метода является компьютерная обработка цифровых изображений, получаемых фотографированием подсвеченного ярким световым лучом сечения измеряемого потока с подмешанными в него мелкими частицами – трассерами. Рассматриваются два кадра, соответствующие двум близким моментам времени. Базовым или стандартным в настоящее время принято считать

алгоритм обработки, основанный на разбиении всей области изображения на элементарные расчетные окна и вычислении кросс-корреляционной функции для каждого окна на первом кадре и соответствующего ему окна на втором кадре по формуле [1]:

$$R(m,n) = \frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N f_1(i,j) f_2(i+m,j+n)}{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N f_1(i,j) f_2(i,j)}, \quad (1)$$

где $f_1(i,j), f_2(i,j)$ – значения интенсивности пикселя с локальными координатами (i,j) на первом и втором кадрах соответственно; m,n – горизонтальное и вертикальное целочисленные смещения пары окон друг относительно друга.

Значения m,n , соответствующие максимуму функции (1), определяют целочисленное смещение элементарного окна разбиения, по которому вычисляется вектор скорости в точке, совпадающей с центром окна. Путем интерполяции значений кросс-корреляционной функции в соседних точках определяется дробная часть смещения в долях пикселя. Схема алгоритма, заимствованная из [3], представлена на рисунке 1.

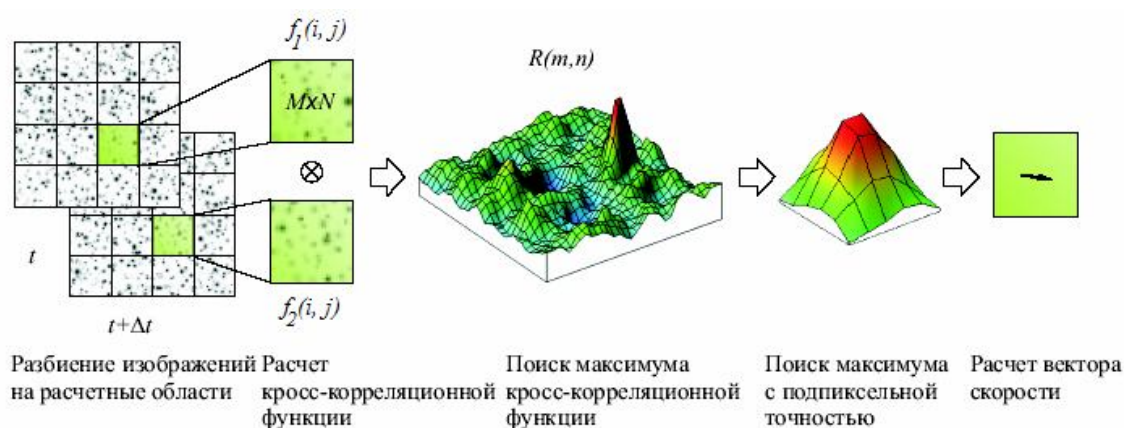


Рисунок 1 – Схема стандартного кросс-корреляционного алгоритма определения векторов скорости по изображениям трассеров [3]

Одним из главных недостатков стандартного алгоритма, как показано в работах [4,5], является низкая точность при анализе потоков с

большими локальными градиентами скорости. В этом случае область, представленная на первом кадре прямоугольным элементарным окном, заметно деформируется и на втором кадре уже не представима с достаточной точностью прямоугольным окном той же формы, смещенным относительно исходного положения на определенную величину. В то же время стандартный алгоритм не учитывает деформации элементарных окон. В полной мере эта проблема еще не нашла общепринятого решения.

В [4,5] предложен итерационный алгоритм, предусматривающий построение реконструированного кадра на основе первого из двух последовательных снимков и текущего приближения поля скоростей. Уточнение значений скорости осуществляется путем сравнения реконструированного кадра и второго из имеющихся изображений. Этот метод, среди прочих преимуществ, учитывает наличие градиентов скорости во всей области, что отражается при построении реконструированного кадра. Однако компьютерная реализация нового метода связана с существенно большими требованиями к вычислительным ресурсам, чем реализация стандартного кросс-корреляционного алгоритма. Так, в работе [6], посвященной описанию близкого по идеологии алгоритма, также учитывающего деформацию исходного шаблона, приводятся данные о том, что затраты машинного времени на обработку одной пары снимков, при использовании APOLLO – WORKSTATION DN 10000 (с производительностью в 20 раз большей, чем у персональных компьютеров в 1993 г.), составили 12 суток. Даже с учетом прогресса компьютерной техники за 17 лет, использование только лишь новой аппаратной платформы не позволит свести затраты до такого уровня, который необходим для реализации PIV – исследований турбулентных течений, где необходима обработка большого числа последовательных пар снимков.

Следовательно, прогресс, основанный на реализации нового метода, может быть достигнут на основе оптимизации алгоритма его реализации в совокупности с использованием средств системной поддержки распределения ресурсов, предоставляемых пользователям разработчиками современных операционных систем.

Целью настоящей работы является оптимизация алгоритма обработки цифровых трассерных изображений по методу построения реконструированного кадра с применением развитых способов управления виртуальной памятью в среде WIN32.

Основные результаты. Согласно [4,5], Реконструированное изображение строится на основе первого из двух последовательных кадров путем определения смещения каждого пикселя трассерного изображения по следующим формулам:

$$dx_{ij}^k = X_1^k(1-\xi_1)(1-\xi_2) + X_2^k\xi_1(1-\xi_2) + X_3^k\xi_1\xi_2 + X_4^k\xi_2(1-\xi_1), \quad (2)$$

$$dy_{ij}^k = Y_1^k(1-\xi_1)(1-\xi_2) + Y_2^k\xi_1(1-\xi_2) + Y_3^k\xi_1\xi_2 + Y_4^k\xi_2(1-\xi_1), \quad (3)$$

где dx_{ij}^k, dy_{ij}^k - соответственно горизонтальное и вертикальное перемещение пикселя с координатами i, j , принадлежащего элементарному окну разбиения с номером k , между первым и вторым кадрами; $X_1^k, X_2^k, X_3^k, X_4^k, Y_1^k, Y_2^k, Y_3^k, Y_4^k$ - значения горизонтальных и вертикальных проекций векторов перемещения в угловых точках окна k (рисунок 2).

Нормированные локальные координаты пикселя, в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 2, определяются следующим образом:

$$\xi_1 = \frac{i}{M}, \xi_2 = \frac{j}{N}. \quad (4)$$

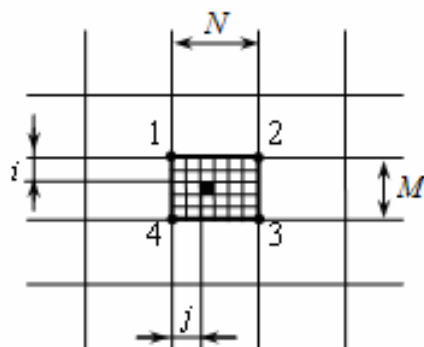


Рисунок 2 – Элементарное окно разбиения на первом кадре

Поскольку перемещения пикселей, определяемые выражениями (2) – (4), являются дробными, то интенсивность каждого смещенного пикселя распределяется по четырем смежным пикселям реконструированного кадра. В итоге, для определения интенсивности пикселя (p, q) реконструированного кадра принято

$$f_r(p, q) = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f_1^k(i, j)(S_{pq})_{ij}^k}{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (S_{pq})_{ij}^k}, \quad (5)$$

где $(S_{pq})_{ij}^k$ – площадь пересечения пикселя первого кадра с координатами i, j с пикселем p, q на реконструированном кадре, K – количество элементарных окон разбиения рассматриваемой области. Не будем здесь подробно останавливаться на вычислении площадей $(S_{pq})_{ij}^k$, необходимые формулы приведены в работе [5].

В соответствии с рассматриваемым подходом уточнение значений перемещений X_k, Y_k для всех узловых точек k (общим числом $K1$) осуществляется путем минимизации функции ошибки методом градиентного спуска.

$$E(X_1, X_2, \dots, X_{K1}, Y_1, Y_2, \dots, Y_{K1}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (f_2(i, j) - f_r(i, j))^2}{\left(\max_{i,j} (f_2(i, j) - f_r(i, j))\right)^2}} \quad (6)$$

При этом на каждом шаге итерации требуется многократный пересчет реконструированного кадра на основе формул (2)...(5) с определением соответствующей ошибки по формуле (6), что необходимо для вычисления проекций градиента функции ошибки. Однако, при каждом таком пересчете изменяется только одно из узловых значений проекций перемещения. В целях сокращения объема вычислений следует не проводить их каждый раз для всей области, а в каждом случае определять зону влияния измененного узлового значения и выполнять локальный пересчет реконструированного кадра только в пределах этой зоны влияния. Это один из основных резервов сокращения времени счета, если не считать распараллеливания вычислений, что является темой отдельного исследования.

Кроме времени вычислений рассматриваемая задача предъявляет большие требования и к объему памяти для хранения данных и промежуточных результатов. При размерах цифрового изображения в несколько мегапикселей, что характерно для современной практики применения метода PIV, без тщательного анализа формы представления промежуточных данных (структуры используемых массивов) легко можно прийти к ситуации нехватки физической памяти, либо к замедлению работы с памятью из-за слишком частого обращения к страничному файлу (файлу подкачки). Однако, отмеченное выше обстоятельство, связанное с тем, что при каждом из огромного числа пересчетов ре-

конструированного кадра изменяется только его небольшая область, позволяет экономить и память. Для этого нужно динамически выделять только такой ее объем, который необходим для сохранения изменений в локальной области реконструированного кадра и для сохранения ее исходного состояния. При этом каждый раз текущая локальная область, претерпевающая изменения, не состоит из одной непрерывной группы пикселей подряд расположенных в единой сквозной нумерации. Поэтому, для того, чтобы в процессе вычислений оценивать требуемые объемы динамически выделяемой памяти и использовать выделенные массивы в процессе расчета, необходимы дополнительные вычисления, связанные с определением размеров массивов для промежуточных результатов и для установления соответствия в нумерации изменяемых пикселей в пределах всего реконструированного кадра и рассматриваемой локальной области. Эти вычислительные затраты заметно сказываются на времени счета.

В такой ситуации можно существенно оптимизировать вычислительный процесс за счет использования развитых механизмов управления виртуальной памятью, реализованных в ядре WIN 32 в виде системной поддержки пользователей.

Программа существенно упрощается, а ее быстродействие повышается, если при каждом из многочисленных пересчетов интенсивности отдельных пикселей реконструированного кадра мы будем идентифицировать каждый из них в единой общей нумерации, относящейся ко всему кадру, например, через индексы i, j . Но тогда, на первый взгляд, нам необходимо каждый раз выделять память для всего массива (обозначим его F_r) размером $M1 \times N1$ ($M1, N1$ – размеры кадра по вертикали и горизонтали), в то время, как работа будет происходить только с небольшой частью его элементов. Ситуацию можно изменить, используя то обстоятельство, что в WIN32 реализовано разделение операций резервирования регионов виртуальной памяти и передачи этим регионам (или, что существенно, их частям-блокам) физической памяти в страничном файле. Особую гибкость этот механизм приобретает в сочетании со структурной обработкой исключений (SEH), возможность которой заложена в операционной системе (ОС) и поддерживается на уровне компиляторов (в частности, Microsoft Visual C++).

Рассмотрим наиболее характерную операцию записи нового значения `new_value` интенсивности пикселя (0...256) в элемент массива $F_r[i, j]$. Сначала мы резервируем регион виртуальной памяти достаточный для размещения всего массива $F_r[M1, N1]$

...

```

        PBYTE      pF_r      =(PBYTE)      VirtualAlloc(NULL,
(SIZE_T)M1*N1,
        MEM_RESERVE, PAGE_READWRITE);
...

```

При этом физическая память региону не передается, а только активируется диапазон виртуального адресного пространства размером $M1 \times N1$, увеличенный для кратности размеру страницы памяти (4 Кб для процессоров Intel).

Обращение к элементу $F_r[i, j]$ оформляем следующим образом (приведем пример для случая записи):

```

...

__try
{
    *(pF_r+i*N1+j) = (BYTE) new_value;
}

__except (EXCEPTION_EXECUTE_HANDLER)
{
    VirtualAlloc((PVOID)(pF_r+i*N1+j),
4*1024, MEM_COMMIT, PAGE_READWRITE);
    *(pF_r+i*N1+j) = (BYTE) new_value;
}

...

```

Синтаксис структурной обработки исключений основан на использовании блоков *try-except*, поддерживаемых Windows совместимыми C++ компиляторами. В приведенной выше конструкции первое обращение к элементу массива осуществляется в блоке *try*. В том случае, если физическая память по указанному адресу уже передана ранее, присвоение выполнится успешно и блок *except* не будет выполняться. Если же физическая память по этому адресу еще не выделена, выполнение этой команды вызовет процессорное исключение и система, при значении фильтра `EXCEPTION_EXECUTE_HANDLER` (-1), передаст управление командам, расположенным в блоке *except* и представляющих собой обработчик исключения. Обработка исключения включает-

ся в системном вызове `VirtualAlloc`, который при указанном значении аргументов приведет к выделению физической памяти блоку минимального размера (одна страница), содержащему необходимый адрес. При этом, начальный адрес блока будет равен ближайшему меньшему значению, кратному размеру страницы. После передачи блоку физической памяти реализуется повторное обращение по требуемому адресу, которое уже будет успешным.

Хотя выделенный блок памяти имеет размер существенно больший необходимого для размещения 1-го элемента массива (в нашем случае 1 б), однако в этом есть определенное преимущество. Вероятность того, что в ближайшее время будет осуществляться обращение по адресам, близким к рассматриваемому в данный момент адресу, весьма велика. И в этом случае первое обращение к памяти не вызовет исключения и частота вызова функции `VirtualAlloc` существенно снизится, что ускоряет работу программы. Более детально затронутые вопросы управления виртуальной памятью и реализации SHE рассмотрены в работе [7].

Выводы. Рассмотренный способ динамического использования памяти в Win32 позволяет эффективно организовать работу с данными, организованными в виде большого количества массивов большой размерности в ситуации, когда в большинстве случаев приходится работать с небольшими участками этих массивов. Резервирование регионов виртуального адресного пространства под целые массивы снимает проблему обеспечения соответствия элементов массивов различной структуры и размерности. Использование структурной обработки исключений оптимизирует адресное выделение физической памяти для локальных участков рабочих массивов. В результате значительно ускоряется работа программы, что, в свою очередь, позволяет на несколько порядков уменьшить продолжительность обработки изображений в методах цифровой трассерной визуализации с построением и оптимизацией реконструированного кадра. Этот метод обеспечивает большую точность определения скоростей, чем стандартная кросс-корреляция, и позволяет использовать менее дорогое и более доступное оборудование для регистрации изображений трассеров.

Дальнейшее повышение быстродействия программ обработки цифровых изображений, основанной на предложенном методе, может быть реализовано на основе реализации параллельных вычислений. При этом наиболее перспективным представляется использование параллельных вычислений на графических процессорах, в частности, на программной платформе CUDA.

Библиографический список

1. Willert C.E. *Digital particle image velocimetry* / C.E. Willert, M. Charib // *Exp. Fluids*. – 1991. – V. 10. – P. 181 – 193.
2. Raffel M. *Particle Image Velocimetry. A practical guide* / M. Raffel, C.E. Willert, S.T. Wereley, J. Kompenhans. – Springer, 2007. – 448 pp.
3. Токарев М.П. Разработка алгоритмов и программного обеспечения для обработки изображений в методах цифровой трассерной визуализации: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / М.П. Токарев. – Новосибирск, 2010. – 190 с.
4. Мочалин А.Е. Информационная технология обработки трассерных изображений, основанная на построение реконструированного кадра / А.Е. Мочалин // *Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики: XI – я Всероссийская школа – конференция молодых ученых: тезисы докладов.* – Новосибирск, 2010. – С. 66.
5. Мочалин А.Е. Информационная технология трассерной визуализации, основанная на оптимизации реконструированного изображения / А.Е. Мочалин // *Науково - технічний журнал «Радіoeлектронні і комп'ютерні системи».* – 2010. – №4. – С. 174 – 178.
6. Huang H.T. *Limitation and improvement of PIV* / H.T. Huang, H.E. Fiedler, J.J. Wang // *Exp. in Fluids*. – 1993. – Vol. 15, №4–5. – P. 263 – 273.
7. Рихтер Д. *Windows для профессионалов: пер. с англ.: Создание эффективных Win32 – приложений с учетом особенностей 64 – разрядной версии Windows* / Д. Рихтер. – 4 - е изд. – СПб.: Питер4 М.: «Русская редакция», 2001. – 723 с.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. Паэрандом Ю.Э.

*Гречко М.В.
(ГФ УІПА, м. Стаханов, Україна,
ngretchko@ukr.net)*

КОМУТАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В ВЕНТИЛЬНОМУ ГЕНЕРАТОРІ ІНДУКТОРНОГО ТИПУ З СУМІЩЕНИМИ ОБМОТКАМИ

Розглянуто комутаційні процеси в якірній обмотці, що виникають при роботі вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками.

Ключові слова: індукторний генератор, суміщена обмотка, якірна обмотка, комутація, комутуючі діоди.

Рассмотрены коммутационные процессы в якорной обмотке, возникающие при работе вентильного генератора индукторного типа с совмещенными обмотками.

Ключевые слова: индукторный генератор, совмещенная обмотка, якорная обмотка, коммутация, коммутирующие диоды.

Актуальність проблеми. З огляду на важкі умови експлуатації тракторів (вібрації, вологість, запыленості) виготовляють безконтактні генератори індукторного типу [1].

Завдяки безконтактності конструкції надійність їх роботи збільшується. Застосування на автомобілях існуючих конструкцій індукторних генераторів стримується через їх невисокі питомі показники. Через наявність постійної складової магнітної індукції їх вага порівняно з контактними синхронними генераторами в два рази більша [2, 3].

Покращення питомих показників індукторних генераторів неможливе без вирішення принципово нових задач. Найбільшого ефекту на сучасному етапі розвитку машинобудування можна досягти шляхом суміщення магнітопроводів та обмоток [4]. Експериментальні дослідження індукторних генераторів з суміщеними обмотками показують, що їх корисна потужність завдяки суміщенню обмоток збільшується в 1,7 рази (наближаючись до серійних синхронних генераторів з обмоткою на роторі та контактними кільцями за питомими показниками) [5].

Одним з варіантів вирішення цієї проблеми є комбіноване (суміщене) використання якірної обмотки генератора (рисунки 1, 2), що дозволяє підвищити питомі показники до рівня синхронних контактних генераторів. Комутуючі діоди VD1–VD3, які включені послідовно з фазами якірної

обмотки, дозволяють використати напівхвилю якірного струму для створення додаткової МРС, що збігається по фазі з МРС відповідної обмотки контуру збудження. Це збільшує результуючий магнітний потік, і, відповідно, ЕРС. Під час другої напівхвилі якірного струму ці діоди відключають котушку робочої обмотки від навантаження [6].

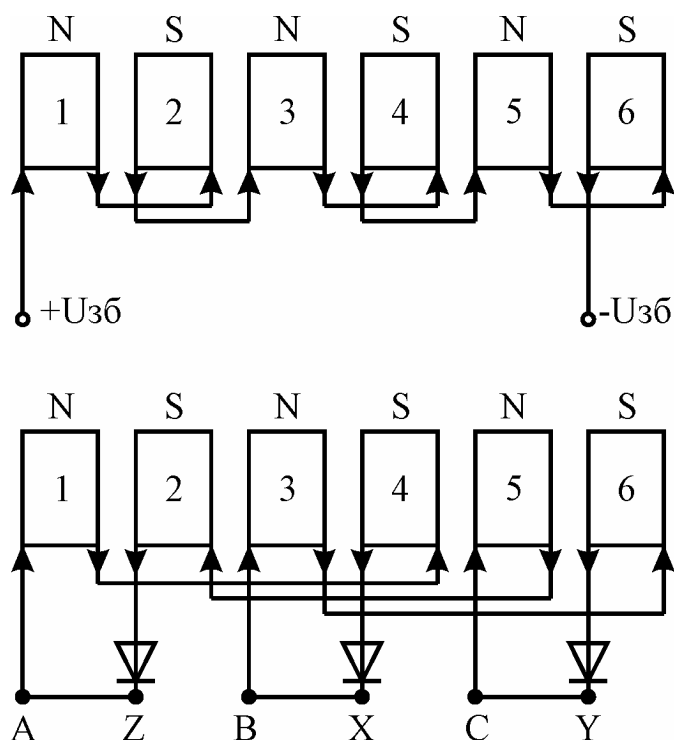


Рисунок 1 – Схема вентильного генератора індукторного типу

Мета роботи - визначення особливостей комутаційних процесів при роботі вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками на випрямлене навантаження активного типу.

Викладення основного матеріалу.

Вентильний генератор індукторного типу з суміщеними обмотками являє собою трифазну машину змінного струму, що працює на випрямлене навантаження. Схема вмикання генератора приведена на рисунку 2.

Кожна фаза генератора складається із двох однакових котушок, розташованих на двох діаметрально протилежних зубцях статора. Обмотка статора з'єднана в трикутник для забезпечення замкнутого контуру по напрямку односпрямованого струму, що має місце в контурі трикутника через включення в кожен фазу якірної обмотки діода. Односпрямований струм створює магнітний потік, що збігається за напрямком з потоком обмотки збудження на кожному зубці. Таким чином, струм кожної фази обмотки статора, що пульсує, створює додатковий магнітний потік, викликаючи підмагнічуючий ефект, що, як показує експери-

ментальне дослідження, дозволяє збільшити вихідну напругу генератора, а значить, і його потужність.

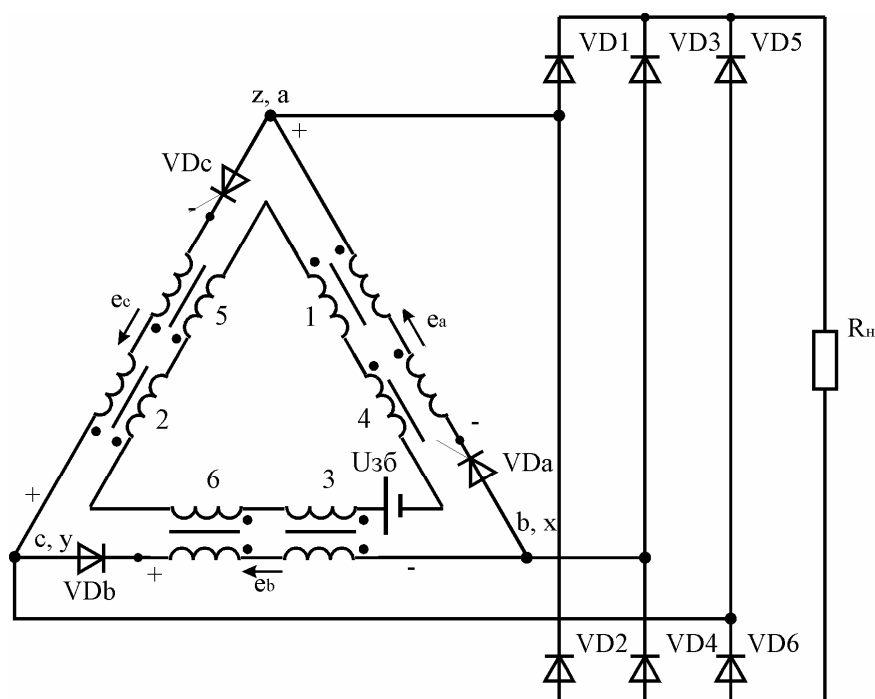


Рисунок 2 – Схема вмикання генератора

Обмотка статора генератора включена на трифазний мостовий випрямляч (міст Ларіонова), зібраний на некерованих діодах. У якості навантаження використовуються або активний опір, або акумулятор, як джерело проти-ЕРС.

Розглянемо особливості роботи генератора на випрямлене навантаження активного характеру.

Діаграма роботи вентилів моста приведена на рисунку 3, де показані фазні ЕРС генератора та інтервали роботи кожного вентиля випрямного моста.

В інтервалі часу $\gamma_e = 0 \div \frac{\pi}{3}$ працює пара вентилів, один із яких має найбільший позитивний потенціал, другий найменший негативний потенціал. Для цього інтервалу це вентиль VD5 фази *c* і вентиль VD4 фази *b*. З урахуванням вентилів у фазах генератора для цього моменту часу відкритий вентиль VDa фази *a* і вентиль VDc фази *c*, вентиль VDb фази *b* у перебуває під дією негативного ЕРС і він закритий. Для цього моменту контур замикання струму VD5- R_n -VD4-фаза *a* – фаза *c*, тобто працюють дві фази *a* та *c*, включені послідовно.

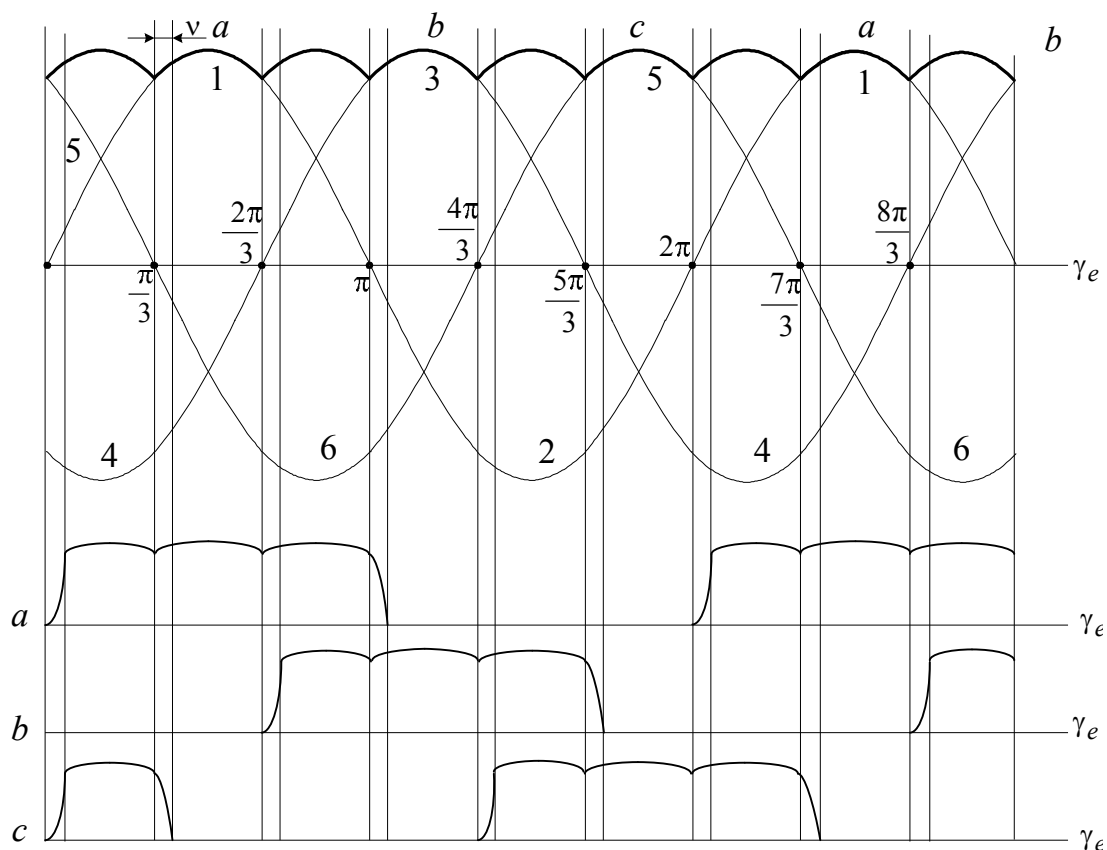


Рисунок 3 – Діаграма роботи вентилів випрямного моста

У припущенні синусоїдальної ЕРС у фазах генератора в момент $\gamma_e = \frac{\pi}{3}$ відбувається комутація вентилів, вентиль VD5 відключається, вентиль VD1 вступає в роботу. У результаті фаза *c* відключається і продовжує працювати фаза *a*. Тривалість комутації визначається кутом ν . При більш детальному розгляданні момент початку комутації вентиля VD5 необхідно визначати по рівності нулю ЕРС фази *C*.

Для інших моментів часу черговість роботи фаз показана на рисунку 3, де також наведено характер зміни струму у фазах генератора.

Наявність вентилів у фазах генератора виключає появу знакозмінного струму, і струм має односпрямований характер, тобто прийнята схема включення обмоток генератора аналогічна схемі однонапівперіодного випрямлення. Відсутність струму у фазах на певних інтервалах часу приводить до погіршення використання генератора. Жирними лініями на рисунку 3 показаний характер зміни напруги на навантаженні в режимі холостого ходу.

Режим роботи генератора на випрямне навантаження можна розглядати як почергове підключення однієї або двох фаз обмотки статора

до навантаження. Повний цикл роботи можна розбити на шість проміжних станів схеми генератора, після чого цикл повторюється.

Для проміжку часу $\gamma_e = 0 \div \frac{\pi}{3}$ розрахункова схема генератора, що включає робочий режим і режим комутації, приведено на рисунку 4.

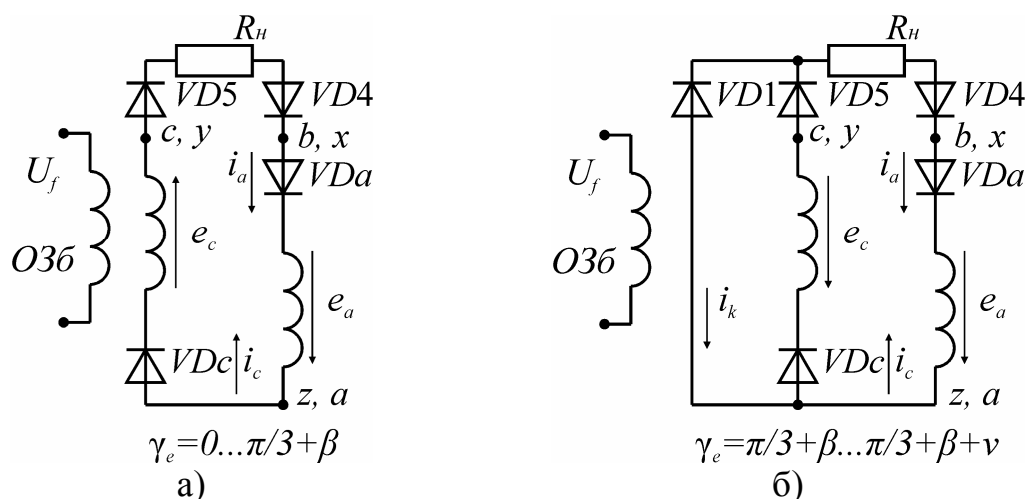


Рисунок 4 – Миттєві схеми роботи генератора на інтервалі першого циклу

На інтервалі часу $\gamma_e = 0 \div \frac{\pi}{3} + \beta$ працюють дві фази a та c , які включені послідовно (рисунки 4,а) на навантаження.

При синусоїдальних ЕРС у фазах генератора в момент часу $\gamma_e = \frac{\pi}{3}$ починається комутація вентилів, вентиль $VD5$ відключається, а вентиль $VD1$ включається до роботи. У процесі комутації фаза c відключається і продовжує працювати фаза a . Але за рахунок впливу змінної складової струму обмотки збудження ЕРС фази несінусоїдальна. Тоді початком комутації необхідно рахувати момент $\gamma_e = \frac{\pi}{3} + \beta$, коли ЕРС фази C дорівнює нулю.

Комутація закінчується в момент $\gamma_e = \frac{\pi}{3} + \beta + \nu$ і починається другий цикл роботи генератора, при якому продовжує працювати фаза a .

Схема для режимів роботи генератора протягом другого циклу наведена на рисунку 5.

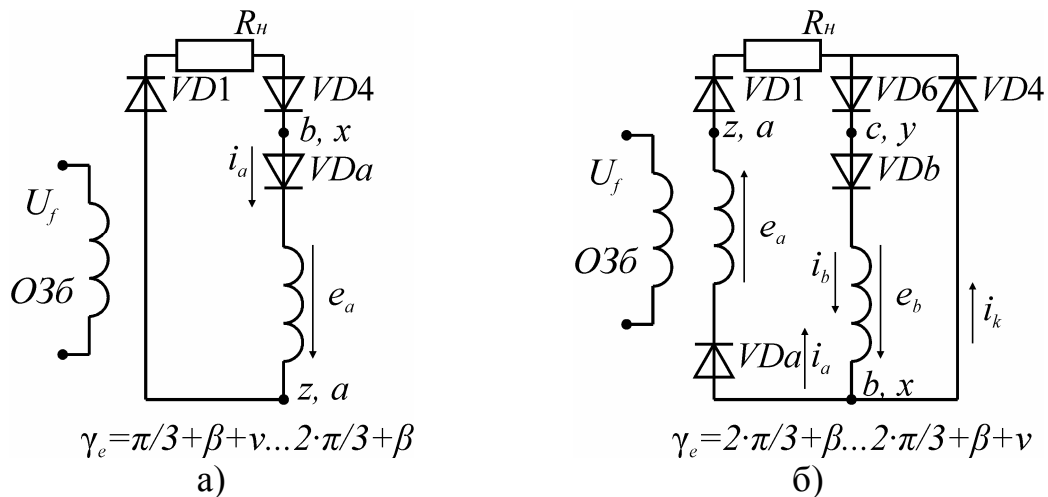


Рисунок 5 – Миттєві схеми роботи генератора на інтервалі другого циклу

Розрахункова схема генератора для робочого режиму другого циклу, коли працює фаза a , наведена на рисунку 5,а.

