

ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Выпуск 11 (54) 2018



СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**Сборник
научных трудов
Донбасского государственного технического
университета**

Сборник
Выходит 1–4 раза в год
Основан в июне 1999 г.
Выпуск 11 (54) 2018

**Збірник наукових праць
Донбаського державного технічного університету**

Збірник
Виходить 1–4 рази на рік
Заснований у червні 1999 р.
Випуск 11 (54) 2018

Collection of Scientific Papers of DonSTU

Collection
Publishing 1–4 times a year
Founded in June 1999
Issue 11 (54) 2018

Алчевск
2018

УДК 622(06) + 669(06) + 69(06) + 65.011.56 +
+ 621.3 + 33 + 621.37 + 1

**Сборник научных трудов
Донбасского государственного
технического университета**

Сборник

Выпуск 11 (54) 2018

**Основатель:
Донбасский государственный
технический университет**

*Свидетельство Министерства информации,
печати и массовых коммуникаций ЛНР
о государственной регистрации средства массовой
информации МИ-СТР ПИ 000003
от 05.02.2016*

*Приказом Министерства образования и науки
Донецкой Народной Республики от 2 мая 2017 г.
№ 464 сборник научных трудов включён в Перечень
рецензируемых научных изданий, в которых
должны быть опубликованы основные научные
результаты диссертаций на соискание учёной
степени кандидата наук, на соискание учёной
степени доктора наук, утверждённый приказом
Министерства образования и науки Донецкой
Народной Республики от 1 ноября 2016 г. № 1134,
согласно приложению 1.*

*Рекомендовано учёным советом
ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ»
(Протокол № 2 от 26.10.2018)*

Включён в наукометрическую базу данных РИНЦ

Формат 60×84%.

Усл. печат. л. 9,5.

Заказ № 364.

Тираж 100 экз.

Издательство не несёт ответственности за
содержание материала, предоставленного автором
к печати.

Адрес редакции, издателя и основателя:
ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный
технический университет»
пр. Ленина, 16, г. Алчевск, ЛНР
94204

E-mail: info@dstu.education
Web-site: <http://www.dstu.education>

ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ ЦЕНТР,
ауд. 2113, т./факс 2-58-59

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя
и распространителя средства массовой
информации
МИ-СТР ИД 000055 от 05.02.2016.

Главный редактор

Зинченко А. М. — к.э.н., и.о. ректора

Заместитель главного редактора

Новохатский А. М. — д.т.н., проф.

Редакционная коллегия:

Литвинский Г. Г. — д.т.н., проф.

Финкельштейн З. Л. — д.т.н., проф.

Корнеев С. В. — д.т.н., проф.

Леонов А. А. — к.т.н., доц.

Харламов Ю. А. — д.т.н., проф.

Ульяницкий В. Н. — к.т.н., проф.

Зелинский А. Н. — к.т.н., проф.

Куберский С. В. — к.т.н., проф.

Денищенко П. Н. — к.т.н., доц.

Дрозд Г. Я. — д.т.н., проф.

Шолух Н. В. — д. арх., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомская С. А. — секретарь редакционной
коллегии.

Для научных сотрудников, аспирантов,
студентов высших учебных заведений.

Язык издания:

русский, украинский и английский

Компьютерная вёрстка и корректура
Исмаилова Л. М.

© ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018
© Чернышова Н. В., художественное
оформление обложки, 2018

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ

GEOSCIENCES

УДК 622.243.2

Проф. Литвинский Г. Г.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА. СПИРАЛЬ АРХИМЕДА

Выполнен краткий ретроспективный экскурс в историю развития буровой техники от ударно-поворотного до шарошечного способа бурения с позиций геомеханического взаимодействия бурового породоразрушающего инструмента (БПРИ) с горной породой. Дан анализ особенностей работы БПРИ при разных способах бурения исходя из возникающих усилий на кромке резца. Вскрыты основные технические противоречия БПРИ, сформулированы требования к нему и критерии оптимизации. Рассмотрены недостатки разрушения породы под прямолинейным лезвием буровой коронки. Предложена оптимальная форма лезвия БПРИ в виде острого клина с тонкой по центру твердосплавной вставкой. Сформулирован критерий эффективности работы БПРИ, разработана математическая модель и путём решения дифференциального уравнения доказана оптимальная форма БПРИ в виде спирали Архимеда. Дана оценка эффективности применения оптимизированного БПРИ.

Ключевые слова: теория бурения, способы бурения, буровая коронка, требования к коронке, критерии оптимизации бурения, математическая модель бурения, форма лезвия коронки, спираль Архимеда, эффективность бурения.

1 Актуальность, цель и задачи исследований

Одним из наиболее важных процессов в горных технологиях при подземном строительстве и добыче всех видов полезных ископаемых является бурение горных пород. Ежегодно в мире бурят десятки тысяч километров скважин разного назначения, диаметра, глубины и пространственной ориентации, на что затрачивается много материальных и трудовых ресурсов, энергии и дорогостоящих дефицитных материалов. Стоимость сооружения 1 км скважины для добычи нефти или газа в Западной Сибири составляет 0,5...1,0 млн американских долларов. Поэтому так остро стоит проблема увеличения производительности и снижения стоимости бурения, которая приобретает межотраслевое значение. Для её решения необходимо совершенствовать существующие и изыскивать новые способы и средства бурения, в первую очередь — буровой породоразрушающий инструмент (БПРИ).

В основном для бурения применяют режуще-скалывающий БПРИ, разнообразие типов которого чрезвычайно велико (рис. 1).



Рисунок 1 Различные типы режуще-скалывающего БПРИ

Это обусловлено высокой изменчивостью горно-геологических и горнотехнических условий бурения, с одной стороны, и отсутствием чётко осознанной критериальной модели оптимизации типов БПРИ — с другой [1–6 и др.]. Следует признать, что именно БПРИ является са-

мым важным определяющим звеном в конструкции буровых машин и технологии сооружения скважин. Поэтому столь актуальна проблема его исследования, создания и совершенствования для дальнейшего прогресса буровой техники и технологии.

При выполнении исследований по оптимизации параметров БПРИ в их основу положены результаты, полученные в работах [7, 8].

Целью исследований является обоснование критериальных требований к работе режуще-скалывающего инструмента и оптимизация его параметров на основе выдвинутых критериев.

Идея исследований состоит в изучении геомеханического взаимодействия бурового инструмента с породами забоя скважины и создании математической модели этого взаимодействия.

В данной работе **объект** исследований — механизм силового взаимодействия режуще-скалывающего инструмента с горной породой при её разрушении, **предмет** исследований — конструктивные параметры бурового инструмента для оптимизации процесса бурения.

К основным задачам исследования следует отнести:

- 1) краткий ретроспективный экскурс в историю развития буровой техники;
- 2) формулирование требований к буровому инструменту и критериев его оптимизации;
- 3) обоснование оптимального способа бурения и конструкции бурового инструмента;
- 4) разработку математической модели и получение дифференциальных соотношений для установления конфигурации лезвия БПРИ на буровой коронке;
- 5) анализ полученных закономерностей и результатов, постановку задач дальнейших исследований.

Помимо указанных задач исследования попутно решались некоторые вспомогательные вопросы техники бурения.

2 Краткий обзор развития буровой техники

Вся история развития бурения отражает устранение постоянно возникающего противоречия между уровнем существующей технологии и потребностью промышленности. Анализ исторического аспекта развития БПРИ показывает, что вначале (от древности до XX века) преобладал простейший ударно-скалывающий способ бурения скважин. Он сводился к подъёму БПРИ, повороту вокруг оси и сбрасыванию его на забой для выкалывания породы. Производительность была низкой, а глубина проходки скважин — малой (рис. 2).

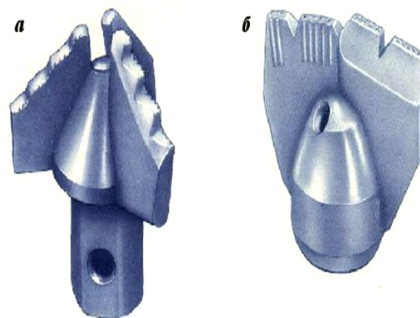


Рисунок 2 Буровые долота для ударного бурения пород:

а — трёхлопастное; б — двухлопастное

Революционные изменения в буровой технике произошли во время второй технической революции (последняя треть 19 — начало 20 вв.) и было «...непосредственно вызвано к жизни превышением потребности над возможностью удовлетворить её прежними средствами производства» (Маркс К., Энгельс Ф. Соч., т. 47, с. 461). Появление электромоторов и двигателей внутреннего сгорания позволило перейти к вращательному, а далее — к комбинированному способам бурения: ударно-вращательному и вращательно-ударному.

От способа взаимодействия БПРИ с породами забоя скважины во многом зависит производительность бурения и скорость проходки. В мягких и средней крепости породах производительным оказался вра-

щательный способ бурения, основанный на применении резцов, срезающих породную «стружку» с забоя (рис. 3). По сути, идея такого бурения аналогична работе обычного резца металлорежущего станка. Однако в породах, особенно в крепких, резцы быстро выходили из строя в результате износа и затупления.

Таким образом, для бурения в породах средней и высокой прочности пришлось перейти на ударно-вращательный способ, где при вращении БПРИ и постоянном прижатии его на забой дополнительно создавали ударные нагрузки на породу. Тем самым создавали комбинированное ударно-скалывающее и режущее воздействие на породы забоя скважины (рис. 4).



Рисунок 3 Буровой инструмент для вращательного бурения: резцы РП по породе и РУ по углю



Рисунок 4 Коронки для ударно-вращательного и вращательно-ударного бурения шпуров

Апофеозом развития вращательной техники бурения следует по праву считать изобретение шарошки в 1909 году американским инженером Говардом Хьюзом, которое кардинально изменило не только

особенности взаимодействия БПРИ с породой, но и скачком (в десятки раз) улучшило технико-экономические показатели проходки скважин. При таком бурении разрушение породы выполняют зубки шарошек, которые вращаются буровой колонной и прижимаются ею с большим напорным усилием к забою (рис. 5).

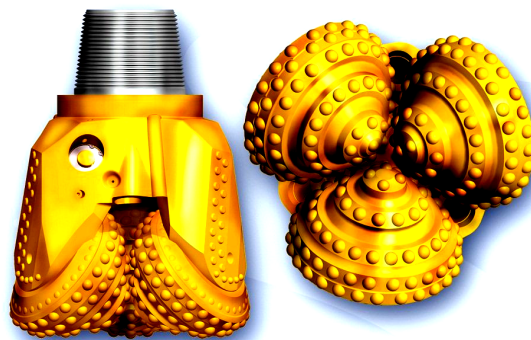


Рисунок 5 Шарошечное штыревое долото с твёрдосплавными зубками

Шарошка многократно ускорила бурение нефтяных и газовых скважин, позволила насытить промышленность XX века углеводородным сырьём, что скачком ускорило технический прогресс, дало мощный импульс развитию двигателей внутреннего сгорания и всех видов транспорта, легло в основу стратегии и тактики мировой геополитики в борьбе за энергетические ресурсы.

Однако достигнутый к настоящему времени уровень развития буровой техники уже перестал удовлетворять запросы промышленности. Необходимо новое кардинальное улучшение показателей бурения.

Для выбора предпочтительного направления совершенствования БПРИ выполним сопоставительное сравнение геомеханических параметров различных способов бурения.

3 Анализ особенностей работы БПРИ при разных способах бурения

Горные инструменты, как правило, работают в тяжёлых условиях: высокие переменные по величине и направлению нагрузки; изменчивые свойства разрушаемых пород; абразивная среда, повышенные

температуры и др. Это предъявляет жёсткие требования к прочности и стойкости БПРИ, удовлетворить которые становится всё сложнее из-за накопления технических противоречий.

3.1 Усилие на кромке резца и требования к нему при бурении

Основным геомеханическим процессом при бурении является механическое деформирование и разрушение пород в забое скважины под режущей кромкой инструмента. Процессы деформирования и разрушения породы весьма сложны и разнообразны: скол, резание, смятие, выдавливание, истирание и усталостный износ, которые комбинируются в различных сочетаниях в зависимости от типов БПРИ.

Эти сложные деформационные процессы возникают за счёт статического или динамического прижатия БПРИ к породному забою. При этом, как правило, при вращательном движении неминуемо возникают касательные усилия на режущих кромках БПРИ в процессе их движения по породе.

Знакопеременное деформирование и разрушение породы вызывает в инструменте сложные сочетания сжимающих, изгибающих и сдвигающих усилий, создающие динамические **пространственные** поля нормальных и касательных напряжений. Наиболее нагруженным оказывается лезвие инструмента, разрушающее породу, — самая ответственная часть бурового оборудования, во многом определяющая его эффективность работы.

Анализ особенностей работы БПРИ позволяет сформулировать основные общие требования, которым должны удовлетворять его резцы или коронки:

1) стойкость и прочность при действии статических и динамических усилий сжатия и сдвига;

2) максимальная глубина внедрения в породу при минимальной нагрузке на лезвие;

3) наиболее полная очистка забоя скважины от продуктов разрушения (бурового шлама);

4) высокая производительность бурения при минимальных затратах энергии и расходе инструмента.

Оказывается, что разные способы бурения (ударное, вращательное и их различные комбинации) существенно различаются одним из важнейших показателей работы БПРИ: наличием или отсутствием сдвигающих усилий, приложенных к лезвию БПРИ при его воздействии на породный забой. До сих пор этому обстоятельству уделялось недостаточное внимание.

Сдвигающие усилия на лезвии возникают при перемещении коронки по касательной к поверхности породного забоя скважины. Чаще всего это происходит в результате вращения БПРИ в забое, т. е. в подавляющем большинстве существующих способов бурения.

Выполним краткий сопоставительный анализ двух принципиально различных способов разрушения породы:

1) ударный или статический выкол породы путём внедрения клина на глубину h перпендикулярно поверхности породы;

2) резание и сдвиг породы путём перемещения заглублённого резца параллельно поверхности забоя.

3.2 Особенности работы БПРИ при ударном способе бурения

При ударном способе бурения (рис. 6) для динамического дробления породы на ударную кромку инструмента и долото действует только нормальная сила N , которая создаёт под лезвием трещину раскола в соответствии с законами пинч-эффекта [8].

Таким образом, достигается наиболее эффективный для каменных материалов вид разрушения — тангенциальное растяжение, вызывающее последующий раскол.

Как доказано в [8], глубина h_c трещины раскола зависит от угла заострения клина α (он из теоретических соображений принят равным $\alpha = 0,5\beta$, где β — обычно принятый угол заострения) приложенной к нему нормальной погонной нагрузки q и

прочности породы на одноосное растяжение $[\sigma_p]$:

$$h_c = \frac{2 \nu_p E_p}{\pi \nu_c E_c} \frac{q}{[\sigma_p]} [\alpha + 0,5 \cdot \sin(2\alpha)]^{-1}, \quad (1)$$

где ν_p , ν_c , E_p , E_c — коэффициенты Пуассона и модули Юнга соответственно при растяжении и сжатии породы (индексы «р» и «с»).

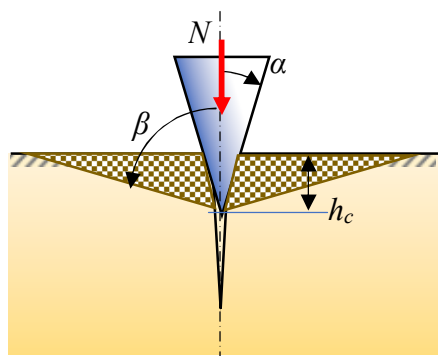


Рисунок 6 Действующие усилия при разрушении породы ударным или статическим сколом

Для определения параметров призм выкола под клиновым инструментом породы следует воспользоваться исследованиями [8], где были разработаны основы теории разрушения пород клиновым инструментом. Эти исследования и численные расчёты показали, что по мере увеличения угла заострения клина α (его «затупления») угол наклона площадки сдвига β незначительно увеличивается от 75 до 80°, а глубина h внедрения клина в породу существенно уменьшается. Так, для углов заострения $\alpha=10, 20, 30, 40, 50^\circ$ соответствуют глубины внедрения $h=9,8; 4,2; 1,8; 0,7, 0,2$ мм. Следовательно, при углах заострения α более 40° (существующие коронки) клин почти не внедряется в породу и происходит лишь усталостное повреждение её поверхности.

Ударно-поворотный способ воздействия долота на забой скважины эффективен в основном для пород малой твёрдости. Он

зависит от остроты кромок ударного лезвия долота, что позволяет увеличить глубину его внедрения и площадь выкола породы после удара. Обратим внимание на то, что угол заточки кромок лезвий 2α существующих коронок нельзя было выполнить менее 90° из-за опасности выкалывания кромок при ударных колебаниях инструмента в процессе его внедрения в породу.

Единственным усилием, действующим на инструмент при ударном отколе, является нормальная сила N , а усилия сдвига T и изгибающий момент M почти отсутствуют (рис. 6), откуда следует основное определяющее неравенство при разрушении расколом:

$$N \gg T \approx M \approx 0. \quad (2)$$

Работа W_1 при разрушении расколом определяется лишь трением на боковых гранях клина при его внедрении в породу на глубину h и ввиду её малости (3...10 мм) оказывается незначительной:

$$W_1 = 0,5 \cdot N \cdot h. \quad (3)$$

Итак, у дробящего инструмента затраты энергии меньше, а процесс затупления идёт медленнее, чем у режущего. Тем не менее существующие в настоящее время БРПИ для ударно-поворотных способов бурения не удовлетворяют условиям оптимальной работы резца при его внедрении в породу. Это обусловлено тем, что:

- основная энергия удара расходуется на смятие и переизмельчение породы под резцом из-за его «затупленного» лезвия, когда $\alpha > 40^\circ$, что приводит к большим затратам энергии и малой скорости бурения;

- для внедрения ударного инструмента при существующих углах заострения α более 40° необходима чрезмерно высокая погонная нагрузка на лезвие ($q > 3 \dots 5$ кН/см и более), что ведёт к потере стойкости инструмента.

Эти антагонистические технические противоречия стали тормозом дальнейшего развития ударного способа бурения, несмотря на его простоту и теоретические преимущества.

Кроме того, процесс работы дробящего БПРИ прерывен, т. к. после каждого удара инструмент поднимают и перемещают путём поворота в новое положение, что обуславливает низкую частоту ударов, сложность выполнения и меньшую эффективность такого инструмента. Чаще всего на практике режущая кромка инструмента прижата напорным усилием к забою, и тогда неминуемо возникают касательные и скалывающие напряжения на кромке резца, а все преимущества ударно-поворотного бурения исчезают. По этой причине область его применения ограничена главным образом бурением шпуров и скважин.

3.3 Особенности бурения резцами

Исполнительные органы выемочных и проходческих машин обычно оснащают группой резцов, которые, воздействуя на горную породу, образуют на ней борозды — резы, проходы, лунки. При резании с поверхности обычно образуется «развал» породы. Способ резания породы резцом также происходит при вращательном, вращательно-ударном и ударно-вращательном способах бурения. Тогда порода разрушается в забое скважины путём среза и скола.

Для этого на резец следует воздействовать нормальной N и сдвигающей касательной T силами одновременно, но при этом неминуемо возникает и значительный изгибающий момент M (рис. 7).

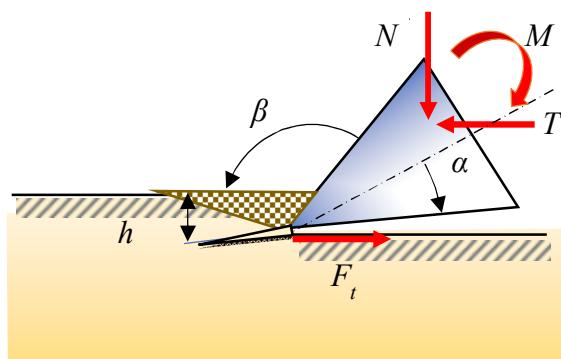


Рисунок 7 Действующие усилия при разрушении породы резанием

Главную роль при резании породы играет сдвигающее усилие T , и всегда выполняются основные определяющие неравенства

$$T \gg N, M > 0. \quad (4)$$

При срезе работа W_2 разрушения оказывается на порядок больше, чем при расколе, поскольку совершается усилием сдвига T на всём протяжении пути s движения инструмента:

$$W_2 = T \cdot s \gg W_1. \quad (5)$$

При резании сдвиговым усилием T происходит дополнительное воздействие на породу в виде различных типов среза и сдвига поверхностного слоя, касательного скалывания и отделения породы от массива. Однако основная работа по разрушению затрачивается на преодоление сил трения между режущим инструментом и породой. Такая особенность взаимодействия БПРИ с породой приводит к нарастающим негативным последствиям:

- работа силы трения полностью переходит в тепловыделение на самом ответственном участке инструмента — на его лезвии;
- ввиду плохого теплоотведения на лезвии БПРИ, всегда окружённого породой с низким коэффициентом теплопередачи, температура лезвия резко повышается до значений 1000...2000 °С и более;
- высокая температура на лезвии приводит к снижению в разы его деформационно-прочностных свойств;
- необходимость постоянного преодоления скользящим лезвием трения жёсткой абразивной среды приводит к интенсивному его износу и затуплению;
- у затупленного лезвия резко возрастают сопротивление породы и температура, что ведёт к прогрессивному усилению тепловыделения от сил трения и к износу и затуплению кромок.

Работа БПРИ, таким образом, является геомеханическим процессом, при котором происходит взаимовлияние входящих (приложенные усилия, заточка, температура ин-

струмента и др.) и результирующих (скорость резания, работа разрушения и др.) параметров. При этом реализуется положительная обратная связь, ухудшающая технические параметры бурения, что делает этот процесс неустойчивым.

Очевидно, сам процесс бурения способом резания самопроизвольно формирует механизм **нелинейной положительной обратной связи**.

Вышеприведённый анализ показывает, что при резании породы реализуется так называемый **режим с обострением** в виде динамического закона, при котором одна или несколько моделируемых величин (в нашем случае — температура лезвия и сопротивление породы) стремятся к бесконечности за конечный промежуток времени. В реальных условиях происходит остановка процесса бурения из-за затупления и износа инструмента, что требует его замены и ремонта.

3.4 Особенности работы раздавливающего БПРИ

По принципу воздействия на горную породу он отличается от дробящего инструмента ударно-поворотного действия не динамическим, а статическим приложением нагрузки к породе и нашёл своё конструктивное исполнение в виде дисковых шарошек (рис. 8). Из рисунка видно, что разрушение породы под шарошкой происходит путём раздавливания и выкола.

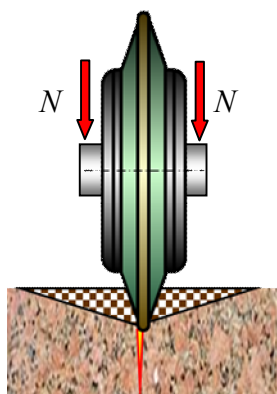


Рисунок 8 Дисковая шарошка с боковыми призмами выкола и разрушающим твёрдосплавным ободом

Как правило, дисковые шарошки устанавливают на проходческие комбайны, и они, как инструменты дробяще-скалывающего действия, доказали свою эффективность по породам с коэффициентом крепости 4...8 при высокой износостойкости и относительно низкой энергоёмкости разрушения. Это их роднит с ударно-поворотным способом бурения.

При внедрении в породу диск своим ободом уплотняет её поверхностный слой и перемещает его на некоторую глубину без хрупкого разрушения. По мере увеличения глубины вдавливания образуется уплотнённое пылевидное ядро, которое из глубины давит во все стороны, что приводит к сколу частиц породы по сторонам диска. Образуется «развал», на дне которого остаётся нарос — остаток пылевидного ядра.

Шарошкам присущи и существенные недостатки. Статическое разрушение раздавливанием под кольцевой твёрдосплавной вставкой требует чрезвычайно высоких напорных усилий на породный забой. Кроме того, у дисковой шарошки диаметром более 0,1 диаметра её кольцевой траектории по забою возникают высокие выламывающие усилия на лезвии при его внедрении в породу. Это вызывает разрушение лезвия на твёрдосплавном ободе, особенно возле центра кругового породного забоя. Тяжёлые и сложные по конструкции дисковые шарошки для роторных проходческих комбайнов требуют массивных валов и подшипников для выдерживания высоких напорных усилий, что значительно ограничивает их область применения. Ввиду этого следует признать, что дисковые шарошки вряд ли могут рассчитывать на широкое распространение в будущем.

Наиболее совершенным и распространённым для бурения скважин БПРИ следует считать шарошечное ребристое или штыревое долото (рис. 5), которое осуществляет дробяще-скалывающее разрушение породы.

Шарошечное буровое долото состоит из сферических или цилиндрических шарошек в количестве от одной до шести, смонтирован-

ных на подшипниках качения или скольжения на цапфах секций бурового долота. Шарошки представляют собой конусное стальное колесо, на котором расположены зубья разной длины или штыри из карбида вольфрама. Основная разновидность шарошечных долот для сплошного бурения — трёхшарошечное долото (рис. 5), а для бурения глубоких скважин получило распространение также одношарошечное буровое долото.

Зубья шарошки при работе выполняют сложное составное движение: обкатываются по породному забою скважины, вращаясь вокруг оси конусного корпуса за счёт вращения буровой колонны. Все шарошки имеют усложнённые системы смазки и промывки.

Преимуществами шарошки являются: малая площадь контакта штырей (зубьев) с забоем и их большое число; некритичный уровень износа зубьев; малый крутящий момент для вращения колонны труб.

Однако анализ механизма взаимодействия шарошки с породой показывает наличие ряда недостатков:

- на штыри (зубья) шарошки помимо усилий сжатия действуют изгибающие моменты из-за их внедрения в лунку с поворотом и скольжением;

- для исключения откола режущих кромок их выполняют затупленными, что ведёт к неэффективному разрушению породы смятием и выдавливанием и высокому абразивному износу;

- глубина внедрения штырей весьма мала (до 1 мм в крепких породах), что заметно снижает эффективность бурения;

- затруднённое удаление породного шлама из забоя снижает скорость бурения и ограничивает применение шарошки только породами, склонными к хрупкому разрушению.

Заканчивая критический анализ особенностей работы различного типа вооружений БПРИ, можно заключить, что по мере своего исторического развития появилось много разновидностей бурения от ударно-поворотного способа вначале до современного способа шарошечного бурения.

Однако все существующие способы бурения обладают существенными, до сих пор не преодоленными недостатками.

4 Оптимальные параметры БПРИ

Для создания БПРИ с оптимальными параметрами следует сформулировать исходные требования, которым должны отвечать конструктивные особенности инструмента, способ и режим его взаимодействия с разрушаемой породой. Эти требования вытекают из анализа особенностей работы всех существующих конструкций БПРИ и сводятся к следующему:

- 1) следует исключить появление касательных усилий на контакте лезвия с разрушаемой породой, а это значит, что инструмент должен всегда внедряться по нормали к породной поверхности забоя скважины;

- 2) на инструмент должны действовать только нормальные сжимающие усилия вдоль его оси без создания в нём поперечных сил и изгибающих моментов;

- 3) воздействие лезвия на породу должно быть не статическим, а динамическим (ударное вдавливание);

- 4) недопустимо касательное к породе (скользящее) перемещение БПРИ в момент внедрения лезвия в породу, для чего следует исключить любой его поворот вокруг своей оси при контакте с породой;

- 5) угол заточки лезвия должен быть минимальным для обеспечения наибольшей глубины его проникновения в породу, одновременно исключая поломку его при ударе;

- 6) для улучшения выноса породы и очистки забоя лезвие должно подниматься над забоем не менее двух-трёх глубин его ожидаемого внедрения в породу;

- 7) ударное лезвие должно взаимодействовать с породой не в отдельных изолированных точках забоя, а по линии длиной не менее 3...5 глубин внедрения, что повышает его устойчивость и заметно увеличивает производительность бурения, поскольку достигается не объёмное, а близкое к плоскому напряжённо-деформированное состояние в породе под лезвием;

8) поскольку глубина внедрения такого инструмента после единичного удара по породе в лучшем случае не превышает $h < 5 \dots 10$ мм, его высота должна быть не более $3 \dots 4 h$, что значительно снижает массу и расход дорогостоящих материалов.

Отсюда следует, что наиболее простым и наименее энергоёмким является способ разрушения породы ударным инструментом дробящего действия, когда его вдавливают в породу ударной нагрузкой, после чего поднимают и перемещают в новое положение.

Перечисленным требованиям в полной мере удовлетворяет лишь ударно-поворотный способ бурения, с которого и началось развитие технологии бурения и от которого давно, тогда вполне обоснованно, отказались как от малопродуктивного. Тем не менее, с точки зрения геомеханического взаимодействия ударного лезвия с породой, этот способ является самым эффективным. Остаётся только преодолеть основной его недостаток, состоящий в том, что в ударно-поворотном способе бурения периодически происходит относительно медленный подъём и сброс инструмента на забой под собственным весом. Именно эта особенность технологии не позволяла решить конструкторские задачи по увеличению частоты и энергии ударов.