Кінець робочого режиму другого циклу визначається моментом часу $\gamma_e = \frac{2\pi}{3} + \beta$, коли ЕРС фази b дорівнює нулю.

У режимі комутації вентиль $VD4$ відключається, включається вентиль $VD6$ і приєднує фазу b до навантаження, надалі працюють фази a і b , включені послідовно. Миттєва схема для цього режиму наведена на рисунку 5,б.

Тривалість робочого режиму третього циклу роботи генератора визначається проміжком часу $\gamma_e = \frac{2\pi}{3} + \beta + v \div \pi + \beta$. Миттєві схеми робочого та комутаційного режимів наведені на рисунку 6.

У робочому режимі навантаження живлять дві фази a та b , включені послідовно (рисунку 6, а).

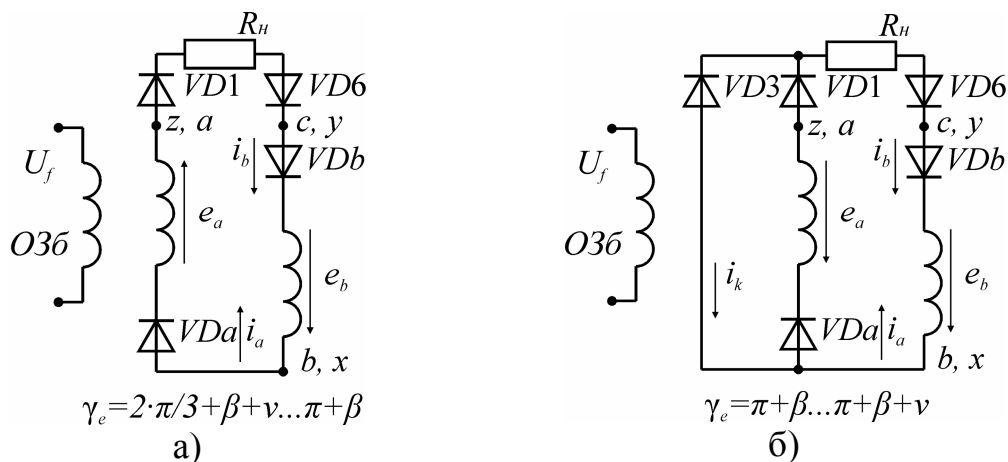


Рисунок 6 – Миттєві схеми роботи генератора на інтервалі третього циклу

Кінець циклу в момент часу $\gamma_e = \pi + \beta$. Момент початку комутації визначається рівністю нулю ЕРС фази. В інтервалі комутації $\gamma_e = \pi + \beta \div \pi + \beta + \nu$ відключається вентиль $VD1$, підключається до роботи вентиль $VD3$ і надалі продовжує працювати фаза b . Миттєва схема для цього режиму наведена на рисунку 6, б. Кінець комутації при $i_a = 0$.

Робочому режиму генератора в четвертому циклі відповідає проміжок часу $\gamma_e = \pi + \beta + \nu \div \frac{4\pi}{3} + \beta$, комутаційному режиму

$\gamma_e = \frac{4\pi}{3} + \beta \div \frac{4\pi}{3} + \beta + \nu$. Миттєві схеми роботи генератора для зазначених режимів наведені на рисунку 7.

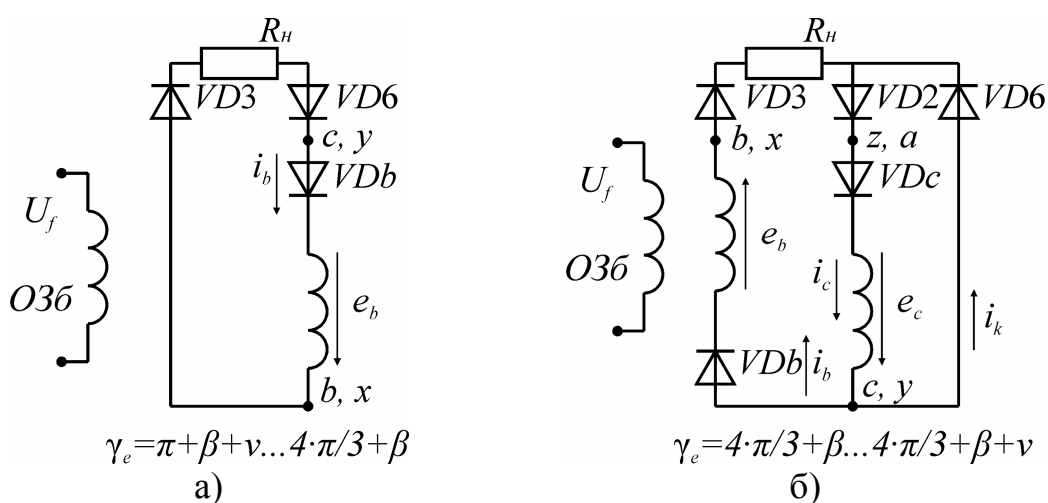


Рисунок 7 – Миттєві схеми роботи генератора на інтервалі четвертого циклу

У робочому режимі генератора на навантаження працює фаза b і для нього справедлива наступна система диференціальних рівнянь (рис. 7, а). Кінець робочого циклу в момент часу $\gamma_e = \frac{4\pi}{3} + \beta$, коли ЕРС фази c дорівнює нулю.

Початок режиму комутації визначається рівністю нулю ЕРС фази c . У режимі комутації відключається вентиль $VD6$, включається вентиль $VD2$, приєднуючи фазу c до навантаження, вентиль $VD3$ продовжує працювати. Миттєва схема цього режиму наведена на рисунку 7, б. Кінець комутації закінчується при рівності струмів фаз b та c .

Тривалість п'ятого циклу роботи генератора відповідає інтервалу часу $\gamma_e = \frac{4\pi}{3} + \beta + \nu \div \frac{5\pi}{3} + \beta + \nu$. Миттєві схеми робочого й комутаційного режимів генератора наведені на рисунку 8.

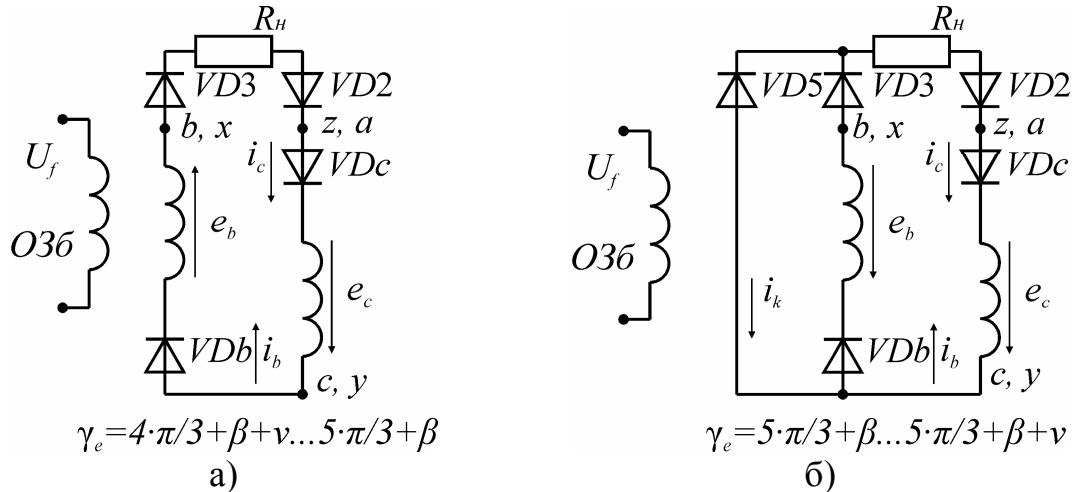


Рисунок 8 – Миттєві схеми роботи генератора на інтервалі п'ятого циклу

У режимі комутації відключається вентиль $VD3$, включається вентиль $VD5$ при працюючому вентилі $VD2$. Наприкінці комутації фаза b відключається і на навантаження продовжує працювати фаза c .

Тривалість роботи генератора в шостому циклі визначається проміжком часу $\gamma_e = \frac{5\pi}{3} + \beta + \nu \div 2\pi + \beta + \nu$. Миттєві схеми робочого і комутаційного режимів наведені на рисунку 9.

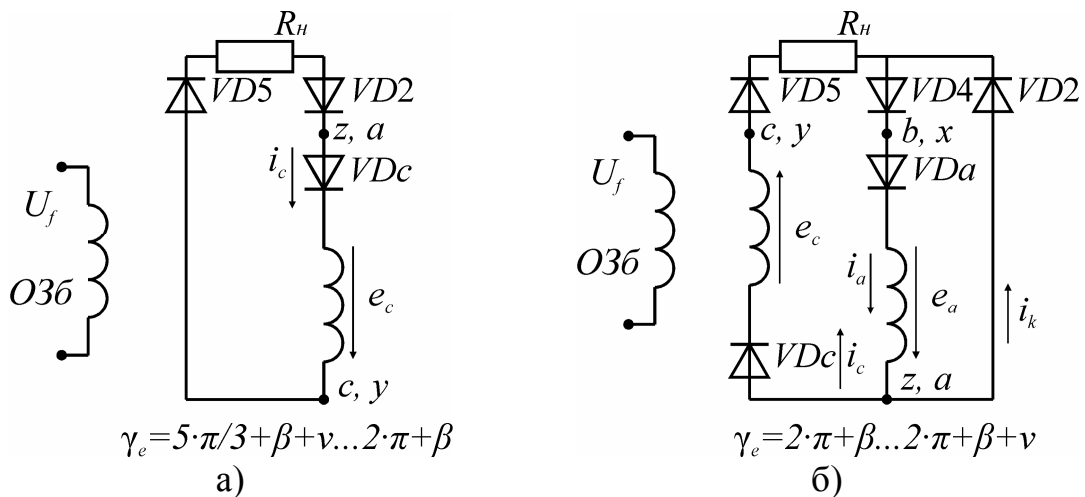


Рисунок 9 – Миттєві схеми роботи генератора в інтервалі шостого циклу

Кінець робочого циклу $\gamma_e = 2\pi + \beta$, що характеризується рівністю нулю ЕРС фази a . У режимі комутації відключається вентиль $VD2$, підключається до роботи вентиль $VD4$, у результаті до навантаження приєднується фаза a . Кінець комутації визначається рівністю струмів у фазах a і c .

В інтервалі часу $\gamma_e = 2\pi + \beta + \nu \div \frac{7\pi}{3} + \beta$ працюють дві фази генератора a та c , тобто йде повторення циклів.

Висновки та рекомендації. Розглянуті особливості роботи схеми вентильного генератора індукторного типу з суміщеними обмотками дозволяють розробити його математичну модель для дослідження різних режимів роботи генератора.

Бібліографічний список

1 Акимов С.В. Бесконтактные электрогенераторы на автомобилях и тракторах / Акимов С.В. - М.: Научно-исслед. ин-т инфор. и автом. пром-ти. – К.: Каравелла, 1974. – 48 с.

2 Ютт В.Е. Электрооборудование автомобилей. / В.Е. Ютт. – М.: Транспорт, 1989. – 287 с.

3 Сажко В.А. Електричне та електронне обладнання автомобілів: навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. / В.А. Сажко. – К.: Каравела, 2004. - 304 с.

4 Луцик В. Д. Суміщені електричні машини та апарати / В.Д. Луцик. – К.: Техніка, 1993.– 203 с. (Мова рос.).

5 Луцик В.Д. Дослідження індукторного генератора з несиметричною суміщеною обмоткою / В.Д. Луцик, М.В. Гречко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2002. - № 4. – С. 49-52.

6 Гречко М.В. Методика визначення індуктивних параметрів вентильних генераторів індукторного типу // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика». –Донецьк: ДНТУ. - 2009. - № 9. – С.66-71.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Луциком В.Д.

д.т.н. Лущик В. Д.
(ДонДТУ, Алчевськ, Україна)

ІНДУКТОРНІ ГЕНЕРАТОРИ З СУМІЩЕНИМИ ОБМОТКАМИ

Описана конструкція та принцип дії індукторних генераторів з суміщеними обмотками. Приведено теоретичне обґрунтування переваг розглянутих генераторів. Наведені дані експериментальних досліджень генераторів з суміщеними обмотками і, для порівняння, генераторів, що серійно виготовляються.

Ключові слова: індукторні генератори, суміщені обмотки, магнітопровід, експериментальні дослідження.

Описана конструкция и принцип действия индукторных генераторов с совмещенными обмотками. Приведено теоретическое обоснование преимуществ рассматриваемых генераторов. Приведены данные экспериментальных исследований генераторов с совмещенными обмотками и, для сравнения, генераторов, которые изготавливаются сериями.

Ключевые слова: индукторные генераторы, совмещенные обмотки, магнитопровод, экспериментальные исследования.

Серед безконтактних електричних генераторів найбільшого поширення набули генератори індукторного типу завдяки простоті конструкції, надійності в роботі та невисокої ціни. Індукторні генератори знайшли широке застосування на тракторах та сільгоспмашинах, на вітроелектростанціях, на залізничному транспорті як підвагонні генератори. Однак більш широке поширення їх стримується із-за невисоких питомих показників. Вага їх порівняно з контактними генераторами в два рази більша.

Зарубіжні і вітчизняні вчені та конструктори-дослідники удосконалюють уже відомі типи індукторних генераторів, не вносячи ніяких принципових змін у конструкцію та принцип дії [1,2,3].

Істотного покращення масогабаритних показників індукторних генераторів можливо досягнути, якщо сумістити обмотку збудження з обмоткою якоря. Для цього магнітопровід індукторного генератора потрібно змінити таким чином, щоб обмотка збудження знаходилася на тих же зубцях статора, що і обмотка якоря.

Обмотка збудження повинна бути також узгоджена з трифазною

обмоткою якоря. Мінімальне число зубців якоря, на яких можливо утворити трифазну обмотку, дорівнює трьом. З огляду на те, що ці ж зубці повинні утворювати магнітне поле збудження, їх число повинно бути парним. Тому мінімально можливе число зубців на статорі $Z_1=6$. При $Z_1=6$ кожна пара зубців статора є окремою фазою. Також кожна пара зубців статора утворює магнітний потік збудження. Тому статор із $Z_1=6$ буде мати шестиполісний магнітний потік збудження. $2p=6$ – мінімально можливе число полюсів збудження в розглядуваному індукторному генераторі.

Число зубців ротора Z_2 повинно бути парним. Це потрібно, щоб, по-перше, не було одностороннього магнітного притягування і, значить, магнітних вібрацій; по-друге, для збільшення величини пульсацій магнітного потоку в фазах: в певну мить часу під парою зубців статора, що є фазою, повинні розміщуватись зубці ротора, в слідуючу мить, через півперіоду – пази ротора. Цю умову можливо виконати, якщо Z_2 є парним.

Для більш раціонального використання магнітопроводу статора та ротора важливо, щоб Z_2 як можна менше відрізнялось від Z_1 . Найкраще підходить $Z_2=8$.

Для того, щоб досягалась максимально можлива пульсація, необхідно щоб

$$b_{Z1} < b_{\Pi2}, b_{Z2} < b_{\Pi1},$$

де b_{Z1} , b_{Z2} – ширина зубця статора і відповідно ротора,

$b_{\Pi1}$, $b_{\Pi2}$ – ширина паза статора і відповідно ротора.

Був виготовлений індукторний генератор, габарити і маса якого були такі ж, як і в серійного автомобільного генератора 37.3701(ВАЗ 2108). Зовнішній діаметр статора $D=124\text{мм}$ (рисунок 1), внутрішній діаметр – $D_i=81\text{мм}$, ширина зубців і пазів $b_{Z1}=15\text{мм}$, $b_{Z2}=14,6\text{мм}$, $b_{\Pi1}=27,4\text{мм}$, $b_{\Pi2}=17\text{мм}$.

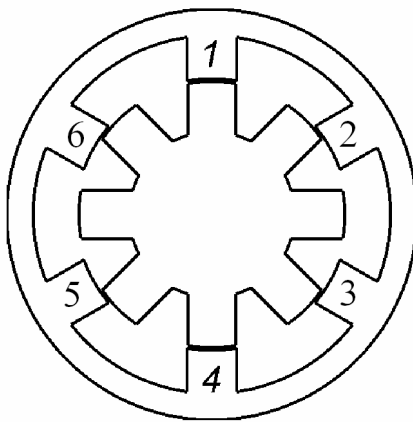


Рисунок 1 - Магнітопровід генератора, $Z_1=6$, $Z_2=8$

Довжина пакета статора і ротора $l_b=48\text{мм}$, але загальна вага статора і ротора залишились такою ж, як і в серійному генераторі за рахунок значно меншої ваги ротора, відсутності контактних кілець і щіток. На зубцях 1,4 розміщені котушки фази А, на зубцях 3,6 – фази В, на зубцях 5,2 – фази С.

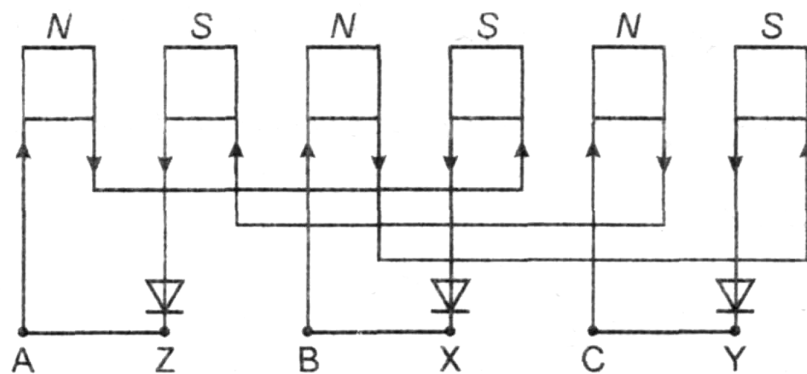


Рисунок 2 – Схема обмотки

Фази якірної обмотки з'єднані в трикутник, при цьому в фазах якірної обмотки послідовно та узгоджено з іншими фазами ввімкнуті діоди (рисунок 2). На один із діодів подають напругу від джерела постійного струму (рисунок 3), з тим щоб струм збудження протікав по всім фазам якірної обмотки.

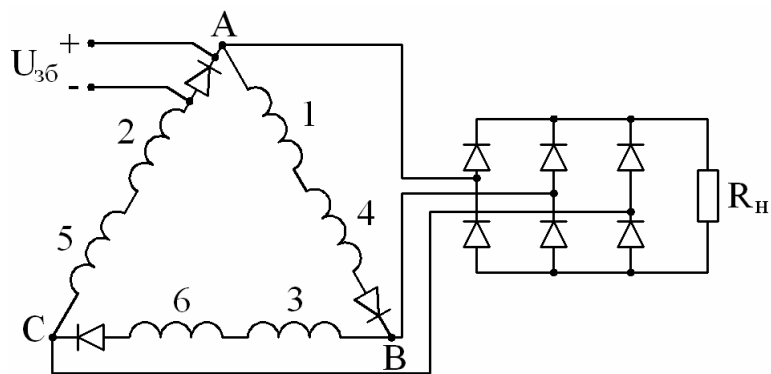


Рисунок 3 – Схема вмикання навантаження

При навантаженні в фазах якірної обмотки протікає однопівперіодний випрямлений струм. Магнітний потік реакції якоря можна вважати такої ж форми, що і струм, який його створює.

Однопівперіодний випрямлений струм, якщо розкласти його в ряд Фур'є, має постійну складову і в два рази меншу основну гармонічну

складову. Основна гармонічна складова магнітного потоку реакції якоря буде в 2 рази менша магнітного потоку реакції якоря, створеного синусоїдним струмом такої ж діючої величини, що і однопівперіодний випрямлений струм. Тому в 2 рази зменшуються індуктивні опори x_d та x_q і відповідно поздовжня ЕРС реакції якоря E_d та поперечна ЕРС реакції якоря E_q . Жорсткість зовнішньої характеристики генератора завдяки діодам різко зростає.

Магнітний потік реакції якоря, створений однопівперіодним випрямленим струмом, направлений узгоджено з магнітним потоком, створеним обмоткою збудження, що теж сприяє збільшенню жорсткості зовнішньої характеристики.

Ще більш кращі масогабаритні і енергетичні показники показує генератор, статор якого має гребінкову зубцеву зону. Статор в такому випадку має 12 зубців, а ротор – 14 зубців (рисунок 4). Число полюсів збудження залишається незмінним. Завдяки гребінковій зубцевій зоні статора частота ЕРС якірної обмотки, яка залежить від швидкості обертання n та числа зубців ротора Z_2 , $f_2 = nZ_2$, зростає в 1,75 рази.

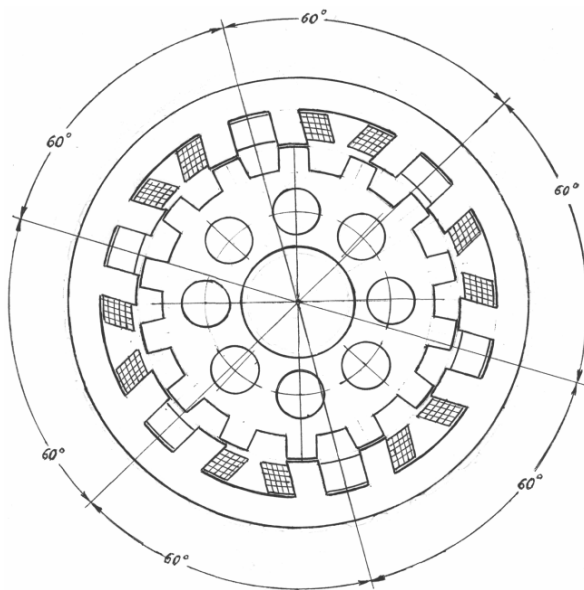


Рисунок 4 - Генератор з гребінковою зубцевою зоною, $Z_1=12$, $Z_2=14$

Важливим фактором в покращенні процесу електромагнітного перетворення енергії є незначна різниця між числами пазів статора $Z_1=12$ і ротора $Z_2=14$. Малі зубці статора мають ширину $b_{z1}=7,8\text{мм}$, а паз між ними – $b_{п1}=11,4\text{мм}$. На рисунку 5 показані магнітопроводи статора і ротора, а на рисунку 6 – статор з обмоткою.

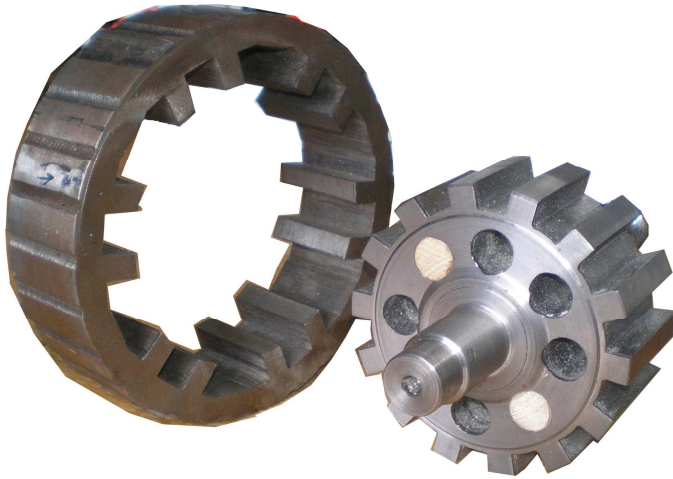


Рисунок 5 – Фото магнітопроводу статора та ротора

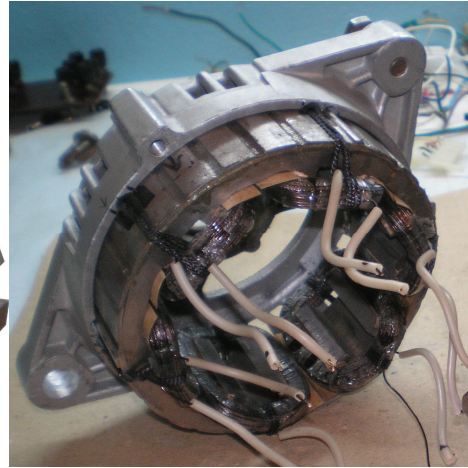


Рисунок 6 – Статор з обмоткою

Завдяки більш раціональному співвідношенню розмірів зубцевої зони статора пульсації магнітного потоку в генераторі з числом зубців $Z_1=12$ і $Z_2=14$ зображуються у вигляді однопівперіодних синусоподібних імпульсів (рисунок 7), які можна розкласти в ряд Фур'є з допомогою періодичної функції $f(x)$ з періодом T

$$y = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega x - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\cos 2\omega x}{1 \cdot 3} + \frac{\cos 4\omega x}{3 \cdot 5} + \frac{\cos 6\omega x}{5 \cdot 7} + \dots \right).$$

При

$$x = \frac{T}{4}$$

$$y = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega x - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\cos 2\omega x}{1 \cdot 3} + \frac{\cos 4\omega x}{3 \cdot 5} + \frac{\cos 6\omega x}{5 \cdot 7} + \dots \right),$$

тобто магнітний потік має постійну складову $\frac{1}{\pi}$ і в два рази меншу основну гармонічну.

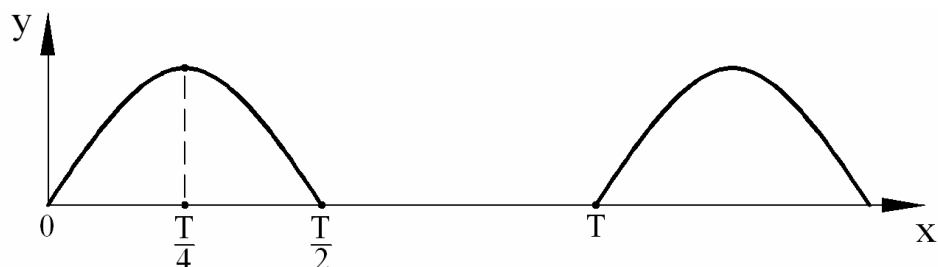


Рисунок 7 – Пульсації магнітного потоку, $Z_1=12$, $Z_2=14$

гляді імпульсів шириною $\frac{1}{3}T$ і проміжком між ними $\frac{2}{3}T$ зображені на рисунку 8.

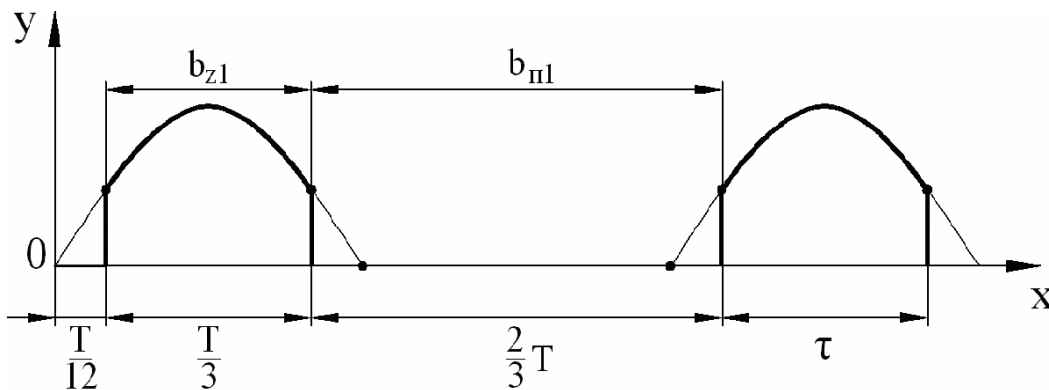


Рисунок 8 – Пульсації магнітного потоку, $Z_1=6$, $Z_2=8$

Періодична функція $f(x)$ з періодом T для цього випадку

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (\alpha_k \cos k\omega x + b_k \sin k\omega x),$$

де
$$a_k = \frac{2\omega_0}{T} \frac{1 + \cos k\omega\tau}{\omega_0^2 - k^2\omega^2}, \quad b_k = \frac{2\omega_0}{T} \frac{\sin k\omega t}{\omega_0^2 - k^2\omega^2} (k=1, 2, \dots),$$

$$\frac{a_0}{2} = \frac{2\tau}{\pi T}, \quad \omega_0 = \frac{\pi}{\tau}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Згідно з рисунком 8 $\tau = \frac{1}{3}T$. В результаті одержуємо для $\kappa=1$

$$y = \frac{2}{3\pi} + \frac{3}{5\pi} \cos k\omega x + \frac{3\sqrt{3}}{5\pi} \sin k\omega x.$$

При $x = \frac{T}{4}$ $y = \frac{2}{3\pi} + \frac{3\sqrt{3}}{5\pi}$, тобто магнітний потік має постійну

складову $\frac{2}{3\pi}$ і основну гармонічну, яка дорівнює $\frac{3\sqrt{3}}{5\pi} = 0,331$.

В генераторі із співвідношенням пазів $Z_1=6$ і $Z_2=8$ основна гармонічна магнітного потоку зменшується в $0,5/0,331=1,51$ рази порівняно з генератором з гребінковою зубцевою зоною.

В таблиці 1 приведені результати експериментальних досліджень індукторних генераторів з суміщеними обмотками при швидкості обертання ротора $n=5000\text{об/хв.}$, а також, для порівняння, серійного індукторного генератора Г-306 та автомобільного синхронного генератора з контактними кільцями. Маса всіх досліджуваних генераторів приблизно однакові – 4,2кг.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень генераторів при швидкості обертання ротора $n=5000\text{об/хв.}$

Тип генератора	U_d	I_d	P_d	$U_{зб}$	$I_{зб}$	$P_{зб}$	$U_{л}$	$U_{ф}$	$I_{ф}$	$P_{2\sim}$	$p_{ма}$	$p_{ст.}$	$p_{мех}$	η	G_m
	В	А	Вт	В	А	Вт	В	В	А	Вт	Вт	Вт	Вт	%	грам
Індукторний $Z_1=6, Z_2=8$	190	3,95	750	18,5	4,6	85	140,6	140,6	1,86	784	14	110	60	77,5	470
Індукторний $Z_1=12, Z_2=14$	199	4,57	910	18,7	4,8	90	147,3	147,3	2,15	950	18	135	60	78,25	340
Індукторний Г-306	14	28,6	400	13	5	65	10,42	10,42	13,44	420	49	70	60	66,8	700
Автомобільний синхронний	13,64	55	750	13	5	65	10,1	5,83	44	784	662	70	80	47	560

Коефіцієнт корисної дії генераторів вираховувався по формулі

$$\eta = \frac{P_d}{P_2 + p_{ма} + p_{ст.} + p_{мех}} \cdot 100\%$$

Як можна бачити із таблиці, індукторні генератори з суміщеними обмотками мають кращі показники порівняно з індукторними генераторами серійного виконання по всім параметрам: питомому показнику кг/кВт (масогабаритному показнику), коефіцієнту корисної дії, питомій витраті міді. Кращі показники і в порівнянні з автомобільним синхронним генератором, який має контактні кільця, щітки і обмотку збудження на роторі.

Слід зазначити, що індукторний генератор з суміщеними обмотками для легкового автомобіля поки що не вдалось здійснити. Струм збудження і якірний струм у генераторів легкового автомобіля відрізняється на порядок (таблиця 1), по уже відомим схемам суміщення об'єднання обмоток не виявилось можливим здійснити. Але робота в цьому напрямку триває.

Індукторні генератори шестиполюсного збудження і з діодами в фазах якірної обмотки, з'єднаної в трикутник, у випадку виготовлення двох окремих обмоток втрачають потужність до 30%. Такі генератори переважають по всім показникам індукторні генератори серійного виконання, але поступаються синхронним генераторам з контактними кільцями по масогабаритному показнику, який автомобілебудівники вважають найважливішим.

Висновки

1. Сконструйовано, виготовлено і досліджено декілька експериментальних зразків вентильного індукторного генератора радіального збудження принципово нової конструкції: на зубцях статора розміщені концентричні котушки якірної обмотки і котушки обмотки збудження, які можуть суміщуватись з якірною обмоткою по спеціальній схемі.

2. Завдяки кращим масогабаритним показникам та більш високому ККД досліджені вентильні індукторні генератори з окремими обмотками можуть бути використані для застосування на тракторах, сільгоспмашинах, будівельних машинах, на важких автомобілях – скрізь, де на теперішній час використовують вентильні індукторні генератори традиційного конструкції.

3. Експериментальні вентильні індукторні генератори з суміщеними обмотками переважають за своїми основними показниками синхронні машини з контактними кільцями, і тому можуть бути рекомендовані в серійне виробництво як підвагонні генератори залізничних вагонів, для літальних апаратів, для вітроелектроустановок, для гідроелектростанцій невеликої потужності.

Бібліографічний перелік

1. *Петренко А.Н. Методика расчета геометрии и параметров активной зоны одноименнополюсных индукторных автотракторных генераторов / Петренко А.Н. и др. // Вестник НТУ ХПИ. - №5. - 2005.*

2. *Ваткин В.А. Разработка вентильных индукторных электромеханических систем автотракторного назначения: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: специальность 05-09-01 «Электромеханика и электрические аппараты» / В.А. Ваткин. – Москва, 2007. – 20с.*

3. *Шлегель А.О. Повышение надежности электромеханических систем автотракторного генератора: автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: специальность 05-09-01 «Электромеханика и электрические аппараты» / А.О. Шлегель. – Самара, 2007. – 20с.*

4. Луцик В.Д. Патент №86352 Україна. Індукторний трифазний різнополюсний вентильний генератор. Опубл. 27.04.09. Бюл. №8.

5. Луцик В.Д. Трифазні вентильні індукторні генератори з суміщеною обмоткою. // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції – Севастополь: СевНТУ, 2010. - С. 25-27.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Заблодським М.М.

*к.т.н. Сафонов П.С.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)*

МАКРОМОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОПУЛЬСНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ В АСИМЕТРИЧНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ

Наведена математична модель напівпровідникового перетворювача при живленні від асиметричної вхідної напруги. Для узагальненої макромоделі знайдено аналітичний вираз вхідних струмів напівпровідникового перетворювача. Представлені результати моделювання багатопульсної перетворювальної системи з міжфазним трансформатором в асиметричному режимі роботи.

Ключові слова: макромодель, асиметричний режим роботи, багатопульсний напівпровідниковий перетворювач, електронна перетворювальна система.

Приведена математическая модель полупроводникового преобразователя при питании от асимметричного входного напряжения. Для обобщенной макромодели найдено аналитическое выражение входных токов полупроводникового преобразователя. Представлены результаты моделирования многопульсной преобразовательной системы с межфазным трансформатором в асимметричном режиме работы.

Ключевые слова: макромодель, асимметричный режим работы, многопульсный полупроводниковый преобразователь, электронная преобразовательная система.

Напівпровідникові перетворювачі електроенергії споживають енергію на основній частоті напруги мережі живлення та генерують енергію в мережу у вигляді вищих гармонік струму. Зі зростанням кількості електричної енергії, параметри якої перетворюються за допомогою напівпровідникових пристроїв, зростає актуальність поліпшення електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів з мережею живлення. Спотворення форми кривої напруги у мережі живлення є слідством несинусоїдальності вхідних струмів напівпровідникових перетворювачів. Проблема генерування вищих гармонік перетворювачами має суттєве техніко-економічне значення при сумірній з мережею живлення потужності електроустановки або сумарній потужності декількох силових перетворювачів електроенергії. Найбільш негативно

впливають на електрообладнання вищі гармоніки нижчих порядків (третья, п'ята, сьома).

В даний час моделювання є основним науково обґрунтованим методом, що використовується для досліджень, оцінок характеристик складних систем і ухвалення рішень у всіх областях наукової і інженерної діяльності. При математичному моделюванні можливе позбавлення впливу зовнішніх чинників, а також точне завдання і варіювання в необмеженому діапазоні параметрів електронної перетворювальної системи.

Аналіз робіт [1, 2] показав, що в даний час для моделювання електронних систем використовуються аналітичні і імітаційні методи. Якнайповніше дослідження процесів при аналітичному моделюванні можна провести, якщо відомі явні зв'язки вихідних характеристик з параметрами, змінними і початковими умовами системи. Для наукового дослідження загальних властивостей об'єкту аналітичним методом проводять спрощення первинної моделі, що дозволяє отримати тільки орієнтовні результати [1]. Імітаційне моделювання дозволяє вирішувати завдання аналізу складніших систем, оскільки імітує елементарні явища із збереженням логічної структури і часової послідовності. Це дозволяє отримувати відомості про процеси, що протікають в певні моменти часу, і оцінювати характеристики досліджуваної системи. Для повного аналізу характеристик процесів в системі проводиться багатократна імітація з варіюванням початкових даних. Комбінування аналітичних і імітаційних методів моделювання дозволяє використовувати їх достоїнства і отримувати ефективніші математичні моделі.

Метою даної роботи є розробка ефективної математичної моделі для дослідження режиму роботи багатопульсної електронної системи при асиметрії напруги живлення.

Матеріал досліджень і отримані результати. Побудова моделі для дослідження впливу асиметрії напруги мережі проводилися для системи, що містить перетворювач з міжфазним трансформатором [3]. Асиметрична напруга мережі описується системою рівнянь

$$\begin{cases} \bar{E}_A = E \cdot N_{AB}; \\ \bar{E}_B = E \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}}; \\ \bar{E}_C = -\bar{E}_A - \bar{E}_B, \end{cases} \quad (1)$$

де N_{AB} – коефіцієнт, що враховує асиметрію напруги;
 E – діюче значення е.р.с. мережі живлення, В.

Струми, що протікають в перетворювачі, визначаються системою рівнянь в матричному вигляді

$$\bar{I} = \bar{T}^{-1} \cdot \bar{U}, \quad (2)$$

де \bar{T} – блокова топологічна матриця;

\bar{U} – вектор контурних е.р.с.

$$\bar{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & j \cdot \omega \cdot L1 & 0 & -j \cdot \omega \cdot M1 \\ 0 & -j \cdot \omega \cdot L1 & j \cdot \omega \cdot L2 & j \cdot \omega \cdot M1 - j \cdot \omega \cdot M2 \\ 0 & -j \cdot \omega \cdot M1 & -j \cdot \omega \cdot M2 & j \cdot \omega \cdot (L3 + L4) + R_d \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де ω – циклічна частота напруги первинного джерела живлення, рад/с;

$L1, L3, L2, L4$ – індуктивності обмоток міжфазного трансформатора, Гн;

$M1, M2$ – взаємні індуктивності первинних і вторинних обмоток міжфазного трансформатора, Гн.

$$\bar{U} = [0; \bar{E}_1; \bar{E}_1; 0], \quad (4)$$

де \bar{E}_1, \bar{E}_2 – комплексні значення контурних е.р.с.

$$\bar{E}_1 = \bar{E}_A \cdot S2 + \bar{E}_B \cdot S5 + \bar{E}_C \cdot S8 - (\bar{E}_A \cdot S1 + \bar{E}_B \cdot S4 + \bar{E}_C \cdot S7), \quad (5)$$

$$\bar{E}_2 = \bar{E}_A \cdot S3 + \bar{E}_B \cdot S6 + \bar{E}_C \cdot S9 - (\bar{E}_A \cdot S2 + \bar{E}_B \cdot S5 + \bar{E}_C \cdot S8), \quad (6)$$

де $S1 - S9$ – комутаційні функції, що описують стани ключів.

Миттєве значення струму, що протікає в навантаженні, визначається наступним виразом:

$$i_d(\omega \cdot t) = \sqrt{2} |\operatorname{Re}(\dot{I}_4(\omega \cdot t)) \cdot \sin(\omega \cdot t) + \operatorname{Im}(\dot{I}_4(\omega \cdot t)) \cdot \cos(\omega \cdot t)|. \quad (7)$$

Фазні струми перетворювача визначаються системою

$$\begin{cases} \bar{I}_A = \bar{I}_1 \cdot S1 + \bar{I}_2 \cdot S2 + \bar{I}_3 \cdot S3; \\ \bar{I}_B = \bar{I}_1 \cdot S4 + \bar{I}_2 \cdot S5 + \bar{I}_3 \cdot S6; \\ \bar{I}_C = \bar{I}_1 \cdot S7 + \bar{I}_2 \cdot S8 + \bar{I}_3 \cdot S9. \end{cases} \quad (8)$$

Електронні перетворювальні системи можуть бути проаналізовані на рівні моделей окремих компонентів, тобто на мікрорівні. В цьому випадку можливе отримання різноманітних характеристик (струмів і напруг будь-якого елементу системи). Але у багатьох випадках інтерес викликають лише вхідні і вихідні величини досліджуваної системи. В цьому випадку найзручніше використовувати макромоделі, що забезпечують достатньо повний опис процесів, що протікають на вході і виході перетворювальної системи. Використання макромоделей дозволяє значно спростити аналіз впливу певної групи параметрів на ті або інші енергетичні і часові характеристики.

На рисунку 1 наведена макромодель багатопульсного перетворювача напруги, що містить в своїй структурі міжфазний трансформатор [3 – 5].

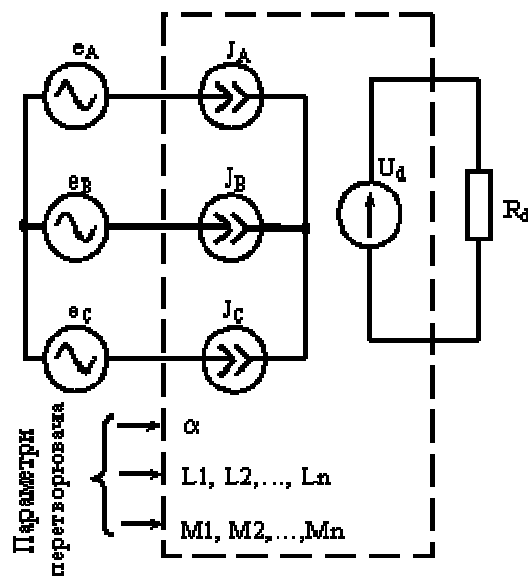


Рисунок 1 – Макромодель багатопульсного перетворювача напруги

Вхідні струми моделюються за допомогою керованих джерел струму J_A , J_B , J_C , вихідна напруга – за допомогою залежного джерела е.р.с. U_d . При цьому фазні струми для несиметричного режиму роботи визначатимуться аналітичним виразом

$$i_{\phi} = \sum_{n_I=1}^{\frac{m_2}{4}} \left[I_m \cos \left(\frac{\pi}{m_2} + \frac{2\pi}{m_2} \left(\frac{m_2}{4} - n_I \right) \right) \times \right. \\ \times \sin \left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{m_2} + \frac{2\pi}{m_2} \left(\frac{m_2}{4} - n_I \right) \right) \times \\ \left. \times \left(h \left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{m_2} (n_I - 1) - \alpha + \theta \right) - h \left(\omega \cdot t - \frac{2\pi}{m_2} \cdot n_I - \alpha + \theta \right) \right) \right], \quad (9)$$

де I_m – амплітуда фазного струму;

m_2 – пульсність перетворювача;

ω – циклічна частота мережі живлення;

t – час;

h – одинична функція;

α – кут регулювання вентилів перетворювача;

n_I – номер ступеня струму фази перетворювача на інтервалі першої чверті періоду;

n_{II} – номер ступеня струму фаз перетворювача на інтервалі другої чверті періоду;

θ – кут асиметрії.

На рисунку 2 наведені часові діаграми фазних струмів напівпровідникового багатопульсного перетворювача.

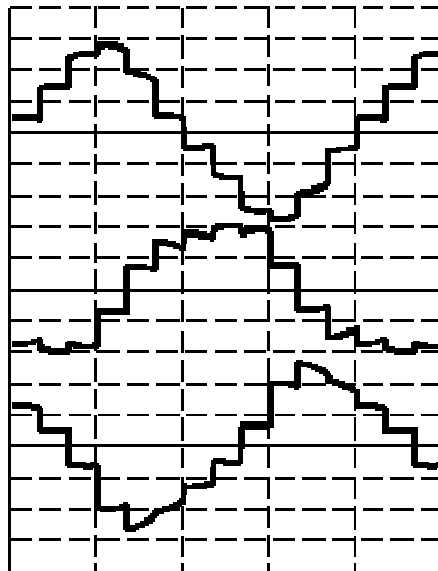


Рисунок 2 – Часові діаграми фазних струмів напівпровідникового перетворювача

На рисунку 3 наведена часова діаграма вихідної напруги в масштабі 100 В / под. і 5 мс / под.

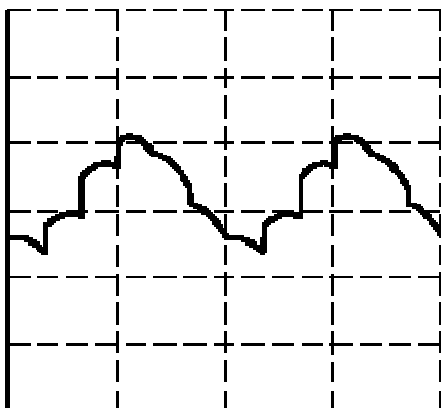


Рисунок 3 – Часова діаграма вихідної напруги

Отримана макромодель багатопульсної електронної перетворювальної системи, що дозволяє досліджувати асиметричний режим роботи. Комбінування аналітичних і імітаційних методів дозволило підвищити ефективність моделі за рахунок виключення з моделі параметрів, що незначною мірою впливають на форму струму. Результати моделювання дозволяють провести оцінку ступеня впливу асиметрії вхідної напруги електронної перетворювальної системи на асиметрію струмів напівпровідникового перетворювача.

Бібліографічний список

1. Советов Б.Я. Моделирование систем. / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев. – М.: Высш. шк., 2005. – 343 с.
2. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1988. – 421 с.
3. Сафронов П.С. Покращення електромагнітної сумісності напівпровідникових перетворювачів з мережею за допомогою міжфазного енергообміну: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.09.12 «Напівпровідникові перетворювачі електроенергії» / П.С. Сафронов. – Х., 2006. – 18 с.
4. Сафронов П.С. Влияние асимметрии напряжения сети на форму входных токов полупроводникового преобразователя с межфазным трансформатором / П.С. Сафронов, Ю.Э. Паэранд // Технічна електродинаміка. – К., 2007. – Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність, ч. 5. – С. 19-22.
5. Сафронов П.С. Аналитико-имитационное моделирование комбинированной электронной системы с применением современных ин-

*формационных технологий / П.С. Сафронов, Ю.Э. Паэранд, М.П. Лынь
// Сборник научных трудов Донбасского государственного техническо-
го университета. – Алчевск, 2007. – Вып. 23. – С. 368-374.*

Рекомендована к печати к.т.н., проф. Паэрандом Ю.Э.

*к.т.н. Саратовский Р.Н.,
к.т.н. Михайлова Л.Ф.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

АНАЛИЗ РАБОТЫ ПОЛУМОСТОВОГО РЕЗОНАНСНОГО ИНВЕРТОРА С ГАЛЬВАНИЧЕСКИ РАЗВЯЗАННОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАГРУЗКОЙ

Проаналізована робота напівмостового резонансного інвертора з гальванічне роз'язним індукційним навантаженням при зміні частоти управління, коефіцієнта магнітного зв'язку та добротності навантаження.

Ключові слова: індукційне нагрівання, резонансний інвертор, індукційне навантаження.

Проанализирована работа полумостового резонансного инвертора с гальванически развязанной индукционной нагрузкой при изменении частоты управления, коэффициента магнитной связи и добротности нагрузки.

Ключевые слова: индукционный нагрев, резонансный инвертор, индукционная нагрузка.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами.

В настоящее время для индукционной плавки металлов широко используются источники питания на базе тиристорных преобразователей частоты (ТПЧ), имеющие ряд преимуществ перед машинными преобразователями частоты [1, 2]. Однако при работе на индукционную нагрузку возникает проблема согласования ТПЧ с нагрузкой, характеризующейся значительно изменяющимися во времени параметрами. Эта проблема является особенно актуальной для установок индукционного нагрева, т.к. в течение всего процесса необходимо обеспечивать оптимальный режим работы ТПЧ, при котором параметры нагрузки и рабочая частота преобразователя должны постоянно согласовываться. Это, в свою очередь, обеспечит нормальные электромагнитные процессы в преобразователе, необходимые энергетический режим его работы и мощность в нагрузке.

Проблема согласования ТПЧ с индукционной нагрузкой достаточно хорошо освещена в литературе, поэтому остановимся на вопросе, который беспокоит, прежде всего, обслуживающего персонала. Речь

идёт о том, что проблема согласования сопровождается ещё и тем, что при этом нагрузка обычно имеет гальваническую связь с питающей сетью. Этому способствует то, что разработчики преобразовательной техники для больших мощностей не часто используют устройства гальванической развязки (трансформаторы низкой частоты или традиционные закалочные трансформаторы средней частоты с Ш-подобным замкнутым броневым магнитопроводом [3]) из-за их большой стоимости и значительных массогабаритных показателей. Наличие гальванической связи приводит к необходимости применения ряда мероприятий для электробезопасности персонала, чтобы исключить возможность случайного прикосновения к элементам нагрузки, которые находятся под потенциалом сети.

Развитие преобразовательной техники для индукционного нагрева требует появления дешевого и простого в изготовлении устройства согласования нагрузки с гальванической развязкой от сети, которое может применяться для индукционных плавильных установок мощностью десятки – сотни кВт. Поэтому задача разработки принципиального решения построения такого устройства, которое простейшими средствами реализовало бы гальваническую развязку нагрузки и при этом могло бы быть практически использованным в наиболее распространённых схемах ТПЧ без их существенных переделок, является актуальной и требует реализации. В настоящее время в качестве основного звена ТПЧ широко используются резонансные инверторы с диодами встречного тока собранные по мостовой, полумостовой или одноключевой схеме. В работе [4] рассмотрены особенности работы одноячейкового резонансного инвертора на гальванически развязанный индукционный нагреватель.

Целью данной статьи является исследование и анализ режима работы полумостового резонансного инвертора с индуктивно связанным устройством согласования, обеспечивающим гальваническую развязку индукционной нагрузки.

Устройством гальванической развязки предлагается использовать воздушный (линейный) трансформатор, состоящий из двух индуктивно связанных элементов без ферромагнитного сердечника, использование которого снижает КПД оборудования за счет потерь на гистерезис. В предложенном устройстве в качестве первичной обмотки трансформатора используется коммутирующая индуктивность инвертора. В качестве вторичной обмотки трансформатора использована дополнительная индуктивность, включённая в цепь индуктора и компенсирующего конденсатора. При определённом расположении этих элементов создаётся воздушная магнитная связь, степень такой связи характеризуется коэффициентом магнитной связи

$$K_{CB} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad (1)$$

где M - взаимная индуктивность элементов цепи;

L_1 и L_2 - собственные индуктивности этих элементов.

Следует отметить, что на практике обычно $K_{CB} < 1$.

Для исследования инвертора использовался метод математического моделирования электромагнитных процессов при помощи программы анализа схем силовой электроники ПАКЛС [5], с общепринятыми допущениями учета схем замещения ключевых и реактивных элементов. Для этой цели была разработана модель полумостового резонансного инвертора с индуктивно связанным устройством согласования с нагрузкой, схема которого представлена на рисунке 1.

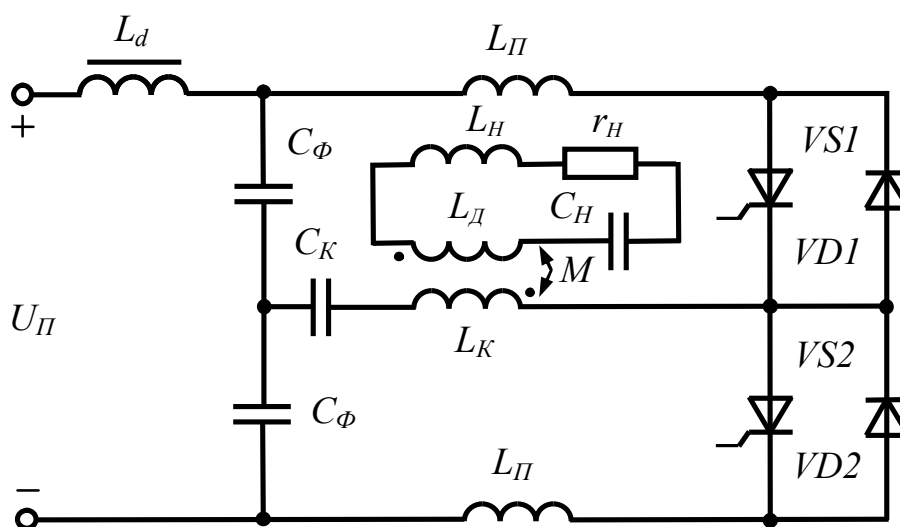


Рисунок 1

Для анализа электромагнитных процессов в математической модели исследуемой схемы входной источник постоянного напряжения представлен в виде постоянной ЭДС, а нагрузка – эквивалентными параметрами последовательной схемы замещения r_H и L_H . За период цикла плавки эти параметры могут изменяться в несколько раз [2].

Для повышения эффективности анализа, универсальности и распространения результатов исследований на возможные абсолютные величины параметров схемы использовалась система относительных единиц [6]. В этом случае были приняты следующие основные базовые величины: источник постоянного напряжения $U_П = 1$; эквивалентная коммутирующая ёмкость инвертора $C_{KE} = (C_K \cdot C_Ф) / (C_K + C_Ф) = 1$; суммарная коммутирующая индуктивность инвертора $L_{K\Sigma} = L_K + L_П = 1$, базовый

ток $I = U_{\Pi} / Z_K = U_{\Pi} / \sqrt{L_{K\Sigma} / C_{KE}} = 1$, относительно которого определяются все токи в схеме; собственная частота коммутирующего контура инвертора $f_K = 1 / (2\pi \sqrt{L_{K\Sigma} C_{KE}})$, где L_K и L_{Π} – соответственно коммутирующая индуктивность в диагонали полумоста и в плечах тиристорно-диодной ячейки; C_{Φ} и C_K соответственно фильтровый и коммутирующий конденсаторы, Z_K – волновое сопротивление коммутирующего контура инвертора.

Для проведения исследований и анализа необходимо определить параметры элементов схемы. В работе [7] было установлено, что при изменении параметров нагрузки и частоты управления схема инвертора с $C_K = C_{\Phi} = 2$ и $L_K = L_{\Pi} = 0.5$ имеет большую нагрузочную способность и обладает повышенной коммутационной устойчивостью. В связи с тем, что индуктивная связь осуществляется с индуктивностью L_K и учитывая, что из вторичного контура воздушного трансформатора в первичный вносятся активное R_{BH} и реактивное X_{BH} сопротивления, то образованная индуктивная связь может привести к расстройке коммутирующего контура. Поэтому необходимо учитывать это явление и воздушный трансформатор следует рассматривать со стороны первичной обмотки как двухполюсник с сопротивлением $\underline{Z} = R + jX$. Проведя аналитический анализ этого двухполюсника можно определить необходимые параметры нагрузочного контура, чтобы сохранить требуемое значение $L_K = 0.5$.

Расчёт проводился для принятых величин $K_{CB} = 1$, добротности $Q_H = 11$, при частоте управления $f_U = 1.1 \cdot f_K$ и частоте нагрузочного контура $f_H = 0.5 \cdot f_U$ при условии, что в качестве вторичной обмотки трансформатора использовалась дополнительная индуктивность L_{Δ} , включённая в цепь индуктора L_H и компенсирующего конденсатора C_H , равная $L_H = 0.4 \cdot L_{K\Sigma} = 0.4$. В результате были получены относительные значения параметров нагрузочного контура: активное сопротивление нагрузки $r_H = 0.02$ и компенсирующая ёмкость $C_H = 4.4$. Таким образом, полученные значения r_H и C_H обеспечивают реактивное сопротивление со стороны первичной обмотки трансформатора, а следовательно и его индуктивность равной принятой величине $L_K = 0.5$, тем самым сохраняя пропорцию оптимального распределения индуктивностей инвертора.

Анализ режима работы полумостового резонансного инвертора с индуктивно связанным устройством согласования, обеспечивающим гальваническую развязку индукционной нагрузки, проводился по результатам математического моделирования. В результате чего было исследовано и проанализировано влияние изменения частоты управления f_U и коэффициента магнитной связи воздушного трансформатора K_{CB} на энергетический режим и выходные параметры инвертора.

По результатам исследований получены и представлены на рисунках 2 и 3 кривые зависимостей относительных значений входного тока I_d инвертора, максимальных значений тока тиристора I_{VSm} и тока обратного диода I_{VDm} , напряжений на тиристоре U_{VSm} , на коммутирующем конденсаторе U_{Ckm} , на компенсирующем конденсаторе U_{Cnm} и на индукторе U_{Hm} от изменения частоты управления f_y отнесённой к частоте коммутирующего контура f_K при различных коэффициентах магнитной связи $K_{CB} = 0.5, 0.75$ и 0.9 для добротности нагрузки $Q_H = 11$.

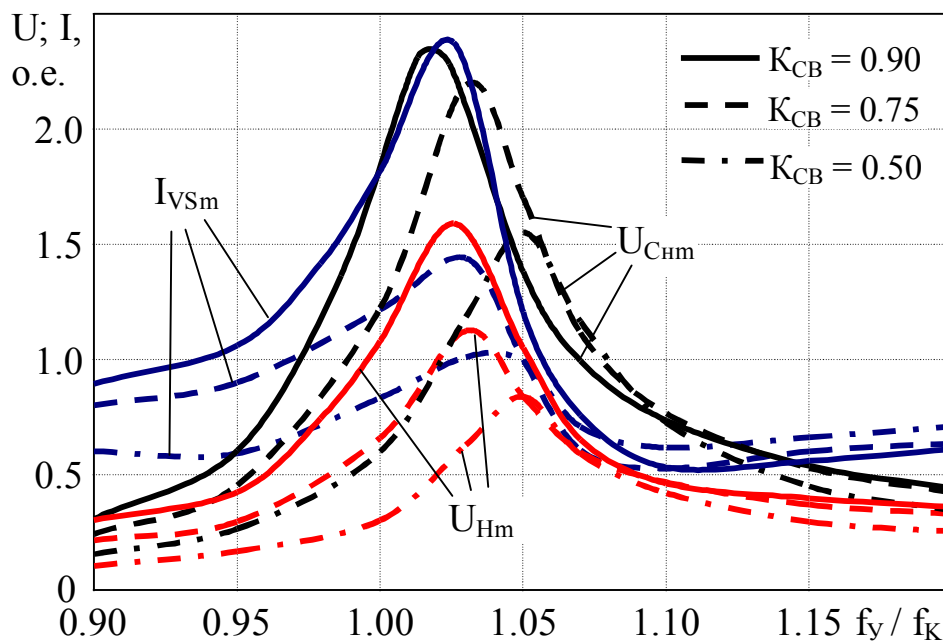


Рисунок 2

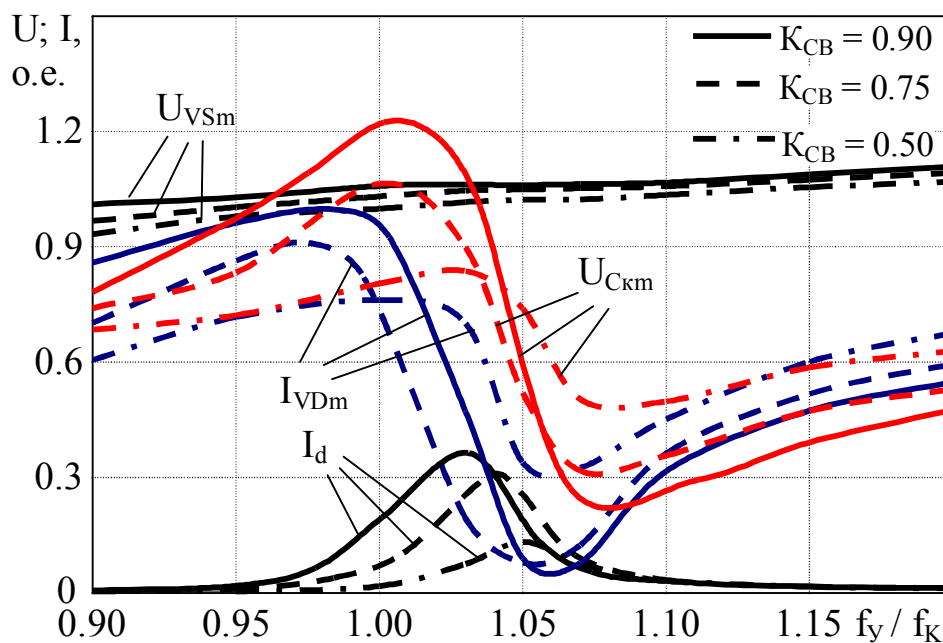


Рисунок 3

Из приведенных кривых на рисунках 2 и 3 видно, что изменяя частоту управления, можно осуществлять регулирование энергетического режима и выходных параметров инвертора. При этом наблюдается экстремальное значение тока тиристора I_{VSm} , напряжений на компенсирующем конденсаторе U_{Cm} и на индукторе U_{Hm} и входного тока инвертора I_d , а, следовательно, и мощности преобразователя. Это явление проявляется при любых значениях коэффициента магнитной связи K_{CB} , причем, чем больше значение K_{CB} , тем выше находятся эти экстремумы. Следует отметить, что эти экстремумы наблюдаются на частотах f_{Σ} выше собственной частоты коммутирующего контура f_K , что необходимо учитывать при разработке.

Так для $K_{CB} = 0.9$ максимально допустимое напряжение на индукторе может превышать напряжение питания в 3 раза. С уменьшением K_{CB} до 0.5 уменьшается максимальное напряжение на индукторе до значения $0.85U_{\Pi}$. При этом изменение частоты управления от $0.9f_K$ до f_{Σ} даёт возможность осуществлять регулировку относительного значения входного тока в диапазоне от 0.01 до 0.36 о.е., а соответственно и напряжения на индукторе в диапазоне от 0.3 до 1.6 о.е.

По графикам изменения тока обратных диодов I_{VDm} видно, что с ростом частоты f_V наблюдается уменьшение тока до некоторого значения, после чего происходит его увеличение. Причём резкое уменьшение тока диодов сопровождается резким увеличением тока тиристоров I_{VSm} , входного тока инвертора I_d и соответственно напряжения на индукторе U_{Hm} . По амплитуде тока обратных диодов можно судить о загрузке инвертора, а, следовательно, и о качестве согласования и передачи мощности в нагрузку.

Что касается напряжения на тиристоре U_{VSm} то с изменением частоты его значение практически не меняется и также как напряжение на коммутирующем конденсаторе U_{Cm} не превышает значения $1.2U_{\Pi}$, что является допустимым уровнем для тиристоров и конденсаторов.

На рисунке 4 представлены кривые зависимостей тех же параметров от коэффициента K_{CB} при неизменной частоте f_V равной частоте f_K для добротности нагрузки $Q_H=11$.

Из приведенных графиков на рисунке 4 видно, что регулировать входной ток инвертора I_d и напряжение на нагрузке U_{Hm} , а следовательно и мощность, передаваемую в нагрузку возможно не только за счёт изменения частоты управления, а и с помощью изменения коэффициента магнитной связи K_{CB} . Возможность такого регулирования (простым перемещением взаимного расположения элементов) даёт больше возможностей для реализации технологических нужд установки и упрощает согласование инвертора с нагрузкой. При этом изменение коэффициента K_{CB} от 0.3 до 1.0 даёт возможность осуществлять

регулировку относительного значения входного тока в диапазоне от 0.01 до 0.32 о.е., а соответственно и напряжения на индукторе в диапазоне от 0.14 до 1.45 о.е.

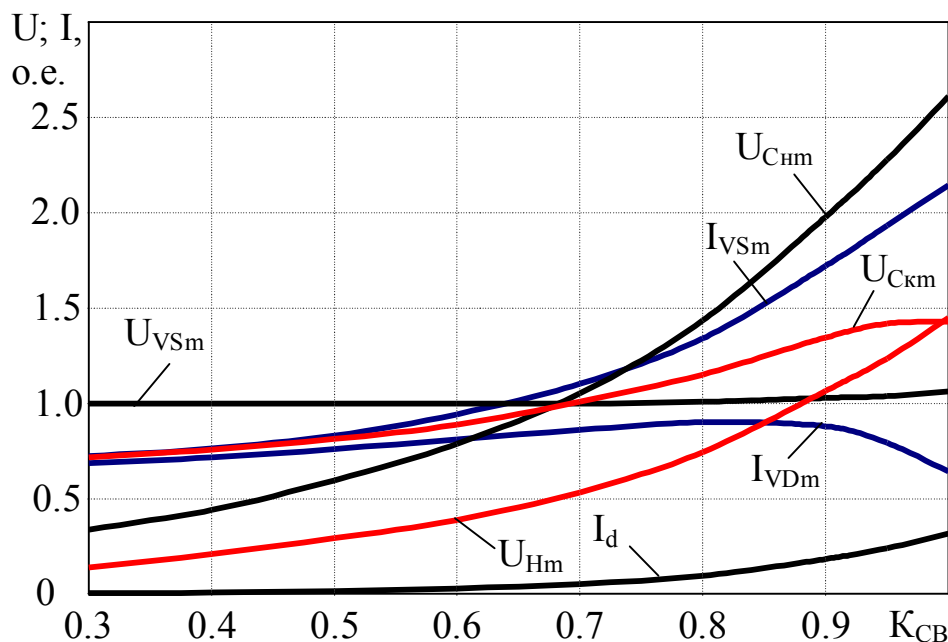


Рисунок 4

Следует также отметить, что наиболее эффективная магнитная связь в трансформаторе достигается при коэффициенте $K_{CB} > 0.8$. Это подтверждается графиком изменения тока обратного диода, на котором видно, что начиная с $K_{CB} = 0.8$ до 1.0 происходит резкое уменьшение его значения. Это свидетельствует о том, что с этого момента инвертор начинает более эффективно передавать мощность в нагрузку.

При анализе работы ТПЧ учитывают соотношение между реактивным и активным сопротивлением индукционной плавильной установки, которое характеризуется добротностью Q_H .

$$Q_H = \frac{x_H}{r_H} = \frac{\omega \cdot L_H}{r_H}. \quad (3)$$

В плавильных установках тигель с расплавленным металлом отделён от индуктора слоем огнеупорного материала, поэтому добротность ИПУ зависит от величины зазора и загрузки металла и может составлять $Q_H = 4 \div 20$ [2].

В связи с этим было исследовано и представлено на рисунках 5 и 6 влияние добротности нагрузки Q_H на выше перечисленные величины при условии неизменной частоты управления f_y равной частоте комму-

тирующего контура f_K для различных коэффициентов $K_{CB} = 0.5, 0.8$ и 1.0 .