Таким образом, если обеспечить выполнение условия повышения частоты ударов до $1 \dots 2$ Гц, то благодаря выполнению всех вышеперечисленных требований наиболее оптимальным БПРИ следует признать инструмент клиновидной формы с углом заострения в пределах $\beta = 2\alpha = 25 \dots 30^\circ$, форма которого показана на рисунке 9. Это БПРИ с симметричными клиновидными гранями и твёрдосплавной вставкой для ударно-скалывающего разрушения породы.

Новый БПРИ состоит из корпуса 1, симметричных клиновидных граней 2, наклонённых к оси симметрии под углом $\alpha = 12 \dots 15^\circ$. По центру расположена твёрдосплавная вставка 3, которую можно выполнить из сверхтвёрдых композиционных

материалов типа СВПК, обладающих свойствами синтетических поликристаллических алмазов и позволяющих изготавливать заготовки режущих элементов различных форм и размеров [9].

В частности, весьма перспективен кубический нитрид бора в виде химического соединения бора и азота. Параметры решётки и минимальное межатомное расстояние у него несколько больше, чем у алмаза. При твёрдости до 80000 МПа термостойкость его выше, чем у алмаза (он не теряет своих свойств даже при температуре 1400°C); модуль упругости в $3 \dots 3,5$ раза выше, чем у стали, предел прочности на сжатие — 500 МПа. В зависимости от технологии изготовления известны разные его модификации под названиями: эльбор, кубонит, боразон, гексанит.

Такие свойства новых сверхтвёрдых материалов позволяют уменьшить толщину твёрдосплавной вставки в клиновом БПРИ до 1 мм, что для самой крепкой породы с прочностью на одноосное сжатие $\sigma_c = 200$ МПа (коэффициент крепости порядка $f=20$) требует создания статической погонной нагрузки q_n порядка

$$q_n \approx \sigma_c / A = 200 \text{ МПа} / 0,1 \text{ см}^2 \approx 2 \text{ кН/см}, \quad (6)$$

где A — площадь давления под остриём твёрдосплавного лезвия толщиной 0,1 см и длиной 1 см, $A = 0,1 \text{ см} \cdot 1 \text{ см} = 0,1 \text{ см}^2$.

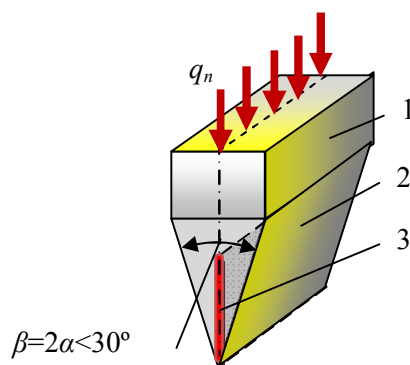


Рисунок 9 Новая конструкция БПРИ

Оценим возможную скорость бурения новым БПРИ по сверхкрепким породам. Поскольку ударно-дробящий способ бурения относится к низкочастотному БПРИ, то частота ударов по породе будет в пределах $n=2...3$ Гц, а глубина проникновения тонкого твёрдосплавного лезвия благодаря пинч-эффекту составит около $h=3...5$ мм. Тогда скорость V_b бурения будет равна

$$V_b \approx k_V \cdot n \cdot h = (0,6...0,8) \cdot 2 \text{ с}^{-1} \cdot 5 \text{ мм} \approx (6...8) \text{ мм/с.} \quad (7)$$

В результате можно достигнуть высокой скорости прохождения скважины на уровне предельно технически возможной и равной 20...30 м/час.

По мере уменьшения прочности породы скорость бурения будет увеличиваться за счёт увеличения глубины проникновения клина h . Однако даже в самых слабых породах вряд ли стоит ожидать увеличения скорости бурения более 50...60 м/час, поскольку «узким местом» тогда станет очистка забоя от бурового шлама и удаление его из скважины.

5 Оптимальная конфигурация лезвия БПРИ в проекции на забой. Спираль Архимеда

Приступим к решению следующей довольно нетривиальной задачи, связанной с оптимизацией разрушения породы в процессе поворота БПРИ вокруг оси скважины.

Вначале следует обосновать форму породного забоя скважины. Поскольку одним из важнейших условий оптимальности работы БПРИ является отсутствие поперечных усилий на его лезвии, необходимо обеспечить его воздействие на забой лишь нормальными усилиями. Эти усилия формируются в результате ударов инструмента, направленных вдоль оси скважины. При этом лезвие всегда при любом повороте должно находиться в плоскости, нормальной к оси скважины.

Следовательно, породный забой скважины должен всегда быть перпендикулярным к лезвию БПРИ, т. е. плоским. Любое

отклонение поверхности породного забоя от плоскости неминуемо должно приводить к появлению поперечных усилий, действующих на лезвие БПРИ и снижать его работоспособность из-за повышенного износа, изгиба и поломки.

Рассмотрим особенности разрушения породы под буровой коронкой. Наиболее простой формой лезвия БПРИ в проекции на забой является прямая линия. Такая форма самая удобная с позиций технологии изготовления коронки и её заточки после затупления, поэтому она получила наибольшее распространение на практике, особенно при перфораторном бурении.

Однако разрушение породы в забое происходит, как показывает анализ, крайне нерационально (рис. 10). Так, под буровой коронкой в забое 1 происходят выколы породы 2, образованные следами 3 лезвия. При этом явно выделяются три области разрушения породной поверхности забоя скважины: переизмельчения *I*, нормального разрушения *II* и недостаточного разрушения *III*. Соотношение площадей этих областей составляет ориентировочно $A_I : A_{II} : A_{III} \approx 10 \% : 30 \% : 60 \%$.

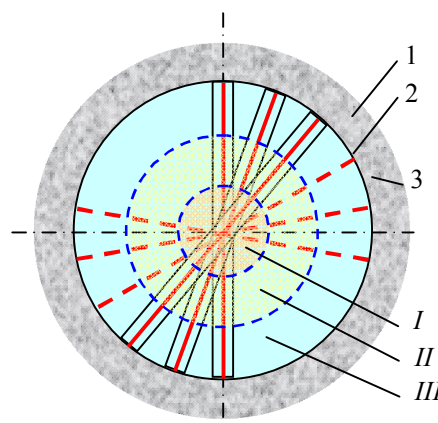


Рисунок 10 Особенности разрушения забоя скважины под буровой коронкой

По мере увеличения зоны поражения забоя лезвием зона переизмельчения увеличивается, а когда происходит полное разрушение породы на периферии забоя, площадь зоны переизмельчения может достигать до $A_I=80...90 \%$.

В результате неравномерности разрушения породы в забое:

- возрастают в 1,5...2 раза непроизводительные затраты энергии на переизмельчение породного шлама в забое;
- происходят неравномерное затупление и износ лезвия инструмента, быстро прогрессирующий на его концах, что резко (в разы) снижает производительность бурения;
- большие затраты времени на смену затупленных коронок и расход дефицитных материалов.

Основная причина этих недостатков заключается в неравномерности разрушения породы в забое. Следовательно, для устранения этой причины необходимо обеспечить **равномерность работы** каждого участка лезвия коронки. Теоретически это условие можно выполнить, если произвольный участок лезвия будет разрушать один и тот же объём породы.

Основная идея оптимизации состоит в том, чтобы на каждый элементарный участок ударной кромки коронки приходилась одна и та же разрушаемая («заметаемая») площадь (рис. 11).

Для разработки математической модели оптимизации разрушения рассмотрим элементарное кольцо произвольного радиуса r шириной dr внутри скважины единичного радиуса (рис. 11). Пусть это кольцо пересекает кромка лезвия коронки под углом φ , а искомое уравнение лезвия в полярной системе координат будет $r = f(\varphi)$.

Площадь элементарного кольца в принятых обозначениях равна

$$dA = 2\pi \cdot r \cdot dr, \quad (8)$$

а элементарная длина кромки лезвия, формирующего разрушение в заданном кольце, составит

$$dl = \sqrt{dr^2 + r^2 \cdot d\varphi^2}. \quad (9)$$

Согласно сформулированному критерию оптимизации, элементарная длина dl должна быть пропорциональна разрушаемой площади dA :

$$dl = dA / b; \quad (10)$$

$$\sqrt{dr^2 + r^2 \cdot d\varphi^2} = 2\pi \cdot r \cdot dr / b,$$

где b — размерная постоянная, определяемая из граничных условий, м.

Производя алгебраические упрощения второго уравнения (10), приходим к дифференциальному уравнению

$$\frac{d\varphi}{dr} - \frac{\sqrt{a^2 r^2 - 1}}{r} = 0, \quad 1/\text{м}, \quad 1/\text{м}, \quad (11)$$

где $a = 2\pi / b$, 1/м.

Искомое уравнение кривой $\varphi = f(r)$ получим после решения уравнения (11) с граничными условиями (при $r = r_0$ $\varphi = \varphi_0$), для чего находим определённый интеграл

$$\varphi = \int \frac{\sqrt{a^2 r^2 - 1}}{r} \cdot dr = \sqrt{a^2 r^2 - 1} + \arcsin(ar)^{-1} + C, \quad (12)$$

где $C = \varphi_0 - \sqrt{a^2 r_0^2 - 1} - \arcsin(ar_0)^{-1}$ — постоянная, определяемая из граничных условий.

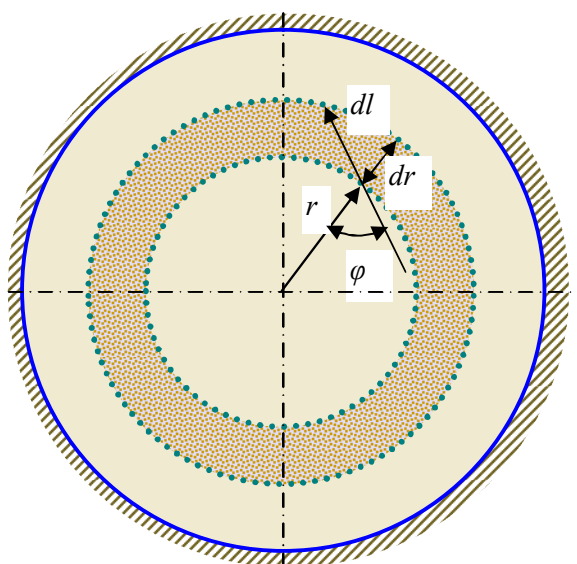


Рисунок 11 Математическая модель оптимизации разрушения забоя скважины

Решение, как следует из (12), существует лишь при условии $a^2 r^2 \geq 1$. Постоянная интегрирования C может изменяться в пределах $0 \leq \varphi_0 \leq 2\pi$. Чтобы получить наглядное представление о виде достаточно сложной функции $\varphi = f(r)$ (12), построим её график в координатах r, φ (рис. 12).

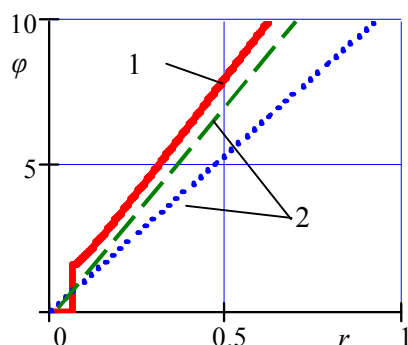


Рисунок 12 Графики функций по уравнению:

1 — искомой функции $\varphi = f(r)$ (12);

2 — спирали Архимеда $\varphi = kr$

Рядом с графиком функции (12) построены два луча, выходящих из начала координат $\varphi = ar$. Как следует из сравнения графиков, сложная по записи функция (12) с достаточной точностью может быть описана простейшим уравнением луча $\varphi = kr$, за исключением небольшого участка в начале координат, т. е. там, где нарушено условие существования решения в виде неравенства $a^2 r^2 \geq 1$.

Как известно из аналитической геометрии, простейшее уравнение прямой является уравнением луча в декартовой системе координат $\varphi = ar$. А прямой луч при переходе в полярную систему координат оказывается не чем иным, как знаменитой **спиралью Архимеда**. Древнегреческий учёный Архимед из Сиракуз (III век до н. э.) вывел уравнение спирали при изучении формы закрученной раковины. Архимедова спираль напрямую связана с числами Фибоначчи («золотым сечением») и часто встречается в природе (от ДНК человека до строения галактик в космосе), широко при-

меняется в технике (при конструировании фрез, кулачковых механизмов, самоцентрирующихся патронов и др.).

Если принять во внимание, что обычно $r \gg 1/a$, то после несложных преобразований уравнение (11) значительно упростится

$$\frac{d\varphi}{dr} - a = 0, \quad (13)$$

а его решение даёт простейшее уравнение луча в декартовой и спирали Архимеда в полярной системах координат $\varphi = ar$.

Следовательно, ударная кромка буровой коронки должна соответствовать полученному уравнению, что гарантирует равномерное истирание и износ по всей её длине. Оказывается, как следует из нашего решения (12), архимедова спираль обладает ещё одним особым свойством — каждый её элементарный участок длиной dl на любом расстоянии от центра «замечает» одинаковую площадь ограничивающего её кольца при вращении вокруг центра $r = 0$.

Отношение площади кольца произвольной ширины к длине дуги вписанной в него спирали есть величина инвариантная и не зависит от радиуса расположения кольца.

Отсюда приходим к важному выводу: **оптимальная форма лезвия БПРИ в проекции на плоскость забоя скважины должна иметь вид спирали Архимеда** (за исключением небольшой области в центре скважины).

При конструировании БПРИ возможны различные варианты выполнения ударных кромок (рис. 13).

Коронки должны создавать необходимый минимум удельного давления на породу, способствовать удалению бурового шлама, продольной устойчивости и др. В частности, следует всегда стремиться к выполнению БПРИ с максимально возможной суммарной длиной лезвия, что пропорционально снижает её износ и увеличивает срок службы. Однако это требует увеличения в такой же степени общей энергии удара и силовых параметров бурового оборудования.

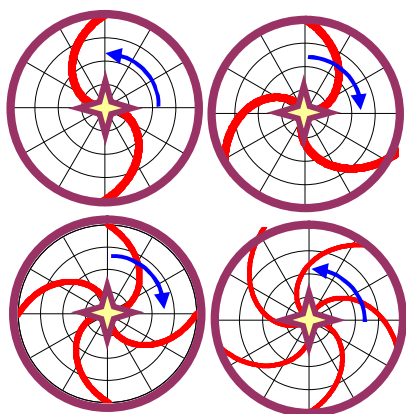


Рисунок 13 Многолучевые ударные кромки буровых коронок ($n=2, 3, 4, 5 \dots$) по спиралям Архимеда

В ряде случаев из конструкторско-эксплуатационных соображений может возникнуть необходимость изменить скорость износа лезвия вдоль радиуса скважины. С целью изучения такой возможности обобщим полученные ранее зависимости, для чего запишем обобщённое уравнение архимедовой спирали в виде

$$r = k\varphi^\alpha, \quad (14)$$

где k — размерный параметр, 1/м;

α — показатель кривизны, имеющий смысл отклонения искомой кривой от спирали Архимеда, $0 < \alpha < \infty$.

При $\alpha = 0$ спираль вырождается в радиальный луч, исходящий из начала координат, а при $\alpha \rightarrow \infty$ получаем спираль с бесконечной кривизной (сингулярность) в центре координат.

Общее представление об этих кривых даёт рисунок 14. На рисунке сопоставлены архимедовы спирали с разными показателями кривизны α . Чем меньше кривизна α , тем быстрее «распрямляется» спираль по мере возрастания радиуса.

Чтобы судить, как меняются параметры поражения A_L при вращении разных спиралей вокруг центра скважины, построены графики на рисунке 15.

Параметр «поражения» забоя A_L , показывающий размер «заметаемой» площа-

ди A , приходящийся на единицу длины лезвия буровой коронки L , можно вычислить по формуле

$$A_L = A/L. \quad (15)$$

Определяем «заметаемую» спиралью площадь между радиусами r_0 , r_1 :

$$A = \pi(r_1^2 - r_0^2) = \pi \cdot k^2 (\varphi_1^{2\alpha} - \varphi_0^{2\alpha}), \quad (16)$$

а длину спирали находим по формуле

$$L(r) = \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \sqrt{(1 + \alpha^2 k^2 \xi^{2\alpha-2})} d\xi, \quad (17)$$

где r_0 , r_1 , φ_0 , φ_1 — соответственно радиальные и угловые границы рассматриваемой площади.

В качестве аргумента для графиков принято расстояние до центра скважины r , а функцией A_L является отношение площади скважины A , которую при вращении вокруг центра «заметает» спираль, к её длине L . Из сопоставления графиков становится понятным, что спиральное лезвие коронки с показателем кривизны $\alpha < 1$ быстрее (примерно в 2 раза) будет изнашиваться ближе к периферии скважины, а при показателе кривизны $\alpha > 1$ износ ударного лезвия будет преобладать в центральной области скважины.

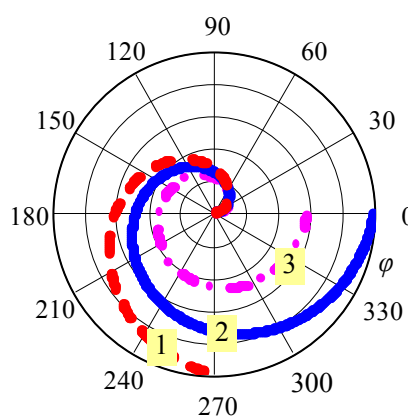


Рисунок 14 Особенности поведения обобщённых спиралей Архимеда:
1) $\alpha=0,7$; 2) $\alpha=1,0$; 3) $\alpha=1,2$

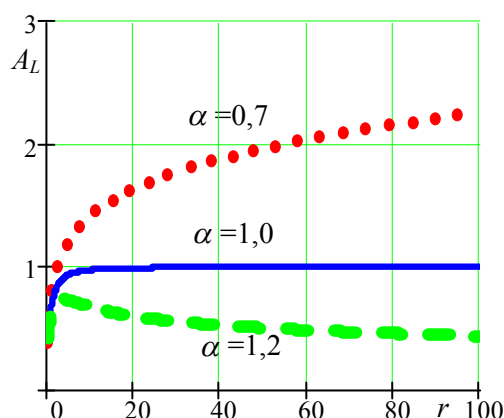


Рисунок 15 Особенности поведения обобщённых спиралей Архимеда:

1) $\alpha=0,7$; 2) $\alpha=1,0$; 3) $\alpha=1,2$

Оптимальным решением с точки зрения равномерности износа и долговечности эксплуатации, безусловно, является лезвие, выполненное по классической спирали Архимеда, у которой $\alpha=1$ и функция поражения $A_L = \text{Const}$. Даже незначительное (на $\pm 20...30\%$) отклонение ударного лезвия от оптимальной формы приводит к многократному (в $2...3$ раза) изменению функции поражения A_L , т. е. к неравномерности износа и, как следствие, пропорциональному уменьшению срока эксплуатации БПРИ. Заметим, что существующие БПРИ работают далеко вне области оптимального износа.

Для оценки оптимальности работы бурового инструмента введём функцию неравномерности поражения забоя скважины лезвием коронки

$$\Delta = \frac{1}{r_1 - r_0} \int_{r_0}^{r_1} \sqrt{\left(\frac{A_L(\xi)}{A_{LC}} - 1 \right)^2} d\xi, \quad (18)$$

где A_{LC} — усреднённая функция поражения забоя скважины в границах изменения радиуса r_0, r_1 , определяемая по формуле усреднения

$$A_{LC} = \frac{1}{r_1 - r_0} \int_{r_0}^{r_1} A_L(\xi) d\xi. \quad (19)$$

Для буровой коронки, выполненной по классической спирали Архимеда $\alpha=1$, как и следовало ожидать, относительная неравномерность поражения забоя $\Delta=0$.

Предельным случаем является традиционная буровая коронка с прямолинейным долотчатым лезвием (рис. 1, 2, 4) — самая «древняя» по возрасту и до сих пор широко распространённая в горной промышленности. Её параметры «антиоптимальности» зашкаливают и являются предельными. После расчёта по формулам (14)–(19) для долотчатой коронки радиуса r , опустив промежуточные выкладки, получим такие результаты:

1) показатель кривизны лезвия $\alpha=0$;

2) длина лезвия $L=2r$;

3) заметаемая лезвием площадь забоя

$$A = \pi \cdot r^2;$$

4) параметр поражения забоя

$$A_L = A/L = \pi \cdot r/2;$$

5) усреднённая функция поражения забоя скважины в границах изменения радиуса от 0 до r равна $A_{LC} = \pi \cdot r/4$;

6) функция неравномерности поражения забоя скважины $\Delta=1$.

Таким образом, мы выделяем два предельных случая работы бурового инструмента:

— оптимальной формы по классической спирали Архимеда, у которой показатель кривизны $\alpha=1$, когда достигается минимальная неравномерность поражения забоя $\Delta=0$;

— традиционной прямолинейной долотчатой формы с показателем кривизны $\alpha=0$, у которой неравномерность поражения забоя $\Delta=1$ предельно высока.

Эти разновидности бурения можно рассматривать как антиподы, все остальные варианты воздействия на породный забой скважины занимают промежуточное положение по показателю кривизны $0 < \alpha < \infty$ и функции неравномерности поражения забоя $0 < \Delta < 1$.

В заключение сделаем несколько замечаний гносеологического и методического характера.

Возникает закономерный вопрос: каким образом вот уже в течение более трёх ве-

ков развития горной техники и технологии остались неизменными малоэффективные способы бурения и конструкции бурового долота? Даже зубчатая шарошка — апофеоз инженерной мысли XX века — является, по сути, повторением идеи разрушения забоя радиальными зубьями, т. е. повторением долота с крайне плохой функцией неравномерности поражения забоя $\Delta = 1$.

Объяснение этому казусу — в неявном господстве традиционной научной доктрины развития науки и техники, в движении по вектору инерции мышления, когда основные усилия инженеров направлены на устранение узких мест и отдельных недостатков, на экстенсивное изменение выходных параметров конструкторско-технологического изделия (увеличение массы, мощности, размеров, энергии и пр.). Тогда как согласно прогрессивной доктрине следует вскрыть основные технические противоречия и на основе отказа от традиционных подходов предложить новые технические решения.

Нетрудно заметить, что в историческом развитии техники и технологии бурения проявился основной движущий закон диалектики — «закон отрицания отрицания», когда новое развивается из старого путём преодоления его антагонистического противоречия. Мы видим вначале смену примитивного ударно-поворотного способа бурения более прогрессивным вращательным (шарошечным), а затем, на более высоком уровне, возврат к идее ударно-поворотного бурения с оптимальными параметрами, позволяющими скачком увеличить его эффективность.

В результате перехода на оптимальные параметры конструкции БПРИ и новую версию ударно-поворотного способа бурения можно существенно увеличить эффективность буровой техники: в 2...5 раз снизить износ и расход БПРИ, энергоёмкость бурения и массу бурильной машины, а в итоге повысить в 2–3 раза техническую скорость проходки скважины.

Однако для эффективного использования возможностей прогрессивного ударно-поворотного способа бурения следует суще-

ственно пересмотреть основные конструкторские и технологические концепции бурения и перейти к созданию принципиально новых конструкций буровых агрегатов, чему будут посвящены последующие публикации.

Выводы

Методологическая особенность проведённых исследований состоит в углублённом изучении закономерностей геомеханического взаимодействия режущей кромки БПРИ с породами скважины при бурении.

Выполненные исследования позволили получить следующие основные результаты, обладающие научной новизной и практической полезностью:

- сформулированы требования к режущему инструменту;
- установлены принципиальные различия в действующих на режущую кромку усилиях при ударно-поворотном и сдвиговом воздействии на породный забой;
- впервые сформулированы критерии оптимизации и конкретизированы требования к оптимальным параметрам БПРИ;
- предложена конструкция нового БПРИ для ударно-скалывающего разрушения породы с симметричными клиновыми гранями и твёрдосплавной вставкой;
- разработана математическая модель оптимизации конфигурации лезвия БПРИ в проекции на забой;
- впервые доказано, что оптимальной формой лезвия БПРИ является спираль Архимеда;
- исследованы иные формы лезвий БПРИ с использованием обобщённой спирали Архимеда.

Задача дальнейших исследований заключается в реализации теоретических результатов в конкретные конструктивные разработки нового бурового агрегата.

Автор выражает благодарность своему другу профессору Латышеву О. Г. (Уральский государственный горный университет) за присланную им монографию [10] и возможность ознакомиться с его работами по проблеме разрушений горных пород.

Библиографический список

1. Абубакиров, В. Ф. Буровое оборудование : справочник в 2-х т. Т. 2. Буровой инструмент [Текст] / В. Ф. Абубакиров, Ю. Г. Буримов, А. Н. Гноевых. — М. : ОАО «Издательство "Недра"», 2003. — 494 с.
2. Волик, Д. А. Буровые породоразрушающие инструменты [Текст] : учеб. пособ. для вузов / Д. А. Волик. — М. : РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2014. — 94 с.: ил.
3. Абатуров, В. Г. Физико-механические свойства горных пород и породоразрушающий буровой инструмент [Текст] / В. Г. Абатуров. — Тюмень : Нефтегазовый университет, 2007. — 269 с.
4. Волков, А. С. Буровой инструмент [Текст] / А. С. Волков. — М. : Недра, 1980. — 285 с.
5. Lundberg, L. Efficiency of percussive drilling with extension rods [Text] / L. Lundberg. — International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. — August 1987. — Volume 24, Issue 4. — P. 213–222.
6. Крюков, Г. М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. Т. 1. [Текст] / Г. М. Крюков. — М. : Горная книга, 2006. — 330 с.
7. Литвинский, Г. Г. Основы теории резания и разрушения горных пород [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2017. — Вып. 8 (51). — С. 5–15.
8. Литвинский, Г. Г. Пинч-эффект при разрушении породы клиновым горным инструментом [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2018. — Вып. 9 (52). — С. 5–20.
9. Алмазы и сверхтвёрдые материалы для армирования горных инструментов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://mydocx.ru/10-138651.html>, 2016.
10. Латышев, О. Г. Разрушение горных пород [Текст] / О. Г. Латышев. — М. : Теплотехник, 2007. — 672 с.

© Литвинский Г. Г.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ГЭМО ДонГТУ Корнеевым С. В.,
д.т.н., проф., зав. каф. СПСиШ ДонНТУ Борщевским С. В.**

Статья поступила в редакцию 01.10.18.

проф. Литвинський Г. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ БУРОВОГО ІНСТРУМЕНТУ. СПІРАЛЬ АРХІМЕДА

Виконано короткий ретроспективний екскурс в історію розвитку бурової техніки від ударно-поворотного до шарошечного способу буріння з позицій геомеханічної взаємодії бурового породоруйнівного інструменту (БПРІ) з гірською породою. Проаналізовано особливості роботи БПРІ при різних способах буріння виходячи з виникаючих зусиль на кромці різця. Розкрито основні технічні протиріччя БПРІ, сформульовано вимоги до нього та критерії оптимізації. Розглянуто недоліки руйнування породи під прямолінійним лезом бурової коронки. Запропоновано оптимальну форму леза БПРІ у вигляді гострого клину з тонкою по центру твердосплавною вставкою. Сформульовано критерій ефективності роботи БПРІ, розроблено математичну модель і шляхом вирішення диференційного рівняння доведено оптимальну форму БПРІ у вигляді спіралі Архімеда. Дано оцінку ефективності застосування оптимізованого БПРІ.

Ключові слова: теорія буріння, способи буріння, бурова коронка, вимоги до коронки, критерії оптимізації буріння, математична модель буріння, форма леза коронки, спіраль Архімеда, ефективність буріння.

Prof. Litvinsky G. G. (DSTU, Alchevsk, LPR)

OPTIMIZATION OF DRILLING TOOL PARAMETERS. ARCHIMEDES SPIRAL

A short retrospective digression into the history of development of drilling equipment was made, starting from a swivel-to-roller drilling method from the position of geomechanical interaction of

a rock-cutting drilling tool (RCDT) with rock. The analysis of the operation features of the RCDT for different drilling methods is given based on the arising forces at the edge of the tool. The main technical contradictions of the RCDT were revealed, requirements for it and optimization criteria have been formulated. The defects of rock destruction under the straight blade of the drill bit are considered. The optimal form of the RCDT blade is proposed in the form of an acute wedge with a thin carbide insert in the center. The criterion of the RCDT work efficiency is formulated, the mathematical model has been developed and by solving the differential equation the optimal form of the RCDT in the form of the Archimedes spiral has been proved. The effectiveness of the optimized RCDT has been assessed.

Key words: boring theory, drilling methods, drill bit, chisel requirements, drilling optimization criteria, mathematical model of boring, chisel shape, Archimedes spiral, drilling efficiency.

УДК 622.287.1

д.т.н. Полозов Ю. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР),
Лазебник А. Ю.