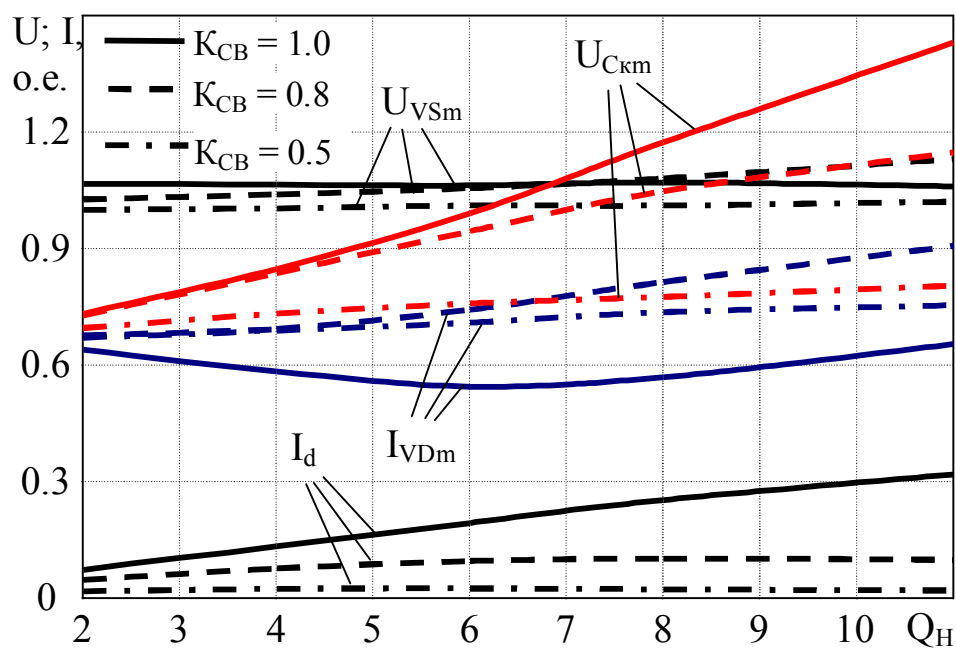


Рисунок 5

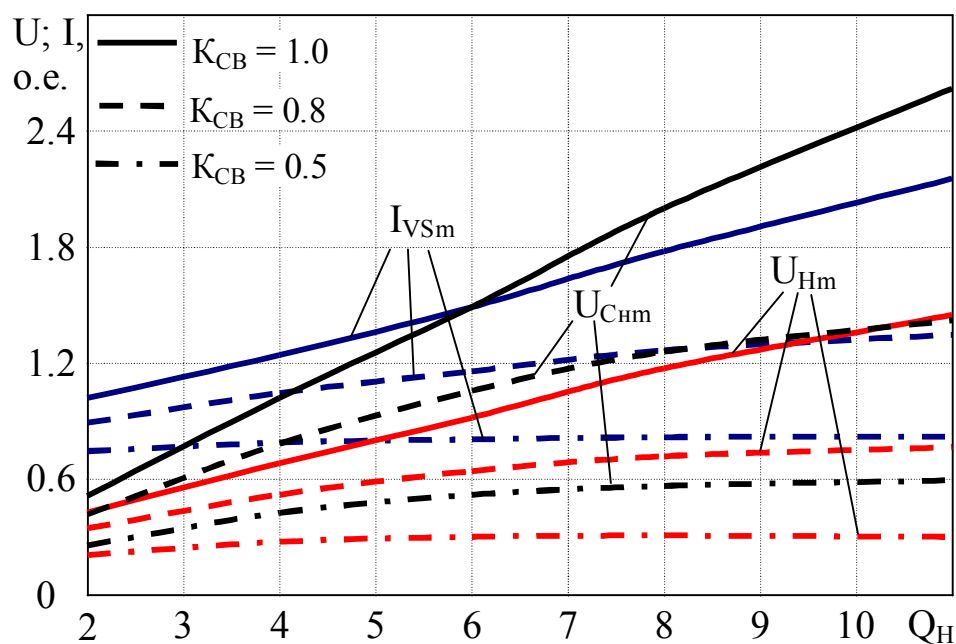


Рисунок 6

Из приведенных кривых на рисунке 5 видно, что с ростом Q_H также происходит увеличение относительных значений входного тока I_d инвертора, напряжений на коммутирующем конденсаторе U_{Ckm} и на индукторе U_{Hm} . Причём при $K_{CB} = 0.8$ и 1.0 это увеличение происходит бо-

лее быстро, чем при $K_{CB} = 0.5$. Это также подтверждает, что эффективная магнитная связь в трансформаторе достигается при коэффициенте $K_{CB} > 0.8$. Напряжение на тиристоре U_{VSm} практически не меняется, т.е. не зависит от Q_H и не превышает значения $1.10U_{II}$. По кривым изменения тока обратных диодов I_{VDm} видно, что чем выше K_{CB} и чем больше Q_H тем меньше амплитуда тока и тем больше передаётся мощности в нагрузку.

Таким образом, наличие воздушного трансформатора позволяет эксплуатировать полумостовые инверторы при изменении параметров нагрузки в широком диапазоне – от режима холостого хода (полное отсутствие металла в индукторе) до режима короткого замыкания нагрузки. За счёт такого способа согласования даже при полном обрыве нагрузки (обрыв соединения с компенсирующим конденсатором) инвертор переходит в режим, эквивалентный короткому замыканию нагрузки для распространённых типов схем последовательных резонансных инверторов с обратными диодами.

За счёт уменьшения магнитной связи между коммутирующей индуктивностью и индуктором можно регулировать загрузку инвертора. Если ввести автоматическое регулирование расстояния между индуктивно связанными элементами в зависимости от степени загрузки инвертора, можно расширить технологические возможности индукционного оборудования.

Применение таких устройств согласования создаёт новые возможности для установок индукционного нагрева.

Выводы. Анализ работы полумостового инвертора показал возможность создания гальванической развязки индуктора от промышленной сети питания даже без применения специальных дополнительных трансформаторов согласования за счёт использования в качестве такого трансформатора уже существующих элементов схемы. Это даёт широкие возможности использования приведенного принципа развязки и согласования с самыми разнообразными индукторами, обеспечивая при этом необходимую электрическую безопасность обслуживающего персонала. Этот принцип может быть использован независимо от мощности установки там, где схемой инвертора уже предусмотрено использование коммутирующей индуктивности и где есть возможность создать с ней и индуктором магнитную связь.

Библиографический список

1. Васильев А.С. Источники питания электротермических установок / Васильев А.С., Гуревич С.Г. Иоффе Ю.С. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 248с.: ил.

2. Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок / [Беркович Е.И., Ивенский Г.В., Иоффе Ю.С., Моргун В.В.] 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинград. отд-ние, 1983. - 208с.

3. Установки индукционного нагрева: учебное пособие для вузов/ А.Е. Слухоцкий и др.; под ред. А.Е. Слухоцкого. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1981.- 170 с.

4. Ламанов С.Л. Особливості роботи однокоміркового резонансного інвертора на гальванічне розв'язаний індукційний нагрівач / С.Л. Ламанов, О.І. Комісаренко, Л.Ф. Михайлова // Сборник научных трудов ДонГТУ. – 2009. – № 29. – С. 378 – 386.

5. Система автоматизированного исследования схем силовой электроники. / А.С. Васильев, С.В. Дзлиев, С.А. Федосин, Ю.И. Блинов // Техническая электродинамика, 1985. - №1. - С. 3 – 6.

6. Анализ электромагнитных процессов в автономном последовательном инверторе методом эквивалентных генераторов./ В.В. Шипицын, В.И. Лузгин, А.А. Новиков [и др.] // Техническая электродинамика, 1983. - №2.- С. 39 – 45.

7. Саратовский Р.Н. Анализ работы полумостового резонансного инвертора на индукционную нагрузку / Р.Н. Саратовский // Сборник научных трудов ДонГТУ, 2010. – № 32. – С. 397 – 405.

Рекомендовано к печати д.т.н., проф. Заблудским Н.Н.

*к.т.н. Самчелеев Ю.П.,
к.т.н. Дрючин В.Г.,
к.т.н. Шевченко И.С.,
Белоха Г.С.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ОДНОФАЗНЫЙ ЧАСТОТНО-ТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Показана можливість побудови однофазного високоефективного частотно-струмового перетворювача.

Ключові слова: *високоефективний, частотно-струмовий, перетворювач.*

Показана возможность построения однофазного высокоэффективного частотно-токового преобразователя.

Ключевые слова: *высокоэффективный, частотно-токовый, преобразователь.*

Введение. Современные устройства преобразовательной техники (УПТ) работают в условиях постоянно действующих на них различных возмущений: внешних (колебания напряжения сети, частоты, асимметрии напряжений и токов и др.) и параметрических (изменение параметров нагрузки, регуляторов и др.) и при этом они являются, как правило, генераторами высших гармоник в сеть.

Поэтому УПТ должны отвечать требованиям, определяющим их эффективность: предельное быстродействие, точность, широкий диапазон регулирования тока (напряжения), малая чувствительность к действию возмущений, высокая степень электромагнитной совместимости с сетью и нагрузкой.

Цель работы. Продемонстрировать возможность построения УПТ, реализующего частотно-токовый режим, отвечающего указанным выше требованиям и выполненного в однофазном исполнении.

Материал исследования. Поставленная задача решается посредством объединения релейного принципа управления с принудительным формированием потребляемого из сети тока синусоидальной формы при отсутствии фазового сдвига между током и напряжением сети.

Функциональная схема преобразователя представлена на рисунке 1. В качестве нагрузки может быть двигатель постоянного тока [1], нагрузка активно-индуктивная или емкостная.

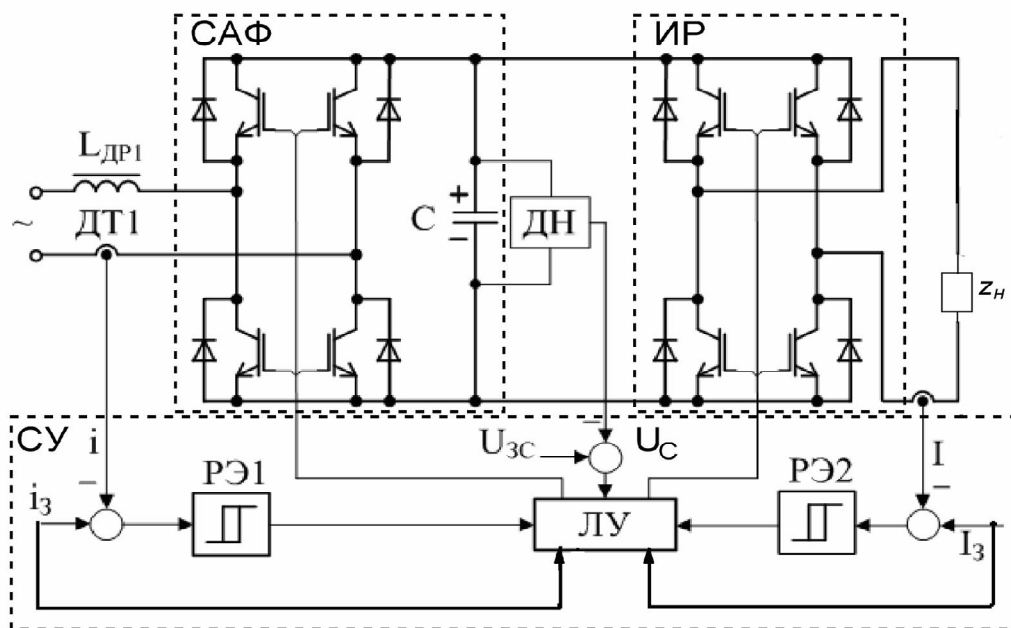


Рисунок 1 – Функциональная схема преобразователя

ДТ1 – датчик потребляемого из сети тока; ДТ2 – датчик тока нагрузки;
 ДН – датчик напряжения на конденсаторе; СУ – система управления
 САФ – силовой активный фильтр; ИР – импульсный регулятор

Ниже приводятся результаты компьютерного моделирования режимов работы предложенного преобразователя.

Режим стабилизации тока в цепи нагрузки. В данном случае преобразователь выступает в роли источника тока (ИТ), т.е. реализует режим при котором ток в цепи нагрузки не зависит от величины сопротивления. Принцип работы ИТ описан в [1]. На рисунке 2 представлены осциллограммы, показывающие реакцию ИТ на изменение напряжения сети (момент времени $t=0.052$ с, рисунок 2а) и на изменение сопротивления нагрузки (момент времени $t=0.123$ с, рисунок 2а). В обоих случаях ток в цепи нагрузки оставался неизменным, а потребляемый из сети ток оставался синусоидальным при $\cos\varphi=1$.

На рисунке 2б представлена реакция ИТ на уменьшение тока задания I_3 . Ток нагрузки I уменьшился с 15А до 10А (соответственно изменилась величина потребляемого из сети тока), сохранив при этом синусоидальную форму при $\cos\varphi=1$.

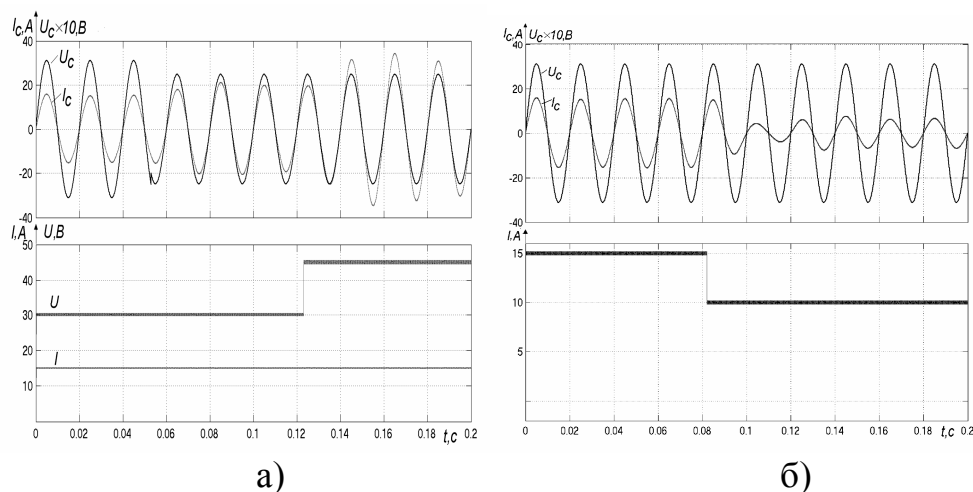


Рисунок 2 – Работа ИТ при действии возмущений

- а) изменение напряжения и сопротивления;
- б) изменение величины тока задания

Режим частотно-токового преобразования. В этом случае на вход подается I_3 соответствующей формы (в данном случае синусоидальной), ток в нагрузке повторяет величину и форму тока I_3 . Ток, потребляемый из сети, остается синусоидальным при $\cos\varphi=1$. На рисунке 3 показан процесс формирования тока в нагрузке с частотой 50Гц, 250Гц, 500Гц (прямое преобразование).

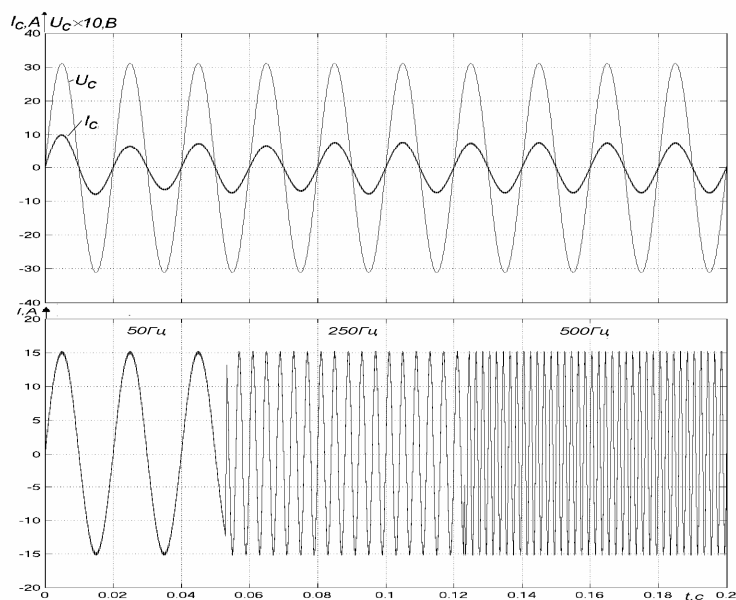


Рисунок 3 – Работа ИТ в режиме прямого ПЧ

На рисунке 4 показана работа ИТ также в режиме ПЧ. Отличие заключается в том, что в этом случае осуществляется преобразование постоянного напряжения U , подключенного к зажимам вместо Z_H , а нагрузка подключена ко входу преобразователя вместо сетевого напряжения (обратное преобразование). Из рисунка 4а следует, что в нагрузке сформирован ток с частотой 50Гц, 250Гц, 500Гц как и в случае представленном на рисунке 3. На рисунке 4б показана реакция ПЧ на увеличение сопротивления нагрузки (момент времени $t=0.052с$) и на увеличение постоянного напряжения U с 200В до 300В (момент времени $t=0.123с$). В обоих случаях ток в нагрузке оставался синусоидальным и неизменным по величине.

На рисунке 5 представлена зависимость максимально возможной частоты тока в нагрузке (частота пропускания) от ее индуктивности. Кривая 1 соответствует напряжению на конденсаторе активного фильтра 400В, кривая 2 – 600В.

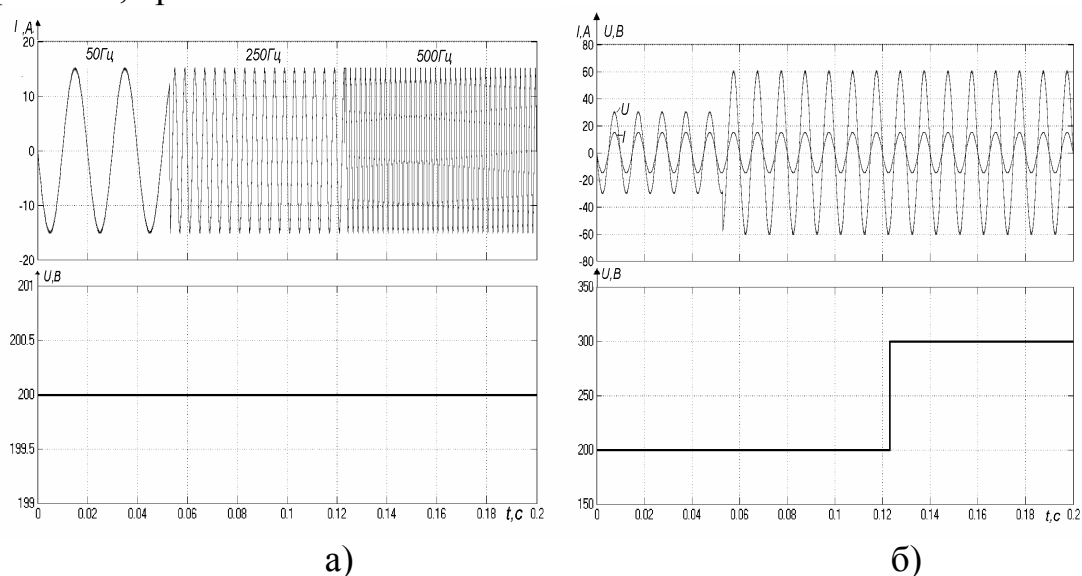


Рисунок 4 – Работа ИТ в режиме обратного ПЧ

а) формирование тока с частотой 50Гц, 250Гц, 500Гц

б) при увеличении сопротивления нагрузки и постоянного напряжения

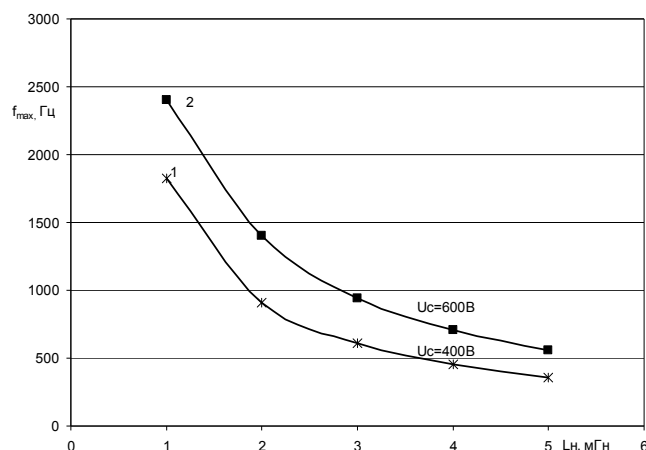


Рисунок 5 – Зависимость максимальной частоты тока в нагрузке от ее индуктивности

Из графиков следует, что с ростом индуктивности нагрузки L_n максимально достигаемая частота уменьшается, а при увеличении напряжения на конденсаторе – увеличивается. Максимальная частота фиксировалась в момент начала искажения формы тока I по отношению к форме тока I_3 .

Представленные зависимости совершенно одинаковые как в режиме преобразования переменного напряжения сети с $f=50$ Гц в переменный ток регулируемой частоты и его величины (прямое преобразование), так и в режиме преобразования постоянного напряжения в переменный ток регулируемой частоты и его величины (обратное преобразование).

Выводы. Предложенный авторами ИТ может работать как:

- преобразователь однофазного переменного напряжения неизменной частоты и амплитуды в постоянный ток с возможностью регулирования его величины и стабилизации на заданном уровне;
- преобразователь однофазного переменного напряжения неизменной частоты и амплитуды в однофазный ток различной формы и регулируемой амплитуды и частоты;
- преобразователь постоянного напряжения неизменной величины в однофазный ток регулируемой частоты и амплитуды.

Во всех режимах работы ИТ малочувствителен к действию внешних и внутренних возмущений, оставаясь при этом электромагнитно совместимым с сетью и нагрузкой.

Библиографический список

1. Дрючин В.Г. Однофазная электромагнитно совместимая с сетью система стабилизации тока / В.Г. Дрючин, Ю.П. Самчелеев, И.С. Шевченко, Д.И. Морозов // Проблемы энергосбережения в электротехнических системах. Наука, освіта і практика. Наукове видання. – Кременчук: КНУ, 2011. – Вип 1/20011(1) – 426с.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. Пазрандом Ю.Э.

к.т.н. Шевченко І.С.,

к.т.н. Морозов Д.І.,

Калюжний С.В.,

Барбашин О.Г.

(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗІ ДЖЕРЕЛ СТРУМУ

Наведені результати досліджень асинхронних електроприводів, що побудовані на базі джерел струму, а не напруги у роторному колі машини.

Ключові слова: *джерело струму, асинхронний електропривод, каскад, пружний момент, математична та цифрова модель.*

Приведены результаты исследований асинхронных электроприводов, построенных на базе источников тока, а не напряжения, в роторной цепи машины.

Ключевые слова: *источник тока, асинхронный электропривод, каскад, упругий момент, математическая и цифровая модель.*

Переважна більшість електроприводів будується на базі традиційних джерел напруги – електричних, електромагнітних, вентильних. Основною перевагою таких джерел є мінімум втрат в електроприводі при роботі його у режимі холостого ходу. Але для захисту двигунів від великих струмів у динамічних режимах та формування необхідної динаміки вони вимагають використання регуляторів струму.

Джерела струму (ДС), навпаки, дозволяють обійтися без регуляторів струму, оскільки самі є автоматичними (за природою) стабілізаторами струму на заданому рівні.

Існує ряд механізмів (намотувально-розмотувальні пристрої, лебідки тралів і інш.), які для свого приводу вимагають не традиційних джерел швидкості, а джерел моменту, які дають ряд переваг [1], у першу чергу захист ниток, канатів, полос від поривів.

Мета роботи – показати особливості режимів роботи асинхронної машини (АМ) при наявності в її роторному колі ДС та переваги використання такого варіанту електропривода (ЕП).

Дослідження та результати. Перш за все слід наголосити, що будь яке ідеальне ДС має безкінечно великі внутрішні е.р.с. і активний опір, що забезпечує йому близьку до нульової напругу. Це надає йому великих форсуючих можливостей, тобто воно може нівелювати вплив

електромагнітних інерційностей (індуктивностей), які знаходяться в його колі. Це дуже важливо для асинхронних двигунів, у яких дія індуктивностей (від потоків розсіяння) роторних обмоток суттєво впливає на величину електромагнітного моменту АМ:

$$M_E = c\Phi I_p \cdot \cos \varphi_p, \quad (1)$$

де I_p – ефективне значення струму ротора;
 $c\Phi$ – величина магнітного потоку,

$$c\Phi \approx c\Phi_n = \frac{M_n}{I_{pn} \cos \varphi_{pn}}, \quad (2)$$

де M_n , I_{pn} , $\cos \varphi_{pn}$ – номінальні значення моменту, роторного струму та коефіцієнта потужності;

$$\cos \varphi_{pn} = \frac{r_p}{\sqrt{r_p^2 + (x_p \cdot S_n)^2}}, \quad (3)$$

де r_p , x_p – значення активного та реактивного (при 50 Гц) опорів роторних обмоток АМ;

S_n – номінальне значення ковзання ротора.

Якщо ДС буде забезпечувати стабільність величини реактивного опору роторних обмоток на будь-якій частоті $f_2 = f_1 S$ – ($x_1 S$), то електромагнітний момент АМ буде залежати (при сталій напрузі статорних обмоток) тільки від величини роторного струму I_p , тобто вихідного струму ДС, що його формує.

Принцип дії ДС на режими роботи ЕП суттєво не впливає. Тому всі дослідження проводилися на базі індуктивно-ємнісного перетворювача (ІЄП), за одним з кращих варіантів – схеми Штейметца. Як показують дослідження [2,3] таке джерело має хороші статичні, динамічні та регульовальні властивості.

Функціональна схема асинхронного ЕП з джерелом струму в роторному колі наведена на рисунку 1. Оскільки частоти ротора і ДС – різні, використано узгодження через постійний струм – діодні випрямлячі $U1$, $U2$, що з'єднані послідовно. Для комутації (перемикання) роторного випрямляча $U1$ ввімкнено допоміжний перетворювач $U3$ у режимі інвертора струму, що «ведеться» мережею. У деяких випадках, для спрощення системи ЕП, інвертор струму можна замінити резистором R , падіння напруги на якому від протікання випрямленого струму I_d ДС виконує роль комутаційної е.р.с. Ця е.р.с. ($e_k = K_{ce} E_{pn}$) вдержує відповідний вентиль моста $U1$ в закритому стані, поки відповідна лінійна роторна е.р.с. не відкриє його. При цьому швидкість змінення струму ротора (частота) не має особливого значення через великі форсуючі можливості ІЄП. Струм ротора при будь-якій частоті (ковзанні S) відстає від своєї е.р.с. на кут не більший $\varphi_p = 18 \div 25^\circ$ (рисунк 2). Завдяки цьому електромагнітний момент АМ (середнє значення) практично пропорційний роторному струму I_p , а значить, і струму

ДС I_d (рисунок 3). Як тільки e_p стає такою, що менша падіння напруги в самій обмотці ротора від струму I_d , то описана картина в роторі порушується – зникає стабілізація роторного струму і моменту (лінія $S_{\min}(I_d)$ на рисунку 3):

$$E_{pn} S_{\min} \geq \frac{I_d^* \cdot Z_d^*}{K_{ci}}, \quad (4)$$

$$S_{\min} \geq \frac{I_d^* \cdot r_d^*}{\sqrt{\left(K_{ci} E_{pn}^*\right)^2 - \left(I_d^* x_r^*\right)^2}}. \quad (5)$$

Завдяки комутуючому інвертору $U3$ діодний роторний перетворювач $U1$ виступає в ролі інвертора випрямленого струму i_d ДС, який «ведеться» АМ. Остання може розглядатися як асинхронізована синхронна машина.

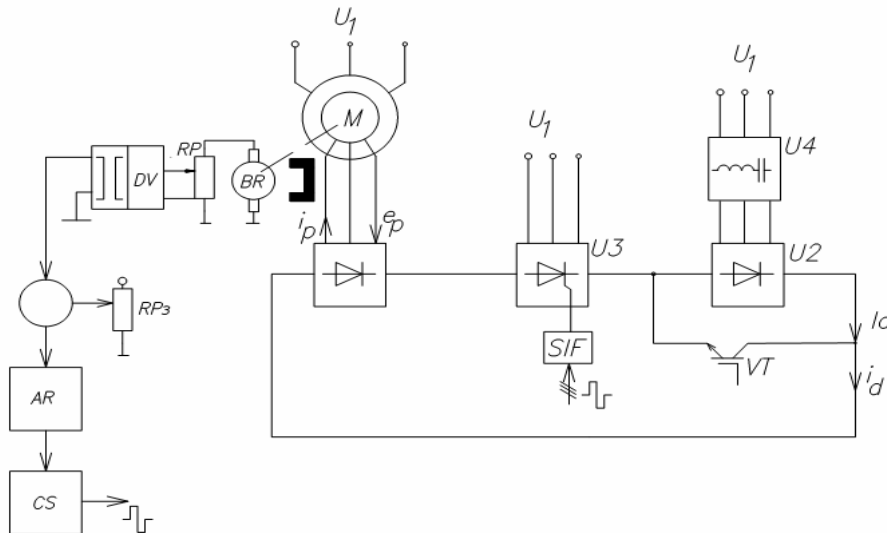


Рисунок 1 – Функціональна схема асинхронного ЕП з ДС у роторному колі

Для стабілізації та регулювання швидкості використовують зворотній зв'язок за цією координатою, та шунтуючий вихід ДС транзистор VT , який керується релейною або аналоговою системою CS . Працюючи у ключовому режимі, транзистор забезпечує змінення вихідного струму ДС в межах $I_d \div 0$ ($I_d = K_{ci} U_n / X_c$, $K_{ci} = 1.22 \div 1.28$, U_n – величина лінійної напруги мережі живлення, X_c – реактивний опір конденсатора на частоті 50 Гц).

ДС при цьому може розглядатися як регульоване джерело з коефіцієнтом передачі:

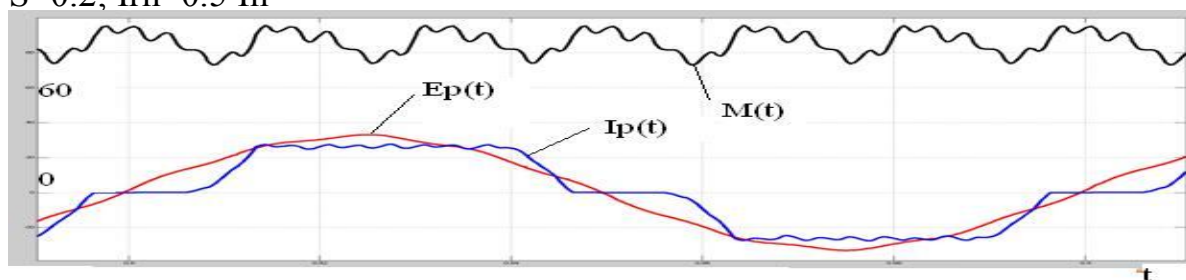
$$K_D = I_d / U_{p\omega}, \quad (6)$$

де $U_{p\omega}$ максимальне значення вихідної напруги регулятора швидкості $AR(U_{p\omega}=10\div 12\text{ В})$.

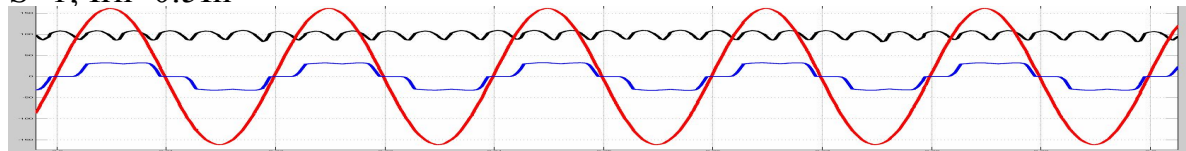
Рівняння механічної характеристики (МХ) такого ЕП в замкненому стані буде мати вид:

$$\omega = \omega_3 - \frac{M}{c\Phi_d \cdot K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_D}, \quad (7)$$

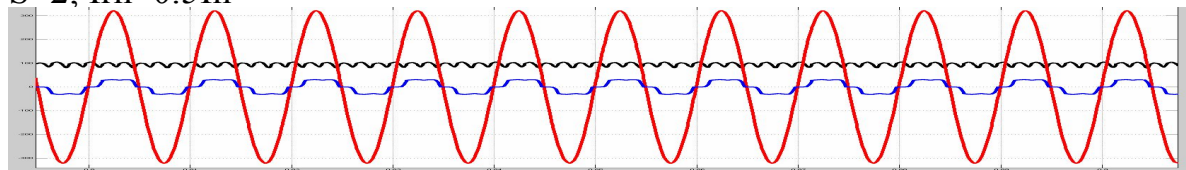
де $K_{p\omega}, K_{\omega}$ - коефіцієнти підсилення регулятора швидкості та каналу зворотного зв'язку за швидкістю;
 $S=0.2; I_{rn}=0.5 I_n$



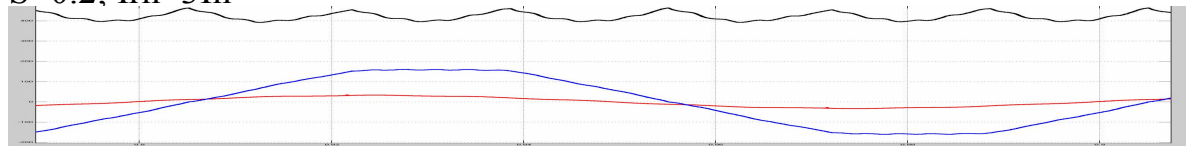
$S=1; I_{rn}=0.5 I_n$



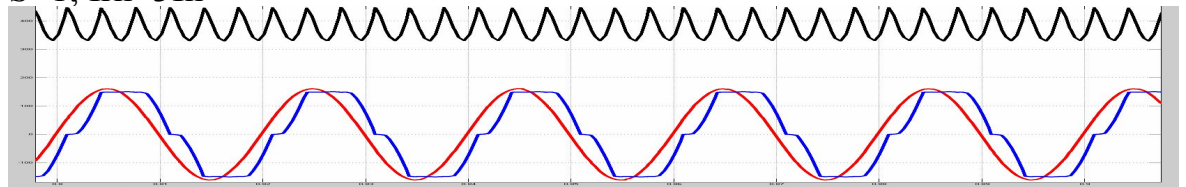
$S=2; I_{rn}=0.5 I_n$



$S=0.2; I_{rn}=3 I_n$



$S=1; I_{rn}=3 I_n$



$S=2; I_{rn}=3 I_n$

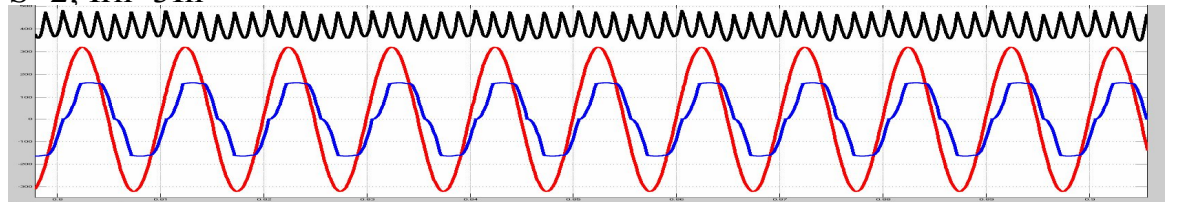


Рисунок 2 – Осцилограми е.р.с. e_p , струму i_p та моменту M при різних значеннях ковзання ротора ($S=0.2, 1, 2$)

$c\Phi_d$ - магнітний потік АМ, що перерахований на випрямлений струм ротора $c\Phi_d = K_{ce} E_{pn} / \omega_0$, ($K_{ce} = 1.35$);

ω_3 , ω_0 – задана швидкість та швидкість обертання магнітного поля в зазорі.

На рисунку 3 такі МХ позначені $U_{3\omega} = 0.1, 0.5, 0.8$.

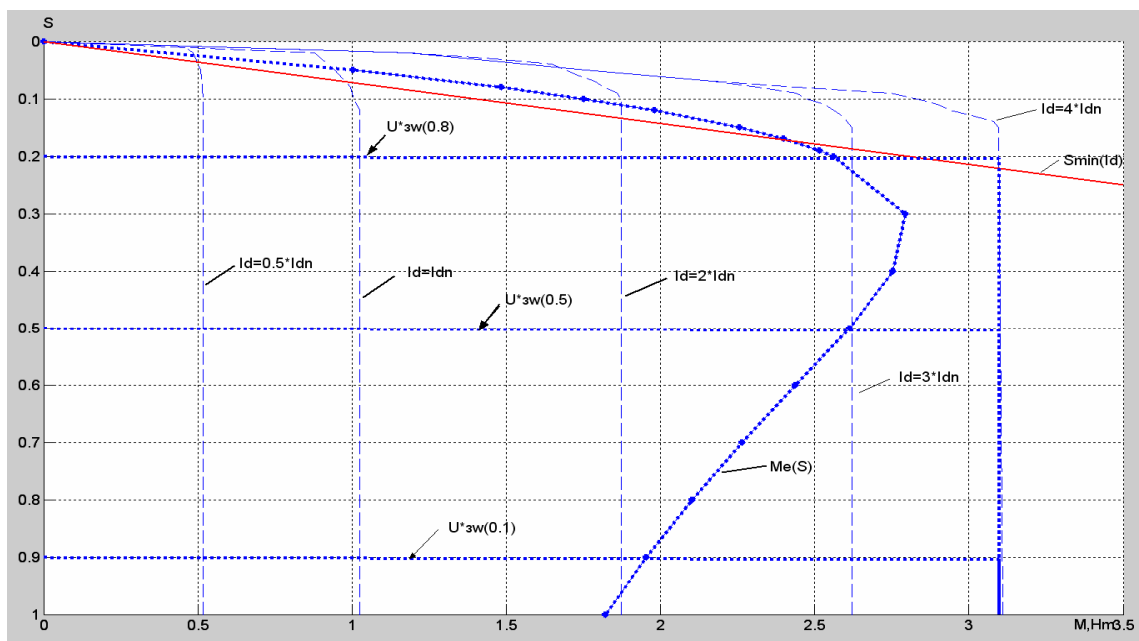


Рисунок 3 – Механічні характеристики асинхронного ЕП при наявності ДС в роторному колі АМ

Можливі і інші варіанти побудови ЕП на базі ДС у роторному колі. Це коли струм ДС – незмінний, а регулюється магнітний потік величиною напруги, що підводиться до статорних обмоток за допомогою тиристорного регулятора (ТРН). Якщо не враховувати насичення сталі АМ, то МХ ЕП будуть мати вид:

$$\omega = \omega_3 - \frac{M \omega_0 K_e}{K_{p\omega} \cdot K_{\omega} \cdot K_{ce} \cdot K_T I_d}, \quad (8)$$

де K_e – коефіцієнт трансформації е.р.с АМ;

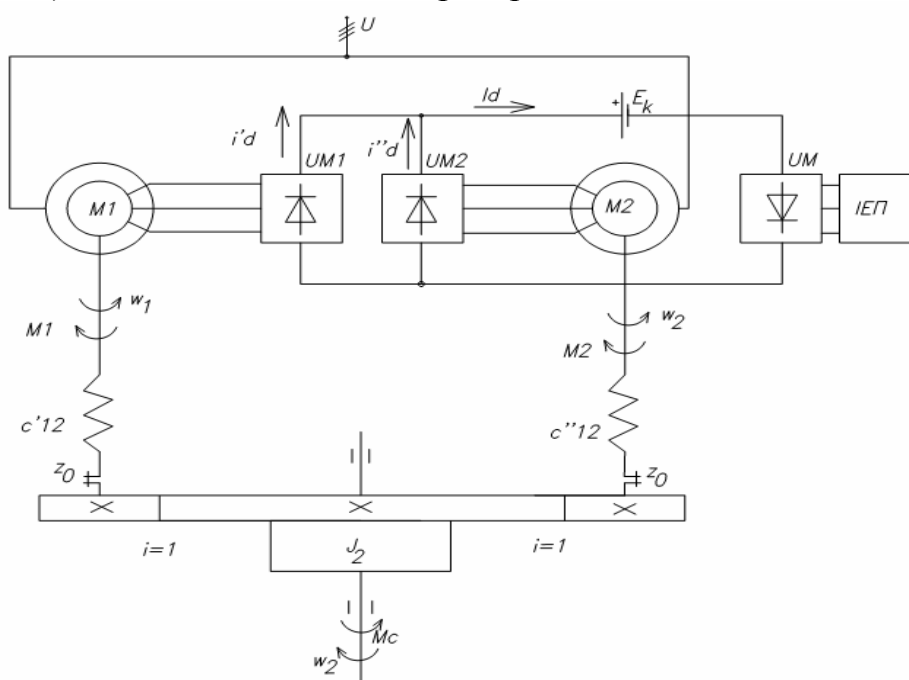
K_T – коефіцієнт підсилення (передачі) тиристорного регулятора напруги.

Як відомо з теорії ЕП, МХ, що мають практично нульову жорсткість, забезпечують відсутність електромагнітного зв'язку між енергіями, які накопичуються в індуктивностях якірної (роторної) обмотки машини та її махових масах. А це дає можливість формувати момент двигуна незалежно від пружного моменту у податливому валопроводі, зменшуючи цим величину останнього.

$$K = \sqrt{1 + (\Omega_1 / \Omega_0)^2}, \quad (9)$$

де Ω_1, Ω_0 - частоти вільних коливань валопроводів при заземлених (нерухомих) відповідно механізмі і роторах.

де Ω_1, Ω_0 - частоти вільних коливань валопроводів при заземлених (нерухомих) відповідно механізмі і роторах.


$$\Omega_0 = \sqrt{C_{12}/J_1}, \quad \Omega_1 = \sqrt{C_{12}/J_2}, \quad (10)$$

де C_{12} – коефіцієнт жорсткості валопроводів;
 J_1, J_2 – моменти інерції роторів АМ (разом з деталями що знаходяться на їх валах) і механізму, що приведений до вала двигуна відповідно.

Результати досліджень (рисунк 5) показують, що при появі у передачі в каналі першого двигуна навантаження пружні моменти у валопроводах коливаються у протифазі (назустріч один одному), в той час коли в традиційній системі ЕП при послідовному вмиканні роторних обмоток та живленні від джерела напруги, вони співпадають за фазою. Це призводить до більш швидкого вирівнювання миттєвих швидкостей роторів та їх моментів за рахунок перерозподілу випрямлених струмів i_d роторних обмоток ($0.2 \leq t \leq 0.45$ с) – більш завантажений двигун одержує більший струм за рахунок другого, оскільки сумарний I_d ДС залишається незмінним.

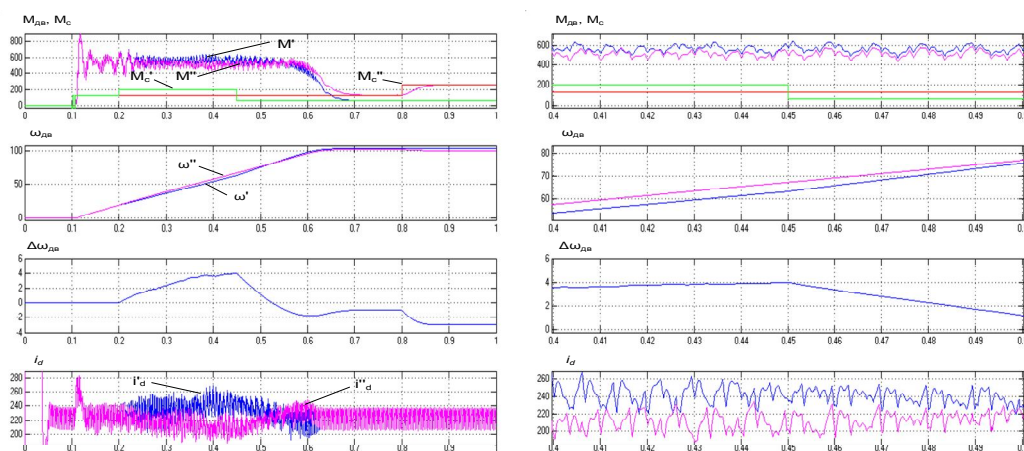


Рисунок 5 – Результати моделювань взаємозв'язаного через передачу дводвигунного асинхронного ЕП на базі ДС у роторних колах

($M_{дв}$; M_{12} ; M_c – моменти двигунів, пружні та навантаження, $\omega_{дв}$, $\Delta\omega$ – швидкості роторів окремих двигунів та розбаланс цих швидкостей)

Права частина рисунка демонструє фрагмент загального процесу на інтервалі 0,4-0,5 с для спостереження зняття навантаження з першого вала (0,45с).

Тенденція «взаємодопомоги» двигунів один одному за рахунок перерозподілу загального струму I_d ДС зберігається навіть при відсутності прямого механічного зв'язку між валами окремих двигунів, що дуже важливо для електроприводів механізмів переміщення, наприклад мостових, козових і порталних кранів. На рисунку 6 показані осцилограми моментів двигунів, їх швидкостей та випрямлених струмів роторів при розгоні дводвигунного ЕП на базі ДС у роторному колі при змінюванні навантажень на окремі вали (накид навантаження $0,5 M_n$ при $t=0.2$ с на перший вал, а при $t=0.8$ с - номінального на другий).

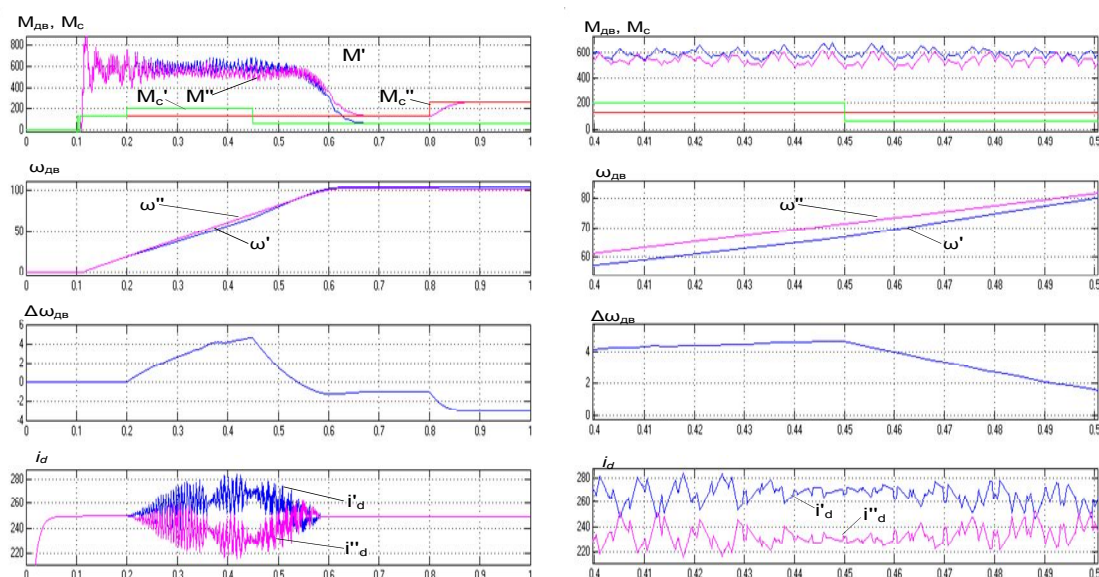


Рисунок 6 – Осцилограми моментів, швидкостей, випрямлених струмів та розбалансу швидкостей двигунів механічно не зв'язаних між собою при їх розгоні і зміні навантажень на окремі вали

Якщо ДС регульоване, то можна будувати і регульовані взаємозв'язані асинхронні ЕП при введенні зворотного зв'язку за швидкістю одного з двигунів.

Рівняння МХ такого ЕП буде мати вид (зворотній зв'язок за швидкістю першого двигуна):

$$\omega_1 = \omega_3 - \frac{M_{c1} + M_{c2}}{K_{p\omega} K_{\omega} K_D} \frac{\omega_0}{K_{ce} E_{pn}}, \quad (11)$$

$$\omega_2 = \omega_3 + 0.5 \frac{(M_{c1} - M_{c2}) r_d}{(c\Phi_d)^2} - \frac{M_{c1} + M_{c2}}{K_{p\omega} K_{\omega} K_D c\Phi_d}, \quad (12)$$

де M_{c1} , M_{c2} – моменти навантаження на окремі вали;

r_d – еквівалентна величина активного опору кола випрямленого струму (окрім ДС).

Похибка у «відслідковуванні» другим двигуном швидкості першого буде такою:

$$\Delta\omega = 0.5 \frac{\omega_0^2 r_d}{(K_{ce} E_{pn})^2} (M_{c2} - M_{c1}). \quad (13)$$

При використанні нерегульованого ДС у роторному колі АМ та ТРН в статорних одержують регульований взаємозв'язаний (роторними колами) асинхронний ЕП, динамічні процеси в якому демонструються осцилограмами (рисунок 7). Як видно з них, другий двигун намагається повторити швидкісний режим першого, незважаючи на великі відмінності навантажень на окремих валах.

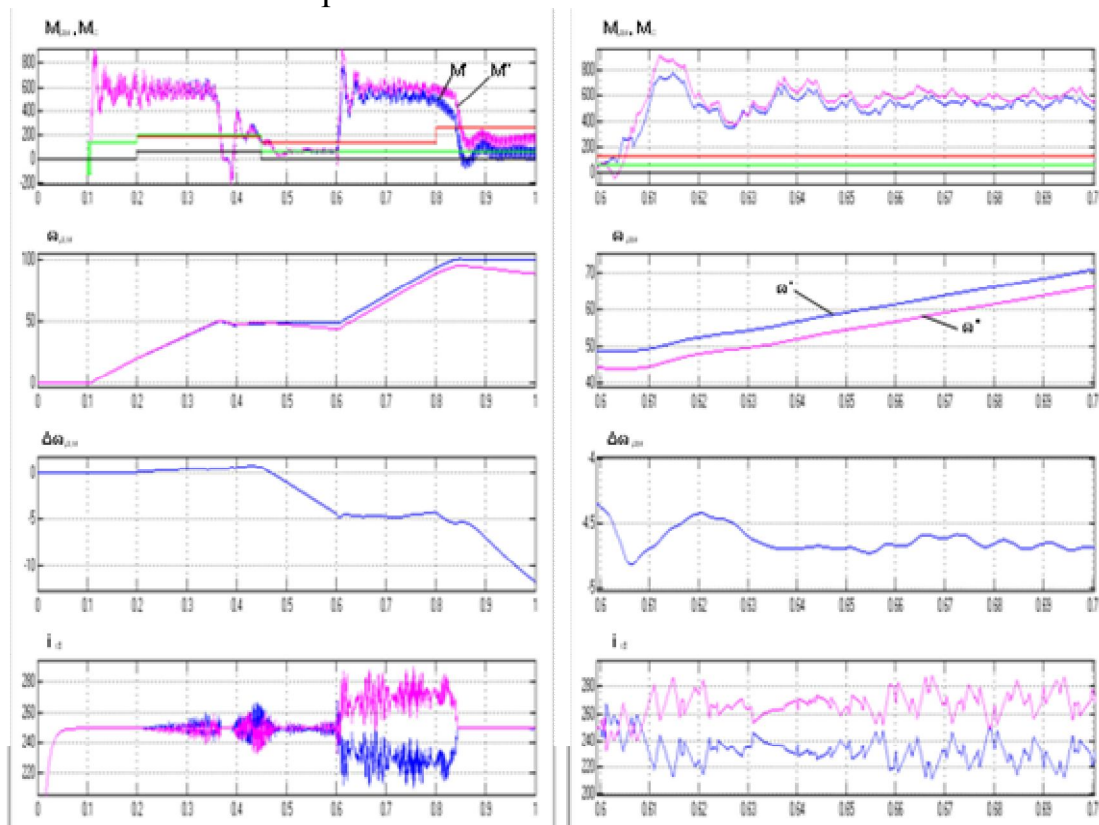


Рисунок 7 – Динамічні процеси у вазємозв'язаному дводвигунному асинхронному ЕП на базі ДС у роторних колах АМ при дії як управляючих (ω_3) так і збурюючих (M_{c1} , M_{c2}) факторів

Висновки

1. Використання джерел струму у роторних колах асинхронних двигунів дозволяє «ідеально» розподілити навантаження на їх вали при спільній роботі на один механізм.
2. Паралельне живлення роторних кіл асинхронних двигунів від одного джерела струму дозволяє значно покращити частотні властивості таких ЕП порівняно з традиційними на базі джерел напруги.

Бібліографічний список

1. Волков И.В. Электроприводы со стабилизированным током в силовых цепях / Волков И.В., Исаков В.Н. – М. : Радио и связь, 1991. – 216 с.

2. Морозов Д.И. Статические свойства источников тока на базе индуктивно-емкостного преобразователя / Д.И. Морозов, А.А. Сонов, Н.И. Андреева, С.В. Калюжный // Сборник ДонГТУ. – 2010. - № 32.— С. 366-375.

3. Морозов Д.И. Статические свойства источников тока на базе индуктивно-емкостного преобразователя / Д.И. Морозов, А.А. Сонов, Н.И. Андреева, С.В. Калюжный // Сборник ДонГТУ. – 2010. - № 32. — С. 376-385.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Лушиком В.Д.

*к.т.н. Мурга В.В.,
Мурга О.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСЛОВИЙ КОРРЕЛЯЦИИ ДИПОЛЕЙ ВОЗБУЖДЕННЫХ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ

Представлені експериментальні дані по кореляції збуджених активних центрів імпульсних лазерів. Показана динаміка параметрів випромінювання лазерів при збудженні активного середовища складними імпульсами накачування. Наводяться кількісні характеристики зміни енергії і просторових параметрів випромінювання при використанні колективних ефектів.

Ключові слова: імпульсні твердотільні лазери, кореляція збуджених активних центрів, колективні ефекти, складне накачування.

Представлены экспериментальные данные по корреляции возбужденных активных центров импульсных лазеров. Показана динамика параметров излучения лазеров при возбуждении активной среды сложными импульсами накачки. Приводятся количественные характеристики изменения энергии и пространственных параметров излучения при использовании коллективных эффектов.

Ключевые слова: импульсные твердотельные лазеры, корреляция возбужденных активных центров, коллективные эффекты, сложная накачка.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Такие эксплуатационные характеристики лазеров, как выходная мощность, расходимость излучения и распределение интенсивности излучения в пучке в значительной степени влияют на точность локационных наблюдений. Увеличение интенсивности излучения лазера улучшают соотношение сигнал/шум, позволяет повысить надежность получаемых данных и при неизменных параметрах приемника позволяет улучшить условия приема и обработки отраженного сигнала.

Постановка задачи. Как показали исследования, использование явлений, происходящих в активной среде при развитии генерируемого излучения, приводит к повышению энергетической эффективности передатчика. Наблюдается более симметричная форма гигантского импульса, уменьшается расходимость излучения, увеличивается выходная

энергия, повышается повторяемость характеристик, что повышает стабильность параметров генерируемых импульсов. Цель данных исследований – обеспечить условия создания коррелированного состояния возбужденных активных центров при которых можно наблюдать коллективное излучение.

Изложение материала и его результаты. Интерес представляет возможность использования коллективных эффектов, возникающих в активной среде при определенных режимах возбуждения. Наблюдение подобных эффектов проводилось в твердотельных импульсных лазерах с традиционной оптической накачкой и сопровождалось существенными изменениями характеристик генерируемого излучения. Полученные результаты интересны с точки зрения разработки оптимальных условий возбуждения активной среды лазеров и более эффективного использования действующих передатчиков, работающих в режиме модуляции добротности.

Электрическая схема, которая используется для инициализации коллективных взаимодействий в активной среде лазеров, позволяет более точно дозировать энергию, подводимую к лампам накачки, что сказывается на повторяемости и стабильности энергетических характеристик генерируемого излучения.

Существующие способы стабилизации параметров лазерного излучения позволяют зафиксировать изменение выходной энергии в пределах 10 % при изменении питающего напряжения на 10 % от номинального значения [1]. Этот способ стабилизации параметров лазерного излучения успешно применяется для твердотельных лазеров с электрооптической модуляцией добротности. В данном случае предполагаются некоторые непроизводительные потери энергии, поскольку при данном способе стабилизации используется управление излучением по заданному уровню инверсии активной среды.

На рисунке 1 показана осциллограмма импульса возбуждения лазера, который позволяет обеспечить установление коррелированного состояния возбужденных активных центров.

Включение добротности обеспечивает нарастание интенсивности поля в резонаторе при коллективизированном состоянии диполей возбужденных активных центров. При включении затвора через 30 мкс после последнего короткого импульса позволяет обеспечить увеличение энергии генерируемого излучения. Стабильность выходной энергии при этом заметно возрастает. Уменьшается разброс значений энергии в 1.5 раза. Помимо высокой повторяемости параметров генерируемого излучения использование коллективных взаимодействий позволяет увеличить энергетическую эффективность лазеров как в режиме модуляции добротности, так и в режиме свободной генерации.

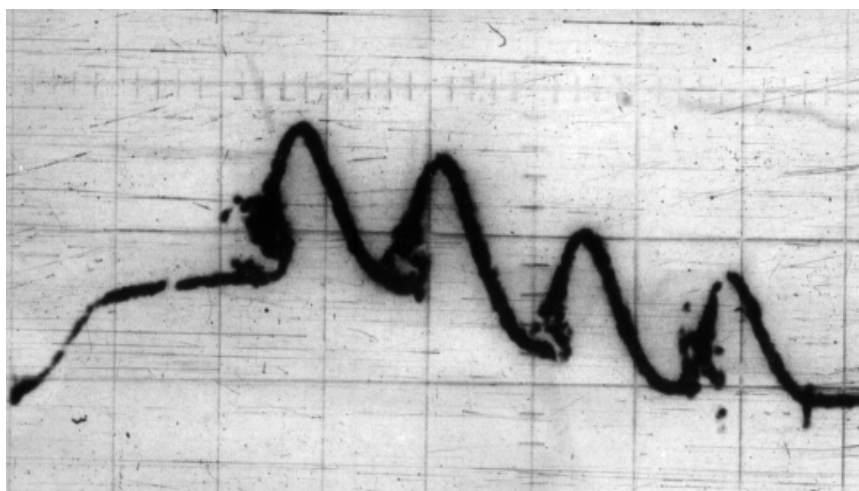


Рисунок 1 – Импульс возбуждения ламп накачки лазера, который обеспечивает установление связей между возбужденными активными центрами. Масштаб по горизонтали – 50 мкс/дел

При этом не возникает непроизводительных потерь энергии. Более того, отмечено увеличение выходной энергии лазера в 1.3 раза по сравнению с традиционным способом возбуждения. Помимо указанных результатов отмечено более равномерное распределение интенсивности излучения по торцу активного элемента, что приводит к уменьшению расходимости излучения в 1.4 раза.

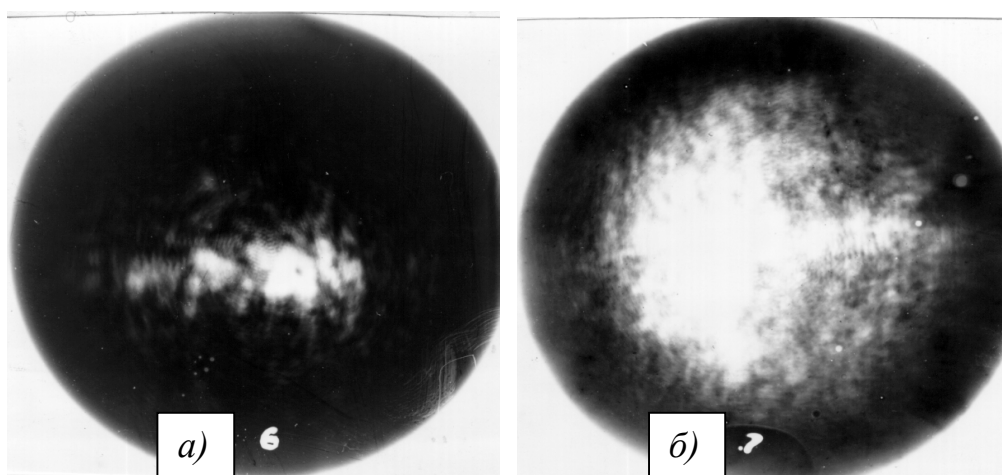


Рисунок 2 – Распределение интенсивности по торцу активного элемента при «гладкой» накачке (а) и при накачке «резонансной» последовательности коротких импульсов (б) при $E_n \approx 580$ Дж

В этом случае стабилизация параметров излучения возможна без дополнительных устройств, а лишь по тракту питания ламп накачки. Разработка такого режима со стабилизацией параметров производится для конкретного лазера с учетом типоразмера активного элемента, концентрации активных центров и режима генерации [2,3]. Последнее замечание позволяет уменьшить потери энергии при локации удаленных объектов.

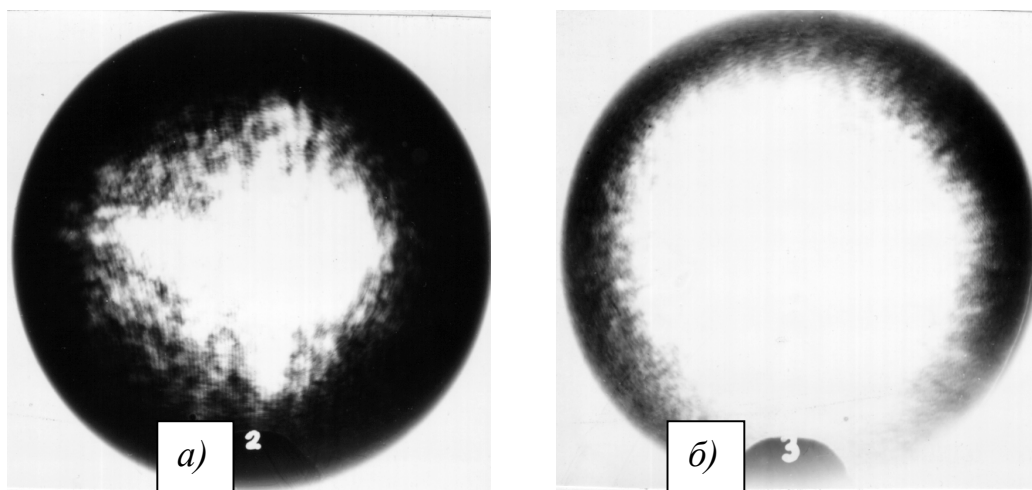


Рисунок 3 – Распределение интенсивности по торцу активного элемента при «гладкой» накачке (а) и при накачке «резонансной» последовательности коротких импульсов (б) при энергии накачки в обоих случаях 720 Дж

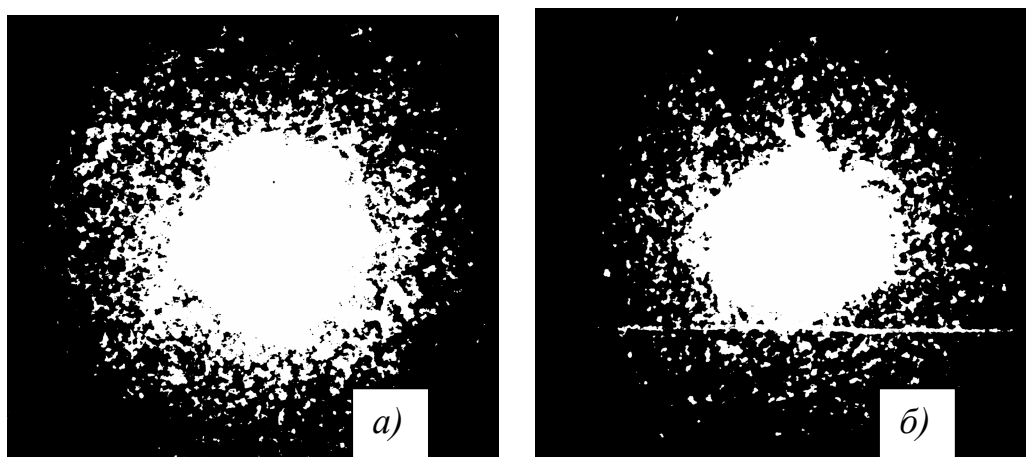


Рисунок 4 – Распределение поля излучения лазера в фокальной плоскости длиннофокусной линзы. Масштаб 100:1,

а) «гладкая» накачка: б) «резонансная» накачка

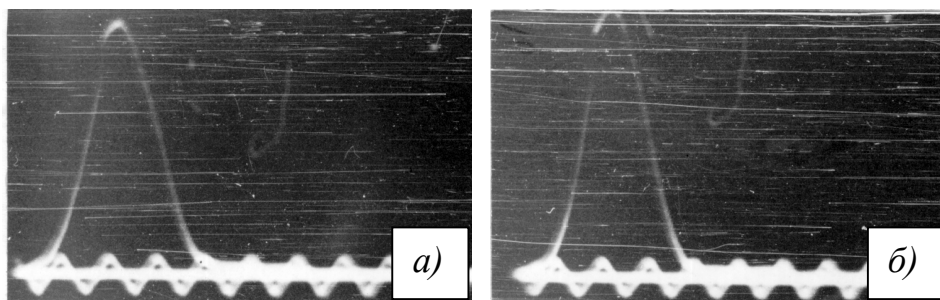


Рисунок 5 – Изменение формы гигантского импульса при возбуждении среды традиционным импульсом (а) и сложным импульсом накачки (б).
Период синусоиды – 10 нс

При оценке длительности импульса генерации на гранате в режиме модуляции добротности было отмечено (рисунок 5), что длительность в этом случае уменьшается на 15 – 20 % при сохранении энергии генерации.

Спад интенсивности за вершиной импульса определяется величиной потерь и происходит с постоянной времени

$$t_e \cong \frac{L}{c} (\alpha L - \ln \sqrt{r_1 r_2}), \quad (1)$$

где: c - скорость света в активной среде;

α - коэффициент, характеризующий поглощение среды, пропорционален

$(N_2 \frac{g_1}{g_2} - N_1)$ и в рассматриваемом случае равен

$$\alpha = 2 \frac{N_1 - N_2 \frac{g_1}{g_2}}{N}, \quad (2)$$

где g_1 и g_2 - вырождение уровней;

N - общее число активных центров.

При согласовании периода следования коротких пиков в последовательности со скоростью распространения возмущения в кристалле возможно получение коррелированного состояния возбужденных активных центров. Данное явление проявляется в увеличении выходной энергии моноимпульса в 1.25 – 1.3 раза и уменьшения расходимости излучения в 1,5 раза. подобное изменение параметров выходного излучения характерно при кооперативных эффектах в твердотельных активных средах, в частности при сверхизлучении.