(АФГТ ЛНУ им. В. Даля, г. Антрацит, ЛНР)

ГИДРОИЗОЛЯЦИЯ И УКРЕПЛЕНИЕ НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ МЕТОДОМ ТАМПОНАЖА

Приведены результаты промышленных испытаний нового метода тампонирувания водопроницаемых грунтов и разуплотнённых пород на примере капитального ремонта плотины Елизаветинского водохранилища в Луганской области с использованием гладкоствольной колонны. Использование гладкоствольной колонны, обеспечивающей минимальный зазор между стенками скважины, в сочетании со структурированными глиноцементными тампонажными растворами позволяет отказаться от крепления инъекционных скважин перфорированными манжетными колоннами и применения пакерующих устройств.

Ключевые слова: водопроницаемые грунты, тампонаж, глиноцементные растворы, гладкоствольная колонна, гидроизоляция грунтов, методика расчёта параметров тампонажа.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. В практике эксплуатации насыпных дамб, плотин и других гидротехнических сооружений, как правило, часто возникают аварийные ситуации, связанные с увеличением фильтрации воды через них по зонам разуплотнённых грунтов и пород как в самом теле, так и в подстилающих породах. В таких случаях, во избежание аварий и дальнейшего разрушения дамб и плотин, разрабатываются мероприятия по восстановлению водонепроницаемости грунтов путём применения методов инъекции [1].

В ГОАО «Спецтампонажгеология» была разработана и внедрена в широких масштабах высокоэффективная технология защиты и предупреждения аварийных утечек воды, в т. ч. аварийных, путём сооружения противофильтрационных завес и барьеров на пути их фильтрации. Весьма эффективно технология сооружения противофильтрационных завес и барьеров применялась при ремонте и реконструкции плотин и дамб водохранилищ, шламонакопителей, каналов и других гидротехнических сооружений [2].

Одним из приоритетных направлений повышения качества гидроизоляции и укрепления несвязных грунтов гидротехниче-

ских сооружений методом тампонажа является возможность создания необходимого давления нагнетания тампонажного раствора в проницаемую среду за счёт потерь напора при подъёме тампонажного раствора в зазоре между стенками скважины и буровыми трубами (в случае применения гладкоствольной колонны буровых труб, обеспечивающей минимальный зазор).

Предложенная технология подтверждается теоретическими расчётами параметров тампонажа с целью гидроизоляции и укрепления несвязных грунтов и обеспечивает упрощение технологии нагнетания за счёт отказа от применения дорогостоящих пакерующих устройств и манжетных колонн [2].

Необходимо подтверждение выполненных аналитических расчётов и лабораторных исследований предложенной технологии в натурных условиях.

Постановка задачи. Задачей предложенной технологии гидроизоляции и укрепления несвязных грунтов является подтверждение эффективности использования стабилизированного (затвердевшего) слоя тампонажного раствора в зазоре «стенка скважины–буровая колонна» в качестве пакерующего устройства вместо установки манжетной колонны.

Изложение материала и его результаты.

Основными составляющими данной технологии устранения протоков воды через плотины и дамбы являются:

- заполнение глиноцементным раствором пустот, трещин, поровых каналов, образовавшихся в результате техногенных и суффозионных процессов;
- создание гидроизоляционного экрана в теле дамбы;
- стабилизация и укрепление разуплотнённого материала плотин, дамб, каналов и оснований гидротехнических сооружений.

В основу технологии положен принцип инъекции в разуплотнённые зоны специальных тампонажных растворов через пробуренные вертикальные и наклонно-направленные скважины. Физическая сущность процесса инъектирования тампонажных растворов способом «снизу–вверх» с использованием гладкоствольной буровой колонны заключается в следующем:

- после завершения бурения скважины на полную проектную глубину производится подъём бурового инструмента на величину нижней заходки и осуществляется нагнетание тампонажного раствора;
- первоначально глиноцементный раствор под давлением поступает в зазор между стенками скважины и буровой колонной, поднимаясь в нём на величину, определяемую давлением нагнетания и реологическими характеристиками раствора;
- в определённый момент, когда давление нагнетания достигает критической величины, недостаточной для преодоления гидравлических сопротивлений при дальнейшей прокачке глиноцементного раствора в зазор между стенками скважины и буровыми трубами, тампонажный раствор стабилизируется, резко увеличивая прочность структуры, и образует в зазоре пробку, работающую как пакерующее устройство;
- дальнейшее нагнетание тампонажного раствора будет происходить в режиме инъектирования в проницаемую среду и формирования вокруг скважины изоляционной завесы с размерами, определяемыми

скважностью (пустотностью) грунтов и реологическими характеристиками раствора и давлением;

- после завершения тампонирующего нижележащего интервала проницаемых пород буровая колонна приподнимается на величину следующей заходки, и нагнетание глиноцементного раствора возобновляется согласно проектным расчётам.

Аналитические расчёты необходимой величины пробки из стабилизированного тампонажного раствора в зазоре между стенками скважины и буровыми трубами, способной выдержать проектное давление нагнетания, определяются по уравнению

$$L = 0,25 \cdot (d_{скв} - d_{тр}) \frac{P_n}{P_m}, \quad (1)$$

где L — длина пробки тампонажного раствора в зазоре между стенками скважины и буровыми трубами, м; P_n — давление тампонажного раствора, МПа; $d_{скв}$ — диаметр скважины, мм; $d_{тр}$ — наружный диаметр буровых труб, мм; P_m — пластическая прочность глиноцементного раствора, МПа.

Основные типы тампонажных растворов, применяемых в практике ремонта гидротехнических сооружений, приведены в таблице 1. Водосливная дамба Елизаветинского водохранилища, находящаяся в эксплуатации с 1944 г., в связи с повышенными утечками воды через неё потребовала капитального ремонта. Для определения состояния тела дамбы ООО «УкрНТЭК-экогеодинамика» было выполнено бурение разведочных скважин и проведены комплексные геофизические исследования.

По результатам геофизических исследований в насыпном грунте и подстилающих породах выделены две аномальные зоны ФЗ-1 и ФЗ-2, которые обусловлены разуплотнением грунтов тела дамбы и характеризуются повышенным коэффициентом фильтрации (рис. 1).

Основным водопроводящим слоем являются насыпные грунты — суглинки и аллювиально-делювиальные отложения. Их

водопроницаемость неодинакова. Коэффициент фильтрации изменяется в широких пределах от 0,05 до 0,71 м/сут (табл. 2).

Это определяет снижение поверхности зеркала грунтового потока в местах с более высокой скоростью фильтрации подземных вод. Подстилающие элювиально-делювиальные суглинки значительно менее

проницаемые, коэффициент фильтрации на порядок ниже залегающих над ними аллювиально-делювиальных отложений. Таким образом, элювиально-делювиальные суглинки могут рассматриваться как относительный водоупор, препятствующий перетоку воды из аллювиально-делювиальных отложений в проницаемую карбоновую толщу.

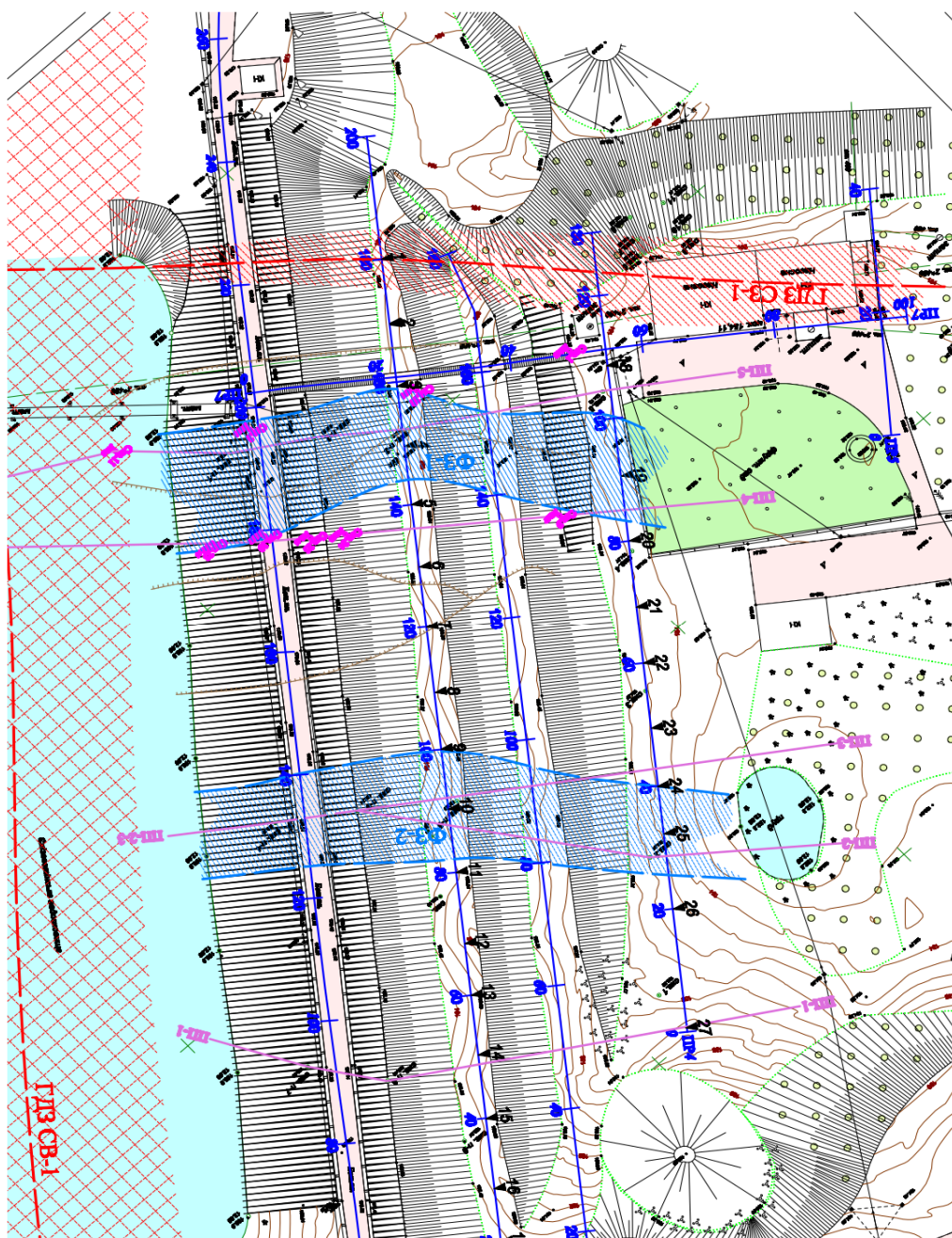


Рисунок 1 Схема расположения водопроводящих зон в теле дамбы Елизаветинского водохранилища

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Таблица 1

Виды и характеристики тампонажных растворов для сооружения противофильтрационных завес

№	Типы растворов	Назначение растворов	Характеристика растворов			
			Состав	Плотность, ρ , кг/м ³	Фильтрация, K_f м/с	Прочность, P_m МПа
1	Глиноцементный	Закладочный Гидроизоляционный	Глина, Цемент, Силикат натрия	1250–1400	$1 \cdot 10^{-10}$ $1 \cdot 10^{-11}$	До 1,0
2	Глино-зольно-цементный	Закладочный, Гидроизоляционный, уплотняющий	Глина, Цемент Зола-унос	1200–1450	$1 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-6}$	До 1,0
3	Грунто-цементный	Закрепляющий	Грунт, цемент	1250–2000	$1 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-6}$	До 10,0
4	Цементный	Закрепляющий	Цемент	1250–2000	$1 \cdot 10^{-10}$	До 40,0

Таблица 2

Результаты опытно-фильтрационных работ методом экспресс-откачки в контрольных скважинах

Номер скважины	Место проведения	Проницаемые породы	Значение K_f (м/сут)	Интервал, м
Скважина № 1	Примыкание поймы к правому борту	Суглинки (ed _{I-II})	0,051	1,7–8,0
Скважина № 2	Пойма	Суглинки (ad _{IV})	0,712	1,05–8,0
Скважина № 3	Центр поймы	Суглинки (ad _{IV})	0,107	0,42–8,0
Скважина № 4	Пойма	Суглинки (ad _{IV})	0,287	1,13–10,0

Водопроницаемость карбоновых отложений в основании дамбы не изучалась.

При выборе составов тампонажных растворов для изоляции фильтрационных зон в теле дамбы Елизаветинского водохранилища необходимо было учитывать, что грунты представлены переслаиванием суглинков и аллювиально-делювиальных отложений, обладающих высокой пористостью. Применение цементных растворов с различными реагентами из-за высокой водоотдачи и неустойчивости не обеспечивает надлежащего проникновения их в породу. В результате вблизи стенки тампонажной скважины образуется пробка из цементных частиц, резко возрастает давление нагнетания, и процесс инъецирования прекращается.

Для изоляции несвязных грунтов был рекомендован глиноцементный раствор. Такие растворы готовят на основе исходного глинистого раствора с плотностью до 1200–1230 кг/м³ и содержат до 10 % сухого цемента и до 1 % структурообразователя [3]. Благодаря низкой водоотда-

че растворы удовлетворительно проникают в грунт, т. е. позволяют формировать вокруг нагнетательной скважины изоляционную завесу с заданными параметрами.

Минимальная величина пробки из структурированного глиноцементного раствора в зазоре между бурильными трубами Ø 50 мм и стенками скважины Ø 76 мм согласно данным расчётов по уравнению (1) составляет 2,5 м.

С целью повышения противофильтрационных и прочностных характеристик грунтов дамбы и создания гидроизоляционного экрана по внутреннему борту дамбы в зоне ФЗ-1 был запроектирован комплекс буровых и тампонажных работ, включающий:

- бурение с поверхности земли скважин малого диаметра;
- нагнетание в них тампонажного раствора.

Тампонаж разуплотнённых грунтов тела дамбы в районе выявленной ООО «УкрНТЭК-экогеодинамика» фильтрационной зоны ФЗ-1 проводился путём

инъектирования глиноцементных тампонажных растворов через 11 тампонажных скважин, пробуренных с поверхности дамбы, как показано на рисунке 2.

Параметры гидроизоляционной завесы в каждой из выявленных проницаемых зон, включая размеры контура распространения тампонажного раствора вокруг скважин, количество скважин и режимов нагнетания раствора рассчитывались по технологии комплексного метода тампонажа [3]. Схемы формирования изоляционных завес приведены на рисунке 2:

I этап — бурение скважин с нечётными номерами: скв. 11, скв. 9, скв. 7, скв. 5, скв. 3, скв. 1;

II этап — бурение скважин с чётными номерами: скв. 10, скв. 8, скв. 6, скв. 4, скв. 2.

Бурение тампонажных скважин осуществлялось самоходной буровой установкой УРБ-2А2. Конструкция скважин следующая:

- интервал 0,0–4,0 м — диаметр бурения 112 мм с последующим креплением обсадными трубами диаметром 108 мм;
- интервал бурения 4,0–17,0 м — диаметр бурения 57 мм до забоя.

Формирование изоляционных завес в отдельной скважине осуществлялось по зажимной схеме способом «снизу–вверх» в интервалах глубин 16–13 м, 13–10 м, 10–7 м и 7–4 м. Очередность тампонажа скважин — согласно методу «сгущения скважин», т. е. на первом этапе через одну скважину с последующим смыканием гидроизоляционной завесы на втором этапе.

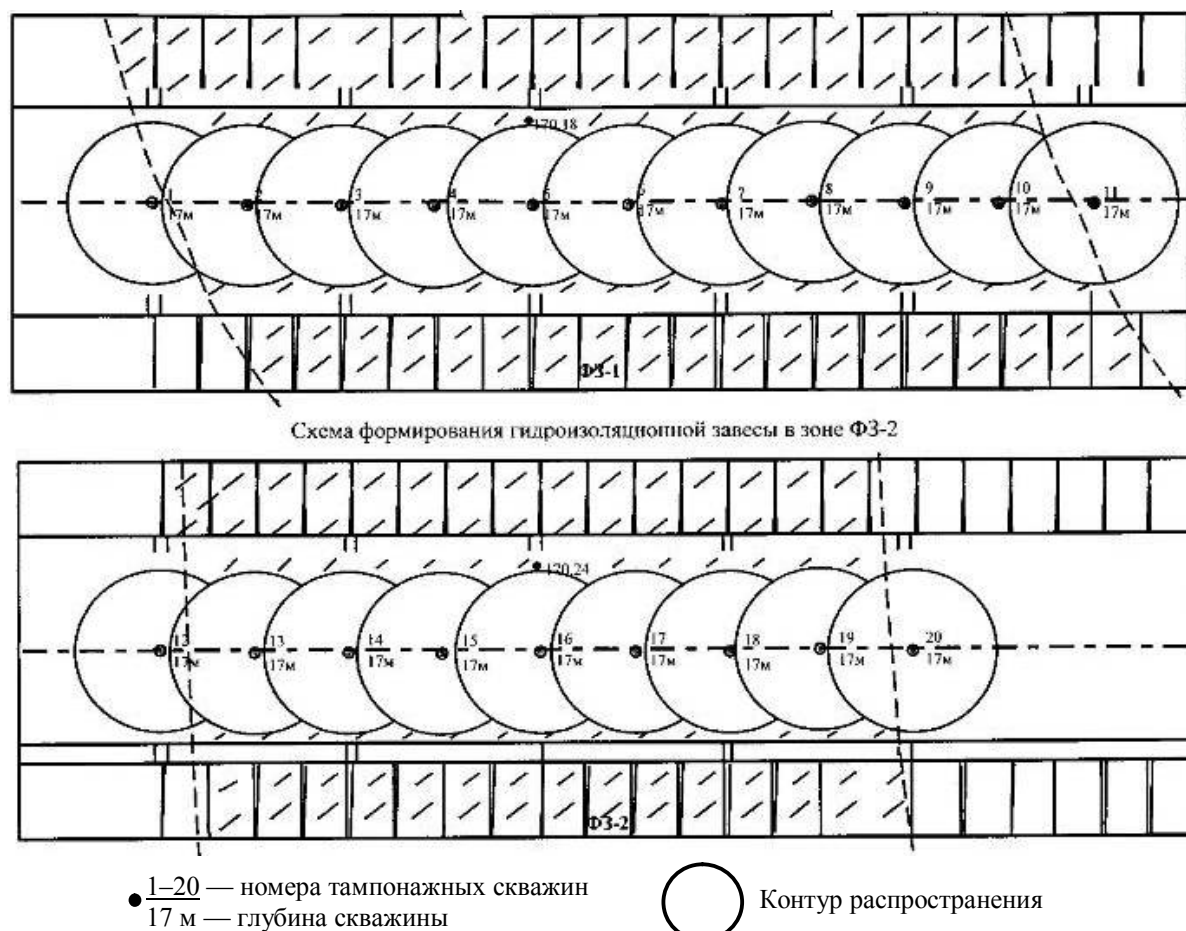


Рисунок 2 Схема формирования гидроизоляционной завесы в водопрводящих зонах Ф3-1 и Ф3-2

Нагнетание тампонажного раствора в скважины продолжалось до достижения расчётного конечного давления нагнетания, появления остаточного давления, а также в случае выхода тампонажного раствора на поверхность земли или в соседние скважины.

Приготовление и нагнетание тампонажного раствора осуществлялось с использованием высокопроизводительного мобильного оборудования, включающего цементно-смесительные машины УС-6/30, цементировочные агрегаты УНБ-160/40. Нагнетание глиноцементного раствора производилось по новой технологической схеме с использованием гладкоствольной колонны бурильных труб. В данной схеме строго гарантированное нагнетание глиноцементного раствора в каждый конкретный интервал (заходку) обеспечивалось пробкой самого раствора в зазоре между стенками скважины и бурильными трубами.

Как показывает анализ результатов тампонажных работ, при нагнетании расчётного объёма тампонажного раствора в каждый из проницаемых интервалов, исключая нижний, не наблюдалось выхода раствора через устье скважины на поверхность.

Это свидетельствует о надёжности герметизации скважины на период нагнетания раствора даже под давлением, превышающим расчётные величины в 3–5 раз и достигавшим 4–5 МПа.

При тампонаже нижнего проницаемого интервала 13–16 м по скважинам №№ 4, 5,

7, 9 и 10 на начальном этапе наблюдались выходы тампонажного раствора через устье скважин. Это свидетельствует о том, что глиноцементный раствор хорошо распределяется по зазору, образуя в нём пробку до устья скважины, которая выдерживает давления, превышающие расчётные, и обеспечивает процесс инъекции грунта тела дамы. Объём нагнетания тампонажного раствора в скважины первой очереди составил 45 м^3 , а в скважины второй очереди — $37,5 \text{ м}^3$. Общий объём нагнетания тампонажного раствора $82,5 \text{ м}^3$.

Выводы и направление дальнейших исследований. Использование предложенного метода нагнетания глиноцементного тампонажного раствора в практике укрепления и водоизоляции проницаемых пород и грунтов позволяет значительно повысить эффективность таких работ за счёт отказа от применения обсадных труб, манжетных колонн или пакерующих устройств.

Высокие структурно-механические свойства стабилизированного тампонажного раствора обеспечивают надёжную изоляцию зазора между стенками скважины и бурильной колонной на время нагнетания раствора под давлением, необходимым для формирования изоляционной завесы в данном конкретном интервале вокруг скважины. В то же время он не препятствует приподнятию бурового инструмента для проведения нагнетания в вышележащую заходку.

Библиографический список

1. Адамович, А. И. Закрепление грунтов и противофильтрационные завесы [Текст] / А. И. Адамович. — М. : Энергия, 1980. — 318 с.
2. Полозов, Ю. А. ГОАО «Спецтампонажгеология» на современном этапе и новые направления развития комплексного метода тампонажа [Текст] / Ю. А. Полозов // Современные проблемы шахтного и подземного строительства. — Донецк : Норд-Пресс, 2006. — Вып. 5. — 225 с.
3. Тампонаж обводненных горных пород [Текст] : справочное пособие / Э. Я. Кипко, О. Ю. Лушников, Ю. А. Полозов и др. — М. : Недра, 1989. — 318 с.

© Полозов Ю. А.

© Лазебник А. Ю.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТУ Литвинским Г. Г., к.т.н., доц., зам. декана АФГТ ЛНУ им. В. Даля Савченко И.В.

Статья поступила в редакцию 09.10.18.

д.т.н. Полозов Ю. А. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР), **Лазебнік О. Ю.** (АФГТ ЛНУ ім. В. Даля, м. Антрацит, ЛНР)

ГІДРОІЗОЛЯЦІЯ І ЗМІЦНЕННЯ НЕЗВ'ЯЗНИХ ҐРУНТІВ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД МЕТОДОМ ТАМПОНАЖУ

Наведено результати промислових випробувань нового методу тампонування водопроникних ґрунтів та розуцільнених порід на прикладі капітального ремонту греблі Єлизаветинського водосховища в Луганській області з використанням гладкоствольної колони. Використання гладкоствольної колони в поєднанні зі структурованими глиноцементними тампонажними розчинами дозволяє відмовитися від обсадки ін'єкційних свердловин перфорованими манжетними колонами і застосування пакеруючих пристроїв.

Ключові слова: тампонаж, глиноцементні розчини, гладкоствольна колона, гідроізоляція ґрунтів, методика розрахунку параметрів тампонажу.

Doctor of Tech. Sc. Polozov Yu. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR), **Lazebnik A. Yu.** (Anthracite Department of Mining and Transport of Lugansk National University after Vladimir Dahl, Anthracite, LPR)

WATERPROOF AND STRENGTHENING THE LOOSE SOIL OF HYDRAULIC STRUCTURES BY GROUTING

There have been given the industrial testing results of a new method for grouting the permeable soil and unpressed rock on the example of major repairs of dam of the Yelizavetinskoie reservoir in Lugansk region using the smooth-bore column. Use of the smooth-bore column providing the minimum clearance between the walls of hole in combination with structured clay cement grouting mortar allows to reject the injection holes bracing with perforated collar columns and using the drillstring anchors.

Key words: permeable soil, grouting, clay cement mortar, collar column, waterproof of soil, design procedure of grouting parameters.

УДК 622.83:622.023.23

к.т.н. Аверин Г. А.,
 асс. Филонюк Ю. В.,
 асс. Корецкая Е. Г.

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, galagena1959@yandex.ru)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ ОБРУШЕНИЯ ПОРОД КРОВЛИ

Приведены результаты исследования периодических осадок пород кровли в очистном забое путём моделирования породных слоёв различной обрушаемости в шахтных условиях.

Ключевые слова: математическое моделирование, метод конечных элементов, периодичность осадок пород кровли, обрушаемость породных слоёв.

Постановка проблемы. Практика ведения очистных работ в угольных шахтах показывает, что успешное и безопасное их выполнение во многом зависит от состояния технической документации, т. е. соответствия принятых технических и технологических решений действующим отраслевым нормативным актам.

Одним из таких документов, которым руководствуются инженерно-технические работники шахт при составлении технологической проектной документации на выемку угля, крепление и управление кровлей в лаве, является «Классификация боковых пород угольных пластов», разработанная в Донецком Угольном институте (ДонУГИ) в конце 60-х годов XX столетия [1]. Согласно этой классификации вмещающие пласт породы характеризуются следующими свойствами: обрушаемость (управляемость) массива пород над пластом, устойчивость нижнего слоя кровли, устойчивость верхнего слоя непосредственной почвы» [2].

Категории устанавливаются по технологическим признакам, геомеханическим критериям и литологическому составу. В качестве основных критериев определения категорий пород в этой классификации приняты технологические признаки, устанавливаемые по опыту работы лавы в аналогичных условиях: по обрушаемости пород — способ управления кровлей с технологическими решениями, необходимыми

ми для их выполнения, а также оптимальные силовые параметры по выбору и расчёту крепи. Принятые пять категорий массива пород ($A_1, A_2, A_3, A_4, A_4^1$) характеризуются геомеханическими критериями: α — коэффициент конвергенции пород кровли и почвы на 1 м ширины призабойного пространства и мощности угольного пласта 1 м; $Ш_{oi}$ и $Ш_{ni}$ — шаги соответственно первичной и последующих осадок массива кровли; литологическим составом для прогнозирования категории пород по средневзвешенному коэффициенту их крепости ($f_{свi}$).

Устойчивость нижнего слоя непосредственной кровли представлена также пятью категориями (B_1, B_2, B_3, B_4, B_5) и характеризуется геомеханическими критериями: B_i — мощность нижнего слоя непосредственной кровли; Γ_i — расстояние между трещинами основной системы природной трещиноватости слагающих слой пород; D_i — шаг свободного зависания нижнего слоя кровли в выработанном пространстве; литологическим составом для прогнозирования категории пород по коэффициенту крепости (f_i).

Для более точного прогноза поведения непосредственной кровли дополнительно к приведённой классификации для каждого конкретного случая необходимо определять длину консоли зависания пород непосредственной кровли исходя из её прочностных характеристик.

Обрушаемость пород непосредственной кровли в значительной степени оказывает влияние на формирование зоны их беспорядочного обрушения в выработанное пространство после прохода очистного забоя. Практика ведения очистных работ и приведённая классификация свидетельствуют, что в некоторых случаях зона беспорядочного обрушения пород может отсутствовать или быть близкой к вынимаемой мощности пласта или превышать его в несколько раз.

Вышеприведённая классификация обладает рядом существенных недостатков, не позволяющих обеспечить требуемую достоверность прогноза ожидаемых смещений кровли для проектируемого выемочного участка, так как для определения категории кровли используются геомеханические критерии, полученные при ранее отрабатываемых очистных забоях аналогичных пластов. Такие критерии, как шаги первичной и последующих осадок массива кровли ($III_{свi}$ и III_{ni}), шаг свободного зависания нижнего слоя кровли в выработанном пространстве (D_i), полученные в результате усреднённых визуальных наблюдений за состоянием кровли шахтной комиссией и оформленных соответствующим актом, дают значительную погрешность.

Исключить вышеизложенные недостатки позволяет применение математического моделирования методом конечных элементов с использованием методических комплексов типа «ЛИРА» (или ему подобные) для определения периодических (первоначального и последующих) шагов обрушения пород кровли для конкретных горно-геологических условий проектируемого выемочного участка.

Новизной данной работы является прогнозирование относительного опускания пород кровли на расстоянии одного метра от линии очистного забоя и периодических их поднятий, вызванных разрушением пород кровли, определяемых путём создания и просчёта заранее разработанных расчётных схем, использующих метод конечных

элементов, в частности вычислительный комплекс «ЛИРА». Актуальность данной работы значительно возрастает при использовании её для прогнозирования периодических осадок кровли, особенно при отработке пластов с труднообрушаемой кровлей, т. к. эти осадки сопровождаются интенсивными смещениями пород вокруг очистной и примыкающей к ней подготовительной выработок, оказывающих существенное влияние на их устойчивость.

Разработаны расчётные схемы математических моделей, использующие данные стратиграфических колонок, построенных по данным разведочных скважин, расположенных на территории проектируемого участка шахтного поля [3]. Для конкретных условий (расчётов, приведённых в статье) в кровле взяты породы, соответствующие описанию литологического состава категории A_3 по классификации ДонУГИ. Первичное обрушение пород кровли для таких пород составляет от 25 м до 50 м. Критерий α равен 0,0015 м. В расчётной схеме учитываются все породугольные слои, их мощность, глубина разработки, модуль упругости (Юнга), коэффициент Пуассона, пределы прочности пород на сжатие и растяжение, а также угол внутреннего трения и коэффициент сцепления этих пород и угля.

Расчётная схема моделируемой области представляет собой прямоугольник размерами 3465 м (по простиранию) и 1150 м (по глубине), которая аппроксимирована прямоугольными элементами. Ширина каждого элемента равна 5 м или устанавливается равной подвиганию очистного забоя за установленный промежуток времени, например за сутки. Высота колеблется от 0,1 до 7 м, в зависимости от мощности породугольных слоёв. Граничные условия — узлы основания не перемещаются по всем направлениям ниже 1100 м (несжимаемая толща), по бокам узлы прямоугольников расчётной схемы закреплены по простиранию и не перемещаются.

Подвигание очистного забоя осуществляется пошаговой выемкой прямоуголь-

ных элементов угольного пласта, за каждый шаг — один прямоугольник. Вычислительный комплекс работает в режиме упруго-пластической деформации для грунтов [3].

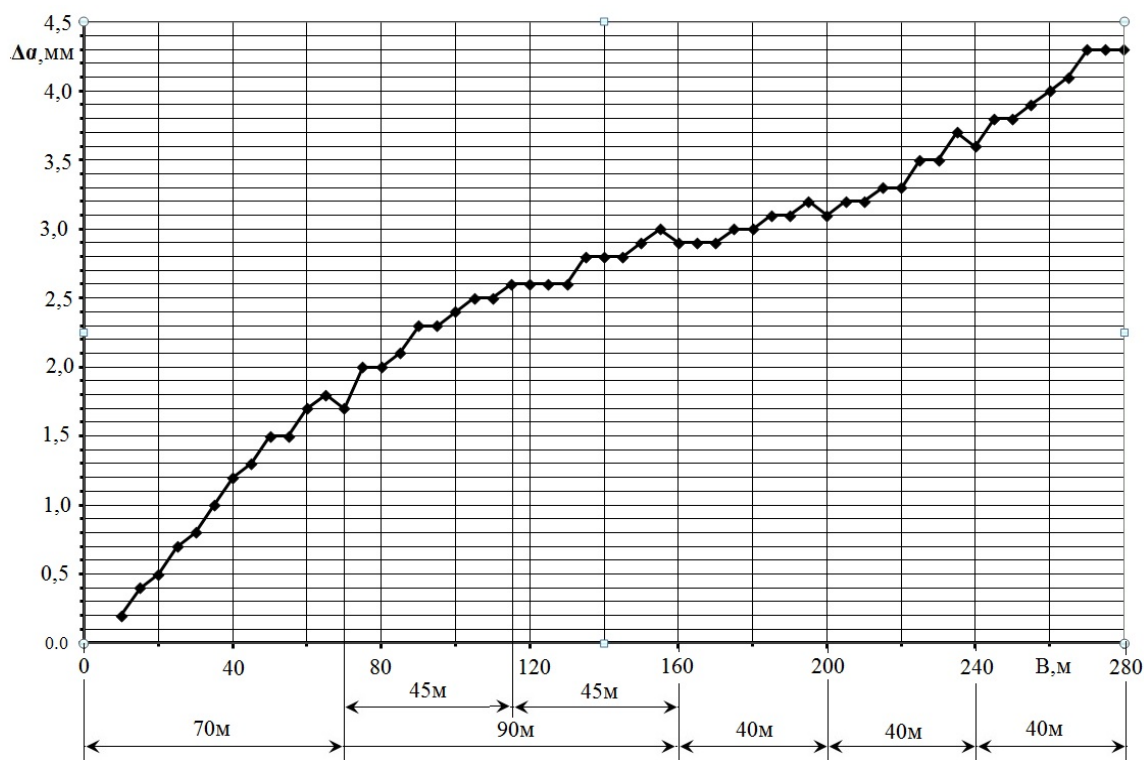
По мере подвигания очистного забоя используемая программа определяет разрушенные элементы и автоматически их не учитывает в дальнейших расчётах во время итерации.

Во время появления неустойчивого равновесия вышележащих пород кровли происходит разрушение и, соответственно, нагрузка на краевую часть угольного пласта падает. При построении графика анализируется приращение оседания кровли и её поведение (Δa , мм) по мере подвигания очистного забоя (B , м), по которому можно определить периодичность (первичный и последующий) шагов обрушения пород кровли (см. рис. 1). В качестве критерия определения первичного и последующих

шагов обрушения кровли принято приращение её оседания на расстоянии 1 м от линии очистного забоя.

По мере подвигания очистного забоя приращения оседаний кровли в основном увеличиваются. В местах, где приращения оседаний кровли стабилизируются, т. е. становятся равными, или резко уменьшаются (когда приращения уравниваются), можно предположить, что происходят незначительные разрушения. Когда относительное приращение уменьшается, можно предположить, что происходит обрушение пород кровли.

Так, на рисунке 1 видно, что первичное оседание равно 70 м, вторичное и третичное обрушения ярко не выражены из-за их различного обрушения и распора между собой — в среднем по 45 м каждый, что вместе составляет 90 м. Дальнейшие обрушения по 40 м.



Δa — приращение оседания пород кровли на расстоянии 1 м от линии очистного забоя, мм;
 B , — величина выработанного пространства по мере подвигания очистного забоя, м

Рисунок 1 Зависимость приращения оседаний (Δa , мм) крепкого нижнего слоя кровли от величины выработанного пространства по мере подвигания очистного забоя (B , м)

Выводы и направление дальнейших исследований:

– в качестве критерия по определению периодических осадок кровли принято приращение её оседания и периодических поднятий на расстоянии 1 м от линии очистного забоя в конкретных горно-геологических условиях. В точках поднятия относительных приращений и происходит обрушение кровли;

– указанный выше критерий позволит прогнозировать периодичность осадок

кровли путём просчёта заранее разработанных расчётных схем для конкретных горно-геологических условий разрабатываемого угольного пласта методом конечных элементов с использованием вычислительного комплекса «ЛИРА»;

– полученные результаты в дальнейшем можно использовать в качестве аргументированного подхода к определению нагрузки на крепь при первичной и периодических осадках кровли.

Библиографический список

1. Давидянц, В. Т. Совершенствование способов и средств управления кровлей на шахтах Донбасса [Текст] / В. Т. Давидянц. — М. : Недра. — 1969. — 280 с.
2. Управление кровлей и крепление в очистных забоях на угольных пластах с углом падения до 35°. Руководство : КД 12.01.01.503-2001 [Текст]. — К. : Минтопэнерго Украины, 2002. — 141 с.
3. Аверин, Г. А. Математическое моделирование первичного и последующего шагов обрушений кровли [Текст] / Г. А. Аверин, В. Г. Ларченко, Е. Г. Корецкая, А. П. Болотов // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2015. — № 2. — С. 3–7.

© Аверин Г. А.© Филонюк Ю. В.© Корецкая Е. Г.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Леоновым А. А.,
гл. маркшейдером Филиала «Шахта им. XIX съезда КПСС»
«Центруголь» Кияненко Н. А.*

Статья поступила в редакцию 30.05.18.

к.т.н. Аверін Г. О., Філонюк Ю. В., Корецька О. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР,
galagena1959@yandex.ru)

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДИЧНОСТІ ОБВАЛЕННЯ ПОРІД ПОКРІВЛІ

Наведено результати дослідження періодичних осідань порід покрівлі в очисному вибою шляхом моделювання порідних шарів різної зрушеності у шахтних умовах.

Ключові слова: математичне моделювання, метод кінцевих елементів, періодичність осідання порід покрівлі, зрушення порідних шарів.

PhD Averin G. A., Filoniuk Yu. V., Koretskaia E. G. (DonSTU, Alchevsk, LPR, galagena1959@yandex.ru)
TECHNIQUE OF DETERMINING THE REGULARITY OF ROOF CAVING

There have been given the research results of the repetitive roof subsidence in a breakage face by modeling the rock layers of different caving in the mine.

Key words: mathematical modeling, finite element method, roof subsidence regularity, layer caving.

УДК 622.834

к.т.н. Ларченко В. Г.,
Коваленко Е. В.,
Маталкина Ю. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

МАКСИМАЛЬНЫЕ ОСЕДАНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОДРАБОТКЕ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Установлена необходимость корректировки действующих отраслевых «Правил подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом» при подработке сооружений на больших глубинах, предложена формула расчёта максимальных оседаний.

Ключевые слова: максимальные оседания, деформации земной поверхности, глубина подработки, зависимость.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Ежегодно увеличивается глубина разработки угольных пластов. В настоящее время на многих действующих угольных шахтах очистные работы ведутся на глубинах значительно больше 1000 м. Третья часть оставшихся в Донбассе балансовых запасов угля находится под застроенными территориями, коммуникациями и природными объектами. Безопасная подработка сооружений земной поверхности возможна принятием горных или конструктивных мер их охраны, выбор которых зависит от ожидаемых величин сдвижений и деформаций земной поверхности. Определить последние можно трудоёмкими натурными инструментальными наблюдениями, автоматизированной наблюдательной станцией [1] и вычислением по методике отраслевых «Правил подработки ...» [2], применимой при подработке на глубинах до 1000 м (и более).

Предварительные исследования [3] указывают на необходимость корректировки методик расчёта [2, 4] ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности при её подработке на больших глубинах, что является актуальной научной и практической задачей.

Постановка задачи. Задачей этапа исследований является обоснование необходимости корректировки действующих нормативных «Правил подработки ...» [2]

для расчёта ожидаемых сдвижений и деформаций подрабатываемых на больших глубинах сооружений и предложение формулы вычисления максимальных оседаний земной поверхности.

Изложение материала и его результаты. На параметры процесса сдвижений и деформаций земной поверхности влияет ряд факторов: глубина подработки, вынимаемая мощность пласта, размеры выработанного пространства, угол падения пласта, крепость пород, тектонические нарушения, способ управления кровлей, литология покрывающей толщи, нарушенность толщи первичной подработкой, кливаж и другие.

Целью этапа исследований является дифференцирование глубины подработки из многофакторного влияния на величину максимального оседания и деформации земной поверхности при подземной разработке угольных пластов.

Исследования выполнялись методом натурных наблюдений [5], математическим моделированием методом конечных элементов [6] и расчётом ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности [3, 7] по методике отраслевого стандарта Украины [2], где максимальное оседание η_m рекомендовано вычислять по формуле

$$\eta_m = q_o \cdot m \cdot \cos \alpha \cdot N_1 \cdot N_2, \text{ м}, \quad (1)$$

где q_0 — относительная безразмерная величина максимального оседания, принимается в зависимости от марки угля и отношения мощности четвертичных отложений h к глубине разработки H по таблице А.1 [2]; m — вынимаемая мощность пласта, м; α — угол падения пласта, градус; N_1 , N_2 — условные коэффициенты, характеризующие степень подработанности земной поверхности, соответственно по падению и по простиранию пласта, определяемые по формулам

$$N_1 = \sqrt{0,9 \left(\frac{D_1}{H} + \Delta D_{II} + \Delta D_B \right)}, \quad (2)$$

$$N_2 = \sqrt{0,9 \left(\frac{D_2}{H} + \Delta D_{III} + \Delta D_{OIP} \right)}, \quad (3)$$

где D_1 , D_2 — размеры очистной выработки соответственно по падению и по простиранию пласта, м; ΔD_{II} , ΔD_B , ΔD_{III} , ΔD_{OIP} —

поправки к относительной длине лавы за счёт целика соответственно со стороны падения, восстания, простирания и обратной простиранию (м), определяемые по таблице А.2 [2] с учётом размера целика l у соответствующей границы, средней глубины H (от 100 м и менее до 1000 и более), марки угля и мощности наносов h .

С целью выделения влияния глубины разработки H на максимальные оседания земной поверхности выполнен расчёт η_m по методике [2] при H от 100 до 1600 м и постоянных горно-геологических условиях: $m=1$ м, $\alpha=5^\circ$, $D_I=2000$ м, первичная подработка, отношение $\frac{l}{H} \geq 0,8$, $\frac{h}{H} \leq 0,3$, $\frac{D_2}{H} = 1,2$ (полная подработка) для углей марки антрацит ($q_0=0,75$) и других марок ($q_0=0,8$).

Результаты вычислений η_m приведены в таблице 1, по ним построены графики зависимости η_m от H (рис. 1).

Таблица 1

Максимальные оседания η_m и деформации i_m , ε_m при различных H

$q_0=0,75$				$q_0=0,8$				
H , м	η_m , м	i_m , $1 \cdot 10^{-3}$	ε_m , $1 \cdot 10^{-3}$	η_m , м		L_3 , м	i_m , $1 \cdot 10^{-3}$	ε_m , $1 \cdot 10^{-3}$
				$\frac{l}{H} \geq 0,8$	$\frac{l}{H} = 0,4$			
100	0,618	12,3	-6,7	0,741	0,798	106,4	14,2	-6,7
200	0,65	6,6	-3,4	0,742	0,798	212,8	7,10	-3,4
300	0,68	4,7	-2,2	0,749	0,798	319,2	4,80	-2,3
400	0,709	3,8	-1,84	0,757	0,798	425,5	3,72	-1,79
500	0,713	3,1	-1,5	0,764	0,798	532	3,03	-1,47
600	0,716	2,6	-1,27	0,771	0,798	638,4	2,58	-1,25
700	0,720	2,3	-1,1	0,779	0,798	744,8	2,27	-1,09
800	0,723	2,0	-0,98	0,786	0,798	851,2	2,01	-0,98
900	0,727	1,8	-0,88	0,794	0,798	957,6	1,82	-0,90
1000	0,730	1,64	-0,81	0,797	0,798	1064	1,65	-0,82
1100	0,73	1,49	-0,73	0,798	0,798	1170,4	1,50	-0,74
1200	0,73	1,37	-0,69	0,798	0,798	1276,8	1,37	-0,68
1300	0,73	1,26	-0,63	0,798	0,798	1383,2	1,27	-0,63
1400	0,73	1,17	-0,58	0,798	0,798	1489,5	1,18	-0,59
1500	0,73	1,1	-0,54	0,798	0,798	1596	1,10	-0,55
1600	0,73	1,0	-0,51	0,798	0,798	1702,4	1,0	-0,51

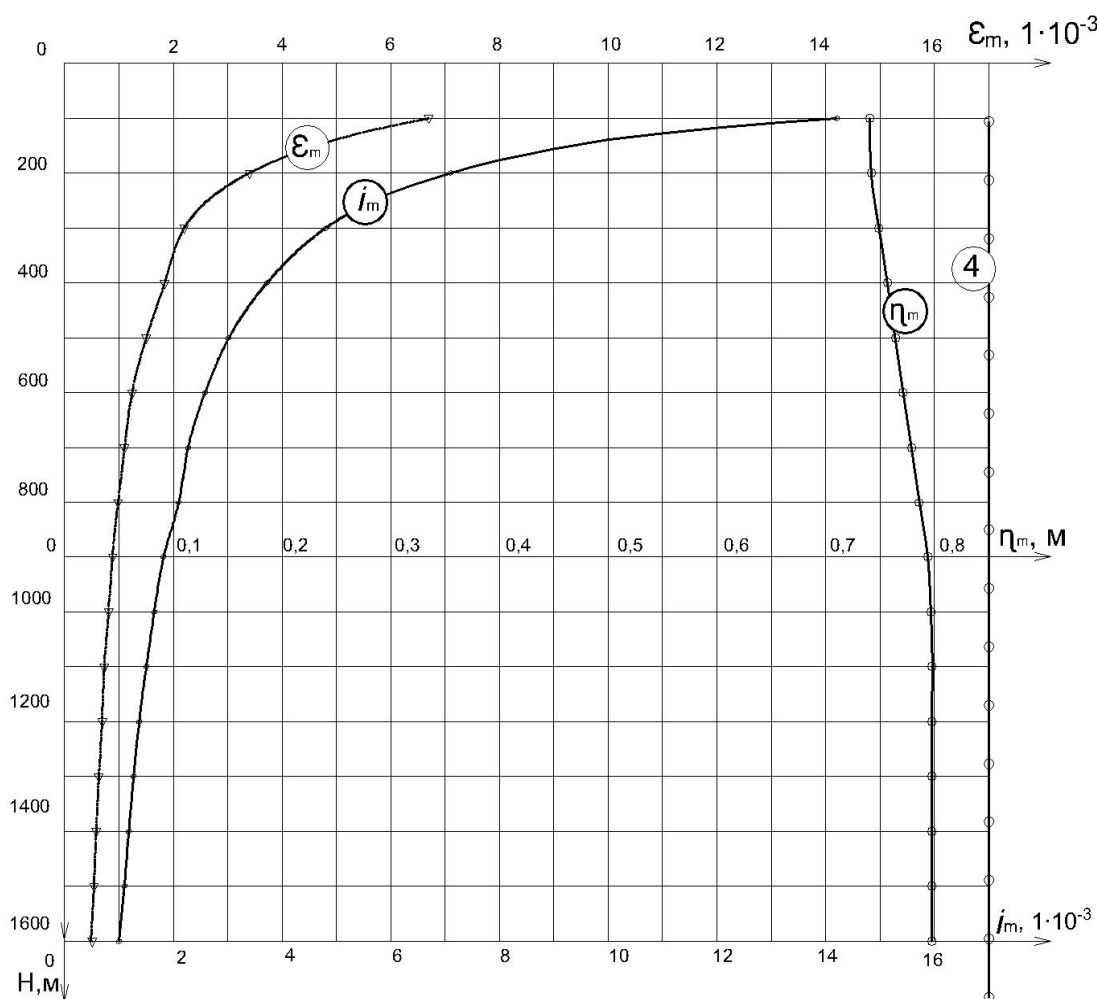


Рисунок 1 Графики зависимости максимальных оседаний η_m , наклонов i_m и горизонтальных деформаций ε_m земной поверхности от H по методике [2] при $\frac{D_2}{H} = 1,2$, $q_0 = 0,8$, $\frac{l}{H} \geq 0,8$

Анализ вычисленных по методике [2] максимальных оседаний (табл. 1) и графиков (рис. 1) показывает, что при постоянном отношении $\frac{D_2}{H} = 1,2$ в тех же горно-геологических условиях η_m возрастает до глубины 1000 м, а с дальнейшим увеличением H η_m остаётся постоянной величиной и не зависит от H , как и при $\frac{l}{H} = 0,4$ (прямая 4, рис. 1), что противоречит теории прочности и процесса сдвижения слоистой толщи горных пород.

Наглядным подтверждением этому являются вычисленные по методике [2] максимальные наклоны $i_{x \max}$ и горизонтальные деформации ε_m земной поверхности в полумульде по простиранию пласта при $\frac{D_2}{H} = 1,2$, $q_0 = 0,8$, $a_0 = 0,3$ и мощности наносов менее 10 м по формулам (4, 5):

$$i_x = \frac{\eta_m}{L_3} \cdot S'(Z_x)_m \cdot S(Z_y), 1 \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_x = 0,5 a_0 \frac{\eta_m}{L_3} S''(Z_x)_m S(Z_y), 1 \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

где L_3 — длина полумульды по простиранию пласта, м,

$$L_3 = H(\operatorname{ctg}\delta_0 + \operatorname{ctg}\psi_3), \text{ м}, \quad (6)$$

где δ_0 , ψ_3 — соответственно граничный угол и угол полных сдвижений в полумульде по простиранию пласта [2]; $S(Z)$, $S'(Z)$, $S''(Z)$ — значения функций, принятые интерполяцией в таблицах А.3, А.4, А.5 [2], в зависимости от вычисленных по формулам (2), (3) коэффициентов подработанности N_1 , N_2 ; η_m — максимальное оседание земной поверхности (табл. 1). Результаты вычислений L_3 , i_m , ε_m сведены в таблицу 1, по ним построены кривые зависимостей i_m и ε_m от H по методике [2] при постоянных $\frac{D_2}{H} = 1,2$, $D_1 = 2000$ м, $m = 1$ м, $\alpha = 5^\circ$ (рис. 1).

Анализ зависимости максимальных наклонных i_m и горизонтальных деформаций ε_m земной поверхности от H (табл. 1, рис. 1) показывает, что их значения уменьшаются на 82 % при глубине до 600 м, а от 600 м и до 1600 м снижение их величин составляет только 11 % при остальных постоянных факторах. Это убедительно свидетельствует, что действующие отраслевые методики расчёта ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности [2, 4] недостаточно учитывают влияние глубины подработки, особенно при H более 600 м.

Анализ влияющих на η_m факторов (формула 1) показывает, что q_0 только косвенно учитывает крепость покрывающих пород через марку угля и мощность наносов. Влияние крепости пород на η_m рассмотрено в работе Посыльного Ю. В. и Тетерина Е. А. [8]. Прямолинейная зависимость η_m от вынимаемой мощности пласта m многократно подтверждена натурными наблюдениями [3], математическим моделированием [6], в расчётах при-

нята постоянной величиной ($m = 1$ м), как и угол падения $\alpha = 5^\circ$.

Зависимость η_m от D_2 в этих же горно-геологических условиях соответствует общепризнанной теории сдвижения слоистых пород (рис. 2), где η_m увеличиваются с возрастанием D_2 до 1100 м при $\frac{D_2}{H} = 1,2$. При дальнейшем увеличении D_2 η_m остаётся постоянным, то есть образовалось плоское дно, наступила полная подработка.

В безразмерных коэффициентах N_1 , N_2 (формулы 2, 3) значения поправок ΔD к относительной длине лавы за счёт размера целика l у соответствующей границы недостаточно обоснованы. Так, в таблице А.2 [2] при $\frac{l}{H} = 0$, то есть целика нет, а поправки ΔD приведены от 0,14 до 0,02 со знаком плюс. При $\frac{l}{H} = 0,4$ ΔD для всех марок угля, кроме антрацита, равны нулю при всех H , таким образом η_m при $\frac{D_2}{H} = 1,2$ согласно [2] является постоянной величиной при H от 100 до 1600 м (прямая 4, рис. 1).

Но при $\frac{l}{H}$ менее 0,7 над целиком в полумульде по простиранию пласта происходит суммирование оседаний, горизонтальных деформаций растяжений и кривизны выпуклости от двух полумульд: со стороны простирания и обратной простиранию, что установлено равноточными натурными наблюдениями [5].

На этом этапе исследований, оставляя прежней структуру формулы (1), предлагаем вычислять η_m по формуле

$$\eta_m = q_0 \cdot m \cdot \cos \alpha \cdot N_1 \cdot N_2 - K_P \cdot H^2, \text{ м}, \quad (7)$$

где K_P — коэффициент остаточных расчленений (разуплотнений) подработанной слоистой толщи горных пород, установленный натурными наблюдениями автора

статьи за сдвижением глубинных реперов, заложенных в пробуренные с поверхности вертикальные скважины [9], исследованиями Клишина Н. К., Кизиярова О. Л., Четверика М. С. и анализом результатов фактических оседаний земной поверхности при подработке на больших глубинах [10], $K_p = 3 \cdot 10^{-9} \frac{1}{\text{м}^2}$. K_p требует дальнейшего

уточнения по результатам натурных наблюдений на больших глубинах.

Результаты вычислений η_m по формуле (7) при $\frac{l}{H} = 0,4$ сведены в таблицу 2, по ним определены максимальные деформации i_m , ε_m по методике [2] и построены графики их зависимости от H (рис. 3) по тем же исходным данным, что и прямая 4 (рис. 1).

Таблица 2

Результаты η_m , вычисленных по формуле (7), и i_m , ε_m

$q_0=0,8, D_1=2000 \text{ м}, m=1\text{м}, \alpha=5^\circ \frac{D_2}{H}=1,2, \frac{l}{H}=0,4$				
$H, \text{ м}$	$\eta_m, \text{ м}$	$L_3, \text{ м}$	$i_m, 1 \cdot 10^{-3}$	$\varepsilon_m 1 \cdot 10^{-3}$
100	0,795	106,4	15,24	7,17
200	0,786	212,8	7,57	3,6
300	0,771	319,2	5,0	2,39
400	0,750	425,5	3,68	1,77
500	0,723	532	2,85	1,39
600	0,690	638,4	2,31	1,12
700	0,651	744,8	1,9	0,92
800	0,606	851,2	1,55	0,75
900	0,555	957,6	1,27	0,63
1000	0,498	1064	1,03	0,51
1100	0,435	1170,4	0,82	0,41
1200	0,366	1276,8	0,63	0,31
1300	0,291	1383,2	0,46	0,23
1400	0,210	1489,5	0,31	0,15
1500	0,123	1596	0,17	0,08
1600	0,030	1702,4	0,04	0,02

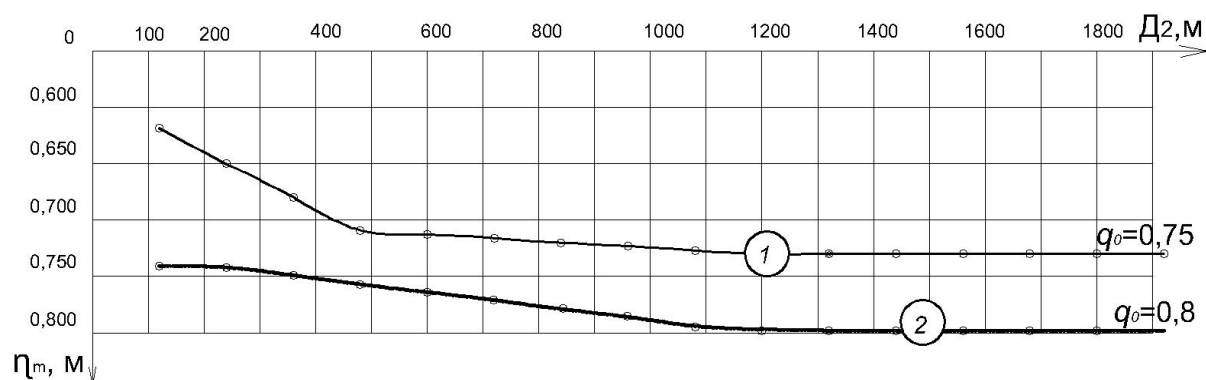


Рисунок 2 Графики зависимости максимальных оседаний η_m земной поверхности от D_2

при $\frac{D_2}{H} = 1,2$: 1 — при $q_0=0,75$; 2 — $q_0=0,8$ по методике [2]

Вычисленные значения максимальных горизонтальных деформаций в этом варианте при $\frac{D_2}{H} = 1,2$, $\frac{l}{H} = 0,4$, $m=1$ м уменьшились до граничного критерия мульды сдвижения ($0,5 \cdot 10^{-3}$) на глубине 1000 м (табл. 2, рис. 3), а по методике [2] — при $H=1600$ м (табл. 1, рис. 1). Это значит, что при $D_2=1920$ м, $D_l=2000$ м мульда не достигает земной поверхности по критерию ε даже по методике [2] при $H=1600$ м, а η_m при $\frac{l}{H} = 0,4$ согласно [2] составляет 0,798 м? То есть область влияния очистных выработок размером 3840×2000 м по критерию ε имеет эллипсоидальную форму, а не перевернутой усечённой пирамиды, ограниченной граничными углами $\delta_0=70^\circ$ [2]. Горизонталь-

ные сдвигения и все виды деформаций земной поверхности зависят от η_m , что указывает на необходимость корректировки методики прогноза ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности при добыче угля на больших глубинах [2], а также определений длин полумульд, граничных и углов сдвижения, области и зон сдвижения подработанной толщи пород.

Отдельный прогноз ожидаемых сдвижений и деформаций требуется при наличии в покрывающей пласт толще крепких песчаников мощностью более 30 м, задерживающих процесс сдвижения на длительное время, затем мгновенным обрушением вызывающих «техногенные» землетрясения местного значения, что неоднократно отмечалось на шахтах ПО «Ровенькиантрацит».