Выводы.

Применение данной разработки в передатчиках ЛЛС значительно упрощает обработку сигнала. Используя радиолокационную формулу можно сделать оценки целесообразности использования полученных результатов для лазерных систем контроля дальности. Так требуемая для контроля цели мощность P_t может быть представлено выражением

$$P_t = \frac{4\pi P_r R^4 \Theta_t^2}{A_e \sigma S_t S_r},$$

где P_r - минимальная мощность обнаруживаемого сигнала;

R - дальность цели;

A_e - площадь приемной антенны;

S_t - коэффициент пропускания атмосферы или другой среды;

S_r - коэффициент пропускания оптики локатора;

σ - эквивалентная поверхность рассеивания цели.

Увеличение величины P_t в 1,5 раза и уменьшение расходимости Θ_t в 1.7 раза позволяет увеличить дальность действия систем контроля в 1.5 раза или же уменьшить мощность передатчика в 4.3 раза при сохранении значений параметров дальности и мощности обнаруживаемого сигнала. Одним из параметров систем контроля является их помехозащищенность. Использование предложенного режима работы позволит при неизменной питающей энергии перейти от режима счета фотонов к режиму детектирования огибающих оптического импульса, что значительно улучшает отношение сигнал/шум и позволяет улучшить контроль дальности лазерными локаторами, работающими в импульсном режиме.

Библиографический список

1. Денищик Ю.С. Управление электрооптическим затвором оптического квантового генератора по заданному уровню люминесценции активной среды / Денищик Ю.С., Мурга В.В. // Приборы и техника эксперимента. – 1986. – №6. – С. 160–163.

2. Денищик Ю.С. Оптимизация по КПД режима накачки активных элементов передатчиков лазерных спутниковых дальномеров / Денищик Ю.С., Мединский А.Г., Мурга В.В. / Анализ движения небесных тел и оценка точности их наблюдений. - Рига, 1988. – С. 206–211.

3. Колпаков Н.Д. О возможности использования взаимного влияния активных центров лазерных рабочих сред для повышения эффективности накачки / Колпаков Н.Д., Денищик Ю.С., Мурга В.В. // Электронная техника. Сер. Лазерная техника и оптоэлектроника. – 1990. – Вып. 4(56). – С. 63 – 64.

4. Мурга В.В. Влияние коллективных явлений в активной среде лазеров на их излучательные характеристики / Мурга В.В. // Тезисы докладов Международной конференции "Лазеры и современное приборостроение". – С-Пб. - 1993. - С. 16 - 17.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Заблодским Н.Н.

*к.т.н. Андреева Н.І.,
к.т.н. Дрючин В.Г.,
Калюжний С.В.,
к.т.н. Самчелеев Ю.П.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)*

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗІ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ

Наведені результати теоретичних досліджень статичних і динамічних властивостей багатодвигунних взаємозв'язаних електроприводів, які побудовані на базі джерел струму, а не напруги.

Ключові слова: *двودвигунний електропривод, джерело струму, математична модель, механічна характеристика.*

Приведены результаты теоретических исследований статических и динамических свойств многодвигательных взаимосвязанных электроприводов, построенных на базе источников тока, а не напряжения.

Ключевые слова: *двухдвигательный электропривод, источник тока, математическая модель, механическая характеристика.*

Існує ряд механізмів, поєднаних однією технологією, що вимагає підтримання в них з певною точністю однієї швидкості, або відповідного їх співвідношення (наприклад, переміщення мостових, козових або порталних кранів). Електроприводи таких механізмів будуються на базі традиційних джерел напруги.

Це призводить до нерівномірного розподілу навантажень окремих двигунів, перекосів у положенні транспортних механізмів і, як результат, - прискореного зносу елементів механічного обладнання. Усі ці явища можуть бути значно послаблені, якщо електроприводи будуть будуватись не як джерела швидкості, а як джерела моменту, тобто мати абсолютно м'яку механічну характеристику.

Мета даної роботи – показати можливості електроприводів, побудованих з використанням джерел струму, а не напруги.

Дослідження та їх результати. Функціональна схема дводвигунного електропривода постійного струму, наприклад, переміщення моста крана, наведена на рисунку 1. До його складу входять: два двигуни незалежного збудження M1, M2 і вентильний збудник UF, що управляється регулятором швидкості AR. Живлення якірних обмоток двигунів

організовано від спільного джерела струму у вигляді резонансного індуктивно-ємнісного перетворювача (ІЄП) UM1 з діодним випрямлячем UM2 на його виході. Для досягнення стабілізації швидкості на заданому рівні ω_3 використано жорсткий негативний зв'язок за швидкістю одного з двигунів (датчик BR).

Завдяки резонансним явищам у реактивних елементах (дросель-конденсатор) ІЄП перетворює незмінну напругу мережі у незмінний струм, який після випрямляча надходить у якірні обмотки двигунів. При цьому величина цього струму практично не залежить від ЕРС двигунів, він тільки перерозподіляється між якірними обмотками ($i_1 + i_2 = I$) завдяки різниці цих ЕРС. Чим більша ЕРС, тим менша частина струму I потрапить у якірну обмотку двигуна, щоб зменшити момент і швидкість цього двигуна та наблизити її до рівня другої.

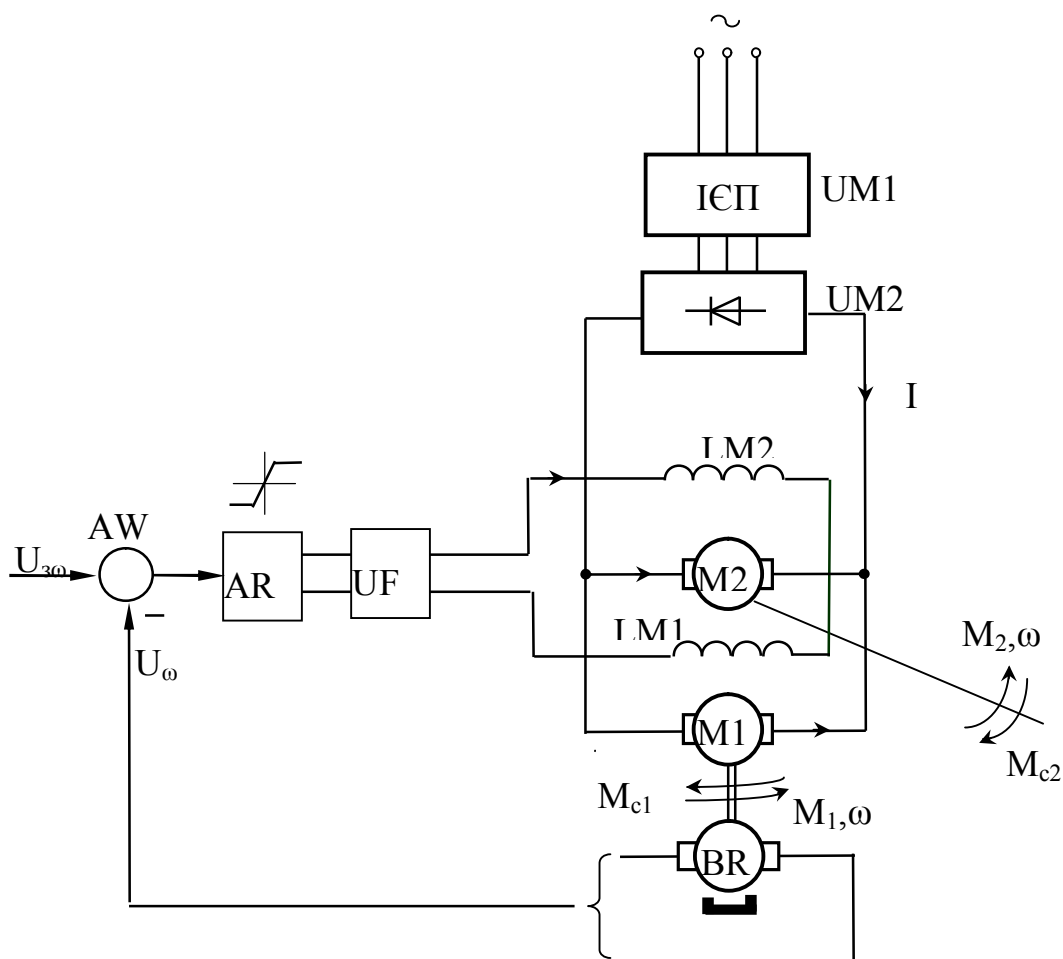


Рисунок 1 - Функціональна схема дводвигунного взаємозв'язаного електропривода на базі джерела струму

Математична модель дводвигунного взаємозв'язаного електропривода має вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi C i_1 - M_{c1} = J_1 \frac{d\omega_1}{dt} \\ \Phi C i_2 - M_{c2} = J_2 \frac{d\omega_2}{dt} \\ L_{\text{я}} \frac{di_1}{dt} + i_1 r_{\text{я}} + \Phi C \omega_1 = L_{\text{я}} \frac{di_2}{dt} + i_2 r_{\text{я}} + \Phi C \omega_2, \\ i_1 + i_2 = I = \text{const} \\ L_f \frac{di_f}{dt} + i_f r_f = U_f = K_{\text{nf}} K_{\text{p}\omega} K_{\omega} (\omega_3 - \omega_1) \\ \Phi = F(i_f), \Phi \cong K_{\phi} i_f \end{array} \right. \quad (1)$$

де L_f, r_f - величина індуктивності та активного опору контуру збудження двигунів;

$L_{\text{я}}, r_{\text{я}}$ - величини індуктивності та опору якірної обмотки двигуна;

I - величина струму джерела;

i_1, i_2 - величини якірних струмів двигунів;

C - конструктивна стала двигуна ($C = Z_n N_{\text{я}} / 2 \pi a_{\text{я}}$);

K_{ϕ} - коефіцієнт, що враховує зв'язок між струмом збудження та магнітним потоком;

M_{c1}, M_{c2} - величини статичних навантажень на валах двигунів;

ω_3 - задане значення швидкості ($\omega_3 = U_{3\omega} / K_{\omega}$);

$K_{\text{nf}}, K_{\text{p}\omega}$ - величини коефіцієнтів підсилення збудника та регулятора швидкості;

K_{ω} - величина коефіцієнта передачі канала зворотнього зв'язку за швидкістю ($K_{\omega} = U_{\text{ym}} / \omega_{3\text{m}}$);

$\omega_{3\text{m}}, U_{\text{ym}}$ - максимальні значення швидкості та сигналу зворотнього зв'язку, що відповідає їй.

Перевішивши структурну схему (рисунк 2) в усталений режим ($p \rightarrow 0$), одержимо рівняння механічної характеристики електропривода відносно вала першого двигуна

$$\omega_1 = \omega_3 - \frac{(M_{c1} + M_{c2}) r_f}{K_{\text{p}\omega} K_{\omega} K_{\text{nf}} C K_{\phi} I}. \quad (2)$$

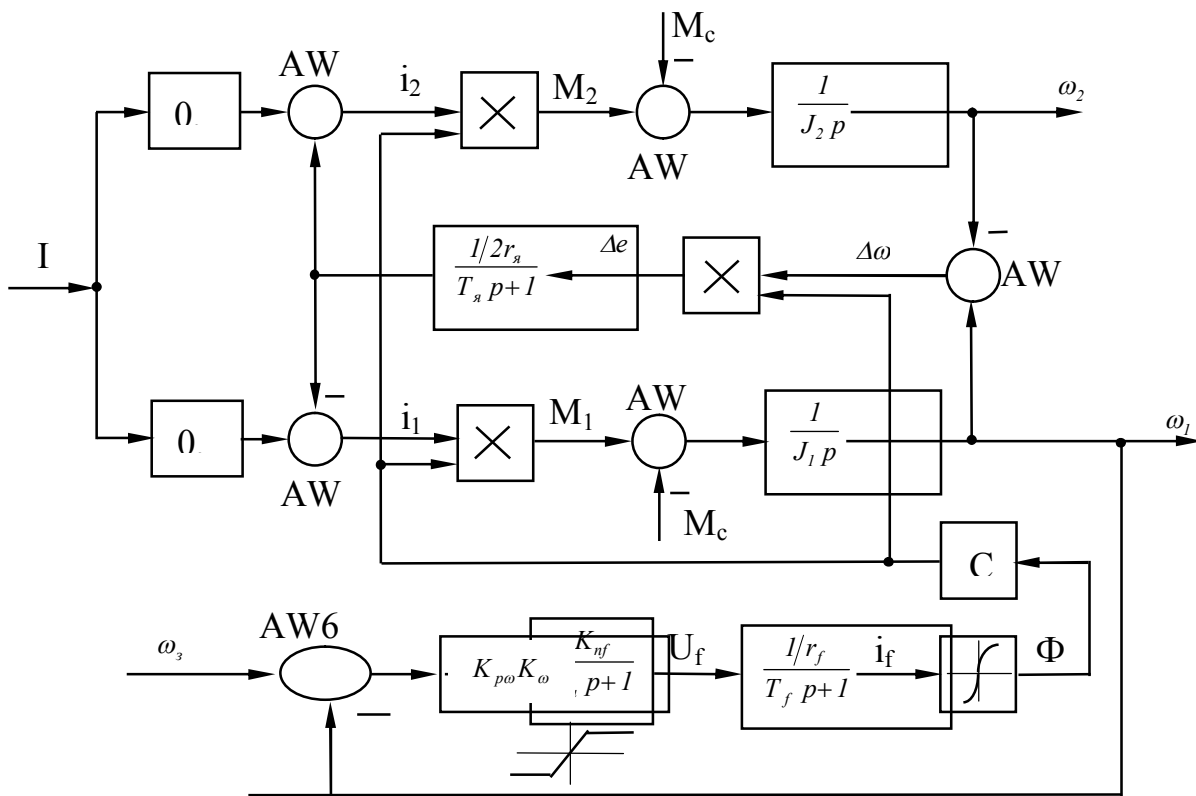


Рисунок 2 - Структурна схема дводвигунного взаємозв'язаного електропривода на базі джерела струму

Похибка відслідковування другим валом першого дорівнює:

$$\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = -\frac{M_{c1} - M_{c2}}{(M_{c1} + M_{c2})^2} I^2 r_y. \quad (3)$$

Як видно із (3), величина цієї похибки буде тим меншею, чим меншим буде розбаланс навантажень на валах двигунів і більше сумарне навантаження при струмі I джерела, враховуючи, що $((M_{c1} + M_{c2})/I)^2 = (C\Phi)^2$.

Функціонування такого вала можливе лише при умові, що $(M_{c1} + M_{c2}) < C\Phi_m I$, де Φ_m - максимальна величина магнітного потоку машин з кривої намагнічування. Чим вона більше, тим інтенсивніша динаміка електропривода (більше прискорення).

Дослідження динаміки такого електропривода проводилось в середовищі SPS програми MATLAB. Схемотехнічна модель наведена на

рисунку 3. Вона враховує всі основні явища, що протікають у розглянутому електроприводі.

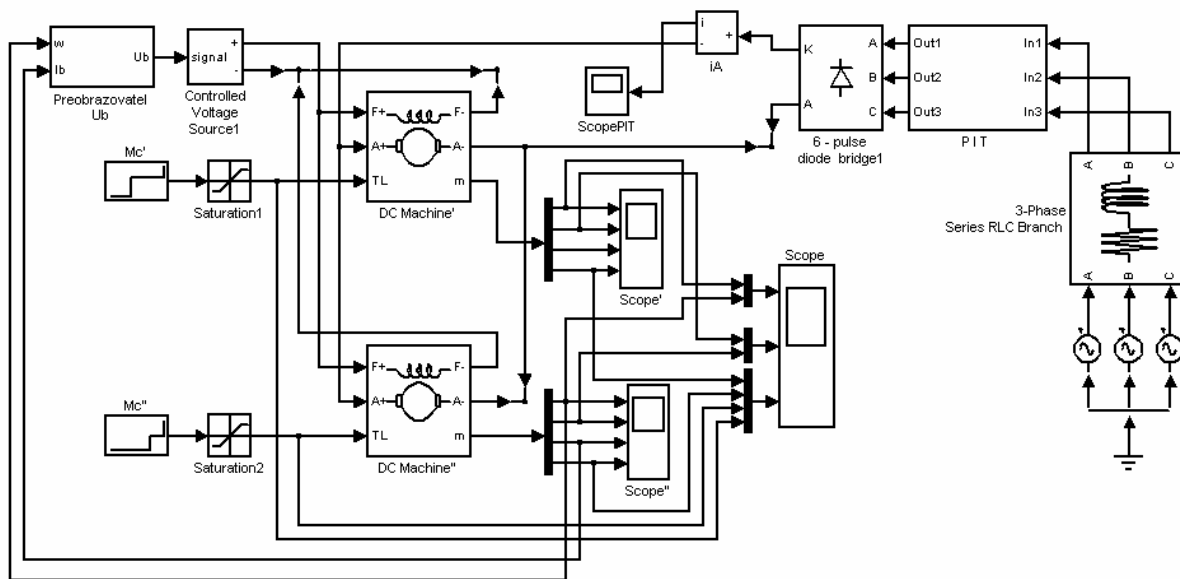


Рисунок 3 - Схема моделі дводвигунного взаємозв'язаного електропривода на базі джерела струму

Ліва частина моделі відтворює регулятор швидкості зі збудником, а також формувачі M_{c1}, M_{c2} ; права – мережу змінного струму, ІСП та діодний випрямляч.

Перевірялась реакція електропривода на такі види управляючих та збурюючих дій (рис.4.):

- 1) пуск обох двигунів ($t = 1,5c$) з навантаженнями $M_{c1} = 30Hm$, $M_{c2} = 50Hm$ до швидкості $0,5\omega_n$;
- 2) накид додаткового навантаження на вал першого двигуна до $M_{c1} = 60Hm$ ($t = 2c$);
- 3) накид додаткового навантаження на вал другого навантаження до $M_{c2} = 80Hm$ ($t = 3,5c$);
- 4) збільшення завдання на швидкість електропривода до ω_n ($t = 5,5c$).

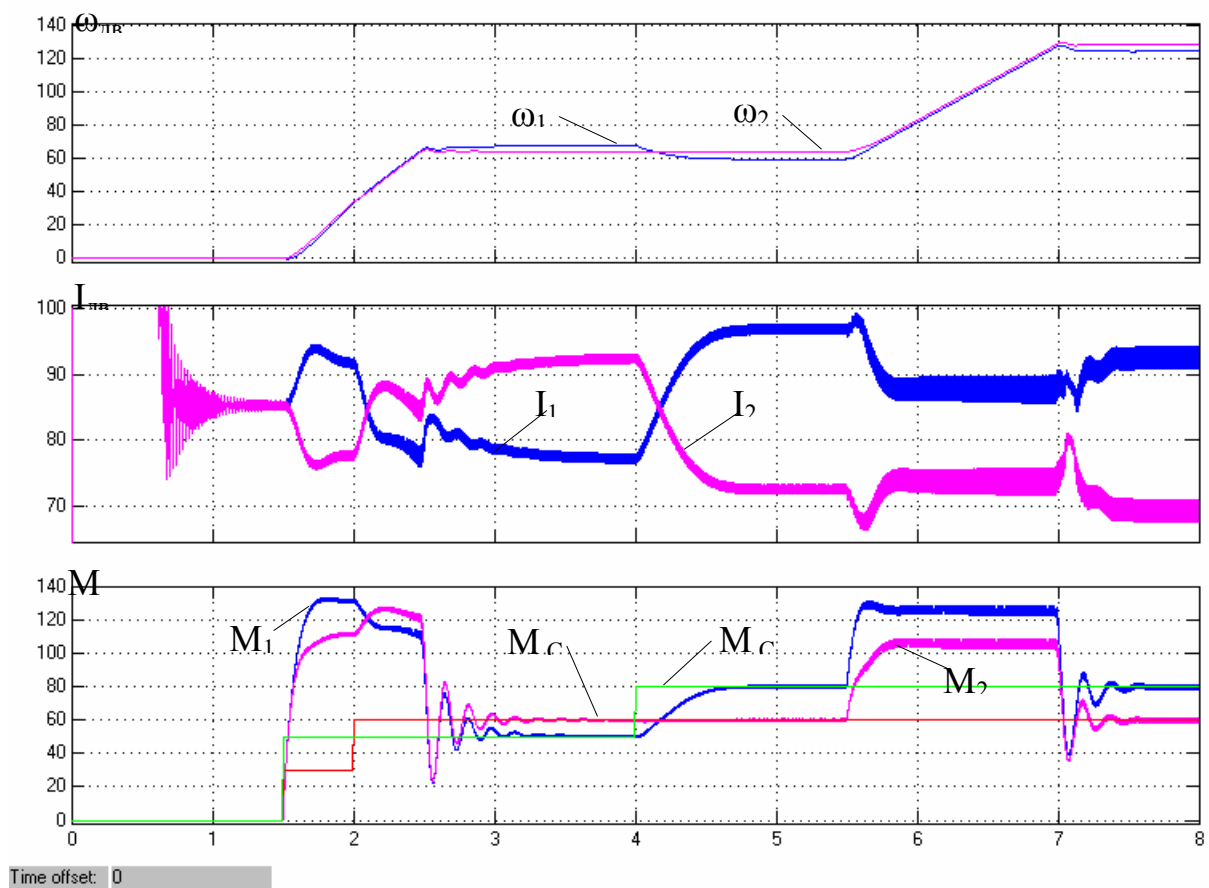


Рисунок 4 - Результати досліджень динамічних і статичних властивостей дводвигунного взаємозв'язаного електропривода на базі джерела струму

Як видно, з результатів дослідження, другий двигун, незважаючи на всі збурюючі дії, практично повторює поведінку першого, що говорить про ефективність використання системи багатодвигунного електропривода з живленням від джерел струму для механізмів переміщення.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Луциком В.Д.

к.т.н. Мурга В.В.,
Ешков А.О.,
Цыкалов М.С.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ И ПРОДУКТИВНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ АГРОКУЛЬТУР

У статті відображаються механізми регуляції рослин і методи впливу на неї. Розглянуто механізми впливу когерентного електромагнітного випромінювання на насіння агрокультур та наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень у даній області.

Ключові слова: лазерне випромінювання, лазерна активація насіння, фітохром, захисні властивості рослин.

В статье отображаются механизмы регуляции растений и методы воздействия на нее. Рассмотрены механизмы воздействия когерентного электромагнитного излучения на семена агрокультур и приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований в данной области.

Ключевые слова: лазерное излучение, лазерная активация семян, фитохром, защитные свойства растений.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Когерентное излучение лазеров находит все большее применение в самых различных отраслях производства Украины. Достаточно перспективным направлением в настоящее время можно рассматривать использование лазерной обработки семян агрокультур. Это дает возможность придания растениям довольно высоких показателей как на стадии развития, так и на стадии плодоношения. В современных условиях это направление признано приоритетным в плане экологически чистых и ресурсосберегающих технологий, которые позволяют повысить урожайность и снизить себестоимость продукции.

Изучение механизмов фотобиологических процессов служит теоретическим фундаментом повышения продуктивности агрокультур, придания агрокультурам требуемых свойств, интенсификации развития агрокомплекса и в борьбе с загрязнением окружающей среды.

Анализ исследований и публикаций. Существуют данные о том, что лазерная стимуляция растений существенно влияет на динамику их роста, сохранность полученного урожая и собственно на саму урожайность, снижает энергоемкость агропродукции, а следовательно, повышает экономическую эффективность производства агрокультур [1]. Однако в каждом новых условиях необходимо подбирать свой режим обработки, апробировать его в производственных условиях для получения максимально возможного урожая [2].

Больших успехов в данном направлении достигли во многих университетах Российской Федерации и Украины [2]. В том числе различные теоретические и экспериментальные работы по предпосевной обработке семян лазерным излучением проводились и в Донбасском государственном техническом университете на кафедре радиофизики.

Постановка задачи. Увеличение продуктивности аграрного комплекса заключается в повышении урожайности растений, всхожести семян. Этого можно добиться при воздействии непосредственно на семена растений.

Целью этих исследований было изучение влияния лазерного излучения на урожайность, всхожесть, скорость роста и сопротивляемость заболеваниям различных агрокультур.

Изложение материала и его результаты. В семени каждого растения содержится в компактном, «свернутом» виде генетическая информация о «взрослом» растении и «инструкции» о том, как себя вести в той или иной жизненной ситуации (когда, при какой температуре и при какой влажности всходить; как реагировать на засуху, на переувлажнение, заморозки; когда зацвести и т.д. и т.п.).

У семян есть сенсоры, которые «открывают» полноту использования генетического потенциала, увеличивают сопротивляемость к неблагоприятным факторам окружающей среды: засухе, повышенной температуре, переувлажнению, пониженным температурам и заморозкам, засолению почвы, повышают сопротивляемость (иммунитет) к вирусным, бактериальным и грибковым заболеваниям.

Эти же сенсоры, единожды «запущенные» вызывают сотни, а порой и тысячи последовательных «цепочечных» биохимических реакций не только в самих семенах, но и в растениях, которые из них вырастут, на всех фазах их развития. Итогом этих реакций является повышение сопротивляемости, выживаемости растений, повышение их урожайности.

Растения и их семена очень чувствительны к изменению освещения. Существуют тонкие биохимические механизмы, позволяющие растениям отслеживать изменения продолжительности, интенсивности и спектрального состава действующего света, с тем чтобы вовремя

включать или выключать различные физиологические процессы: развитие хлоропластов и листа, цветение растения и другие явления.

При освещении растений происходят следующие реакции – поглощение кванта света; перераспределение энергии в молекуле, находящейся в электронно-возбужденном состоянии; фотохимические превращения энергии в клетках, что приводит к определенным биологическим эффектам.

Особенностью фоторегуляторных систем является их высокая квантовая чувствительность, сочетающаяся с большой эффективностью биологического действия. Это обусловлено триггерным принципом действия систем фоторегуляции: здесь свет служит только сигналом, запускающим сложную цепь последовательных биохимических изменений, приводящих в конечном результате к определенному фотобиологическому эффекту.

Чтобы растение «почувствовало» квант света, необходимы пигмент-белковые комплексы (фоторецепторы), поглощающие в данной части спектра и преобразующие квант в биохимический сигнал, т.е. должна произойти фотохимическая реакция. Энергия поглощенного кванта преобразуется двумя путями (в зависимости от фоторецептора): 1) изменяется конформация белка и запускается каскад фосфорилирования (рецептор красного света); 2) идут реакции восстановления вторичных мессенджеров (рецептор синего света).

Для оценки качества и количества квантов в красной области у растений есть фоторецептор фитохром, состоящий из фитохромобилина в комплексе с белком.

Фитохром может находиться в двух основных формах: красной $\Phi_{кр}(660)$ и дальней красной $\Phi_{дкр}(730)$. «Красные кванты» ($\lambda=660\text{ нм}$) поглощаются красной формой фитохрома, и происходит переход $\Phi_{кр} \rightarrow \Phi_{дкр}$. Появление $\Phi_{дкр}$ под действием света с $\lambda=660\text{ нм}$ – сигнал о том, что свет пригоден для фотосинтеза. Дальняя красная форма фитохрома $\Phi_{дкр}$ переходит в $\Phi_{кр}$, при действии света с $\lambda=730\text{ нм}$, и самопроизвольно в темноте (этот переход медленнее). Появление $\Phi_{кр}$ под действием света с $\lambda=730\text{ нм}$ или в темноте – сигнал о том, что условий для фотосинтеза нет.

На основании сигналов фитохромной системы растение изменяет стратегию роста: готовится к фотосинтезу или все силы расходует на рост; приступает к цветению или к листопаду; семена прорастают или дожидаются более благоприятного освещения и т.д.

Из многих фотореакций, опосредованных фитохромом, лучше всего изучены, вероятно, инициация цветения, прорастание семян и пожелтение этиолированных тканей.

Прорастание семян в большинстве случаев стимулируется образующимся на красном свете $\Phi_{\text{дкр}}$ -фитохромом, однако в некоторых случаях свет может подавлять этот процесс.

Кратковременное освещение красным светом этиолированных проростков влечет за собой глубокие изменения. Последние выражаются в том, что увеличиваются размеры листьев, ткани приобретают зеленую окраску (обусловленную синтезом хлорофилла и других хлоропластных компонентов), а запасы крахмала интенсивно утилизируются до начала активного фотосинтеза.

У различных растений фитохромная система используется также как регулятор состояния покоя и старения, роста корней, движения листьев и общего поддержания внешнего вида в процессе роста.

Воздействуя на фитохром, находящийся в семенах растений, определенным импульсом необходимой длины волны (660 нм) или последовательностью импульсов 660-730-660 для превращения одной формы фитохрома в другую можно изменять свойства растений.

Способность лазеров излучать на определенной длине волны позволяет применять их для предпосевной обработки семян. Узкополосность излучения позволяет избегать одновременного контакта фитохрома со светом другой длины волны, который приводит к обратному превращению форм фитохрома. Таким образом, можно активировать фитохром Φ_{730} ($\Phi_{\text{дкр}}$), облучив семена лазерным лучом красного света (660 нм). Относительно высокая энергия лазерного излучения позволяет фитохрому долго находиться именно в активированном состоянии, что позволяет растениям прорасти даже в неудовлетворительных для этого условиях.

В ходе экспериментов, проводимых на кафедре радиофизики Донбасского государственного технического университета, при расчете оптимальных режимов обработки семян установлено, что активность ростовых процессов после светолазерной обработки имеет периодические изменения. Наиболее выраженный эффект проявляется в первый период изменений, что составляет время от 5 до 15 суток для различных культур. Этот период, необходим для внутренней перестройки, происходящей в клетках зародыша семени.

Источниками наиболее эффективного воздействия признаны гелий-неоновый лазер и ксеноновая газоразрядная лампа, спектр излучения которой близок к солнечному распределению энергии. Величина доз падающего излучения, соответствующая наибольшему эффекту, лежит в пределах $5 \cdot 10^{-8}$ Дж – $6 \cdot 10^{-2}$ Дж.

На диаграммах (рисунок 1) указана активность (в процентах от контроля) развития растений, полученных в исследованиях.

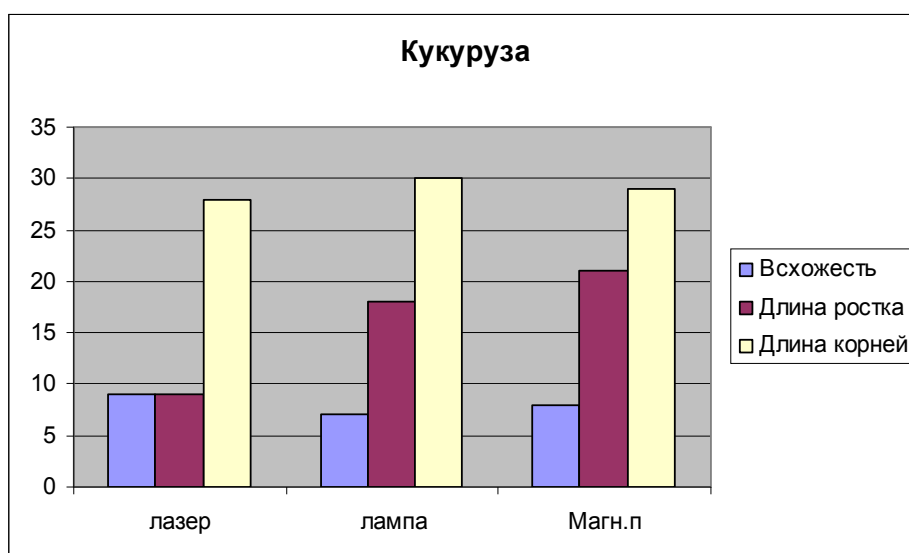
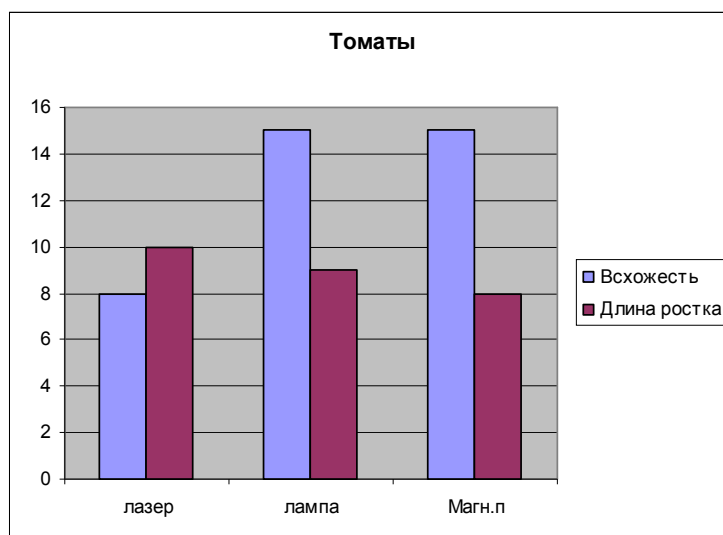
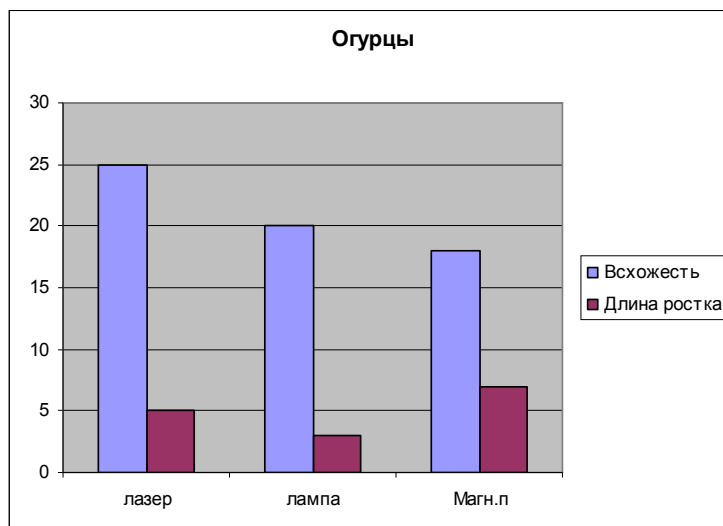


Рисунок 1 – Показатели развития растений после обработки семян.