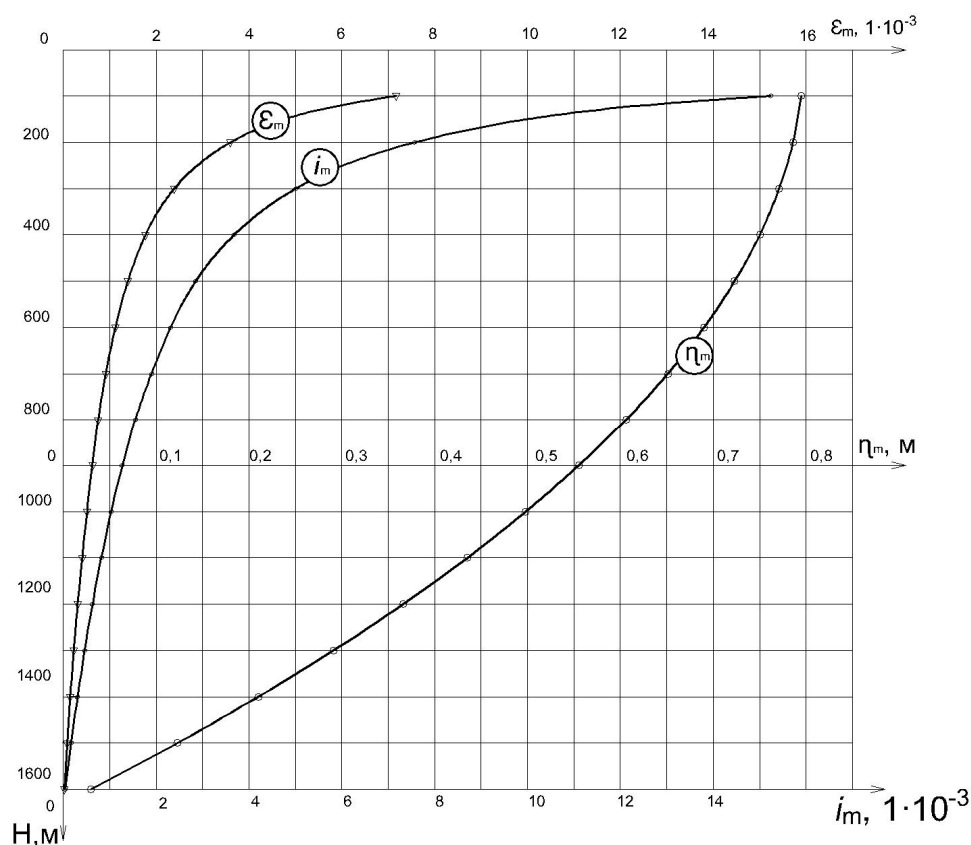


Рисунок 3 Графики зависимости η_m , i_m , ε_m земной поверхности от H при $m=1$ м, $\alpha=5^\circ$, $D_l=2000$ м,

$$\frac{D_2}{H} = 1,2; q_0=0,8; \frac{l}{H} = 0,4$$

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Действующие отраслевые методики расчёта ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности [2, 4] требуют корректировки при добыче угля на больших глубинах (табл. 1, рис. 1).

2. Коэффициент остаточных расслоений K_p в предлагаемой формуле (7) требует уточнений по результатам натурных наблюдений или с помощью автоматизиро-

ванной наблюдательной станции [1], позволяющей повысить точность измерения линейных деформаций до 2400 раз.

3. Определение длин полумульд, граничных и углов сдвижения, области и зон деформирования подработанной толщи, корректировка методики расчёта ожидаемых деформаций земной поверхности при подработке на глубинах более 600 м являются задачей дальнейших исследований авторов.

Библиографический список

1. Ларченко, В. Г. Автоматизированная наблюдательная станция для мониторинга сдвижений и деформаций горных пород [Текст] / В. Г. Ларченко, О. М. Куценко, Ю. А. Маталкина // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2015. — Вып. 1 (44). — С. 49–55.
2. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом [Текст] : утв. Минтопэнерго Украины 28.11.2003. — Введ. 2003-11-28. — К. : 2004. — 128 с. — (Отраслевой стандарт Украины).
3. Ларченко, В. Г. Исследование влияния глубины подработки на параметры процесса сдвижения земной поверхности [Текст] / В. Г. Ларченко, Ю. А. Маталкина // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2017. — Вып. 7 (50). — С. 53–57.
4. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях [Текст] : утв. и введ. Минтопэнерго РФ РАН. Гос. НИИ горн. геомеханики и маркшейдерского дела. — Санкт-Петербург, 1998. — 291 с.
5. Ларченко, В. Г. Практические результаты исследований деформаций земной поверхности при отработке свиты пологих угольных пластов [Текст] / В. Г. Ларченко // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2009». — Днепропетровск : НГУ, 2009. — С. 222–230.
6. Ларченко, В. Г. Определение зависимости параметров сдвижений и деформаций подработанной толщи пород от определяющих факторов методом конечных элементов [Текст] / В. Г. Ларченко, О. А. Черных // Вестник МАНЭБ. — Санкт-Петербург, 2006. — №. 22. — С. 16–24.
7. Ларченко, В. Г. Зависимость максимальных оседаний земной поверхности от основных определяющих факторов [Текст] / В. Г. Ларченко, Ю. А. Маталкина // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2016. — Вып. 4 (47). — С. 45–51.
8. Посыльный, Ю. В. Методика исследования влияния толщи горных пород на максимальные оседания земной поверхности [Текст] / Ю. В. Посыльный, Е. А. Тетерин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — М. : МГГУ. — 2008. — №. 1. — С. 115–121.
9. Ларченко, В. Г. Процесс сдвижений и деформаций подработанного массива горных пород [Текст] / В. Г. Ларченко // Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях : материалы 7-го Международного симпозиума. — Белгород : ВИОГЕМ, 2003. — С. 238–244.
10. Посыльный, Ю. В. Максимальные оседания земной поверхности в антрацитовых районах Донбасса [Текст] / Ю. В. Посыльный, А. А. Джулай, Е. А. Тетерин // Перспективы развития Восточного Донбасса : сб. науч. трудов ШИЮРГТУ (НПИ). — Новочеркасск : Набл, 2007. — 4.2. — С. 282–294.

© Ларченко В. Г.

© Коваленко Е. В.

© Маталкина Ю. А.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ Леоновым А. А.,
гл. маркшейдером шахты им. XIX съезда КПСС Кияненко Н. А.*

Статья поступила в редакцию 04.06.18.

к.т.н. Ларченко В. Г., Коваленко О. В., Маталкіна Ю. А. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

**МАКСИМАЛЬНІ ОСІДАННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ПІДРОБЦІ
НА ЗНАЧНИХ ГЛИБИНАХ**

Обґрунтовано необхідність корегування галузевих «Правил підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом» для розрахунку очікуваних зрушень та деформацій земної поверхні при підземній розробці вугільних пластів на значних глибинах. Наведено скореговану формулу обрахування максимальних осідань гірських порід.

Ключові слова: максимальні осідання, деформації земної поверхні, глибина підробки, залежність, корегування.

PhD Larchenko V. G., Kovalenko E. V., Matalkina Yu. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

**MAXIMUM EARTH CRUST SUBSIDENCE AND DEFORMATION AT GREAT DEPTH
UNDERMINING**

There has been proved the necessity to correct the branch "Rules of undermining the buildings, constructions and natural surroundings at underground coal mining" for calculating the expected displacements and deformations of the earth crust at undermining the coal layers at great depths. There has been given the corrected calculation formula for maximum rock subsidence.

Key words: maximum subsidence, earth crust deformation, undermining depth, dependence, correction.

УДК 622.831.3:622.28.042

к.т.н. Палейчук Н. Н.,
к.т.н. Пронский Д. В.,
д.э.н. Бизянов Е. Е.,
д.э.н. Коваленко Н. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

О ФОРМИРОВАНИИ НАГРУЗКИ НА КРЕПЬ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ АНТРАЦИТОВЫХ ШАХТ

Установлены закономерности изменения показателей устойчивости выработок в зависимости от скорости трещинообразования. Разработан алгоритм определения отклонения от нормали к плоскости напластования пород направления превалирующей нагрузки на крепь со стороны пород кровли. При помощи метода конечных элементов обоснована рациональная форма пластовых выработок в условиях интенсивного трещинообразования.

Ключевые слова: выработки, устойчивость, показатели, интенсивность, скорость, трещинообразование, нагрузка на крепь, асимметрия.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. При ведении горных работ на глубоких горизонтах шахт Восточного Донбасса наблюдается значительный рост количества перекреплений подготовительных и капитальных выработок. Так, по статистическим данным, на шахте «Комсомольская» ГУП «Антрацит» перекрепляется до 70 % подготовительных выработок, на шахте «Партизанская» — до 65 %, на шахте им. В. В. Вахрушева «Ровенькиантрацит» — до 70 %. Значительное количество выработок требует повторного перекрепления. При ведении горных работ на пластах h_8 и h_{10} , где кровли представлены песчаными сланцами, песчаниками и глино-песчаными сланцами, наблюдается интенсивное трещинообразование. К естественной трещиноватости добавляется и искусственная, которая образуется в приконтурной области породного массива вследствие протекания геомеханических процессов, что в результате приводит к изменению эксплуатационных характеристик выработок и зачастую к аварийному состоянию последних. Смещения пород кровли на пологих пластах имеют асимметричное направление, в связи с чем срок эксплуатации рамных крепей сокращается, что вызывает дополнительные материальные затраты на поддержание та-

ких выработок. Таким образом, для расчёта параметров обеспечения устойчивого состояния выработок в интенсивно трещиноватых породах при асимметричных их смещениях со стороны кровли необходимо разработать методику, которая будет учитывать помимо величины направление превалирующей нагрузки на крепь.

Изложение материала и его результаты. В качестве объекта исследований были выбраны горизонтальные подготовительные выработки пластов h_8 и h_{10} шахт «Комсомольская» и «Партизанская» ГУП «Антрацит», а также шахты им. В. В. Вахрушева «Ровенькиантрацит». Вмещающие породы данного региона представлены: песчаными сланцами, мощность m которых в исследованных выработках находилась в пределах 4,7–9,5 м, а временная прочность на сжатие σ_c перпендикулярно плоскостям напластования составляла 53,7–64,2 МПа; песчано-глинистыми сланцами с $m=2,8$ –16,2 м, $\sigma_c=67,5$ –71 МПа; глино-песчаными сланцами с $m=7$ –24,6 м, $\sigma_c=73$ –96,8 МПа и песчаниками с $m=9$ –38 м, $\sigma_c=135,7$ –178 МПа. Углы напластования пород в исследуемых выработках составляют $\alpha=5$ –20° при диапазоне глубин $H=650$ –1100 м.

В связи с тем, что длина выработок составляла 400–3000 м, при оценке их экс-

плутационного состояния общая их длина разбивалась на участки по 40 м. Устойчивость оценивалась известными показателями [1, 2]: ω_S как отношение фактической минимальной площади поперечного сечения участка выработки к проектной и ω_N как отношение количества работоспособных рам металлокрепки к общему их числу на исследуемом участке.

В результате анализа степени и характера деформирования контура подготовительных выработок и элементов крепления на различных участках по значению показателя ω_N выделено четыре типа наиболее характерных зон: со значением показателя менее 0,5 — зона I-го типа, с $\omega_N=0,50-0,65$ — зона II-го типа, со значением $\omega_N=0,651-0,8$ — III-го типа, а участки с $\omega_N>0,8$, соответственно, IV-го типа [1].

С целью определения изменения показателя устойчивости ω_N в зависимости от густоты трещин λ за фиксированный промежуток времени (1 мес.) в течение года проводились инструментальные исследования [1]. При помощи фотопланиметрического метода определялось исходное значение густоты трещин, затем определялось приращение количества трещин на 1 м длины выработки со временем на различных участках. При переходе участков выработок из зон одного в зоны другого типа (при наличии) рассчитывались скорости трещинообразования и изменения показателя устойчивости выработок ω_N как производные первого порядка по времени. По результатам обработки материалов исследований [1] были получены зависимости скорости изменения показателей устойчивости выработки от скорости трещинообразования при изменении типов зон, которые представлены на рисунке 1.

В результате регрессионного анализа было установлено, что зависимость изменения показателей устойчивости выработок ω_N и ω_S от скорости трещинообразования v_λ со значениями показателя достоверности ап-

проксимации $r^2>0,75$ описывается логарифмическими уравнениями вида

$$\begin{aligned} v_N &= a_N \cdot \ln(v_\lambda) + b_N, \\ v_S &= a_S \cdot \ln(v_\lambda) + b_S, \end{aligned} \quad (1)$$

где v_N и v_S — скорость изменения показателей устойчивости выработок ω_N и ω_S соответственно, мес.⁻¹; v_λ — интенсивность трещинообразования, (тр./м)·мес.⁻¹; a_N , a_S , b_N и b_S — эмпирические коэффициенты, учитывающие литотип пород.

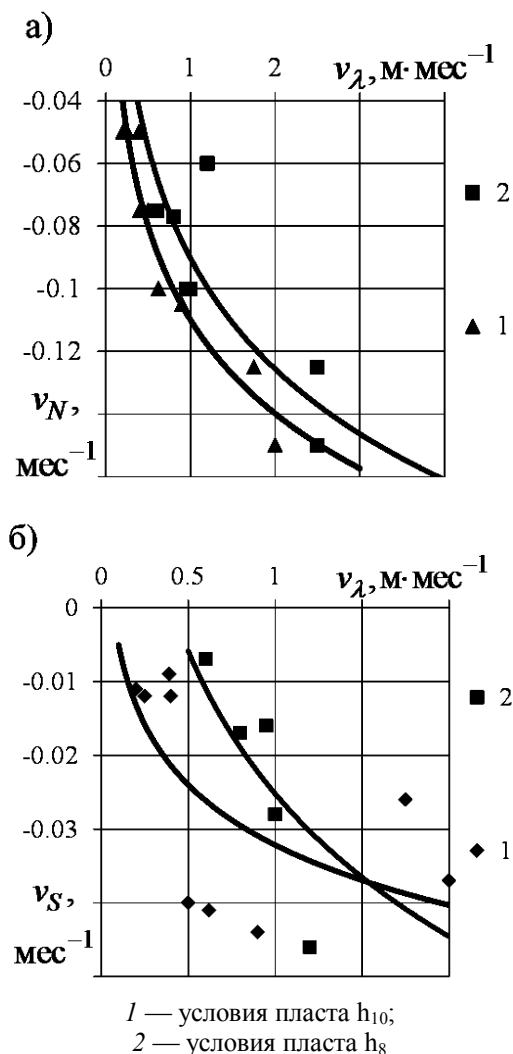


Рисунок 1 Зависимость скорости изменения показателей устойчивости выработки ω_N (а) и ω_S (б) от скорости трещинообразования

Шахтные исследования [2–4] показывают, что направление максимальной компоненты смещений пород кровли находится в прямой зависимости от значения угла напластования пород вне зон влияния очистных работ и геологических нарушений. Однако, как показали исследования [1] в условиях шахт Боково-Хрустальского и Должанско-Ровенецкого геолого-промышленных районов, в зонах с $\omega_N \leq 0,65$ направление преобладающей нагрузки на крепь более чем на 50 % исследуемых участков горизонтальных пластовых выработок не является нормальным к плоскости напластования пород.

Для определения направления максимальной компоненты смещений пород разработан алгоритм, учитывающий их характеристики в обоих направлениях от нормали к плоскости напластования. При расчёте угла отклонения от нормали к плоскости напластования пород максимальной компоненты их смещений необходимо соотнести расчётные размеры зоны неупругих деформаций (ЗНД) в квадрантах $-x0y$ и $x0y$ (рис. 2), подставив наибольшее значение по модулю из величин относительного радиуса ЗНД в знаменатель

$$\varphi = \arccos\left(\frac{r_{L\min}}{r_{L\max}}\right), \quad (2)$$

где $r_{L\min}$ и $r_{L\max}$ — соответственно наименьшая и наибольшая относительная величина ЗНД; φ — угол отклонения преобладающей нагрузки на крепь ρ от нормали к плоскости напластования пород, град.

Относительный радиус зоны неупругих деформаций рассчитывается по общей формуле проф. Шашенко А. Н. [2]:

$$r_L = \frac{R_L}{R_0} = \left(\exp \left[\sqrt{\frac{\gamma H}{2R_c}} - 0,5 \right] \cdot a_1 + b_1 \right), \quad (3)$$

где R_L — радиус зоны неупругих деформаций, м;

R_0 — радиус выработки, м;

γ — средневзвешенный удельный вес пород над выработкой, МН/м³;

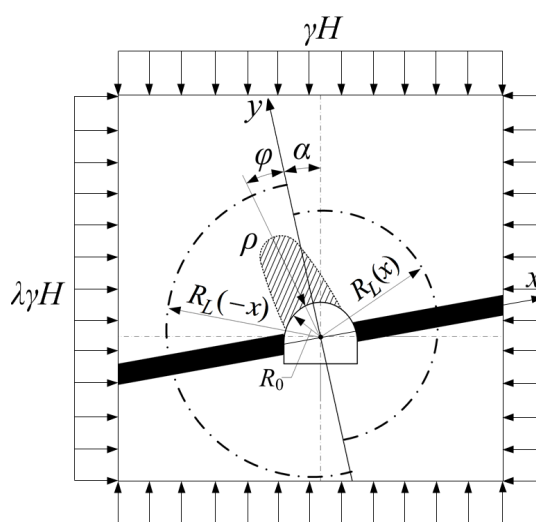
H — глубина заложения выработки, м;

R_c — средневзвешенная прочность на сжатие пород кровли, МПа;

a_1 и b_1 — эмпирические коэффициенты, учитывающие литотип пород.

Современные представления о формах проявления горного давления [2, 3] относят образование и развитие ЗНД к прерогативе «больших» глубин разработки, характерной особенностью которых является то, что разрушение большей части контура выработки происходит преимущественно от сжимающих напряжений, что подтверждается также результатами численных и натурных исследований [1] в исследуемом диапазоне глубин 650–1100 м.

Для проверки точности и адекватности разработанного алгоритма в условиях шахты «Партизанская» ГУП «Антрацит» были выполнены натурные измерения величины φ в выработках с вывалообразованиями, которые показали отклонение расчётных значений данного параметра от фактического в пределах 17 % [1].



α — угол напластования пород, град.;
 ρ — направление максимальной компоненты смещений пород;
 $R_L(-x)$ и $R_L(x)$ — радиусы ЗНД соответственно слева и справа от нормали к напластованию

Рисунок 2 Схема к определению направления преобладающей нагрузки на крепь со стороны пород кровли

Проведение численного эксперимента. Проверка адекватности вышеприведённого алгоритма и обоснование параметров поперечного сечения выработки в условиях асимметричной преобладающей нагрузки на крепь выполнялись при помощи метода конечных элементов. При формировании КЭ-сетки учитывались реальные геометрические параметры породного массива в пределах исследуемой области, в первую очередь, колебания мощности боковых пород. С этой целью на схеме расчётной области выбрано пять точек, в которых с точностью до $\pm 0,02$ м известно значение мощности. Размеры расчётной области составляют: длина (по горизонтальной оси) — 50 м; высота (по вертикальной оси) — 35 м. Количество конечных элементов модели — 7250, количество узлов — 7893. К верхней границе

расчётной области прикладывалась нагрузка в виде веса вышележащих пород $\sigma_z = \gamma H = 21,1$ МПа, а на боковых границах задавалась нагрузка $\sigma_x = \lambda \gamma H = 10,5$ МПа, где $\lambda = 0,5$ — коэффициент бокового распора.

Для численного эксперимента было рассмотрено три варианта формы поперечного сечения: арочная исходная, полуэллиптическая с отношением полупродлёта к высоте, равным коэффициенту бокового распора, и полуэллиптическая с отклонением максимального радиуса от нормали к напластованию на величину угла φ . Задача решалась шагово-итерационным методом в нелинейной постановке.

Распределение изополей главных напряжений σ_1 , по которым проанализировано напряжённо-деформированное состояние пород вокруг выработок, представлено на рисунке 3.

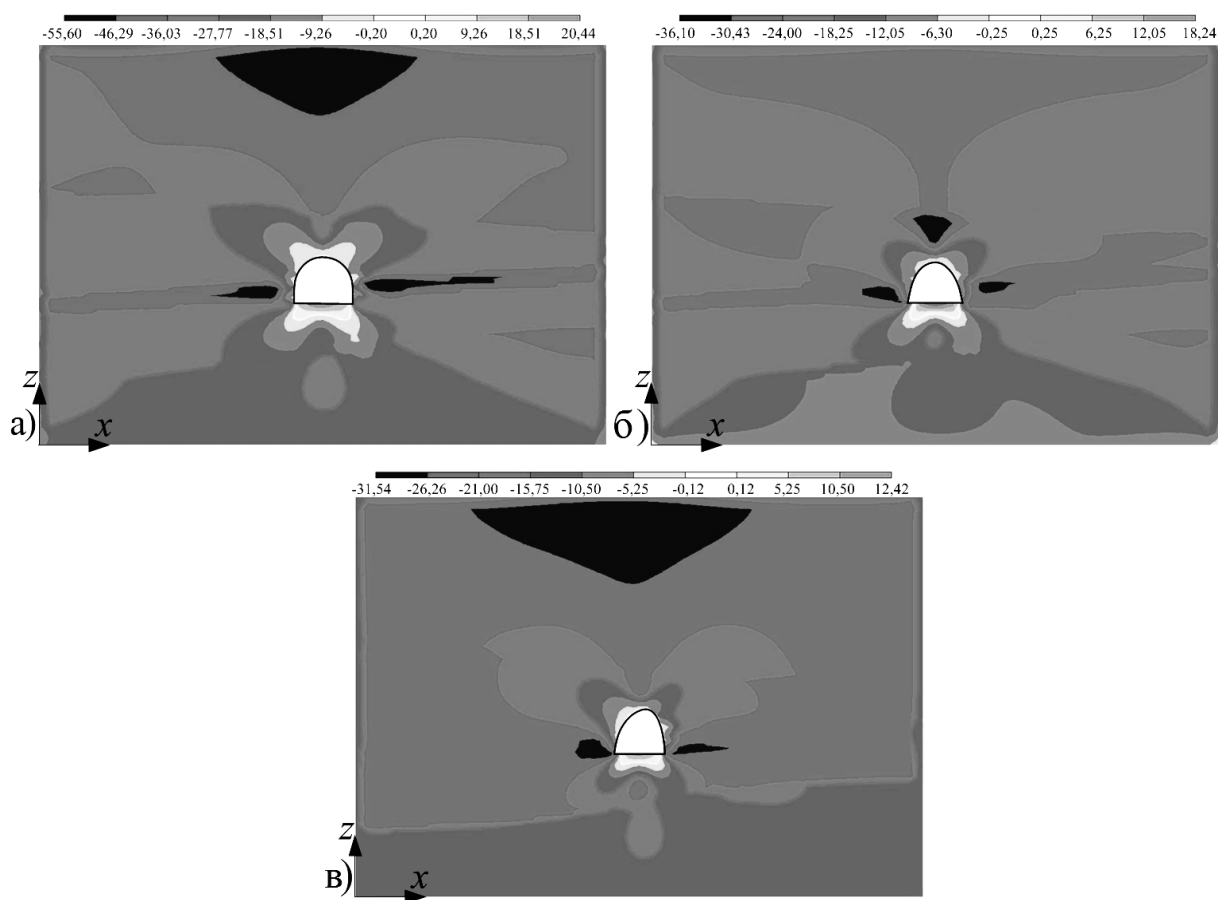


Рисунок 3 Изополя главных напряжений σ_1 в выработке арочной (а), полуэллиптической (б) и асимметричной полуэллиптической (в) форм поперечных сечений

При использовании арочной формы выработки максимальные сжимающие главные напряжения σ_I (46,3–55,6 МПа) наблюдаются в боках выработки. На большей части контура поперечного сечения арочной формы в кровле действуют сжимающие напряжения $\sigma_I=0,2$ –18,5 МПа, но в крайней верхней точке контура и в почве выработки наблюдаются растягивающие усилия $\sigma_I=5,1$ –20,4 МПа. В полуэллиптической выработке на большей части её контура действуют сжимающие главные напряжения $\sigma_I=0,2$ –12,0 МПа, а в почве — растягивающие (0,2–18,25 МПа). Максимальные сжимающие усилия σ_I (30,1–36,1 МПа) наблюдаются в боках выработки и в слое аргиллита на расстоянии от контура выработки соответственно 0,6–1,1 и 2,8 м, что обусловлено её формой. При асимметричной полуэллиптической форме выработки максимальными являются сжимающие главные напряжения σ_I (0,2–12,0 МПа) в почве.

Растягивающие главные напряжения σ_I в почве выработки составляют 0,1–11,5 МПа, а на большей части контура наблюдаются сжимающие усилия σ_I , которые имеют значения 4,9–5,25 МПа, что позволяет отнести данную форму выработки к наиболее рациональной из рассмотренных.

К такой форме выработки наиболее адаптирована металлическая податливая крепь производства Западно-Донбасского научно-производственного центра «Геомеханика» КМП-А3-Р2 (А4-Р2 и А5-Р2) [5], которая рекомендуется в качестве средства повышения устойчивости в интенсивно трещиноватых породах глубоких антрацитовых шахт Донбасса. Численным экспериментом также подтверждается адекватность разработанного алгоритма определения направления преобладающей нагрузки на крепь.

Библиографический список

1. Должигов, П. Н. Устойчивость выработок в интенсивно трещиноватых породах глубоких шахт [Текст] : монография / П. Н. Должигов, А. Э. Кипко, Н. Н. Палейчук. — Донецк : Світ книги, 2012. — 220 с.
2. Шашенко, А. Н. Некоторые задачи статистической геомеханики [Текст] / А. Н. Шашенко, С. Б. Тулуб, Е. А. Сдвижкова. — К. : Пульсари, 2002. — 302 с.

Разработанная на основе предложенного алгоритма определения направления преобладающей нагрузки на крепь со стороны пород кровли обобщённая методика расчёта параметров повышения устойчивости пластовых выработок [1] позволяет проектировать параметры перекрепления горизонтальных выработок глубоких угольных шахт.

Выводы:

1. Для характеристики трещиноватости пород помимо таких параметров, как раскрытие и густота трещин, целесообразно использовать показатель интенсивности, который соответствует скорости трещинообразования.

2. В результате исследований установлено, что зависимость изменения показателей устойчивости выработок от скорости трещинообразования описывается логарифмической функцией.

3. В условиях глубоких шахт Восточного Донбасса в подавляющем своём большинстве выработки имеют арочную форму и закреплены соответствующей крепью. Однако данная форма является морально устаревшей и не обеспечивает надлежащего уровня эксплуатационного состояния выработок, особенно в зонах интенсивного трещинообразования, что в дальнейшем может привести к экономической нецелесообразности поддержания подобных выработок в связи с ростом количества перекреплений таких участков.

4. При помощи метода конечных элементов обоснована форма поперечного сечения выработки, при которой обеспечивается вертикальная и горизонтальная симметрия смещений пород кровли и нагрузки на крепь, — полуэллипс со смещением вертикальной оси на величину угла φ .

3. Литвинский, Г. Г. Основные закономерности проявлений горного давления на «малых» и больших» глубинах [Текст] / Г. Г. Литвинский // Форум горняков–2009 : материалы междунар. конф. — Д. : Национальный горный ун-т, 2009. — С. 13–21.

4. Мартыненко, С. В. Задача подготовки исходных данных для расчёта параметров металлической крепи и её реализация на системе управления базами данных «Visual Fox Pro 6.0» [Текст] / С. В. Мартыненко // Горнодобывающая промышленность Украины и Польши : актуальные проблемы и перспективы : Украинско-Польский форум горняков. — Д. : Национальный горный ун-т, 2004. — С. 92–104.

5. Прокопенко, В. И. Экономическая целесообразность внедрения инновационных крепей на шахтах [Текст] / В. И. Прокопенко, А. В. Кириченко, В. Я. Кириченко // Уголь Украины, 2011. — № 3. — С. 18–22.

© Палейчук Н. Н.
© Пронский Д. В.
© Бизянов Е. Е.
© Коваленко Н. В.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ГД ЛНУ им. В. Даля Рябичевым В. Д.,
к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Леоновым А. А.*

Статья поступила в редакцию 30.05.18

к.т.н. Палейчук М. М., к.т.н. Пронский Д. В., д.е.н. Бизянов Е. Е., д.е.н. Коваленко Н. В.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ПРО ФОРМУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА КРІПЛЕННЯ ВИРОБОК В УМОВАХ ГЛИБОКИХ АНТРАЦИТОВИХ ШАХТ

Встановлено закономірності зміни показників стійкості виробок в залежності від швидкості утворення тріщин. Розроблено алгоритм визначення відхилення від нормалі до площини на шарування порід напрямку переважаючого навантаження на кріплення з боку порід покрівлі. За допомогою методу кінцевих елементів обґрунтовано раціональну форму пластових виробок в умовах інтенсивного тріщиноутворення.

Ключові слова: *виробки, стійкість, показники, інтенсивність, швидкість, тріщиноутворення, навантаження на кріплення, асиметрія.*

PhD Paleychuk N. N., PhD Pronskiy D. V., Doctor of Economic Sciences Bizianov E. E., Doctor of Economic Sciences Kovalenko N. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

FORMING THE SUPPORT LOADING UNDER THE ANTHRACITE MINE CONDITIONS

The dependencies of parameters varying of the output sustainability have been determined on the rate of cracking. There has been developed the algorithm for determining the underline to the plane rock bedding of the direction of prevailing loading on support from the roof rock side. Using the finite element method there has been proved the rational form of the in-seam working under the intensive cracking conditions.