За 0 – уровень приняты данные контрольной группы растений

Известно, что интенсивное внешнее воздействие приводит к существенной перестройке процессов метаболизма, изменению параметров миотического обмена. Возникает вопрос насколько растения и продукция при производстве данной культуры соответствуют качественному составу данного вида, производимого без какой-либо обработки. Неоднократные исследования продукции, получаемой из растений, семена которых прошли светоимпульсную обработку, указывают на отсутствие эффекта накопления вредных веществ. Более того, эта продукция характеризуется более сбалансированным составом и большим содержанием биологически активных веществ, полезных для человека.

Использование физических методов обработки приводящих к активизации процессов развития, сокращения сроков достижения товарной спелости культур, повышения всхожести, представляет собой альтернативу химической обработки семян при проведении предпосевной подготовки.

Выводы:

1. Основываясь на результатах исследований следует отметить, что при воздействии ближнего красного света на семена различных агрокультур повышается их жизнеспособность, ускорение темпов вегетативных процессов, увеличение количества семян, их всхожесть и сила роста.

2. Увеличение активности ростовых процессов семян, которые прошли светоимпульсную обработку, сопровождается повышением устойчивости растений к неблагоприятным внешним воздействиям и позволяет получать прибавку продукции в пределах 20-30%.

3. Внедрение светолазерной предпосевной обработки семян позволит повысить технологичность производства агрокультур, а также снизить себестоимость производств агропромышленного комплекса.

Библиографический список

1. Никулин Р.Н. Исследования воздействия СВЧ-излучения низкой интенсивности на биологические объекты / Никулин Р.Н. – ИРЕ РАН, 2009. - С. 104-106. – (Материалы III Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь»).

2. Чазова И.Ю. Экономический эффект лазерной обработки семян тепличных культур / Чазова И.Ю. - Пермь, 2008. – Ч.2. - С. 504 – 507. – (Сб. науч. тр. всерос. науч.-практ. конф., 16 - 17 марта).

3. Суковатая И.Е. Фотобиофизика / Суковатая И.Е., Кратасюк В.А., Свидерская И. В. и др. // ИПК СФУ: Красноярск, 2008. 54 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Заблодским Н.Н.

к.т.н. Мурга В.В.,
Омеман Дж.,
Антропов И.И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАЗМОТРОНА С ЖИДКИМ КАТОДОМ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Представлено аналіз використання плазмотронів з рідким катодом для різних технологічних операцій. Розглянуто механізм дії слабострумових розрядів між рідким електродом і металевою поверхнею. Проведено обґрунтування доцільності використання плазмотронів з рідким електродом.

Ключові слова: плазмотрон з рідким катодом, коронний розряд, дуговий розряд, зміцнення поверхні.

Представлен анализ использования плазмотронов с жидким катодом для различных технологических операций. Рассмотрен механизм действия слаботочных разрядов между жидким электродом и металлической поверхностью. Проведено обоснование целесообразности использования плазмотронов с жидким электродом.

Ключевые слова: плазмотрон с жидким катодом, коронный разряд, дуговой разряд, упрочнение поверхности.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Газовые разряды с жидкими электродами представляют практический интерес как источники неравновесной плазмы с большим отрывом электронной температуры от температуры тяжёлых частиц. Газоразрядная плазма с такими свойствами даёт возможность получать недостижимые другими путями технологические эффекты, к числу которых относятся: полировка металлических поверхностей с одновременным уменьшением параметра шероховатости Ra от 0,40 до 0,20 мкм и менее; синтез органических соединений в растворах электролитов и др. Перспективность использования генераторов неравновесной газоразрядной плазмы с жидкими электродами в этих целях подтверждается результатами многих экспериментальных исследований.

Однако возможности технологических применений генераторов неравновесной газоразрядной плазмы с жидкими электродами ещё мало изучены. Актуальность исследований в этом направлении обуславливается целым рядом причин: дешевизной жидких электродов, высокой

степенью экологической чистоты технологических процессов с применением неравновесной плазмы газового разряда с жидкими электродами и другие.

Анализ исследований и публикаций. В настоящее время нет теории газового разряда с жидкими электродами. Отсутствуют систематические экспериментальные исследования неравновесной плазмы газового разряда с жидкими электродами при повышенных токах и мощностях.

В отличие от разрядов дугового типа разряды с жидкими электродами горят при относительно высоком напряжении $U \geq 10^3$ В и низкой плотности тока $j \approx 10^{-1} - 1$ А/см². Изменение состава и концентрации электролита обеспечивает возможность управления режимом горения в широких пределах. Длительность горения разряда, которая при использовании металлических электродов обычно лимитируется их эрозией, для жидких электродов практически не ограничена. Электроды широко используются для обработки металлических поверхностей, нанесения покрытий различного назначения и так далее [1].

В работе [2] представлены результаты экспериментального исследования электрического разряда в воздухе при атмосферном давлении между твёрдым анодом и жидким катодом в виде электролита, который смачивает пористый диэлектрик. Электролитом служили техническая вода и водные растворы NaCl различной концентрации. Исследования проводились при токах $I = 0,2...3,5$ А, межэлектродных расстояниях = 5...50 мм и диаметре пористого диэлектрика $d = 40...90$ мм.

Отличительные особенности проявляются в тех режимах, когда электролит интенсивно испаряется с поверхности диэлектрика, не образуя сплошной плёнки на рабочей поверхности. Образующийся поток пара электролита с поверхности катода в сторону анода. Объёмная структура, ток и напряжение разряда зависят от режима поступления электролита на рабочую поверхность диэлектрика. При расходах электролита, когда он кипит на поверхности или внутри пористого диэлектрика в приповерхностном слое, разряд состоит из множества микроканалов, сгруппированных в несколько струй. Разряд горит с характерным шумом. С увеличением тока громкость шума возрастает.

Наличие потока паров электролита подтверждается также и возможностью поддержания разряда при достаточно больших межэлектродных расстояниях. При концентрации NaCl равном 0,5 % вертикальный разряд сравнительно устойчиво горит в промежутке длиной = 50 мм между медным анодом (25 мм) и пористым диэлектриком диаметром 40 мм. При этом ток и напряжение изменялись в пределах, соответственно, 1,5...3,0 А и 700...750 В. Амплитуда колебаний тока составляла 0,1 А, амплитуда колебаний напряжения - 50 В.

Постановка задачи. Целью данной работы является поиск новых способов получения плазмы газового разряда с жидкими электродами, а также экспериментальное исследование свойств такой плазмы с целью расширения возможностей её технологического применения.

Изложение материала и его результаты. Высоковольтные электрические разряды между металлическим анодом и жидким электролитным катодом обладают рядом технологических возможностей. Например, они позволяют получить оксидные порошки [3]. Подробное внешнее описание разряда при малых токах приводится в [4]. При малых токах и токах менее 1 А разряд имеет многоканальную структуру с диффузными электродными пятнами как это имело место в условиях работы [4]. Различие во внешнем виде появляется когда межэлектродное расстояние превышает 5 мм. В этом случае внутри объёма разряда наблюдаются ярко-белые контрагированные каналы, опирающиеся на анод. Количество каналов зависит от формы и размеров анода, а также от тока. При повышении тока эти каналы удлиняются в сторону катода.

При анализе вольтамперных характеристик [2] (рис. 1), видно, что для того, чтобы разряд горел непрерывно, необходимо поддерживать расход электролита через пористый диэлектрик в определённых пределах. Пунктирный участок соответствует режиму кипения электролита.

Как и в случае разряда между твёрдым анодом и электролитом, налитым в сосуд, при увеличении концентрации электролита напряжение разряда падает, что свидетельствует о поступлении паров электролита в разряд. Материал твёрдого анода на напряжение разряда практически не влияет.

Обобщая результаты исследований, можно сделать следующие выводы. Применение катода в виде электролита, который смачивает пористый диэлектрик, позволяет: 1) располагать электроды в любом положении друг относительно друга; 2) поддерживать стабильный разряд при значительных межэлектродных расстояниях. Таким образом, существенно расширяются технологические возможности разряда и появляются новые варианты конструктивного исполнения плазмохимических аппаратов с электролитными разрядами.

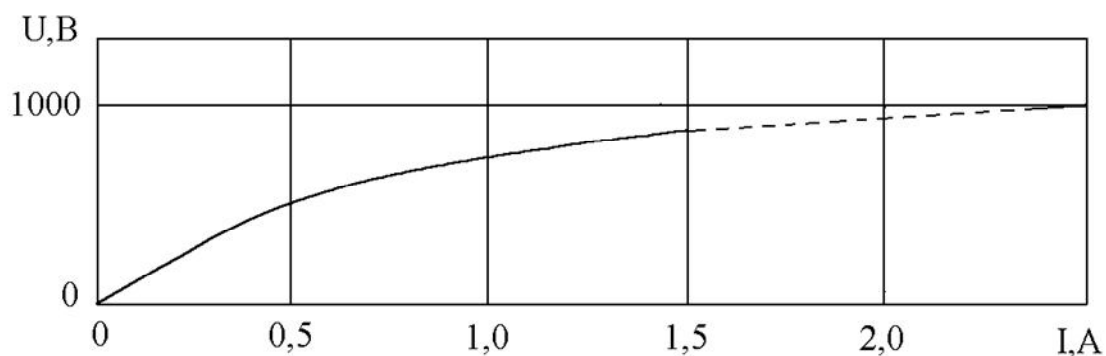


Рисунок 1 – Зависимость напряжения на электродах от тока
Катод - техническая вода, анод - медь диаметром 30 мм

Следует отметить, что для рассматриваемого случая при меньших токах в работах [4, 5] получены качественно иные, а именно, падающие вольтамперные характеристики (рисунок 2).

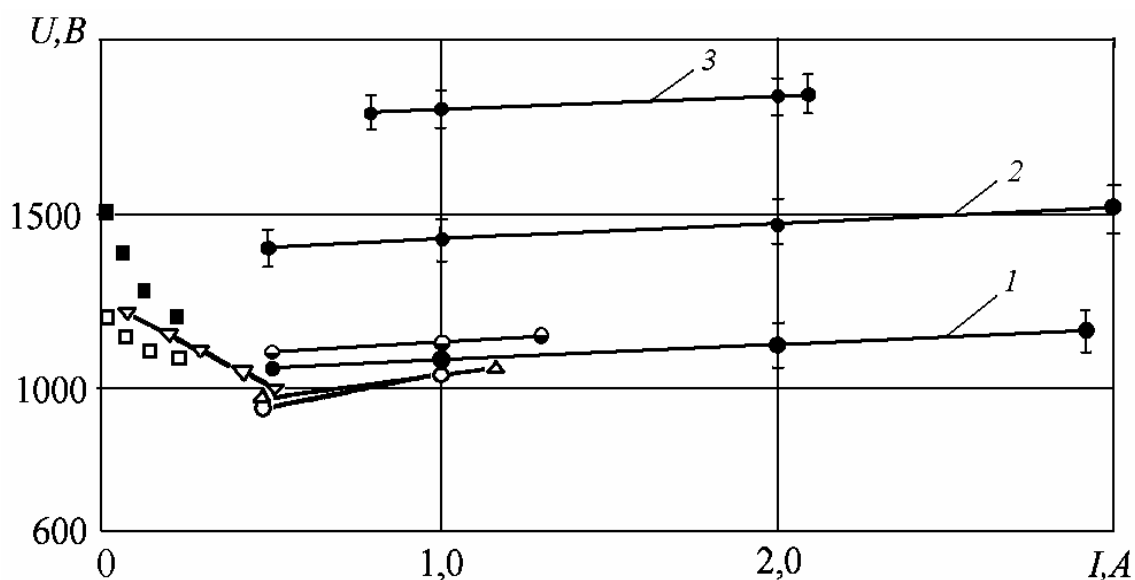


Рисунок 2 – Воль-амперные характеристики разряда
в плазматронах с жидким электродом при малых токах

При малых межэлектродных расстояниях (до 5 мм) вольтамперная характеристика разряда практически не зависит от формы и размеров анода. Во многих работах подтверждается, что когда ток равен 1 А разброс значений напряжения при изменении диаметра медного анода от 5 до 30 мм не превышает 80 В, что составляет около 8 % от номинального значения. Причём такой же разброс значений напряжения получается при повторных зажиганиях разряда с одним и тем же анодом. От формы анода зависит быстрота повышения напряжения при увеличении. В слу-

чае остроконечного анода при увеличении напряжение разряда растёт слабее. По-видимому, это является результатом влияния контрагированных каналов на проводимость разрядного промежутка. Таким образом, параметры разряда зависят от его структуры.

Исходя из следующего можно сделать выводы: при повышенных токах структура и параметры высоковольтного разряда с жидким катодом существенным образом зависят от расстояния между электродами. При < 5 мм разряд имеет однородную структуру, состоящую из множества микроканалов. При > 5 мм в структуре разряда появляются контрагированные каналы и объём разряда существенно уменьшается.

Выводы:

По результатам проведённых исследований можно сделать вывод, что на длительность работы электрода влияет химический состав электролита. Чем меньшее количество солей содержится в электролите, тем больше вероятность того, что на поверхности электрода не будет излишних отложений. Это способствует непрерывной работе электрода. Жидкие электроды являются перспективным конструктивным новшеством.

Подводя итоги, следует отметить, что энергетические характеристики плазмотрона с жидкометаллическими электродами аналогичны характеристикам традиционных плазмотронов с твердыми электродами с фиксированной длиной дуги. Отсутствие эрозии электродов позволяет расширить возможности для исследования дуги и получить обобщенные зависимости для более широкого диапазона критериев моделирования разряда. Данный вид плазмотрона целесообразно использовать для утилизации отходов. Полученные обобщенные зависимости могут использоваться для расчета плазмотронов большей мощности.

Библиографический список

1. Гайсин Ф.М. Электрофизические процессы в разрядах с твердыми и жидкими электродами / Гайсин Ф.М., Сон Э.Е. - Екатеринбург: Уральский университет 1989. - С. 357–376. – (Уральский университет).
2. Гайсин Ф.М. Исследование атмосферного многоканального электрического разряда с жидким катодом в пористой диэлектрике / Гайсин Ф.М., Тазмиев Б.Х. // Материалы 9 школы по плазмохимии для молодых учёных России и стран СНГ. – Иваново, 1999. - Изд-во ИГХТУ. – С. 242–243.
3. Валиев Р.А. Влияние характеристик разряда на интенсивность образования и дисперсность порошка. / Валиев Р.А., Гайсин Ф.М., Шакиров Ю.И. // Электронная обработка материалов. - 1991. - №3. – С. 32-34.

4. Морозова Н.К. ЯМР – исследования жидкостей, обработанных парогазовым разрядом / Морозова Н.К., Галимова Р.К. и др. // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – Казань, 1997. - N4. – С. 224–228.

5. Гайсин Ф.М. Исследование высоковольтного электрического разряда между металлическим анодом и жидким электролитическим катодом при повышенных токах / Ф.М. Гайсин, Б.Х. Тазмиев // Электронный журнал ИГХТУ. – Иваново. – 2000. - 256 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Заблудским Н.Н.

*к.т.н. Кишенько В.Д.,
к.т.н. Смітюх Я.В.,
Кофанова Н.В.
(НУХТ, м. Київ, Україна)*

ПОБУДОВА АРХІТЕКТУРИ БАЗИ ЗНАНЬ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БРАГО- РЕКТИФІКАЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ

В статті наведені результати теоретичних досліджень, запропонований метод поєднання фреймової та продукційної моделей подання експертних знань для побудови експертної системи управління браго-ректифікаційною установкою.

Ключові слова: технологічний об'єкт управління, система управління, модель управління, експертна система, реальний масштаб часу, база знань, нечітка логіка, фрейм, правило – продукція.

В статье приведены результаты теоретических изысканий, предложен метод объединения фреймовой и продукционной моделей представления экспертных знаний для построения экспертной системы управления браго-ректификационной установкой.

Ключевые слова: технологический объект управления, система управления, модель управления, экспертная система, реальный масштаб времени, база знаний, нечеткая логика, фрейм, правило – продукция.

Сучасний стан багаторівневого розвитку наукової, технологічної та інтелектуальної бази спиртового виробництва спонукає до необхідності підвищення рівня автоматизації [1], що полягає в інтелектуалізації автоматизованого управління браго-ректифікаційними установками. Доцільним в такому випадку є створення експертних систем реального часу, що відповідає нормативам науково – дослідної роботи Міністерства освіти і науки України «Створити наукові основи управління біотехнологічними процесами харчових виробництв на основі принципів самоорганізації та адаптації».

Однією з найбільш складних проблем, що виникають при створенні експертних систем реального часу, є перетворення знань про технологічний об'єкт управління та прийнятних способів вирішення пото-

чних ситуаційних питань в раціональну форму для ефективного використання на різних ієрархічних рівнях управління.

На перше місце постає фундаментальна побудова бази знань експертної системи браго-ректифікаційною установкою реального часу. Поняття «реального часу» означає, що в систему надходять дані, які потім оброблюються в чітко зазначені моменти часу. В [2] автор зазначає, що серцевину експертної системи складає база знань, що накопичується в процесі її побудови. Експертні знання мають бути поданими в явному вигляді і є організованими таким чином, щоб спростити процес прийняття рішень.

Розглянувши традиційні методи представлення експертних знань, – логічний, семантичні сітки, фрейми, продукційні системи, звернемо увагу на їхні позитивні та негативні властивості на предмет побудови бази знань..

Представлення знань у вигляді так званої логіки предикатів набуло широкого розповсюдження через високий рівень модульності знань, ефективний формалізований апарат виведення знань на основі резолюцій [3]. Але рамки описових можливостей предикатів визначаються синтаксичними правилами, що є надзвичайно простими на відміну від синтаксичних правил інших природних лексем. Саме таке спрощення поряд із відсутністю винятків, виникаючими ускладненнями прочитання логічних описів, низькою продуктивністю обробки знань є суттєвим недоліком. Тому для створення інтерактивних високотехнологічних систем цей спосіб не є актуальним.

Представлення знань у вигляді семантичних мереж набуває останнім часом широкого розповсюдження. Семантичні сітки – спосіб подання знань при побудові бази знань, що характеризується наочністю знань як системи. Кожне окреме знання розглядається як деяке відношення між суттєвостями та поняттями. Формально, як і в продукційних системах, визначені заздалегідь і вже існуючі всередині системи знання можна нарощувати незалежно від зберігання їх модульності [4]. Визначною особливістю семантичних мереж, яка поряд із цим є також її недоліком, є цілісність системи, яка базуватиметься на основі семантичних мереж. Саме цей недолік і не дозволяє при побудові експертної системи розділити базу знань і механізм виведення [3].

Фреймове подання знань, як зазначається в джерелі [4], може використовуватися практично в усіх підсистемах умовної інтелектуальної системи підтримки рішень.

Фрейм - це мінімальна структура інформації, що є необхідною для подання класу об'єктів, явищ або процесів. Фрейм представляє собою декларативно-процедурну структуру:

$$\{n, (v_1, q_1, p_1), \dots, (v_n, q_n, p_n)\}, \quad (1)$$

де n_i - ім'я фрейму;

v_1 - ім'я слоту;

q_1 - значення слоту;

p_1 - процедура.

Організація бази знань за допомогою фреймів поєднує у собі перевагу декомпозиції та взаємодії, включення в якості нотаток слотам вказівок та очікувань, а також зручності описування проблемно-орієнтованих систем.

Але через складність використання внаслідок процедурної організації, фрейми перевантажують систему, що ускладнює процес здобуття знань, збіднюється можливість динамічної адаптації фреймової системи до змін зовнішнього середовища, ускладнюється проблема узгодження міжфреймових співвідношень. Все це обмежує їх використання [3].

Перевага представлення знань про предметну область у вигляді правил (продукційна модель) полягає по-перше, в тому, що здебільш громіздка частина бази знань про предметну область та об'єкт управління може бути записаною у вигляді правил: «ЯКЩО...ТО...», ліва частина яких {передумова} охоплює в собі множину ситуацій, права {висновок} – множину відповідних дій. По-друге, системи продукцій є модульними, і вилучення або додавання продукцій, як правило, не призводить до небажаних змін решти продукцій. Завдяки наявності в продукціях вказівників, що позначають сферу використання продукцій [4], скорочується час реалізації пошуку необхідного джерела інформації, що раціоналізує пам'ять.

Враховуючи переваги та недоліки різних моделей представлення експертних знань про предметну область та її властивості, [5] літературне джерело наголошує: в сучасних дослідженнях в галузі штучного інтелекту перевага надається поєднанню найліпших якостей різних моделей подання знань в новому, змішаному вигляді.

Щоб уникнути недоліків при використанні продукцій, а саме: ускладнень додавання нових продукцій при перевантаженні бази знань правилами та додаткових труднощів перевірки коректності роботи експертної системи через недетермінованість, тобто неоднозначність вибору використаної продукції, розроблена архітектура бази знань, що поєднує в собі композицію правил та фреймів.

Влучне поєднання при побудові бази знань фреймової і продукційної моделей представлення експертних знань надає можливість ура-

хування основних властивостей такого складного об'єкта управління, як браго-ректифікаційна установка (БРУ), що характеризується невизначеністю, нелінійністю, нестационарністю та багатозв'язністю. Саме така архітектура бази знань використана авторами при створенні експертної системи управління браго-ректифікаційною установкою (БРУ).

{T (режим реального часу)= ____ год . ____ хв. ____ сек . }

	Фрейм :	
N (ім'я фрейму)	<u>Емпірична колона(ЕК)</u>	
v1(ім'я слоту)	Дефлегматор	q1(значення показників)
v2	Конденсатор	q2
...	
vK	=====	qK



Правило :

ЯКЩО.....-(ситуації)

&.....

&.....

&.....

ТО.....-(рекомендації)



	Фрейм :	
N (ім'я фрейму)	<u>Динамічні характеристикиЕК</u>	
v1(ім'я слоту)	Витрата пари	q1(значення)
v2	Температура	q2
...	
vK	=====	qK

Рисунок 1 - Фрагмент застосування архітектури фрейм-правило в базі знань БРУ (браго-ректифікаційної установки)

База знань експертної системи управління браго-ректифікаційною установкою вміщує в собі знання про технологічний об'єкт управління різного ступеню деталізації. Авторами запропонована декомпозиція об'єктів управління, що відповідає наступним ступеням ієрархії знань: 1) структурна ; 2) функціональна ; 3) причинно – наслідкова.

Основу бази знань про предметну область браго-ректифікаційної установки складають моделі управління, що визначають в кожний мо-

мент часу хід виробничого процесу. Поточна модель управління може бути поданою у вигляді наступного кортежу даних :

$$M(t) = \langle P, T, S, V, W \rangle, \quad (2)$$

де t - поточний час;

P – тип математичної моделі;

T - інтервал існування та розвитку виробничих ситуацій;

S - множина станів технологічного комплексу;

V – множина визначаючих умов використання моделі;

W – множина цілей управління.

Управління технологічними комплексами за допомогою експертної системи є реалізованим шляхом надання порад оператору, впливу на систему управління нижчих рівней або безпосередньо на виконавчі пристрої.

Основними перевагами розробленої фреймово-продукційної структури бази знань є простота й наочність управління базою знань. Завдяки розробленій архітектурі на основі правил та фреймів бази знань експертної системи спрощується проблема реалізації пояснень з приводу інтерактивного функціонування системи та обраних нею внаслідок проведеного змістовного динамічного аналізу ситуацій та обрання керуючих рішень і відповідей у вигляді порад оператору. База знань реалізується на основі нечіткого представлення знань.

На рисунку 2 наведений інтерфейс користувача створеної експертної системи управління браго-ректифікаційною установкою, побудованої з використанням представленої архітектури бази знань на основі поєднання продукційної та фреймової структур в якості інтелектуальної підсистеми управління БРУ.

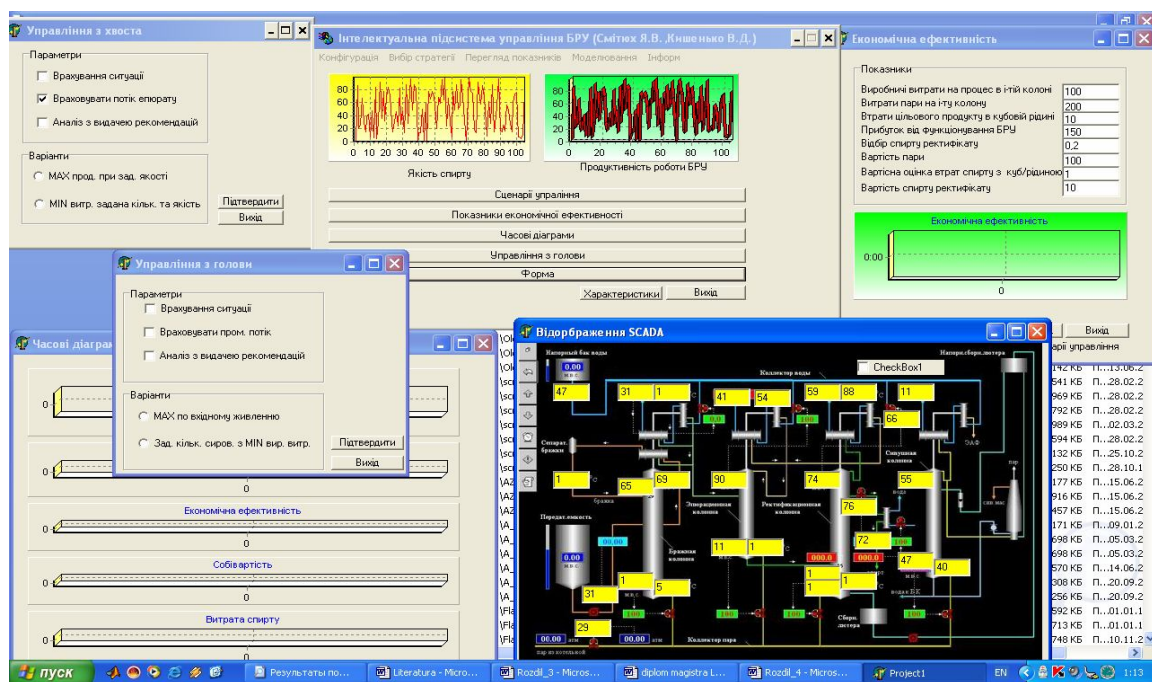


Рисунок 2 - Інтерфейс інтелектуальної підсистеми управління БРУ

Метод побудови бази знань є реалізованим для створення концептуальної моделі інтегрованої експертної системи управління брагоректифікаційною установкою в якості порадової підсистеми інтелектуальної підтримки прийняття технологічних рішень в галузях харчової, хімічної, нафтапереробної, спиртової промисловостей та в фармакології.

Бібліографічний список

1. Мандельштей М.Л. Численное решение одной задачи статической оптимизации процесса бинарной ректификации / МЛ Мандельштей, Л.А. Аксельрод. - Киев, 1973. - С.69-77.- (В кн.: системный анализ и алгоритмизация производственных процессов).

2. Дональд Е. Уотермен. Руководство по экспертным системам : пер.с англ. / Дональд Е. Уотермен. - М.: Мир, 1989.- 388с.: ил.

3. Ездаков А.Л. Экспертные системы САПР: учебное пособие. / Ездаков А.Л. – М.: ИД «ФОРУМ», 2009. - 160 с.: ил.- (Высшее образование).

4. Ямпольський Л.С. Штучний інтелект у плануванні та управлінні виробництвом: підручник / Ямпольський Л.С. , Лавров О.А. – К. : Вища шк., 1995. - 255 с. : іл..

5. Джордж Ф. Люгер. Искусственный интеллект : стратегии и методы решения сложных проблем, 4-е издание. : пер. с англ./ Джордж Ф. Люгер. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 864 с.: ил. – (Парал. тит. Англ.).

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Заблудским Н.Н.

ABSTRACTING

CHAPTER “DEVELOPMENT OF MINERAL DEPOSITS”

Babiyuk G., Puntus V. Manifestation of the scale effect in assessing the strength of model materials.

The results of investigation of the material, equivalent to a rock, with samples of different sizes.

Keywords: testing, a model, rocks, mass, strength, scale effect.

Dolzhikov P.N. Korsakov D.V. Study of the elimination of failure on the earth's surface mines.

According to research conducted by the instrumental processes of displacement of rocks in the fields abandoned mines obtained criterial function designed to model the elimination of stand failures earth's surface, the regularities of deformation of the backfill array.

Key words: failure, backfill, an array, the strain.

Babiyuk G.V., Didenko M.A. Two-stage prediction of underground pressure appearance during advancing of mine working.

The main concepts of technique for two-stage prediction of underground pressure appearance during advancing of mine working and determining of rational parameters of support are presented.

Key words: mode of deformation, displacement of rock edge, support load.

Kipko E.Ya., Kipko A.E. About efficiency of grouting of tectonic violations clay grouts.

The analysis of structure and watering of zones of tectonic violations of East Donbass is executed, the objects of introduction of technology of grouting are resulted and their efficiency is rotined at building of mine working.

Keywords: tectonic violations, water-inflow, mine working, grouting, efficiency.

Chernaj A. V., Nalysko N. N., Lukashenko K. N. The numerical charge explosion simulation of explosive materials near the open surface.

There have been stated the results of numerical simulation charge of explosive materials near the surface of the rock mass. The possibility of numerical experiment has been set according to the results of the test problems solution.

Keywords: the large particles method, the equation of state, the rock mass, the air-blast wave, the rate of expansion.

Gaiko G.I., Ivanov A.P., Zayev V.V. Effect of a protective layer of bottom ash reliability pipe collector underground gas generator.

The results investigation for the impact of the protective ash residue layer formed in the underground gas generator under the underground combustion (gasification) of coal seam onto the deformability and reliability of pipe header or composition, which is under pressure from collapsed roof rock.

Keywords: underground coal gasification, underground gas generator, the pipe header, ash residue, the protective layer.

Shubin A.A. Analysis of features of properties material tab.

This article gives an analysis of the strength and filtration properties of sand and sand-cement hydraulically active suspensions at different concentrations in these solid phase; shows that the proportion of cement in a solution of $1/8 \div 1/6$ the strength of filling mass is 1.7 – 2.7 MPa.

Keywords: hydraulic tab, sand, cement, rock, properties for masonry.

Levchinskiy G.S., Paleychuk N.N. The feasibility of using innovative roof supports in the deep mine workings.

The results of investigations of changes in coal production cost of the overall length of supported workings in mines SE "Antratsite". The character of deformation of around rock massif and elements of roof support is. The optimal form of cross-sections of the workings and roof supports in deep mines.

Keywords: workings, cost, cross-section, the optimal shape, roof support, a new technological level.

Dotcenko O., Ivanova M. Physical modeling consolidation process of the brought down rocks.

In the article is presented the technique of modeling consolidation process of the brought down rocks and ways of the further researches are specified.

Keywords: deformation properties; brought down rocks; experiment.

Kiziyarov O.L. Substantiation of parameters boreless technology consolidation of instable roof in face.

Results of researches of influence boreless ways of hardening on a roof tension in a face are resulted.

Keywords: plaster base structures, filling cupola-shaped, equivalent pressure, zones of loss of stability.

Siidov V.N., Pupkov V.S. Mechanical characteristics of rock.

Experimental module installed by the coefficient of lateral deformation and fractured rock for disposal of sandstone, mudstone and siltstone.

Keywords: modulus of deformation, the coefficient of lateral spacers, fractured rock, sandstone, mudstone, siltstone.

CHAPTER "METALLURGY"

Novokhatskiy A.M., Mikhaylyuk G.D., Karpov A.V. Research of degree of development of reaction of the boudoir in the blast furnace at anthracite application.

Degree of development of reaction of the Boudoir in a blast furnace from the point of view of thermodynamics is analysed. The expense of anthracite on course of reaction of the Boudoir is by practical consideration found in working space of the furnace. The settlement way defines a share of the anthracite reaching the bottom horizons of the furnace.

Keywords: a blast furnace, anthracite, Boudoir reaction, a balance constant.

Petrushov S.N., Rusanov I.F., Kuberskiy S.V., Lupanov D.V. Sintering with input in periferial layer of pig-iron scrap.

Results of theoretical and practical studies, obtained according to describe the process of sintering with input pig-iron scrap in periferial layer on the sintering machine.

Keywords: sintering, pig-iron scrap, periferial layer, process of sintering.

Novokhatskiy A.M., Mikhaylyuk G.D., Tishchenko O.M., Sklyar A.V. Influence of sliding wall accretion on the course of domain fusion.

Sliding influence wall accretion from walls of a laying of a blast furnace on change of indications the electrogram measured on a casing of a forge is analysed the analysis. Hit influence in a forge non fusion penetration weights on change of parameters of domain process is defined. Actions for stabilization of a course of fusion are offered.