Key words: *working, stability, parameters, intensity, rate, cracking, support loading, asymmetry.*

**МЕТАЛЛУРГИЯ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**МЕТАЛУРГІЯ
ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

**METALLURGY
AND MATERIAL SCIENCES**

УДК 669.013:669.18.04:669.89

к.т.н. Куберский С. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ОПТИМИЗАЦИЯ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ МИКРОЗАВОДОВ

Показаны отличия технологической схемы производства стали в условиях металлургических микрозаводов в сравнении с интегрированными предприятиями. Предложены подходы к организации согласованной работы основных технологических агрегатов. Разработана система динамического управления охлаждением непрерывнолитой заготовки. Предложенный алгоритм и технология управления расходом воды обеспечивают существенное снижение температурного градиента по поверхности заготовки даже в условиях частого и ступенчатого изменения скорости разливки.

Ключевые слова: микрозавод, непрерывная разливка, заготовка, скорость разливки, вторичное охлаждение, оптимизация, вода, расход, динамическое управление, температура поверхности.

В настоящее время для ведущих мировых производителей металлопродукции характерно создание микрозаводов, представляющих собой высокоэффективные технологические построения. Такие предприятия обеспечивают оптимизацию расходов сырья и материалов, снижение удельных капиталовложений, энергозатрат и числа факторов, негативно влияющих на окружающую среду. Кроме того, современные микрозаводы ориентированы на максимально возможное использование местных инфраструктуры, рынков сбыта и трудовых ресурсов, а их эффективность во многом определяется использованием региональной сырьевой, материальной, энергетической и топливной базы.

Как правило, конкурентоспособность микрозаводов обеспечивается производством продукции массового спроса ограниченного сортамента (например, строительная арматура) либо, наоборот, специализацией на производстве высококачественной продукции ограниченного спроса (сортовой прокат машиностроительного назначения, качественная катанка и т. д.) с высокой добавленной стоимостью.

При наличии соответствующих технологий и оборудования микрозавод может производить практически любые виды продукции, которые пользуются спросом на рынке металлопродукции. Поэтому технологи-

ческие схемы металлургических микрозаводов в зависимости от конкретных условий могут трансформироваться от простых узкоспециализированных однониточных с ограниченным сортаментом продукции до сложных универсальных и многовариантных.

Наибольшее распространение в металлургии получили микрозаводы с «классическим» построением, включающим дуговую сталеплавильную печь (ЭДП с массой плавки 10–20 т), агрегат ковш-печь (АКП) для доводки стали, а также одно- или двухручьевую сортовую (блюмовую) МНЛЗ [1].

На наш взгляд, ключевыми элементами, обеспечивающими эффективность и рентабельность работы такого завода, является функционирование АКП для внепечной обработки и компактной радиальной МНЛЗ для непрерывной разливки малых объемов стали.

Технология непрерывной разливки стали и используемое для её реализации оборудование в условиях микрозаводов имеют существенные отличия от аналогов, применяемых на интегрированных предприятиях.

Наиболее существенные концептуальные различия в технологии имеют место в подходах к производительности МНЛЗ.

Для интегрированных производств повышение скорости разливки и, соответственно, производительности МНЛЗ зачастую является наиболее важным фактором, существенно влияющим на себестоимость.

В условиях микрозаводов такие подходы к скорости разливки не всегда оправданы и реализуемы, а на первый план, как правило, выходят требования к качеству и эксклюзивности продукции. Микрозаводы, реализующие стратегию производства небольших объёмов эксклюзивной продукции, имеющей повышенный спрос и высокую добавленную стоимость, не всегда заинтересованы в повышении производительности, а иногда снижение объёмов реализации их продукции на рынке позволяет сохранить или поднять уровень сложившихся цен при обеспечении приемлемой рентабельности производства.

Для согласования работы технологических агрегатов, обеспечения серийной разливки, повышения выхода годного и снижения издержек в условиях микрозаводов необходимо варьирование скорости разливки в широком диапазоне, а иногда и разливка стали с минимально возможной скоростью. Это требует новых подходов к организации технологии и в первую очередь вторичного охлаждения заготовок.

Поэтому основная цель представленной работы заключалась в разработке алгоритма и оптимизации вторичного охлаждения стали, разливаемой на МНЛЗ металлургических микрозаводов.

Как было отмечено выше, в технологической схеме микрозаводов используются компактные МНЛЗ. Это обусловлено в первую очередь стремлением сократить площади, занимаемые оборудованием, а также отсутствием необходимости в производстве больших крупнотоннажных заготовок.

Компактность сортовой радиальной МНЛЗ достигается, прежде всего, благодаря уменьшению базового радиуса машины (величина радиуса 3,5–4,0 м). Как правило, радиус сортовых МНЛЗ для микрозаводов и протяжённость главной технологической линии оказывается в 2–2,5 раза меньше, чем высокопроизводительной сортовой МНЛЗ (например, современного мини-завода). Это оказывается возможным за счёт уменьшения скорости вытяжки за-

готовки до 1,5–2,0 м/мин и менее. Для сравнения: на высокопроизводительных сортовых МНЛЗ скорость вытяжки достигает 5–6 м/мин.

Основу успешного функционирования микрозаводов обеспечивает выбор рациональной схемы непрерывной разливки и оптимального количества ручьёв для сортовых и блюмовых МНЛЗ при условии увеличения серийности разливки (без остановки машины) [2]. По оценкам различных экспертов, средняя годовая производительность одного ручья для современных сортовых МНЛЗ составляет 200–250 тыс. т/год, а блюмовых — 135–140 тыс. т/год [3]. Это создаёт благоприятные условия для применения в структуре микрозаводов одноручьевых МНЛЗ. Соответственно, стоимость одноручьевой МНЛЗ в любом случае будет в 1,5–1,6 раза ниже, чем у двухручевой.

Использование преимущественно одноручьевых МНЛЗ в условиях металлургических микрозаводов значительно повышает надёжность работы всех их технологических узлов как при разливке одиночными плавками, так и при серийной разливке.

Следовательно, при разработке концепции производства стали на микрозаводах, производительность которых не превышает 100–150 тыс. т/год, должна решаться задача обеспечения стабильного процесса литья на одноручьевых МНЛЗ при подаче стали от плавильного агрегата малыми порциями. Стабильные условия разливки и качество производимой продукции достигаются в этом случае в широком диапазоне скоростей литья (1,0–7,0 м/мин для сортовых и 0,2–1,0 м/мин для блюмовых МНЛЗ).

Определённого сокращения издержек на производство стали удаётся достигнуть при согласованной работе дуговых сталеплавильных печей и МНЛЗ для обеспечения серийной разливки. Практика работы предприятий с плавильными агрегатами, а следовательно, и сталеразливочными ковшами до 10–15 т выявила проблему в организации серийной непрерывной разливки. Это связано с необходимостью совмещения длитель-

ности циклов подачи ковшей на МНЛЗ и их разливки, которые зависят от целого ряда организационных и технологических факторов и в первую очередь обусловлены малой ёмкостью сталеразливочного и промежуточного ковшей, а соответственно, и длительностью цикла разливки, который не всегда удаётся синхронизировать с циклом выплавки стали в ЭДП. Поэтому для многих микро-заводов характерна непрерывная разливка одиночными плавками либо небольшими сериями по 2–3 ковша, что приводит к большим потерям стали (3,5–4,5 %) и нарушает нормальную ритмичность работы электросталеплавильного цеха. Попытки разливки стали более длинными сериями показали, что для этого необходимо варьировать скорость вытяжки заготовки в достаточно широком диапазоне, а при необходимости разливать сталь на минимальных скоростях. Наряду с обеспечением высокого качества заготовки низкие скорости разливки позволяют максимально синхронизировать работу плавильных агрегатов и МНЛЗ, а следовательно, обеспечить разливку методом «плавка на плавку», что приводит к увеличению выхода годного и снижению себестоимости продукции. Однако при малой массе плавки в ковше (6–20 т) и ритмичности подачи ковшей 60–90 мин для серийной разливки становится необходимым варьировать скорость вытягивания заготовки от 0,1–0,2 до 0,8–0,9 м/мин, что приводит к дополнительным потерям тепла в промежуточном ковше и при переливе из него в кристаллизатор.

Между тем на предприятиях, работающих с крупнотоннажными агрегатами, проблема синхронизации дискретных циклов выплавки стали и её непрерывной разливки решается использованием АКП. Однако эти агрегаты не всегда удаётся эффективно вписать в технологическую схему металлургических микрозаводов, что в немалой степени связано с невозможностью организации эффективного дугового подогрева при значительной скорости охлаждения стали в малых сталеразливочных ковшах.

При использовании плавильных агрегатов малой ёмкости (до 10 т) проблематичным является применение традиционных агрегатов для внепечной обработки стали, а для сталеразливочных ковшей 15–30 т наблюдается повышенный износ футеровки вследствие воздействия на неё дуг электродов при обработке на АКП.

Анализ технологии непрерывной разлики блюмов в условиях одного из микрозаводов показал, что в процессе серийной разлики даже одной марки стали варьирование скорости вытяжки заготовки может происходить в пределах 0,2–0,6 м/мин. Такой широкий диапазон изменения скорости вытяжки заготовки требует дополнительной корректировки интенсивности охлаждения в зоне вторичного охлаждения (ЗВО). В противном случае отдельные участки непрерывнолитой заготовки будут охлаждаться с различной интенсивностью, что может приводить к снижению качества непрерывнолитого металла по внутренним дефектам [3].

Поэтому для обеспечения стабильности процесса разлики длинными сериями актуальной задачей является коррекция интенсивности охлаждения заготовки в ЗВО непосредственно в процессе литья, что может быть реализовано с использованием оперативной системы управления режимами охлаждения заготовки, учитывающей происходящие изменения в технологии литья в режиме текущего времени.

В практике управления процессами затвердевания непрерывнолитой заготовки известны два основных подхода: пропорционально-скоростной и динамический режимы управления [3, 4].

Пропорционально-скоростной режим управления является наиболее распространённым для сортовых МНЛЗ. Он базируется на использовании табличных данных изменения расхода воды в зависимости от скорости разлики. При этом изменение расхода воды происходит во всех секциях ЗВО одновременно с изменением реальной скорости разлики. Технологическая база табличных данных или управ-

ляющих уравнений составляется для всего сортамента разливаемой продукции с учётом типоразмера, химического состава и температур разлива стали. Скоростной режим управления позволяет достаточно точно поддерживать необходимый температурный профиль при стационарном режиме разлива. Однако неотъемлемой частью технологии непрерывного литья являются переходные режимы, обусловленные, прежде всего, изменением скорости разлива, что вызывает появление переохлаждённых или перегретых участков непрерывнолитой заготовки вследствие одновременного изменения расхода охлаждающего во всех секциях и может быть причиной образования трещин, внутренних мостов и, в конечном счёте, снижения качества продукции. Следовательно, такая схема управления может эффективно работать только в небольшом диапазоне изменения скорости вытяжки (0,1–0,15 м/мин).

Динамический режим управления процессом охлаждения в ЗВО широко используется при непрерывной разливке качественных сталей и позволяет свести к минимуму негативное воздействие переходных процессов на температурный профиль непрерывнолитой заготовки. В металлургической практике известны различные алгоритмы динамической системы управления. Базовым параметром для всех алгоритмов является средняя скорость движения непрерывнолитой заготовки вдоль технологической оси. При изменении скорости вытяжки происходит монотонное изменение расхода воды автономно по каждой секции. Технологическая база данных, используемая для реализации алгоритма, представляет собой управляющие уравнения, полученные на основе математической модели, описывающей процессы затвердевания непрерывнолитой заготовки [5–8].

Средняя скорость движения заготовки v_{cp} оценивается в средней точке каждой секции ЗВО (рис. 1). Для того чтобы в начале разлива определить данную скорость для каждой секции, необходимо расстояние от нача-

ла секции до её середины поделить на целое количество равных единичных участков длиной Δl_s (s — номер секции ЗВО).

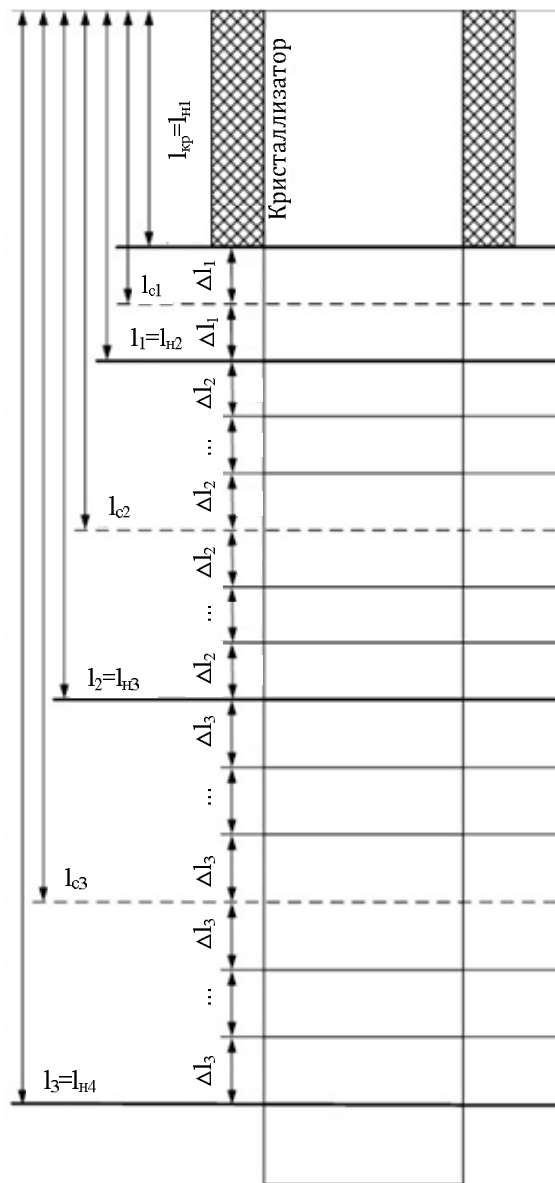


Рисунок 1 Схема размещения участков секций ЗВО

Исходя из вышесказанного, разбивку секций ЗВО можно осуществить с помощью следующей формулы:

$$\Delta l_s = \frac{l_s}{2 \cdot n_s}, \quad (1)$$

где Δl_s — длина участка s -ой зоны;

l_s — длина s -ой секции ЗВО;

n_s — целое число, определённое для каждой секции.

Рекомендации по выбору рациональных параметров охлаждения были разработаны для следующих этапов разливки:

- начало разливки (переход заготовки из кристаллизатора в первую секцию);
- перемещение заготовки до середины секции;
- достижение заготовкой середины секции;
- перемещение заготовки после середины секции;
- переход заготовки между секциями ЗВО.

После включения механизма вытягивания заготовки начинается слежение за её перемещением, т. е. рассчитывается (фиксируется) общая длина перемещения торца L . Также фиксируется общее время T после начала разливки и время прохождения заготовкой участков секции Δl_s (в данном случае кристаллизатора). С этого момента на каждом цикле опроса перемещения контролируется выполнение условия $L \geq l_{(кр)}$.

Как только перемещение заготовки достигло величины длины кристаллизатора $L \geq l_{(кр)}$, начинается формирование усреднённой средней скорости для первой секции ЗВО в соответствии со временем Δt_s прохождения заготовкой текущего участка секции Δl_s . Время Δt_s при переходе из кристаллизатора в первую секцию равно времени прохождения заготовкой расстояния $l_{(кр)}$. С учётом дискретизации опроса датчика перемещения (скорости) рассчитывается время прохождения заготовкой кристаллизатора по формуле

$$t_s = t_{кр} = T - \frac{L - l_{(кр)}}{v_{мгн}}, \quad (2)$$

где $v_{мгн}$ — значение мгновенной скорости разливки, зафиксированное за последний такт до события.

При расчёте усреднённой скорости для первой секции используется уравнение

$$v_{cp}(1) = \frac{l_s}{t_s}, \quad (3)$$

где $l_s = l_{кр} = l_{н1}$ — расстояние от мениска металла в кристаллизаторе до торца заготовки, если он не дошёл до середины секции;

$t_s = t_{кр}$ — время перемещения торца заготовки от мениска до начала первой зоны (выхода из кристаллизатора) $l_{кр} = l_{н1}$, рассчитанное с учётом дискретизации.

Таким образом, по усреднённой скорости для первой секции (v_{cp}) задаётся расход воды на охлаждение в ней заготовки. Для всех остальных секций расход воды остаётся неизменным.

После того как заготовка достигла начала первой секции, т. е. выполнилось условие $L \geq l_{(кр)}$, на каждом цикле опроса датчика перемещения оценивается положение начала заготовки относительно середины первой секции ЗВО $L \geq l_c(1)$. Если это условие не выполняется, то необходимо отслеживать последующее перемещение торца заготовки на расстояние, равное рассчитанному единичному участку первой секции Δl_1 . При этом необходимо также рассчитывать время перемещения заготовки по секции на расстояние Δl_1 .

Расчёт времени прохождения участка для каждой секции выполняется по формуле

$$\Delta t_s = n \cdot \Delta \tau, \quad (4)$$

где $\Delta t_s = \Delta t_1$ — время прохождения заготовкой участка первой секции Δl_1 ;

$\Delta \tau$ — дискретность опроса датчика скорости, с;

n — номер цикла опроса датчика скорости, начиная с которого выполняется условие

$$\sum_{j=1}^n \Delta \tau v_j \geq \Delta l(s), \quad (5)$$

где v_j — мгновенное значение скорости разливки при j -ом опросе;

$\Delta l(s) = \Delta l(1)$ — длина участка первой секции.

Учитывая дискретность опроса датчика скорости, необходимо скорректировать значение Δt_s . С учётом коррекции формула расчёта времени имеет вид

$$\Delta t_s = n \cdot \Delta \tau - \frac{\sum_{j=1}^n \Delta \tau v_j - \Delta l(s)}{v_j}, \quad (6)$$

где $\Delta l(s) = \Delta l(1)$; $\Delta t_s = \Delta t_1$.

Для полученной величины Δt_s рассчитывается усреднённая скорость для первой секции

$$v_{cp}(1) = \frac{l_s}{\Delta t(s)}, \quad (7)$$

где $l_s = l_{kp} + \Delta l_1 = L$;

$\Delta t(s) = \Delta t(1) = \Delta t(1) + \Delta t_1$.

После корректировки скорости и очередного перемещения заготовки на расстояние Δl_1 возвращаемся к проверке условия достижения торцом заготовки середины первой секции. Цикл повторяется до тех пор, пока не выполнится данное условие достижения заготовкой середины секции.

После того как головная часть заготовки достигла середины первой секции $L = l_c(1)$, средняя скорость рассчитывается по формуле (7). Учитывая, что $l_s = L = l_c(1)$, получим

$$v_{cp}(1) = \frac{l_s}{\Delta t(s)} = \frac{l_c(1)}{\Delta t(1)}. \quad (8)$$

После пересечения началом заготовки середины первой секции $L > l_c(1)$ при каждом перемещении заготовки на расстояние участка секции выполняется перерасчёт средней скорости. Так как расчёт расхода воды в секции ЗВО выполняется для середины зоны, то дальнейшее перемеще-

ние начала заготовки по секции не влияет на значение l_s . После достижения заготовкой середины секции это значение необходимо рассчитывать по формуле

$$l_s = l_c(s). \quad (9)$$

В свою очередь, значение времени $\Delta t(s)$ прохождения заготовкой от мениска до середины секции будет изменяться при изменении скорости разливки. Для корректировки времени прохождения заготовкой данного участка определяется промежуток времени, за который она пройдёт расстояние Δl_s , двигаясь со скоростью $v_{cp}(s)$:

$$\Delta t^* = \frac{\Delta l_s}{v_{cp}(s)}. \quad (10)$$

После этого определяется разница между фактическим временем прохождения заготовкой расстояния Δl_s и рассчитанным по формуле (10):

$$\Delta t^{**} = \Delta t_s - \Delta t^*. \quad (11)$$

После возможной фильтрации значения, рассчитанного по формуле (11), определяется средняя скорость с учётом изменения времени

$$\Delta t(s) = \Delta t(s) + \Delta t^{**}. \quad (12)$$

После корректировки средней скорости разливки цикл алгоритма повторяется.

При достижении передним торцом заготовки начала следующей секции расчёт средней скорости для новой секции аналогичен расчёту, описанному для перехода из кристаллизатора в первую зону. Разница состоит только в выборе шага перемещения слитка Δl_s . При вхождении в новую зону этот шаг должен выбираться в соответствии с методикой, описанной выше. Корректировка средней скорости для предыдущих зон также осуществляется с шагом перемещения соответствующей секции, в которой в текущий момент находится начало заготовки.

Разработанная система динамического управления охлаждением заготовки в ЗВО при переходных режимах разливки адаптирована и отработана на промышленных МНЛЗ. Выполненные замеры колебаний температуры поверхности заготовки в ЗВО (с помощью пирометра) показали, что при использовании системы динамического управления охлаждением заготовки её колебания на переходных участках при изменении скорости вытяжки не превышают 2–3 °С. Использование в аналогичных условиях пропорционально скоростной схемы корректировки охлаждения приводит к значительно большим колебаниям температуры поверхности отдельных участков (12–15 °С).

Таким образом, разработанная система динамического управления охлаждением заготовки в ЗВО обеспечивает существен-

ное снижение температурного градиента по поверхности заготовки даже при наличии переходных режимов (ступенчатое изменение скорости разливки), что является достаточно актуальным для условий металлургических микрозаводов.

При варьировании скорости вытягивания заготовки для согласования технологических циклов выплавки и непрерывной разливки сериями предложенная система позволяет плавно изменять интенсивность охлаждения в соответствии с реальными скоростными параметрами, что способствует повышению качества металла. Особенно это важно при снижении скорости разливки, когда для предотвращения образования пористости и мостов требуется существенно снижать интенсивность подачи охладителя во всех секциях ЗВО.

Библиографический список

1. Стеблов, А. Б. Проектирование и строительство металлургического микрозавода [Текст] / А. Б. Стеблов, С. Н. Березов, М. М. Таурбеков, И. В. Дуброва // *Литьё и металлургия*. — 2013. — № 1. — С. 17–19.
2. Yasunaka, H. Improvement of surface quality of continuously cast steel by high cycle mold oscillation [Text] / H. Yasunaka // *Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME*. — Warrendale : ISS-AIME, 1986. — Vol. 69. — P. 497–502.
3. Непрерывная разливка стали [Текст] : учебник / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. — Донецк : ДонНТУ, 2011. — 482 с.
4. Смирнов, А. Н. Некоторые аспекты организации производства в условиях современного микрозавода [Текст] / А. Н. Смирнов, А. Ю. Цупрун, Е. В. Штепан, Е. В. Новикова // *Металл и литьё Украины*. — 2009. — № 1–2. — С. 16–20.
5. Батраева, А. Е. Динамическое управление температурным состоянием заготовок МНЛЗ [Текст] / А. Е. Батраева, Б. Н. Парсункин, Е. Н. Ишиметьев и др. // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. — 2007. — № 11. — С. 20–25.
6. Салихов, З. Г. Математическое описание механизма использования охлаждающей воды в зоне вторичного охлаждения МНЛЗ [Текст] / З. Г. Салихов, Е. Н. Ишиметьев, Р. Т. Газимов, К. З. Салихов // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. — 2010. — № 3. — С. 59–62.
7. Масальский, С. С. Оптимизация вторичного охлаждения непрерывнолитых слитков [Текст] / С. С. Масальский, В. Н. Селиванов // *Известия вузов. Чёрная металлургия*. — 2000. — № 1. — С. 57–60.
8. Минтус, А. Н. Целесообразность динамического управления зоной вторичного охлаждения [Текст] / А. Н. Минтус, А. Ю. Цупрун, Д. А. Денисенко, В. Ю. Мариничев // *Наукові праці Донецького НТУ. Серія : Електротехніка і енергетика*. — 2007. — Вип. № 7 (128). — С. 91–94.

© Куберский С. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М., зам. нач. ЦЛК филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» (ПАО «АМК») Тарасовым В. Н.

Статья поступила в редакцию 11.10.18.

к.т.н. Куберський С. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ОПТИМІЗАЦІЯ ВТОРИННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПІД ЧАС БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ В УМОВАХ МІКРОЗАВОДІВ

Показано відмінності технологічної схеми виробництва сталі в умовах металургійних мікрозаводів у порівнянні з інтегрованими підприємствами. Запропоновано підходи до організації узгодженої роботи основних технологічних агрегатів. Розроблено систему динамічного управління охолодженням безперервнолитої заготовки. Запропонований алгоритм і технологія управління витратою води забезпечують істотне зниження температурного градієнту по поверхні заготовки навіть в умовах частих і ступеневих змін швидкості розливання.

Ключові слова: мікрозавод, безперервне розливання, заготовка, швидкість розливання, вторинне охолодження, оптимізація, вода, витрата, динамічне управління, температура поверхні.

PhD Kuberskiy S. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

OPTIMIZATION OF SECONDARY COOLING WITH CONTINUOUS STEEL CASTING IN THE CONDITIONS OF MICROFACTORIES

The differences in technological scheme of steel production in the conditions of metallurgical microfactories are shown comparing to the integrated enterprises. The approaches to the organization of the coordinated work of the main technological units are proposed. A dynamic control system for cooling the continuously cast billet has been developed. The proposed algorithm and water flow control technology provides a significant reduction in the temperature gradient over the billet surface, even in the face of frequent and stepwise changes in the casting rate.

Key words: microfactory, continuous casting, billet, casting rate, secondary cooling, optimization, water, flow, dynamic control, surface temperature.

УДК 669.18.04:669.89

к.т.н. Куберский С. В.,
к.т.н. Проценко М. Ю.,
Воронько М. И.,
Проценко В. И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ЭЛЕКТРОДНОЙ СМЕСИ НА ТЕМПЕРАТУРУ СТОЛБА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ

Исследовано влияние химического и фракционного состава электродной смеси комбинированного электрода, используемого в рудно-восстановительных блоках процесса дугового глубинного восстановления, на температуру столба электрической дуги. С использованием метода термометрирования выполнен анализ влияния содержания отвального шлака от производства силикомарганца и доломитизированного известняка, а также их крупности на температурный режим горения электрической дуги. Показано, что ввод добавок вызывает снижение температуры столба дуги, а большие её значения достигаются при уменьшении крупности частиц шлака от производства силикомарганца и увеличении фракции использованного доломитизированного известняка.

Ключевые слова: *внепечная обработка, дуговое глубинное восстановление, комбинированный электрод, электродная смесь, состав, крупность, шлак силикомарганца, доломитизированный известняк, электрическая дуга, температура столба дуги.*

Снижение себестоимости товарной металлопродукции и повышение её качества являются основным направлением деятельности металлургических предприятий для обеспечения высокого уровня конкурентоспособности на внутреннем и мировом рынках.

Одним из основных звеньев технологической схемы производства стали является внепечная обработка, обеспечивающая высокий уровень её эксплуатационных свойств и качества. Поэтому вопросы усовершенствования технологий ковшевой металлургии с целью повышения её эффективности являются актуальными в современных условиях функционирования сталеплавильного производства.

Эффективность внепечной обработки в значительной степени зависит от расхода дорогостоящего сырья, материалов и энергоносителей, что заставляет вести поиск альтернативных их заменителей с целью снижения себестоимости металлопродукции.

Анализ технологий внепечной обработки показывает, что повышение её технико-

экономических показателей может быть достигнуто при использовании для рафинирования и раскисления-легирования различных промышленных отходов и вторичных сырьевых материалов взамен традиционных компонентов шихты. Такой подход положительно скажется не только на себестоимости передела, но и позволит снизить негативную нагрузку на окружающую среду.

Одним из путей решения отмеченной проблемы является использование метода дугового глубинного восстановления (ДГВ) элементов в железоуглеродистые расплавы [1]. Метод ДГВ позволяет одновременно решать основные задачи внепечной обработки, связанные с рафинированием, раскислением-легированием, гомогенизацией и нагревом расплава. Кроме того, данная технология предполагает использование в качестве рудного сырья различных промышленных отходов и вторичных материалов (шлак, шлам, бедные руды, бой огнеупоров и т. д.), которые содержат в своём составе полезные для металлургии элементы. Предложенный способ переработки отходов и

вторичных материалов позволяет снизить расход дорогостоящих ферросплавов и лигатур, сократить занимаемые отвалами площади, а также улучшить экологическую обстановку в промышленно развитых регионах. При этом технология обеспечивает снижение расхода энергоносителей при обеспечении высокого качества металла.

Одним из актуальных вопросов метода ДГВ, который не был изучен в ходе предыдущих исследований, является анализ температурных параметров горения комбинированных электродов (КЭ), набиваемых электродной смесью (ЭС) различного химического и фракционного состава.

Поэтому основная цель работы заключалась в определении влияния добавок шлака силикомарганца (ШМnC) и доломитизированного известняка (ДИ) в составе ЭС и их крупности на температуру столба электрической дуги. Выбор данных добавок обусловлен их относительной дешевизной и доступностью, а также наличием компонентов, восстановление которых может обеспечивать дополнительное раскисление-легирование железоуглеродистого расплава.

В процессе внепечной обработки металлического расплава методом ДГВ основным источником тепла является дуговой разряд. Тепловая энергия, выделяемая в дуговом узле, расходуется на нагрев и расплавление материалов рудно-восстановительного блока (РВБ), химические реакции, нагрев обрабатываемого расплава и потери в окружающую среду через рудно-восстановительную смесь (РВС) и сходящими газами.

Поток тепла, образующийся в зоне горения электрической дуги, напрямую зависит от её температуры, которая определяется мощностью, подводимой в зону дугового разряда, и оказывает основное влияние на скорость расходования КЭ и РВС. Зная количество тепла, выделяющегося при горении электрической дуги, можно определить энергетические параметры дугового узла.

Для определения потока тепла, распространяющегося по КЭ в процессе сжига-

ния, было выполнено его термометрирование. КЭ (рис. 1) изготавливали из стальной трубки длиной 230 мм и диаметром 18 мм, в которой насверливали отверстия диаметром 1,0–1,5 мм с шагом 15 мм. Затем подготавливали усреднённую ЭС из заранее просеянных материалов определённой фракции. Для графита и каменноугольного пека крупность частиц составляла менее 0,63 мм, а для ШМnC и ДИ изменялась в пределах 0,05–2,5 мм. После этого погорячему (при температуре 100–120 °С) проводили набивку стальной трубки. Такая температура необходима для размягчения каменноугольного пека, что позволяет более плотно набивать ЭС. Затем электрод помещали в специальный стакан, выполненный из стальной трубы, заполняли его коксовой мелочью для предотвращения контакта КЭ с окружающей средой и опускали в шахтную печь для коксования в течение 8–10 ч. После коксования электроды извлекали из стакана, нарезали в верхней их части резьбу для крепления в лабораторной установке и определяли их длину и массу.

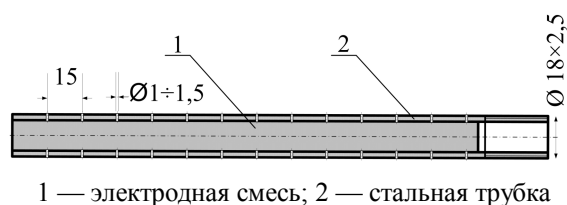


Рисунок 1 Общий вид КЭ

Лабораторные исследования проводили с использованием экспериментальных образцов КЭ, изготовленных в соответствии с матрицей двухфакторного планированного эксперимента с двумя звёздными точками (табл. 1) [2].

Содержание МnC и ДИ согласно матрице планированного эксперимента изменялось от 8,96 % до 16,04 %, а их фракция — от 0,05 мм до 2,5 мм.

В качестве источника питания использовали ТИР-630. В процессе сжигания опытных образцов КЭ работали на переменном токе и поддерживали значение силы тока 250 А.

Таблица 1
Значения исследуемых в планированном эксперименте параметров

№	Значения переменных факторов	
	f (фракция добавки, мм)	Q (количество добавки, %)
1	0,40	10
2	0,40	15
3	2,00	10
4	2,00	15
5	0,05	12,5
6	2,5	12,5
7	1,0	8,96
8	1,0	16,04
9	1,0	12,5

Перед проведением экспериментов по сжиганию КЭ теплоизолированный снаружи асбестом спай платино-платинородиевой термопары (ТПП) закрепляли в отверстии стальной трубки КЭ [3]. Теплоизоляция спая ТПП необходима для предотвращения его нагрева отходящими газами. КЭ сжигали внутри углеродистого трубчатого защитного кожуха Ø100×12 мм (рис. 2). В верхней части лабораторной установки располагался опытный образец КЭ, а в нижней — нерасходуемый (графитовый) электрод.

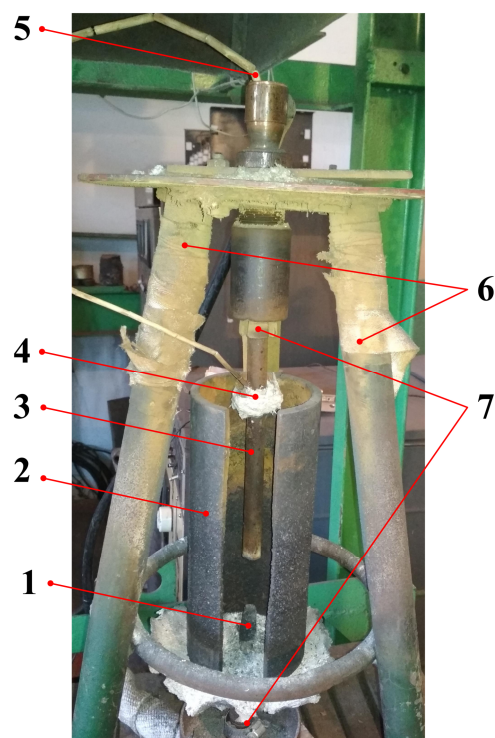
В процессе сжигания электрода спай ТПП приближался к области горения дугового разряда, при этом через каждые 30 с записывали показания ЭДС, измеряемой милливольтметром М2020. После проведения процесса сжигания определяли длину огарка КЭ и его вес, а полученные значения ЭДС с помощью градуировочной таблицы переводили в значения температуры. Огарки КЭ представлены на рисунке 3. После обработки полученных экспериментальных данных рассчитывали скорость расходования КЭ, с помощью которой можно определить, на каком расстоянии от зоны горения электрической дуги находится спай ТПП в определённый промежуток времени.

Таким образом, получается экспериментальное решение обратной задачи Й. Стефана — определяется температурное поле по длине электрода при известной ско-

рости его расходования. По экспериментально установленному распределению температуры вдоль электрода можно определить величину теплового потока по его длине.

В качестве исходных данных для расчёта теплового потока по длине электрода использовались следующие экспериментальные данные (табл. 2–4):

- время горения электрода (τ), с;
- температура в зоне спая ТПП (t), °С;
- длина сгоревшей части КЭ ($l_{\text{сг}}$);
- расстояние от нижнего торца КЭ до спая ТПП перед его сжиганием ($l_{\text{ТПП}}$).



1 — нерасходуемый электрод; 2 — защитный кожух; 3 — КЭ; 4 — ТПП; 5 — термопара ХА; 6 — станина; 7 — электрододержатели

Рисунок 2 Установка для сжигания КЭ



Рисунок 3 Огарки КЭ после их сжигания

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Таблица 2

Изменение температуры КЭ с добавкой ШМнС в ЭС при его сжигании в зоне спая ТПП

τ, с									t, °C								
КЭ1	КЭ2	КЭ3	КЭ4	КЭ5	КЭ6	КЭ7	КЭ8	КЭ9	КЭ1	КЭ2	КЭ3	КЭ4	КЭ5	КЭ6	КЭ7	КЭ8	КЭ9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	15	15	15	15	15	15	15	15
30	30	30	30	30	30	30	30	30	26	39	26	26	26	26	26	26	26
60	60	60	60	60	60	60	60	60	51	51	39	51	39	32	45	39	39
90	90	90	90	90	90	90	90	90	58	64	51	64	39	51	58	51	51
120	120	120	120	120	120	120	120	120	102	90	64	90	51	64	64	64	64
150	150	150	150	150	150	150	150	150	152	115	90	115	64	90	90	77	90
165		180	180	180	180	180	180	180	176		115	127	83	115	108	90	115
			200	210	210	210	210	210				152	102	127	121	127	139
				240	240	240	230	240					115	152	139	152	164
				270	270	245							133	164	146		
				300	280								139	164			
				310									152				

Таблица 3

Изменение температуры КЭ с добавкой ДИ в ЭС при его сжигании в зоне спая ТПП

τ, с									t, °C								
КЭ1	КЭ2	КЭ3	КЭ4	КЭ5	КЭ6	КЭ7	КЭ8	КЭ9	КЭ1	КЭ2	КЭ3	КЭ4	КЭ5	КЭ6	КЭ7	КЭ8	КЭ9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	15	15	15	15	15	15	15	15
30	30	30	30	30	30	30	30	30	19	19	26	26	19	19	16	19	19
60	60	60	60	60	60	60	60	60	26	26	26	26	26	26	26	26	26
90	90	90	90	90	90	90	90	90	39	26	39	39	39	39	32	39	39
120	120	120	120	120	120	120	120	120	39	26	51	51	45	58	39	51	51
150	150	150	150	150	150	150	150	150	51	26	64	77	58	64	51	64	64
180	180	180	160	180	180	180	180	180	64	26	77	83	64	77	64	77	90
210	210	210		210	210	210	210	210	77	77	83		77	90	77	96	127
	240			240	230	240	240	220		26			90	90	90	115	152
	270			265		270	270			45			90		102	127	
						300	280								115	139	
						330									127		
						360									152		
						375									152		

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Таблица 4
Длина сгоревшего КЭ и расстояние
от нижнего его торца до ТПП

	КЭ1	КЭ2	КЭ3	КЭ4	КЭ5	КЭ6	КЭ7	КЭ8	КЭ9
ШМнС	$l_{сг.}, \text{ мм}$								
	53	59	88	47	74	58	53	80	75
	$l_{ТПП}, \text{ мм}$								
ДИ	83	97	121	92	116	101	93	106	100
	$l_{сг.}, \text{ мм}$								
	11	58	58	16	66	56	82	69	112
	$l_{ТПП}, \text{ мм}$								
	104	131	127	129	141	112	141	116	147

Для примера рассчитаем температуру дуги для комбинированного электрода № 2 с добавкой в электродную смесь 15 % ШМнС фракцией 0,40 мм. Процесс рассматриваем как стационарный, когда температура на торце оплавленной трубки составляет 1520 °С, а расстояние от оплавленного торца трубки до торца ЭС составляет 3 мм, т. е. до точки горения электрической дуги [1].

Для расчёта длины КЭ, вовлеченного в теплообмен, используется формула

$$L_{\tau} = \frac{l_{сг.}}{\tau_{общ.}} \cdot (\tau_2 - \tau_1) + l_{\tau}, \quad (1)$$

где $\tau_{общ.}$ — полное время горения КЭ (опыта);

τ_1 и τ_2 — начальное и конечное время горения КЭ для определённого промежутка времени, с;

l_{τ} — расстояние до спая ТПП после сжигания, мм.

Тогда через 150 с от начала сжигания КЭ расстояние до спая ТПП составит

$$l_{\tau} = l_{ТПП} - l_{сг.} = 97 - 59 = 38 \text{ мм},$$

а для 120 с, в соответствии с формулой (1),

$$L_{120} = \frac{59}{150} \cdot (150 - 120) + 38 = 50 \text{ мм},$$

и т. д.

Далее определяем средние значения натуральных логарифмов L_i и t ($\ln L_i$; $\ln t$; $(\ln L_i)^2$; $(\ln t)^2$; $\ln L_i \cdot \ln t$) для определённого

временного промежутка горения КЭ. После выполнения математических действий получаем средние значения натуральных логарифмов, которые представлены в таблице 5.

Линейная зависимость между значениями логарифмов L и t будет иметь вид

$$\ln t = b_{t/L} \cdot \ln(L) + t, \quad (2)$$

где $b_{t/L}$ — отношение выборочных дисперсий средних значений $\ln L$ и $(\ln L)^2$:

$$b_{t/L} = r_{t/L} \cdot \left(\frac{S_t}{S_L} \right), \quad (3)$$

где $r_{t/L}$ — коэффициент корреляции линейной зависимости L и t ;

S_t и S_L — выборочная дисперсия $\ln L$ и $(\ln L)^2$ соответственно, которая рассчитывается по формулам

$$S_L = \sqrt{\ln L^2 - (\ln L)^2}, \quad (4)$$

$$S_t = \sqrt{\ln t^2 - (\ln t)^2}, \quad (5)$$

где $\ln L$, $\ln t$ и $(\ln L)^2$, $(\ln t)^2$ — средние значения натуральных логарифмов L и t и их квадратов.

Таблица 5
Значение средних натуральных логарифмов для L_i и t

$L_i, \text{ мм}$	$t, \text{ °С}$	$\ln L_i$	$\ln t$	$(\ln L_i)^2$	$(\ln t)^2$	$\ln L_i \cdot \ln t$
173	15	5,152	2,708	26,540	7,334	13,951
114	39	4,734	3,652	22,408	13,338	17,288
84	51	4,433	3,940	19,655	15,523	17,468
65	64	4,167	4,162	17,368	17,323	17,345
50	90	3,908	4,495	15,273	20,203	17,566
38	115	3,638	4,742	13,232	22,482	17,248
3	1520	1,099	7,327	1,207	53,677	8,049
Среднее		3,876	4,432	16,526	21,411	15,559

Рассчитываем коэффициент корреляции линейной зависимости:

$$r_{t/L} = \frac{\text{cov}_{t/L}}{S_L \cdot S_t}, \quad (6)$$

где $\text{cov}_{t/L}$ — ковариация между средними значениями $\ln L$ и $(\ln L)^2$, которая определяется по формуле

$$\text{cov}_{t/L} = (\ln L \cdot \ln t) - \ln L \cdot \ln t. \quad (7)$$

После потенцирования выражения (2) получаем зависимость температуры в данном поперечном сечении электрода, расположенном на определённом расстоянии от источника тепла (т. е. столба электрической дуги (t_0)):

$$t_0 = 5447 \cdot e^{-1,076 \ln L_r}. \quad (8)$$

По полученным экспериментальным данным с использованием пакета прикладных программ Microsoft Office Excel и предложенного в работе алгоритма была рассчитана t_0 для всех опытных образцов КЭ, значения которой представлены в таблице 6.

Результаты полученных опытных данных для процесса сжигания КЭ с добавкой в ЭС ШМнС и ДИ были статистически обработаны с помощью стандартного пакета программ Statistica 64 Version 10. Полученные зависимости представлены на рисунке 4, а уравнения регрессии — в таблице 7.

Для удобства анализа представленных на рисунке 4 данных были построены парные зависимости исследуемых параметров при постоянном значении третьего (рис. 5). Парные уравнения регрессии для представленных на рисунке 5 зависимостей приведены в таблице 8.

Таблица 6

Температура дуги при изменении содержания добавки в ЭС (Q) и их фракции (f)

№ п/п	Значения переменных факторов		$t_0, ^\circ\text{C}$	
	$f, \text{мм}$	$Q, \%$	ШМнС	ДИ
1	0,40	10	8415	5225
2	0,40	15	5447	5647
3	2,00	10	6095	5880
4	2,00	15	6954	4834
5	0,05	12,5	7527	6000
6	2,33	12,5	8021	6669
7	1,0	8,96	7457	8192
8	1,0	16,04	6626	7879
9	1,0	12,5	7257	7055

Таблица 7

Уравнения регрессии, описывающие связь между t_0 и составом КЭ

Добавка в ЭС ШМнС
$t_d = 11267,6557 - 6461,7496 \cdot f +$ $+ 68,9056 \cdot (\text{ШМнС}) + 325,7065 \cdot f^2 +$ $+ 449,6729 \cdot f \cdot (\text{ШМнС}) - 29,1027 \cdot (\text{ШМнС})^2$
Добавка в ЭС ДИ
$t_d = 9010,84 + 4146,2336 \cdot f -$ $- 714,5592 \cdot (\text{ДИ}) - 737,6621 \cdot f^2 -$ $- 180,6922 \cdot f \cdot (\text{ДИ}) + 34,4002 \cdot (\text{ДИ})^2$

На рисунке 5 представлены парные зависимости величины t_0 от фракционного и химического состава ЭС при использовании в качестве добавки ШМнС и ДИ с крупностью до 1,0 мм.

Выбор данного ограничения по фракции материала обусловлен невозможностью получения плотной структуры набивки ЭС при крупности более 1,0 мм, а также возможным измельчением добавки в процессе набивки стальной трубки.

Полученные экспериментальные данные и результаты их статистической обработки свидетельствуют о том, что наибольшие значения температуры дуги наблюдаются при минимальной добавке ШМнС в ЭС. При этом увеличение крупности способствует снижению температуры дуги, что подтверждает данные, полученные в работе [4].

При добавке в ЭС ДИ t_0 значительно меньше, чем при использовании ШМнС. Причём увеличение количества добавки с 7 % до 11 % приводит к снижению t_0 , а дальнейшее её увеличение до 17 % способствует росту значений t_0 до величины, соответствующей 10 %. Кроме того, увеличение размеров частичек ДИ благоприятно сказывается на тепловом балансе процесса. Более низкая t_0 при использовании в составе ЭС ДИ может быть обусловлена протеканием реакций восстановления кальция и магния, которые требуют больших затрат тепла, а также процессом разложения ДИ.

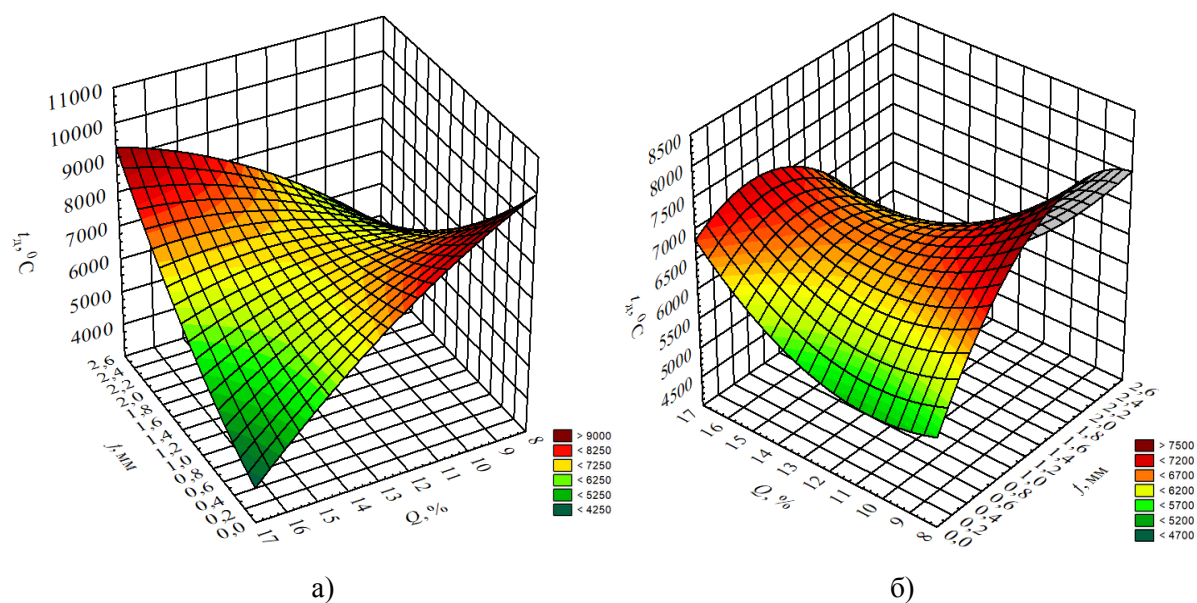


Рисунок 4 Зависимости температуры дуги от содержания добавки в ЭС и её фракции: а — ШМnC, б — ДИ

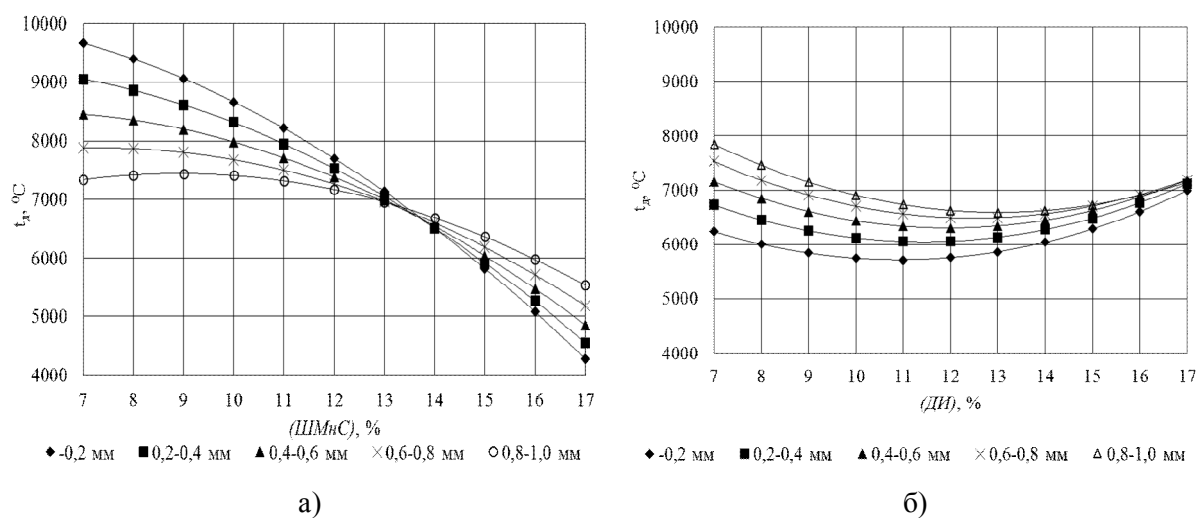


Рисунок 5 Влияние состава ЭС на t_d : а — ШМnC; б — ДИ

Таблица 8

Уравнения регрессии, описывающие влияние состава ЭС на t_d

Количество добавки в ЭС, %	Уравнение регрессии	
	ШМnC	ДИ
-0,2 мм	$t_d = -29,103 \cdot (\text{ШМnC})^2 + 158,84 \cdot (\text{ШМnC}) + 9988,3$	$t_d = 34,4 \cdot (\text{ДИ})^2 - 750,7 \cdot (\text{ДИ}) + 9810,6$
0,2÷0,4 мм	$t_d = -29,103 \cdot (\text{ШМnC})^2 + 248,77 \cdot (\text{ШМnC}) + 8735,1$	$t_d = 34,4 \cdot (\text{ДИ})^2 - 786,84 \cdot (\text{ДИ}) + 10551$
0,4÷0,6 мм	$t_d = -29,103 \cdot (\text{ШМnC})^2 + 338,71 \cdot (\text{ШМnC}) + 7507,9$	$t_d = 34,4 \cdot (\text{ДИ})^2 - 822,97 \cdot (\text{ДИ}) + 11233$
0,6÷0,8 мм	$t_d = -29,103 \cdot (\text{ШМnC})^2 + 428,64 \cdot (\text{ШМnC}) + 6306,7$	$t_d = 34,4 \cdot (\text{ДИ})^2 - 859,11 \cdot (\text{ДИ}) + 11856$
0,8÷1,0 мм	$t_d = -29,103 \cdot (\text{ШМnC})^2 + 518,58 \cdot (\text{ШМnC}) + 5131,6$	$t_d = 34,4 \cdot (\text{ДИ})^2 - 895,25 \cdot (\text{ДИ}) + 12419$

На основании полученных данных можно сделать вывод, что ДИ нецелесообразно использовать в качестве добавки для ЭС, а добавку мелких фракций ШМнС можно использовать лишь для обеспечения синхронного расходования всех элементов рудно-восстановительных блоков.

В ходе дальнейших исследований предполагается проанализировать влияние химического и фракционного состава ЭС на энергетические параметры процесса горения КЭ, их линейную и массовую скорости расходования.

Библиографический список

1. Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов [Текст] : монография / А. Н. Смирнов и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 320 с.
2. Воронько, М. И. Разработка методики для оценки влияния состава электродной смеси на её электропроводность [Текст] / М. И. Воронько, В. О. Десятников, М. Ю. Проценко // *Металлургия XXI столетия глазами молодых : материалы IV Международной научно-практической конференции молодых учёных и студентов*. — Донецк, 2018. — С. 39–42.
3. Проценко, М. Ю. Анализ температурных и энергетических параметров процесса дугового глубинного восстановления элементов [Текст] / М. Ю. Проценко, С. Б. Эссельбах, С. В. Куберский, В. С. Эссельбах, Е. В. Штепан // *Сб. науч. тр. ДонГТУ*. — Алчевск, 2010. — Вып. 32. — С. 261–270.
4. Куберский, С. В. Исследование влияния состава электродной смеси на её удельное электросопротивление [Текст] / С. В. Куберский, М. Ю. Проценко, М. И. Воронько, В. И. Проценко // *Сб. науч. тр. ДонГТУ*. — Алчевск, 2018. — № 10 (53). — С. 70–75.

© Куберский С. В.
© Проценко М. Ю.
© Воронько М. И.
© Проценко В. И.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М., зам. нач. ЦЛК филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» (ПАО «АМК») Тарасовым В. Н.

Статья поступила в редакцию 16.10.18

к.т.н. Куберский С. В., к.т.н. Проценко М. Ю., Воронько М. И., Проценко В. И. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

АНАЛІЗ ВПЛИВУ СКЛАДУ ЕЛЕКТРОДНОЇ СУМІШІ НА ТЕМПЕРАТУРУ СТОВПА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ

Досліджено вплив хімічного і фракційного складу электродної суміші комбінованого електроду, що використовується в рудно-відновлювальних блоках процесу дугового глибинного відновлення, на температуру стовпа електричної дуги. З використанням методу термометрування виконано аналіз впливу вмісту відвального шлаку від виробництва силікомарганцю і доломітизованого вапняку, а також їх крупності на температурний режим горіння електричної дуги. Показано, що введення добавок викликає зниження температури стовпа дуги, а великі її значення досягаються при зменшенні крупності частинок шлаку від виробництва силікомарганцю і збільшенні фракції використаного доломітизованого вапняку.

Ключові слова: позапічна обробка, дугове глибинне відновлення, комбінований електрод, електродна суміш, склад, крупність, шлак силікомарганцю, доломітизований вапняк, електрична дуга, температура стовпа дуги.

PhD Kubersky S. V., PhD Protsenko M. Yu., Voronko M. I., Protsenko V. I. (*DonSTU, Alchevsk, LPR*)

**ANALYSIS OF ELECTRODE MIXTURE COMPOSITION IMPACT
ON THE TEMPERATURE OF THE ELECTRIC ARC**

The influence of the chemical and fractional composition of the electrode mixture of the combined electrode used in the ore-reduction blocks of the arc depth reduction process on the temperature of the electric arc was investigated. Using the thermometry method the impact analysis has been made for waste slag content at the production of silicomanganese and dolomitic limestone, as well as their size on the temperature of the electric arc. It is shown that additives input cause the arc temperature fall, but its greater values are achieved with lessening the size of slag particles from the production of silicomanganese and increasing the fraction of used dolomitic limestone.

Key words: *after-treatment, arc deep recovery, combined electrode, electrode mixture, composition, grain size, silicomanganese slag, dolomitic limestone, electric arc, arc column temperature.*

**СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**

**БУДІВНИЦТВО
І АРХІТЕКТУРА**

**CIVIL ENGINEERING
AND ARCHITECTURE**

УДК 721.01

проф. Рогулин В. В.
(ЛНАУ, г. Луганск, ЛНР),
к.т.н. Николаева Е. К.,
Пушко Н. И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ПРОБЛЕМЫ ЦВЕТОВОГО РЕШЕНИЯ ФАСАДОВ ЗДАНИЙ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРОДОВ ДОНБАССА

Рассмотрены психологические аспекты полихромии фасадов городских зданий многоэтажной застройки и проблемы её создания.

Ключевые слова: *фасад, цвет, утеплитель, теплоизоляция, наружная стена, окружающая среда, паспорт цветовой гаммы.*

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Цвет архитектурной формы — это одно из важнейших объективных свойств материального объекта, и переоценить влияние цвета на психоэмоциональное состояние человека, наоборот, невозможно.

В медицине существует такое направление, как цветотерапия. Суть этой методики состоит в использовании цвета в качестве способа воздействия на психическое, эмоциональное и физическое состояние человека. Основа методики — разная длина волны у каждого цвета (длина 720 нм — красный, 400 нм — фиолетовый). Разная длина волны оказывает своё действие на человеческий организм, стимулируя отдельные участки головного мозга и гипофиз, который отвечает за выработку гормонов, регулирующих обмен веществ, сон, аппетит, половое влечение и эмоциональную стабильность. Поэтому мы являемся очень зависимыми от тех цветов, в окружении которых находимся. Если поместить на длительное время даже неисправимого оптимиста в комнату, в которой нет ни одной яркой детали, а присутствуют только серые и чёрные тона, его настроение неизбежно станет подавленным. Безусловно, каждый человек индивидуален. Но общие тенденции воздействия цвета выделить можно. Многочисленные

исследования психологического познания цвета, проверенные статически и с помощью клинического контроля, выявили следующие закономерности [1]:

- красный цвет стимулирует иммунитет, активизирует обмен веществ, улучшает кровообращение, усиливает выработку адреналина и настраивает оптимистически;

- зелёный цвет лечит заболевания сердца, снимает головную боль, стабилизирует кровяное давление и успокаивает нервы, охлаждает негативные эмоции, помогает принять определённое решение;

- жёлтый цвет стимулирует интеллектуальные способности человека, укрепляет память, полезен для кожи и нервной системы, улучшает зрение. Кроме того, он укрепляет нервную систему, избавляет от навязчивых мыслей, увеличивает чувство оптимизма и уверенности в своих силах;

- оранжевый цвет полезен при любых нарушениях желудочно-кишечного тракта, стимулирует щитовидную железу и лимфатическую систему, нормализует гормональный фон. В психоэмоциональном плане сила оранжевого цвета велика: он способен мобилизовать жизненные силы, вывести из депрессии и заставить вас сделать что-то невероятно сложное;

- фиолетовый цвет полезен при любых внутренних воспалениях, снимает резь в глазах, снижает болезненный аппетит.