Keywords: a blast furnace, wall accretion, electrogram, a blast furnace course.

Smirnov A.N., Kuberskiy S.V., Shutov I.V., Spiridonov D.V. Competitiveness of micro mills: technological aspects.

The competitiveness of micro mills had been performed. The main approaches to the selection of an effective technological scheme of manufacture of metal products and equipment for its implementation had been discussed.

Keywords: micro mill, minimize costs, the strategy of specialization, construction, smelting unit, steel ladle.

Sadovoy A.V., Voliansky R.S., Nazarova E.S. Speed optimal control system of strip reel of cold rolling mill.

The speed optimal control system of strip reel of cold rolling mill is developed, taking into account variable technology parameters. Electromechanical processes are obtained using complex of interconnected multidimensional models of electromechanical equipment of cold rolling mill.

Keywords: optimal control, cold rolling mill, complex of interconnected multidimensional models.

Smirnov A.N., Maksaev E.N., Kuberskiy S.V., Esselbakh V.S. Optimization of exploitation conditions for the drawing system slab caster.

The main approaches to the modernization of the drawing system slab caster had been suggested. It will reduce the slippage of the drive rollers and reduce the risk of fluctuations in the level of the metal in the mold, as well as improve the quality of slab and billet steel yield.

Keywords: continuous casting, slab, drawing system, pusher roller, the pressing, slippage, oscillation level, quality.

Kravchenko V.M., Sidorov V.A., Butsukin V.V. Vibration diagnostics of metallurgical machines features and damages of separate knots growth.

An attempt is undertaken on the basis of materials, got during research of vibration activity of reducing gear of main line of break-down stand, to analyse affecting of seasonal factor capacity of this equipment, to set the period of output of information, providing successful application of the automated system of technical diagnostics of these knots.

Keywords: main line of break-down stand, reducing gear, season, serviceability, vibration diagnostics.

Petryshev A.S., Grygor'ev S.M. Thermodynamics of evaporation of oxide connections of molybdenum as it applies to technology of production of molybdenum concentrate.

Are investigated and compared among themselves elasticity of steams oxide molybdenum connections. The evaporation mechanism is tracked. Dependence of speed of sublimation three-oxide molybdenum from molybdenum concentrate KMo from temperature is fixed. Influence of the contents of accompanying impurity in a concentrate for speed of evaporation of oxides of molybdenum is revealed. The assaying and comparison of the received results with processes of evaporation technically pure three-oxide molybdenum is carried out. Degree of mastering of high-melting alloying elements is shown by steel melt at use metallized molybdenum concentrate.

Keywords: tension of steams, sublimation, molybdenum, oxides, molybdenum concentrate, burn-off loss, degree of recovery, steel melt.

Semiryagin S.V., Bozhanova E.S., Pozhidaeva E.J.. About molecularity and reactions order in chemical kinetics.

Following chief conceptions of chemical kinetics are particularly examined in the work: reaction molecularity, reaction order, reaction rate and reaction mechanism. Definition of elementary reaction through the definition of intermediant. On the example of metallurgical processes special features of complex heterogeneous reactions are examined. Main stages of iron oxide reduction with gaseous reducing agenta diffusion-kinetic mechanism. Particularly viewed the most effective methods of reaction order definitions.

Keywords: chemical kinetics, reaction molecularity, reaction order, intermediants, reaction rate, heterogeneous reactions in metallurgical processes, controlling step of a reaction.

Oginsky Y.K. Displaced volume of metal during rolling in four-roll pass.

The analysis of volumetric metal flow has been performed, the characteristic sizes of the deformation zone have been revealed, and functional relationship between them has been established. The mechanism of formation of the displaced volume during rolling in four-roll pass has been established. The analysis of the established relationships between the displaced volume and the other characteristic (adjacent) volumes has been performed. Using the established relationships, it becomes possible to create more accurate calculation methods of kinematic and energy-power parameters of rolling for various applications.

Keywords: Rolling, four-roll pass, displaced volume, unit volume, residual volume.

CHAPTER “CIVIL ENGINEERING”

Dolzhikov P.N., Kirijak K.K. Application of the pressure cementation to stabilize the landslide process.

This article describes how to stabilize landslide by jet grouting, the analysis of its condition, identification of new physical and mechanical characteristics of the landslide slip. Determination of the stability on the basis of the resulting physical and mechanical characteristics.

Keywords: landslide, array, the area of injection, stabilization of landslides and jet grouting.

Golodnov A., Balashova O. Bearing capacity of compressed welded elements under the presence of residual stress state.

An engineering method of determining the bearing capacity of compressed welded elements considering the influence of steel inelastic properties and residual stress state is developed. The strained state of structures is examined. According to the mathematical experiment there were obtained equations for determining the coefficient of buckling depending on the design resistance of steel, flexibility and eccentricity of load application. Values of residual stresses in the cross sections of elements are determined by the known methods.

Keywords: residual stresses, compressed steel elements, bearing capacity.

Drozd G.Ya., Bizirka I.I. Deposit of sewage as modifier asphalt concrete.

The experimental results on reception of composit knitting materials on the basis of oil bitumen and a sewage treatment waste – the deposited deposits of sewage sludge of (ASS). The basic physical and chemical properties of bitumen and asphalts, the deposits of sewage modified by additives and their components are investigated.

Keywords: deposit of sewages, utilization, asphalt concrete.

Jugov A.M., Belov D.V. Method of erection of monolithic wide-span dome designs.

In given article the principal causes complicating erection of monolithic ferro-concrete dome designs by means of traditional falseworking systems are resulted. Essentially new falsework which allows to solve some technical difficulties at erection of ferro-concrete domes is offered. The device of a falsework and a principle of its work at various stages of use is in

details shown. Universality, high technologicalness and the basic advantages of an elevating falsework before the pneumatic are reflected.

Keywords: monolithic dome, falsework of dome, curve piece, concreting, elevating falsework, technology of erection.

Drozd G.Y., Breus R.V., Rogulin V.V., Sokolenko V.M. Experience of sludge pilot road construction.

The results of model inspections of experimental travelling coverages are resulted on the basis of new compositions of asphaltconcrete with the use of communal offcuts – fallouts of sewages.

Keywords: asphalt concrete, sewage, pavement, full-scale examination.

Gayko E.Yu., Gayko Yu.I. Organizationally economic providing of investment development city communal sector on the basis of concession mechanism.

The scheme of organization and economical acts for stimulate investment activity on implement of concession mechanism is presented in the paper. Four subsystems are detailed: economical, managerial, organizational, legislative, which on based the program of investment development.

Keywords: concession, investment activity, municipal housing economy, monitoring.

Chernih O.A. The modern methods of software at project development of renovation of civil buildings and facilities.

Effects of theoretical studies of a mathematical model of system the base-foundation-building are given, arguments of tensely-strained state devices of system taking into account real data about engineering - a geologic structure of a stage of construction, strength and deformation performances of stuffs of constructions, flaws and cultivations are received.

Keywords: a mathematical model, tensely-strained state, the base-foundation-building.

Belevcova N.L. Thermoelastic plastic state of rotation covers with variable rigidity in a circular direction.

The calculation results of thermoelastic plastic state of rotation covers with variable rigidity in a circular direction from nonaxisymmetric load are listed.

Keywords: thermoelastic plastic state of covers, variable rigidity, nonaxisymmetric anisothermic processes of loading.

Dolgolaptev V.M., Simonova I.N., Simonov S.I. Experimental studies of heat saving performance of typical apartment buildings in the town of Alchevsk.

The article presents the results of the experimental study of typical apartment buildings series 1-121 in the town of Alchevsk by method of thermal photography.

Keywords: energy audit, temperature fields, thermal imager, heat loss.

Golubnichiy A.V. The heat-resistant concretes on on cements with ferriferous slags.

Results of researches of heat resisting concrete on cements with ferriferous color slags are resulted. It is established, that with use of portland cement clinkers, technogenic substances and shamotte filler it is possible to receive heat-resistant concretes with the class of I8.

Keywords: heat-resistant concretes, coloured slags, cements.

Ryzhenko S.S. Influence of pliability flanges connections on distribution of efforts in frames with elements from cross-section corrugated beam.

Existing techniques of designing flange connections are considered, dependences of the Tensely deformed condition in flanges on their geometrical characteristics are shown, the design procedure of frames from beams with corrugated web taking into account rigidity of knots is offered.

Keywords: flange connections, beams with corrugated web.

Ussenko N.V. Distribution of unrelieved stress in easy metal designs from bending profiles of open section.

The technique is described, experimental researches are spent and results of definition of an unrelieved stress in bending profiles of open section are received.

Keywords: cold-formed channel, unrelieved stress, tensometric measurements

Filatova L.N. To the determination of the optimum parameters of the steel I-beam profile girders.

Engineering methods of determination of the steel I-beam girders, taking into account the influence of residual pressure, are developed. The value of residual pressure in the section of a girder is calculated using the well-known methods.

Keywords: residual pressure, steel girders, optimum parameters.

CHAPTER “ELECTRICAL ENGINEERING.RADIOTECHNOLOGY”

Zablodsky N.N., Pliugin V.E. Features of the object-oriented design realization and advantage.

Theoretical information on realization of the object-oriented projects of electromechanical converters of energy is considered. The lacks of procedural approach in design, advantages of the object-oriented design are shown.

Keywords: systems of analysis and design, object-oriented analysis and design, model of waterfall, classes, objects, procedural planning.

Mochalin E., Murga V. The influence of atmospheric refraction on accuracy determining angular coordinates artificial satellite.

The results of modeling the refraction of the atmosphere in the surface layer and the effect of this refraction on the accuracy of observation satellites. It is shown that when calculating the coordinates of satellites should be considered state of the path of the laser radiation.

Keywords: atmospheric refraction, laser location, tract distribution ray satellites.

Lushchik V.D., Ivanenko V.S. One magnetic core synchronous cascade machines with combined windings.

Examined design features of the synchronous machine cascade with matching coils, shows the data of experimental studies which support the advantages of synchronous cascade machines to synchronous machines serial execution.

Keywords: Magnetic core, synchronous cascade machine, engine, generator, rotor, the combined windings

Mochalin Ye.V., Mochalin A.Ye. The use of virtual memory control mechanism in win32 for computer processing of digital tracer images.

The ability of computational costs essential reduction in processing of digital tracer images with new method providing higher precision and lower requirement to recording equipment is shown. The result is achieved due to optimal virtual memory control coupled with structural exception handling in WIN32.

Keywords: virtual memory, exception handling, operating system, tracer image.

Grechko M.V. Interconnect processes in an anchor puttee, arising up during work of valve generator of inductor type with combined обмотками, are considered.

The switching processes in anchorage winding, arising from the work of switched generator of an inductor type with combined windings.

Keywords: inductor generator, combined puttee, anchor puttee, commutation, коммутирующие diodes.

Lushchik V.D. Inductor generators with a combined windings.

The design and principle of operation inductor generators with a combined windings. The theoretical substantiation of the benefits of the generators. The data of experimental researches generators with a combined windings and, for comparison, the generators, which are made lots.

Keywords: type generators, joined the coil, the magnetic circuit, experimental research.

Safronov P.S. Macro-model simulation of asymmetrical mode of step-pulse electronic converter system.

The mathematical model of semiconductor converter supplied by the asymmetrical input voltage is given in this paper. The analytic expression of input currents of semiconductor converters is found for the general macro-model. The results of asymmetrical mode simulation of step-pulse converter system with the inter-phase transformer are presented.

Keywords: macro-model, asymmetrical mode, step-pulse semiconductor converter, electronic converter system.

Saratovskyy R.N., Mikhailova L.F. Analysis of half-bridge resonant inverter is electrically isolated from the inductive load.

Analyzed the work half-bridge resonant inverter is electrically isolated from the inductive load when the frequency control, coefficient of magnetic coupling and Q-load.

Keywords: induction heating, resonant inverter, induction load.

Samcheleev Yu.P., Dryuchin V.G., Shevchenko I.S., Bielokha G.S. Monophase frequency-current transformer.

Possibility of construction of monophase high-efficiency frequency-current transformer is rotined.

Keywords: high-efficiency, frequency-current, transformer.

Shevchenko I.S., Morozov D.I., Kalyuzhnyy S.V., Barbashin A.G. Research mode asynchronous electric drive on base of the source of the current.

They are presented results of the research asynchronous electric drives, built on the base of the sources of the current, unlike the sources of the voltage, in circuit rotor of machine.

Keywords: the source of the current, asynchronous electric drive, cascade, springy moment, mathematical and digital model.

Murga V., Murga E. Provision of correlation dipoles excited active sites.

Experimental data on the correlation of the excited active centers of pulsed lasers. The dynamics of the radiation parameters of lasers for excitation of the active medium complex pump pulses. We give the quantitative characteristics of changes in energy and spatial parameters of radiation by using the collective effects.

Keywords: pulsed solid state lasers, the correlation of the excited active centers, collective effects, complex pumping.

Andreeva N.I., Druchin V.G., Kalugny S.V., Samchelev Y.P. Interrelated electric drive, built on the base of current source.

The theoretical research result are shown for static and dynamic properties of multi-engined interrelated electric drives, built on the base of current source, but not electrical tension.

Keywords: twin-engined electrical drive, current source, simulator, mechanic characteristics.

Murga V., Eshkov A., Tsykalov M. Investigation of pulsed electromagnetic fields on the development and protective properties of plants.

The paper shows the mechanisms of regulation of plants and methods of influence upon it. The mechanisms of the effects of coherent electromagnetic radiation in the seeds of agriculture and the results of theoretical and experimental research in this area.

Keywords: laser radiation, laser activation of seeds, phytochrome, the protective properties of plant.

Murga V., Omeman J., Antropov I. Usage plasmatorch with a liquid cathode for hardening surface material.

The analysis of the usage of plasmatron with a liquid cathode for various manufacturing operations. The mechanism of action of low-current

discharges between the electrode and the liquid metal surface. Conducted a feasibility study of the plasmatrons with liquid electrode.

Keywords: plasmatron with a liquid cathode, corona discharge, arcing, surface hardening.

Kyshenko V.D., Smityuh Y.V., Kofanova N.V. Technology of the construction architecture base of cknowledge for form of the expert systems management with alcohol for distillation plant.

The results of theoretical investigations are presented in article, we had offered the method of unification are frames and productions of models of presentation of expert's knowleges for construction to expert systems management with alcohol for distillation plant.

Keywords: technological object of management, system of management, models of management, expert system, the real scale of time, the base of knowleges, fuzzy set logic, frame, rule-production.

ТРЕБОВАНИЯ

к рукописям научных статей и порядок их рассмотрения при подготовке к выпуску сборника научных трудов ДонГТУ

Статьи должны представляться в соответствии с требованиями ВАК Украины (Перелік № 1 за 2003г). Сборник научных трудов издается три раза в год. Сборник формирует информационный отдел: 94204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16, ДонГТУ, тел/факс (06442) 2-68-87, E-mail: info@dmmti.edu.ua (для редакции сборника научных трудов ДонГТУ), секретарь редакционной коллегии Скомская Светлана Анатольевна.

Сборник содержит следующие разделы: «Разработка полезных ископаемых», «Металлургия», «Строительство», «Электротехника. Радиотехника». Содержание статей должно отвечать новым достижениям науки и техники, их практическому значению, соответствовать технической направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

В статье должно быть кратко изложено то новое и оригинальное, что разработано авторами, показано преимущество перед аналогами предлагаемых разработок, описаны их особенности и практическая значимость. Результаты работы не должны представляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, за несоблюдение действующих стандартов и за недостоверность приведенных в статье данных полностью несут авторы статьи.

Присланные в редакционную коллегию статьи подвергаются обязательному рецензированию. Редакционная коллегия оставляет за собой право вносить в текст статьи изменения редакционного характера без согласования с авторами.

Рекомендуемое количество авторов статьи до 3-х человек.

Языки предоставления статей: украинский, русский, английский.

СОДЕРЖАНИЕ СТАТЕЙ

Предоставляемые статьи должны иметь следующую структуру:

УДК

УДК на статью присваивает отдел библиографии научной библиотеки ДонГТУ, каб.206.

Аннотация

В аннотации приводятся краткие сведения о статье, объемом 5-10 строк, на трех языках: украинском, русском и отдельным файлом на английском языке с указанием Ф.И.О. авторов, названия статьи, ключевых слов.

Обязательные элементы статьи:

– постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями;

– анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных раньше частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;

– формулирование целей статьи (постановка задач);

– представление основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов;

– выводы по данному исследованию и перспективы дальнейшего развития данного направления.

– библиографический список должен быть составлен в порядке ссылок на них. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки.

За авторами статьи остается право выделения жирным шрифтом названия обязательных элементов статьи.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

1. Текст рукописи статьи от 5 до 10 страниц на белой бумаге формата А4 (210х297 мм) с полями: верхнее, левое, правое, нижнее – 28 мм. Страницы не нумеруются. Рукопись статьи оформляется с применением редактора WinWord (не ниже версии 6.0) шрифтом Times New Roman, размером 14, одинарным интервалом, с переносами, выравниванием по ширине, абзацным отступом 1,27 см.

2. Материалы должны отвечать следующей структурной схеме: УДК, ученая степень, фамилии и инициалы авторов, название организации, города, страны, e-mail автора, название статьи, аннотация на двух языках, после каждой аннотации ключевые слова, основной текст, выводы, библиографический список и отдельным файлом на английском языке - Ф.И.О. авторов, название статьи, аннотация, ключевые слова.

УДК проставляется слева вверху, шрифт полужирный, без абзацного отступа.

Через один интервал – ученая степень, фамилия, инициалы. В круглых скобках – название организации, название города, страны, e-mail автора, через запятую. Шрифт полужирный, курсив, по правому краю.

Через два интервала - название статьи заглавными буквами, выравнивание по центру, шрифт полужирный, без абзацного отступа.

Через один интервал - краткая аннотация на украинском и русском языках, курсивом. После каждой аннотации – ключевые слова, курсивом.

Через один интервал - текст статьи.

3. Рисунки вставляются в текст единым объектом и могут быть представлены:

– *растровыми форматами* – gif, tiff, jpg, bmp и им подобными (качество 200-300 dpi);

– векторными форматами – emf, wmf и другими метаформатами.

Рисунки, выполненные в программах Corel, CAD, Word и др., переводятся в один из описанных выше форматов, предпочтительно векторные.

Графический материал следует располагать непосредственно после текста, в котором он упоминается впервые («...на рисунке...», не допускается «см.», «рис.»), или на следующей странице. Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте и нанесены слева направо, сверху вниз. Допускается размещение пояснительных данных под иллюстрацией (подрисуночный текст). Под каждым рисунком (подрисуночным текстом) располагается подпись в формате «Рисунок № – Название» с выравниванием по центру без абзаца. После подписи и перед рисунком оставляется пустой интервал.

4. Абзац содержащий формулы должен иметь следующие параметры: выравнивание по левому краю, без абзаца, интервал перед и после абзаца 14 пт, позиции табуляции – 7,75 см по центру (для расположения формулы) и 15,4 см по правому краю (для расположения номера формулы). Формулы выполняются с помощью редактора формул Microsoft Equation 3, MathType математическим стилем, обычное начертание шрифта (нормальный), со следующими размерами:

Full (обычный)	14 pt
Subscript/Superscript (крупный индекс)	10 pt
Sub-Subscript/Superscript (мелкий индекс)	8 pt
Symbol (крупный символ)	20 pt
Sub-Symbol (мелкий символ)	14 pt

Недопустимо размещение формул в табличном формате.

5. Все таблицы должны иметь название и порядковый номер и располагаться после упоминания по тексту. Название располагается над таблицей.

Каждая таблица должна иметь один интервал перед названием и один после таблицы.

6. Через один интервал от текста статьи – полужирным шрифтом располагается заголовок «Библиографический список». Библиографический список оформляется курсивом и должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки.

7. Текст статьи предоставляется на электронном носителе и в печатном виде, сопроводительная документация только в печатном виде.

СОПРОВОДИТЕЛЬНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Рецензия специалистов редакционной коллегии ДонГТУ.

До 70-річчя
проф. ПЕТРУШОВА СТАНІСЛАВА МИКОЛАЙОВИЧА



Петрушов Станіслав Миколайович народився 03.07.1941 року м. Алчевськ Луганської області, громадянин України. У 1963 р. закінчив Комунарський гірничо–металургійний інститут (зараз ДонДТУ), здобув кваліфікацію інженер-металург по спеціальності „Металургія чорних металів”. Після закінчення інституту працював на різних посадах на підприємствах металургійного комплексу.

З 1970 року Петрушов С.М. працює у Донбаському державному технічному університеті. У 1976 році Петрушов С.М. захистив кандидатську дисертацію, а у 1991 році – докторську на тему : „Розвиток теоретичних основ сучасної технології агломерації”.

З 1980 до 1991 року – працював деканом металургійного факультету, а з 1991 до 2003 року – першим проректором.

У 1991 році Петрушову С.М. присвоєне звання професора кафедри металургії чорних металів. З 2003 року Петрушов С.М. – професор кафедри МЧМ ДонДТУ. Петрушов С.М. є академіком горних наук України та академіком «МАНЭБ».

Петрушов С.М. – автор чи співавтор 250 публікацій, у тому числі 3 монографії, 7 навчально–методичних посібників з грифом Міністерства освіти і науки України, співавтор 42 винаходів та патентів, займається науково–дослідною роботою. Під його керівництвом захищені 6 кандидатських дисертацій та одна докторська.

Він керівник наукового напрямку: Удосконалення теорії і технології агломераційного виробництва.

За останні 10 років економічний ефект наукових розробок Петрушова С.М. становить більше 20 млн. грн..

Професор Петрушов С.М. є автором та ініціатором упровадження у ВНЗ України модульно–рейтингової системи контролю знань студентів. У 1994 році професору Петрушову С.М. Наказом Президента України присвоєне почесне звання „Заслужений працівник народної освіти України”.

Захопленням С.М. Петрушова є спорт. Він грав в різних командах на першість радянського союзу. У 1967 році йому присвоєно звання «Майстер спорту радянського союзу».

Колектив ДонДТУ вітає проф. С.М. Петрушова зі славним 70-річним ювілеєм!

СОДЕРЖАНИЕ

Разработка полезных ископаемых

Бабиюк Г.В., Пунтус В.Ф. ПРОЯВЛЕНИЕ МАСШТАБНОГО ЭФФЕКТА ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ МОДЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	5
Должиков П.Н., Корсаков Д.В. ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЛИКВИДАЦИИ ПРОВАЛА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАД ГОРНОЙ ВЫРАБОТКОЙ.....	17
Бабиюк Г.В., Диденко М.А. ДВУХЭТАПНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ВЫРАБОТОК	24
Кипко Э.Я., Кипко А.Э. ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТАМПОНИРОВАНИЯ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ ГЛИНОЦЕМЕНТНЫМИ РАСТВОРАМИ	35
Чернай А.В., Налисько Н.Н., Лукашенко Е.Н. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВА ЗАРЯДА ВВ ВБЛИЗИ ОТКРЫТОЙ ПОВЕРХНОСТИ.....	40
Гайко Г.И., Иванов А.П., Заев В.В. ВЛИЯНИЕ ЗАЩИТНОГО СЛОЯ ЗОЛЫ НА НАДЕЖНОСТЬ ТРУБНОГО КОЛЛЕКТОРА ПОДЗЕМНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА	46
Шубин А.А. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ЗАКЛАДКИ.....	53
Левчинский Г.С., Палейчук Н.Н. О ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ СРЕДСТВ КРЕПЛЕНИЯ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ ШАХТ	58
Доценко О. Г., Иванова М. С. ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ОБРУШЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД.....	66
Кизияров О.Л. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ БЕСШПУРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВОЙ КРОВЛИ В ЛАВЕ	73

Сиидов В.Н., Пупков В.С. МОДУЛЬ ДЕФОРМАЦИИ И КОЭФФИЦИЕНТ БОКОВОГО РАСПОРА РАЗРУШЕННЫХ ГОРНЫХ ПОРОД	81
--	----

Металлургия

Новохатский А.М., Михайлюк Г.Д., Карпов А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ СТЕПЕНИ РАЗВИТИЯ РЕАКЦИИ БУДУАРА В ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ АНТРАЦИТА	91
---	----

Петрушов С.Н., Русанов И.Ф., Куберский С.В., Лупанов Д.В. СПЕКАНИЕ АГЛОМЕРАТА С ВВОДОМ В ПРИБОРТОВОЙ СЛОЙ ЧУГУННОЙ СТРУЖКИ	99
--	----

Новохатский А.М., Михайлюк Г.Д., Тищенко О.М., Складар А.В. ВЛИЯНИЕ ОПОЛЗАННЯ ГАРНИСАЖА НА ХОД ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ	106
--	-----

Смирнов А.Н., Куберский С.В., Шутов И.В., Спиридонов Д.В. КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ МИКРО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ЗАВОДОВ: ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ	112
--	-----

Садовой А.В., Волянский Р.С., Назарова Е.С. СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАТЯЖЕНИЕМ ПОЛОСЫ СТАНА ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ	122
---	-----

Смирнов А.Н., Максаев Е.Н., Куберский С.В., Эссельбах В.С. ОПТИМИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ РАБОТЫ ВЫТЯГИВАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ СЛЯБОВОЙ МНЛЗ	131
--	-----

Кравченко В.М., Сидоров В.А., Буцукин В.В. ОСОБЕННОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ МАШИН И РАЗВИТИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ ОТДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ	141
--	-----

Петрищев А.С., Григорьев С.М. ТЕРМОДИНАМИКА ИСПАРЕНИЯ ОКСИДНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МОЛИБДЕНА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА МОЛИБДЕНОВОГО КОНЦЕНТРАТА	149
--	-----

Семирягин С.В., Божанова Е.С., Пожидаева Э.Ю. О МОЛЕКУЛЯРНОСТИ И ПОРЯДКЕ РЕАКЦИЙ В ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКЕ	158
--	-----

Огинский И. К. СМЕЩЕННЫЙ ОБЪЕМ ПРИ ПРОКАТКЕ В ЧЕТЫРЕХВАЛКОВОМ КАЛИБРЕ	167
--	-----

Строительство

Должиков П.Н., Кириак К.К. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАПОРНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА	179
--	-----

Голоднов А.И., Балашова О.С. НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СЖАТЫХ СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ НАЛИЧИИ ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ.....	187
---	-----

Дрозд Г.Я., Бизирка И.И. ОСАДОК СТОЧНЫХ ВОД КАК МОДИФИКАТОР АСФАЛЬТОБЕТОНА	199
---	-----

Югов А.М., Белов Д.В. СПОСОБ ВОЗВЕДЕНИЯ МОНОЛИТНЫХ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ КУПОЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	206
--	-----

Дрозд Г.Я., Бреус Р.В., Рогулин В.В., Соколенко В.М. ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ..	214
---	-----

Гайко Є.Ю., Гайко Ю.І. ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНВЕСТИЦІЙНОГО РОЗВИТКУ МІСЬКОГО КОМУНАЛЬНОГО СЕКТОРУ НА ОСНОВІ КОНЦЕСІЙНОГО МЕХАНІЗМУ	221
--	-----

Черных О.А. СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ.....	231
--	-----

Белевцова Н.Л. ТЕРМОПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИЙ СТАН ОБОЛОНОК ОБЕРТАННЯ ПЕРЕМІННОЇ ЖОРСТКОСТІ У КОЛОВОМУ НАПРЯМКУ	238
---	-----

Долголаптев В.М., Симонова И.Н., Симонов С.И. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ЖИЛЫХ ДОМОВ МАССОВЫХ СЕРИЙ ГОРОДА АЛЧЕВСКА.....	244
---	-----

Голубничий А.В. ЖАРОСТІЙКІ БЕТОНИ НА ЦЕМЕНТАХ ІЗ ЗАЛІЗОВМІСНИМИ ШЛАКАМИ.....	253
---	-----

Рыженко С.С. ВЛИЯНИЕ ПОДАТЛИВОСТИ ФЛАНЦЕВЫХ
СОЕДИНЕНИЙ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ В РАМАХ
С ЭЛЕМЕНТАМИ ИЗ ПОПЕРЕЧНО ГОФРИРОВАННЫХ
ДВУТАВРОВ..... 261

Усенко М.В. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В
ЛЕГКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ
ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ ОТКРЫТОГО СЕЧЕНИЯ..... 267

Филатова Л.Н. К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ОПТИМАЛЬНЫХ
ПАРАМЕТРОВ СТАЛЬНЫХ ДВУТАВРОВЫХ БАЛОК 273

Электротехника. Радиотехника

Заблодский Н.Н., Плюгин В.Е. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ И
ПРЕИМУЩЕСТВА ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ 285

Мочалин Е.В., Мурга В.В. ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОЙ
РЕФРАКЦИИ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ
КООРДИНАТ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ.... 291

Лущик В.Д., Іваненко В.С. ОДНОМАГНІТОПРОВІДНА
СИНХРОННА КАСКАДНА МАШИНА З СУМІЩЕНИМИ
ОБМОТКАМИ..... 297

Мочалин А.Е., Мочалин Е.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ
УПРАВЛЕНИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ ПАМЯТЮ В WIN32 ДЛЯ
КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ
ТРАССЕРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ..... 305

Гречко М.В. КОМУТАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ В ВЕНТИЛЬНОМУ
ГЕНЕРАТОРІ ІНДУКТОРНОГО ТИПУ З СУМІЩЕНИМИ
ОБМОТКАМИ..... 314

Лущик В. Д. ІНДУКТОРНІ ГЕНЕРАТОРИ З СУМІЩЕНИМИ
ОБМОТКАМИ..... 323

Сафронов П.С. МАКРОМОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОПУЛЬСНОЇ
ЕЛЕКТРОННОЇ ПЕРЕТВОРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ В
АСИМЕТРИЧНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ 332

Саратовский Р.Н., Михайлова Л.Ф. АНАЛИЗ РАБОТЫ ПОЛУМОСТОВОГО РЕЗОНАНСНОГО ИНВЕРТОРА С ГАЛЬВАНИЧЕСКИ РАЗВЯЗАННОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАГРУЗКОЙ	339
Самчелеев Ю.П., Дрючин В.Г., Шевченко И.С., Белоха Г.С. ОДНОФАЗНЫЙ ЧАСТОТНО-ТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ	349
Шевченко І.С., Морозов Д.І., Калюжний С.В., Барбашин О.Г. ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗІ ДЖЕРЕЛ СТРУМУ	354
Мурга В.В., Мурга О.В. ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСЛОВИЙ КОРРЕЛЯЦИИ ДИПОЛЕЙ ВОЗБУЖДЕННЫХ АКТИВНЫХ ЦЕНТРОВ	364
Андрєєва Н.І., Дрючин В.Г., Калюжний С.В., Самчелєєв Ю.П. ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАННИЙ ЕЛЕКТРОПРИВОД НА БАЗІ ДЖЕРЕЛА СТРУМУ	371
Мурга В.В., Ешков А.О., Цыкалов М.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ И ПРОДУКТИВНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ АГРОКУЛЬТУР.....	377
Мурга В.В., Омеман Дж., Антропов И.И. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАЗМОТРОНА С ЖИДКИМ КАТОДОМ ДЛЯ УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ.....	383
Кишенько В.Д., Смітюх Я.В., Кофанова Н.В. ПОБУДОВА АРХІТЕКТУРИ БАЗИ ЗНАНЬ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ БРАГО- РЕКТИФІКАЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ	389
ABSTRACTING	395
ТРЕБОВАНИЯ к рукописям научных статей и порядок их рассмотрения при подготовке к выпуску сборника научных трудов ДонГТУ.....	407
До 70-річчя проф. Петрушова Станіслава Миколайовича	410

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ ДОНБАСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Випуск 34

Головний редактор

Заблудський М.М. – докт. техн. наук

Редакційна колегія:

А.І. Акмаєв – докт. екон. наук,
С.М. Петрушов – докт. техн. наук,
О.М. Новохатський – докт. техн. наук,
Г.Г. Литвинський – докт. техн. наук,
Р.А. Фрумкін – докт. техн. наук,
Г.В. Бабіюк – докт. техн. наук,
Г.І. Гайко – докт. техн. наук,
М.К. Клішин – докт. техн. наук,
А.П. Борзих - докт. техн. наук,
П.М. Должиков - докт. техн. наук,
З.Л. Фінкельштейн – докт. техн. наук,
В.Д. Лущик – докт. техн. наук,
С.В. Корнєєв – докт. техн. наук,
В.О. Ульшин – докт. техн. наук,
О.І. Давиденко – докт. техн. наук,
Г.Я. Дрозд – докт. техн. наук,
В.Н. Ульяницький – канд. техн. наук,
Ю.Е. Паеранд – канд. техн. наук,
С.А. Скомська – секретар редакційної колегії

Комп'ютерна верстка Н.Б. Трофімова

Підп. до друку .2011. Формат 60×84¹/₁₆. Папір офс.
Друк RISO. Ум.друк.арк . Зам. № . Наклад 100 пр.
Видавництво не несе відповідальність за зміст матеріалу, наданого автором до друку.

Видавець та виготівник:

Донбаський державний технічний університет
пр. Леніна, 16, м. Алчевськ, Луганська обл., 94204.
(Творче виробниче об'єднання «ЛАДО», каб. 113-а, II корпус, т./факс (06442)2-02-59)
Свідоцтво Держкомтелерадіо серія ДК, №2010 від 12.11.2004