Кроме того, вспышки фиолетового успокаивают расшатанные нервы;

– голубой цвет способен снизить кровяное давление и высокую температуру, останавливает развитие инфекции. Цвет неба примиряет нас с реальностью и помогает сохранить спокойствие в самых стрессовых ситуациях;

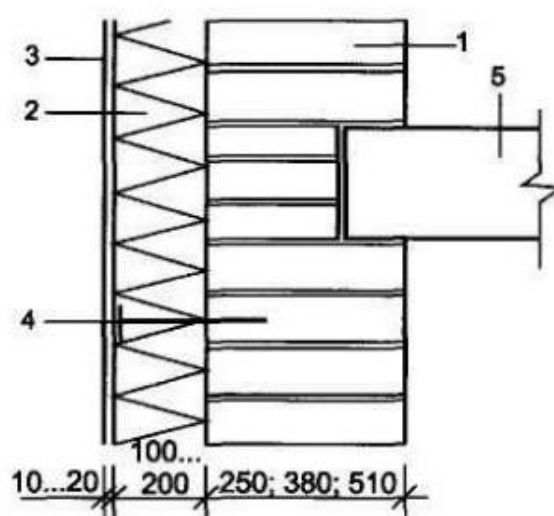
– розовый цвет бодрит, омолаживает, гасит агрессивность, вызывает ощущение неги, уюта и покоя: недаром хорошую жизнь называют розовой.

Безусловно, взаимодействие цвета и человека — процесс индивидуальный и неоднозначный. Так, при шизофрении и других психических заболеваниях возникают определённые особенности восприятия цвета, а некоторые люди и вовсе не ощущают цвет (цветовая слепота) или же воспринимают цвета искажённо (дальтонизм). Но в общем случае влияние цвета на физиологическое и психологическое состояние человека соответствует вышеприведенным данным. При этом, «язык» цвета межнационален, он не связан ни с расой, ни с культурой. И даже на животных оказывает похожее действие.

Постановка задачи. Понятно, что цвет интерьера влияет на небольшую группу людей, находящихся в данном помещении. А вот цветовое решение городских фасадов — это уже мощное психоэмоциональное «оружие» массового воздействия. Поэтому возникает вопрос: каким способом улучшить психоэмоциональное состояние жителей, используя различную цветовую гамму фасадов повседневно окружающих их зданий? Постановка такого вопроса становится более актуальной и своевременной с учётом другой проблемы, решаемой сейчас нашим государством, а именно — повышения энергоэффективности зданий прошлых лет постройки.

Изложение материала и его результаты. Одним из путей решения этой проблемы является улучшение теплоизоляционных характеристик наружных стен за счёт создания теплоизолирующего вентилируемого или неventилируемого слоя по фасадным поверхностям зданий.

В этом случае применяют жёсткий плитный утеплитель в сочетании с атмосферостойкой и прочной облицовкой (штукатурка, сайдинг, фасадный камень). Одним из примеров может служить тепловая изоляция жилых многоэтажных зданий путём устройства непронетриваемого фасада, который включает следующие слои: стена, утеплитель, крепёжный элемент, армирующий слой, грунующий и выравнивающий штукатурные слои, а затем отделочная известково-цементная штукатурка (рис. 1).



- 1 — кирпичная кладка; 2 — утеплитель;
3 — паропроницаемая штукатурка;
4 — дюбель; 5 — плита перекрытия

Рисунок 1 Кирпичная стена с наружной оштукатуренной теплоизоляцией

Цветовая гамма отделочной штукатурки имеет широкий спектр. Это и уже готовые смеси с определёнными оттенками, и растворы, которые самостоятельно окрашиваются колерами в процессе замешивания. Однако создание и эксплуатация цветных фасадов на улицах промышленно развитых городов Донбасса сталкивается с проблемой загрязнения их воздушного бассейна выбросами многочисленных предприятий.

В таблице 1 приведены некоторые виды этих выбросов и их количество на примере Луганской Народной Республики.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

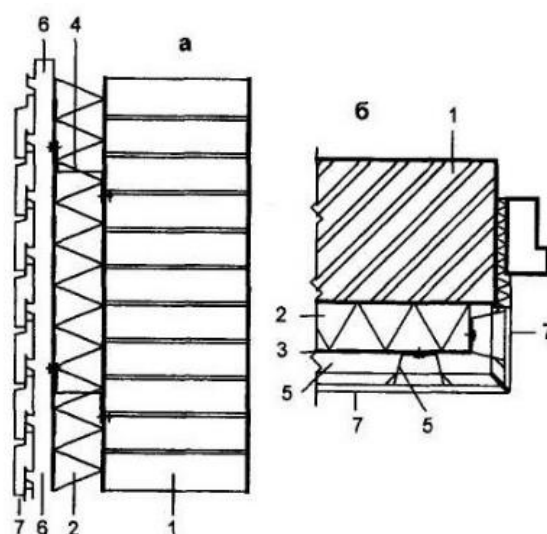
Таблица 1
Структура выбросов загрязняющих веществ
в воздушный бассейн ЛНР

Название загрязняющих веществ	Объёмы выбросов	
	тыс. тонн/год	в % к итогу
оксиды углерода	39,0	28,5
серы диоксид	34,5	25,2
метан	33,1	24,2
твёрдые частицы	18,6	13,6

В отдельных регионах поступления вредных веществ в атмосферу значительно превысили средние показатели по области. В частности, в городе Алчевске плотность выбросов в расчёте на 1 кв. км была большей в 101,0 раза, на душу населения — в 3,8 раза.

Вышеперечисленные антропогенные компоненты воздушного пространства, оседая на белоснежной, нежно-розовой или лимонной поверхностях фасадов зданий, превращают их в неопытно грязные. В данном случае возможно два варианта решения этой проблемы. Точнее, три, но качественная работа очистительных установок промышленных предприятий не является темой данной статьи. А вот с использованием строительных подходов проблема может быть решена либо применением легко моющихся защитных панелей (рис. 2), либо выбором материала с такой цветовой гаммой, которая не изменялась бы от негативного воздействия загрязнённого наружного воздуха.

Первый вариант довольно трудо- и материально затратный как на стадии строительства, так и в период эксплуатации: регулярную очистку наружных поверхностей стен могут позволить себе разве что торгово-развлекательные центры или офисные здания крупных компаний со значительным оборотом капитала. А среднестатистические жители многоквартирных промышленных городов вынуждены выбирать второй вариант — поквартирное («лоскутное») утепление, выполняемое обычно в сером цвете (рис. 3).



а — вертикальное сечение; б — горизонтальное сечение у оконного проёма; 1 — кладка; 2 — утеплитель; 3 — гидроветрозащита; 4 — ригель подобицовой конструкции; 5 — вертикальный элемент подобицовой конструкции; 6 — воздушная прослойка; 7 — облицовочный камень

Рисунок 2 Кирпичная вентилируемая стена с навесной фасадной облицовкой



Рисунок 3 «Лоскутное» утепление
в г. Алчевске

Какую же эмоциональную нагрузку на психику горожан даёт серый цвет? В литературе, посвящённой психологической характеристике цветов [3], даётся такое его описание: «Серый — бесцветен, ни светлый, ни тёмный и абсолютно лишён каких-либо стимулирующих тенденций. Он нейтрален, он не субъект и не объект, ни внутренний и ни внешний, ни напряжение и ни расслабление. Это не оккупированная территория, а пограничный район, ничейная земля, «демилитаризованная зона», «железный занавес». Каждый, кто ставит его на первое место, хочет от всего отгородиться стеной, оставаясь свободным от каких-либо обязательств и ни в чём не принимать участия».

В. Кандинский называет серый «безутешной неподвижностью». Особенно это касается тёмно-серого цвета, который действует более безутешно и удушающе.

Есть мнение, что существует «50 оттенков серого»: стальной, сизый, серебристый, свинцовый, угольный, антрацитовый, фельдграу, грифельный, гейнсборо, муссон, каменный, голубиный, циркон, французский и др. Но ведь для фасадов зданий выбирают не гриндеперлевый оттенок благородного жемчужного серого, а в большинстве случаев асфальтово-серый, «мышинный», тёмно-серый и сине-серый. В результате и так невзрачные фасады приобретают неприглядный, и даже мрачный вид.

Что же делать в ожидании современных технологий, обеспечивающих чистоту воздуха и окружающей среды? Используя принципы и подходы цветотерапии, и при невозможности создания иного цветового решения серый цвет можно и нужно комбинировать с другими, более «оптимистичными» цветами, создавая гармоничные цветовые композиции с необходимым психоэмоциональным эффектом. Психологический комфорт и экономическая целесообразность возможны только при выполнении двух условий. Во-первых, поверхность дополнительного цвета должна занимать небольшую площадь и легко поддаваться очищению. Во-вторых, цветовая пара долж-

на вызывать у большинства горожан положительные психоэмоциональные реакции.

По нашему мнению, достаточно эффективно эти условия выполняет сочетание «лоскутного» утепления и пластиковых окон, цветовая гамма которых включает не только традиционные белые и коричневые варианты.

Этот вопрос волновал и привлекал многих исследователей, таких как Леонардо да Винчи, Ньютон, Гёте, Эйзенштейн и другие. Так, Цойгнер приводит следующие варианты эмоционального восприятия цветовых сочетаний (табл. 2). Конечно, эта информация носит спорный характер, однако вызывает определённый интерес.

Таблица 2

Эмоциональное воздействие различных цветовых пар по Цойгнеру

Цветовое сочетание	Воздействие, восприятие, ощущение
Жёлтый и оранжево-красный	активизирующее, тёплое, жизнерадостное
Жёлтый и пурпурно-красный	парадное
Жёлтый и желтовато-зелёный	освежающее и жизнерадостное
Жёлтый и синевато-зелёный	холодное и успокаивающее
Жёлтый и чёрный	чёрный на жёлтом — суровое
Жёлтый и белый	вялое, слабое
Красный и фиолетовый	неспокойное
Красный и синий	динамичное
Красный и жёлто-зелёный	жизнеутверждающее
Красный и чёрный	активизирующее
Красный и белый	угнетающее
Красный и серый	тёплое, приятное

А вот Гёте в своём «Трактате о цвете» выделяет «характерные» и «нехарактерные» цветовые сочетания [2]. По его мнению, эти цветовые сочетания вызывают определённые душевные впечатления. При

этом Гёте не приемлет «нехарактерные» сочетания двух цветов, расположенных рядом на его цветовом круге. Так, жёлтый с зелёным он называет «пошло веселым», а синий с зелёным — «пошло противным».

Что касается цветовых сочетаний серого цвета, то здесь действуют следующие правила [3]:

- тёмно-серый цвет будет хорошо «звучать» в паре с бежевым, алым, голубым и синим;

- серо-голубой хорошо сочетается с бежевым, фиолетовым, розовым, омарово-красным, бирюзовым, синим и с майской зеленью;

- светло-серый сочетается с персиковым, абрикосовым, карамельным, ванильным, коралловым и лососёвым.

Цветовые вариации с серым цветом оказывают следующие воздействия на эмоциональное состояние человека:

- серый цвет в сочетании с фиолетовым или лиловым создаёт умиротворяющую обстановку;

- сочетание серого и голубого цветов помогает расслабиться и окунуться в атмосферу умиротворения;

- успокаивающую обстановку создают оттенки серого «циркон» с васильковым цветом;

- сочетание серого и красного цвета оказывает приятное, тёплое влияние.

Выводы. Исходя из изложенного, при разработке проектов реконструкции существующих зданий, с целью обеспечения современных нормативных теплопотерь через их наружные стены, необходимо включать в состав проекта паспорт цветовой гаммы новой фасадной поверхности. Также необходимо указывать материалы и описывать технологию создания такой поверхности.

Интерес представляет и учёт цветовой палитры ПВХ-окон для нейтрализации негативного влияния больших серых поверхностей лоскутного утепления.

Библиографический список

1. Базыма, Б. А. Цвет и психика. [Текст] : монография / Б. А. Базыма. — Х. : ХГАК, 2001. — 172 с.
2. Гёте, И. В. Трактат о цвете. Избранные сочинения по естествознанию [Текст] / И. В. Гёте. — М. : Изд-во АН СССР, 1957. — 553 с.
3. Магия цвета [Текст]. — Харьков : АО «Сфера», «Сварог», 1996. — 432 с.

© Рогулин В. В.

© Николаева Е. К.

© Пушко Н. И.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. сопротивления материалов и инженерной и компьютерной графики ГОУ ЛНР ЛНАУ Бурцевым Г. Г., к.т.н., доц., и. о. зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В.

Статья поступила в редакцию 07.09.18.

проф. Рогулін В. В. (ЛНАУ, м. Луганськ, ЛНР), **к.т.н. Ніколаєва О. К., Пушко М. І.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ПРОБЛЕМИ КОЛІРНОГО РІШЕННЯ ФАСАДІВ БУДІВЕЛЬ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ МІСТ ДОНБАСУ

Розглянуто психологічні аспекти поліхромії фасадів міських будівель багатопверхової забудови та проблеми її створення.

Ключові слова: фасад, колір, утеплювач, теплоізоляція, зовнішня стіна, навколишнє середовище, паспорт колірної гамми.

PhD, Prof. Rogulin V. V. (LNAU, Lugansk, LPR), **PhD Nikolaieva Ye. K., Pushko N. I.** (DonSTU, Alchevsk, LPR)

PROBLEMS OF FACADE COLORS CHOICE FOR THE BUILDINGS IN THE INDUSTRIAL TOWNS OF DONBASS

There have been studied the psychological aspects of polychromy of town multistorey building facades and its development problems.

Key words: *facade, color, insulant, thermal insulation, outer wall, surroundings, sheet of color range.*

УДК 624.015.5-69

к.т.н. Балашова О. С.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ИНЖЕНЕРНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Предложена инженерная методика учёта влияния остаточного напряжённого состояния и неупругих свойств стали на несущую способность сварных элементов путём увеличения или уменьшения расчётного сопротивления стали с помощью коэффициента, позволяющего оценить степень влияния остаточных напряжений. Учёт неупругих свойств стали регулируется коэффициентом продольного изгиба, который зависит от расчётного сопротивления стали, гибкости, эксцентриситета приложения нагрузки, формы поперечного сечения.

Ключевые слова: несущая способность, сварные конструкции, остаточные напряжения, неупругая работа материала, остаточное напряжённое состояние, коэффициент продольного изгиба.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Как известно, все металлы при нагревании расширяются, а при охлаждении сжимаются. В процессе сварки, в результате местного нагрева металла и его последующего охлаждения, в сварном соединении происходит непрерывное изменение температурных деформаций и напряжений, причём в отдельных зонах сварного соединения возможно развитие необратимых объёмных изменений, которые и являются причиной возникновения послесварочных — остаточных напряжений (ОН). Эти напряжения не связаны с действием внешних сил, являются внутренними напряжениями первого рода, которые уравниваются в объёме элемента и вызывают его деформацию [1].

Остаточные напряжения отрицательно сказываются на несущей способности, размерной стабильности сварных конструкций. Они могут привести к снижению работоспособности сварных конструкций, так как изменение формы изделия и отдельных её элементов приводит, как правило, к перераспределению сил от рабочих нагрузок в элементах и к дополнительному нагружению сварного соединения, часто не предусмотренному в расчётах. Поэтому исследование, учёт влияния, регулирование ОН — важная задача как при проектировании сварных конструкций, так и при технологии сварки.

На основании многочисленных исследований [1–3] было отмечено, что остаточные растягивающие напряжения (ОРН), наряду с другими факторами, интенсифицируют в сварных соединениях процессы хрупкого, усталостного и коррозионного разрушения, а остаточные сжимающие напряжения (ОСН), сосредоточенные по кромкам поясов двутавровых элементов, приводят к раннему образованию пластических зон в этих частях сечения и, вследствие удалённости их от осей симметрии, снижению несущей способности.

В связи с этим возникает необходимость создавать такие методы расчёта, которые позволили бы определить величины ОН в телах после всех процессов изготовления, учесть наличие ОНС при расчётах элементов с целью снижения вероятности аварий.

Постановка задачи. Разработка инженерной методики расчёта сжатых сварных элементов с учётом влияния остаточного напряжённого состояния (ОНС) и неупругих свойств стали путём увеличения или уменьшения расчётного сопротивления стали с помощью коэффициентов, позволяющих оценить степень влияния остаточных напряжений.

Изложение материала и его результаты. В соответствии с требованиями действующих нормативных документов [8], расчёт на прочность сжато-изгибаемых

элементов по формуле (49) выполнять не требуется при значении приведённого эксцентриситета $m_{ef} \leq 20$, отсутствии ослабления сечения и одинаковых значениях изгибающих моментов, принимаемых в расчётах на прочность и устойчивость.

Расчёт на устойчивость сжато-изгибаемых элементов выполняется как в плоскости действия момента (плоская форма потери устойчивости), так и из плоскости (изгибно-крутильная форма потери устойчивости).

Расчёт на устойчивость сжато-изгибаемых элементов постоянного сечения в плоскости действия момента, совпадающей с плоскостью симметрии, выполняется по формуле

$$\frac{P}{\varphi_e \cdot A} \leq R_y \cdot \gamma_c. \quad (1)$$

Здесь коэффициент φ_e для сплошностенчатых элементов определяется по таблице 74 [8] в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda}$ и приведённого относительного эксцентриситета m_{ef} ($m = e \cdot A / W_c$ — относительный эксцентриситет; e — эксцентриситет; A — площадь сечения; W_c — момент сопротивления сечения для наиболее сжатого волокна). При этом в нормах проектирования стальных конструкций [8] методика определения коэффициента продольного изгиба не учитывает наличие ОНС.

Сжатые элементы, изгибаемые в плоскости наименьшей жёсткости ($I_y < I_x$ и $e_y \neq 0$), при гибкостях $\lambda_x > \lambda_y$ рассчитываются по формуле (1), а также проверяются на устойчивость из плоскости действия момента, как центрально-сжатые элементы, по формуле

$$\frac{P}{\varphi_x \cdot A} \leq R_y \cdot \gamma_c, \quad (2)$$

где φ_x — коэффициент, принимаемый согласно требованию п. 5.3 [2]. При гибкостях $\lambda_x \leq \lambda_y$ проверку устойчивости из плоскости действия момента выполнять не требуется.

Таким образом, в действующих нормативных документах [7, 8] серьёзных предложений по учёту влияния ОНС не имеется. В [7] даны предложения по учёту влияния ОНС при расчётах на устойчивость элементов из прокатных и сварных двутавров путём введения понижающих коэффициентов продольного изгиба, но при этом отсутствует методика определения ОНС. Методики расчёта сжатых элементов коробчатого сечения с учётом влияния ОНС отсутствуют.

В отличие от традиционного способа учёта ОНС путём уменьшения или увеличения коэффициента продольного изгиба [7] в данной работе принят иной подход, позволяющий учитывать влияние вида ОНС путём введения дополнительного коэффициента условий работы $\beta_{f,rs}$, а влияние неупругих свойств стали — коэффициентом продольного изгиба φ_{pl} , зависящим от формы поперечного сечения.

Тогда, с учётом выше приведённых коэффициентов, несущую способность сжатых сварных элементов, подверженных осевому сжатию с изгибом, с учётом влияния остаточных напряжений и неупругих свойств стали предлагается оценивать по формуле

$$\sigma_f = \frac{N}{\varphi_{pl} \cdot A} \leq \gamma_c \cdot \beta_{f,rs} \cdot R_y^f, \quad (3)$$

где σ_f — напряжения на кромках сечений; $\beta_{f,rs}$ — коэффициент, учитывающий наличие и вид ОН в поясах и, соответственно, возможность более раннего или позднего перехода материала поясов в пластическое состояние; φ_{pl} — коэффициент продольного изгиба; R_y^f — расчётное сопротивление стали поясов; A — площадь поперечного сечения; γ_c — коэффициент условий работы.

В формуле (3) численное значение дополнительного коэффициента $\beta_{f,rs}$, учитывающего влияние ОНС, предлагается определять по формуле

$$\beta_{f,rs} = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{str(com)}^{(f)'} (\sigma_{res,str}^{(f)})}{R_y^f}}, \quad (4)$$

где $\sigma_{str(com)}^{(f)'}$ — растягивающие (сжимающие) напряжения на кромках поясов (ОРН принимаются со знаком «плюс», ОСН — со знаком «минус»), определяемые по методике [1]; $\sigma_{res,str}^{(f)}$ — растягивающие напряжения в поясах при предварительном напряжении вытяжкой поясов способом упреждающего разогрева [5].

Влияние неупругих свойств металла в формуле (3) учтено коэффициентом продольного изгиба φ_{pl} [4]. В общем виде формулу для вычисления коэффициента продольного изгиба для интервала величин гибкости $20 \leq \lambda \leq 120$, расчётных сопротивлений стали $205 \leq R_y \leq 410$ МПа и относительных эксцентриситетов $0,272 \leq m \leq 2,7$ можно записать в виде

$$\varphi_{pl} = \varphi_{el} \cdot \gamma_{pl}, \quad (5)$$

где φ_{el} — коэффициент продольного изгиба для такого состояния сжатого элемента, при котором в наиболее напряжённом сечении напряжения не превышают предела упругой работы стали; γ_{pl} — коэффициент, учитывающий развитие пластических деформаций (его величина зависит от формы поперечного сечения).

Для получения зависимостей коэффициентов φ_{el} и γ_{pl} был проведён математический эксперимент. В ходе последовательной аппроксимации результатов математического эксперимента методом наименьших квадратов получены зависимости, позволяющие перейти от недеформированной расчётной схемы к деформированной при выполнении инженерных расчётов несущей способности стальных элементов, подверженных осевому сжатию с изгибом, что позволяет получить результат с более высокой точностью. Формулы для

вычисления коэффициентов приведены в источнике [4].

Вышеизложенную методику проиллюстрируем примером.

При изменении строительных условий привязки проекта одноэтажного каркасного здания [6] к другой климатической зоне стал вопрос о выполнении поверочных расчётов несущей способности каркаса запроектированного здания. Поверочные расчёты металлических конструкций заключались в определении усилий, действующих в несущих элементах каркаса здания. Все несущие элементы поперечных рам запроектированы из сварных двутавровых профилей переменного сечения. Соединения колонн поперечных рам с фундаментами, а также ригелей с колоннами жёсткие.

Для оценки влияния ОН на несущую способность колонн, подверженных осевому сжатию с изгибом, и обоснования возможности применения в проекте конструкций, в частности сварных двутавровых колонн, без изменения их размеров, формы и ОНС был выполнен расчёт каркаса здания по определению усилий, действующих в несущих элементах каркаса.

С целью определения напряжённо-деформированного состояния, возникающего в строительных конструкциях каркаса, предварительно выполнен расчёт каркаса с использованием программного комплекса «Lira-Windows», в основу которого положен МКЭ в перемещениях. Конечно-элементная модель каркаса разработана в линейной постановке. Прогоны смоделированы КЭ типа 10 «Универсальный пространственный стержневой конечный элемент» соответствующих размеров. Колонны и ригели смоделированы плоскими оболочечными КЭ типа 41 «Четырёхугольный элемент оболочки» соответствующей толщины (по проекту 10 мм). Компьютерная модель каркаса состоит из 81648 конечных элементов и 79863 узлов. Общий вид модели приведён на рисунке 1. На рисунке 2 представлен фрагмент компьютерной модели колонн, подстропильных балок, ригелей поперечных рам и прогонов.

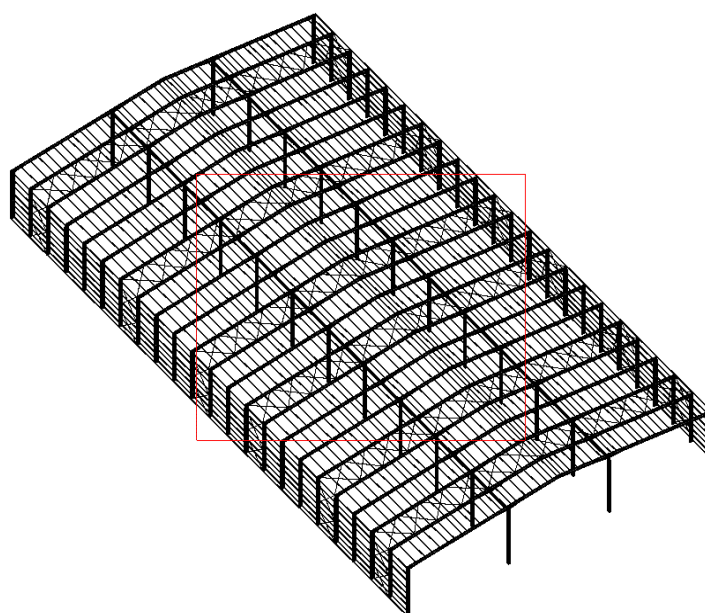


Рисунок 1 Общий вид компьютерной модели каркаса

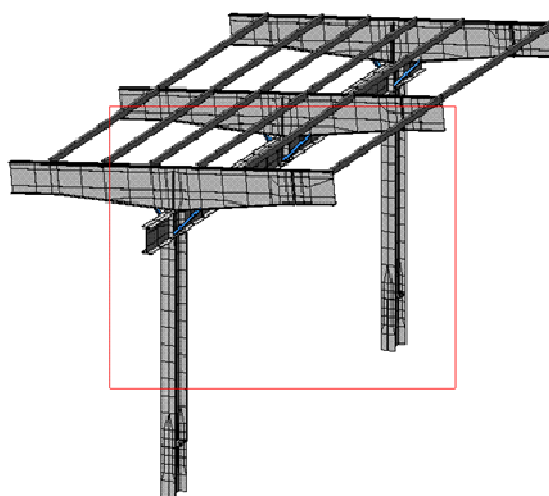


Рисунок 2 Фрагмент компьютерной модели колонн, подстропильных балок, ригелей поперечных рам и прогонов

По результатам выполненных расчётов была установлена величина фактических нагрузок на несущие конструкции, в частности, максимальные усилия в опорных узлах колон среднего ряда (рис. 2) при действии ветровой и снеговой нагрузки в соответствии с изменёнными климатическими условиями: $N=940,5$ кН; изгибающий момент в плоскости поперечных рам $M_y=-16,65$ кНм; изгибающий момент из плоскости попереч-

ных рам $M_z=16,92$ кНм. Для наружных колонн усилия превышают ограничения ($0,272 \leq m \leq 2,72$).

Сечение колонны среднего ряда представлено на рисунке 3.

Величина эксцентриситета приложения нагрузки из плоскости рамы

$$e_{\max} = \frac{M_{\max}}{N_{\max}} = \frac{16,92}{940,5} = 0,018 \text{ м.}$$

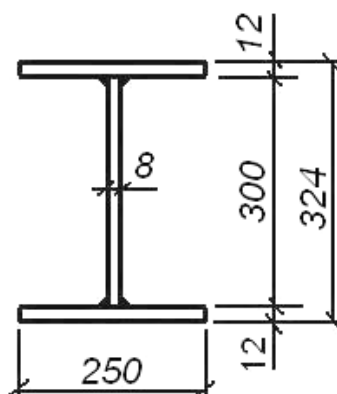


Рисунок 3 Сечение колонны среднего ряда

Геометрические параметры сечения: площадь поперечного сечения $A=84 \text{ см}^2$; момент инерции сечения $I=3125 \text{ см}^4$; момент сопротивления сечения для наиболее сжатого волокна $W=250 \text{ см}^3$; радиус инерции сечения $i=6,1 \text{ см}$; гибкость сжатого элемента $\lambda = \frac{\mu \cdot L}{i} = \frac{0,5 \cdot 1420}{6,1} = 116,4$.

Относительные параметры: относительное расчётное сопротивление стали $\bar{R} = 0,915$; относительная гибкость элемента $\bar{\lambda} = 1,164$; относительный эксцентриситет $m = \frac{e_{\max} A}{W} = 1,8 \cdot 84 / 250 = 0,605$.

Коэффициент продольного изгиба определён по формуле (1) источника [4]: $\varphi_{el} = 0,3024$. Коэффициент, учитывающий развитие пластических деформаций, определён по формуле (4) источника [4]: $\gamma_{pl} = 1,016$. Коэффициент продольного изгиба с учётом развития пластических деформаций определён по формуле (11) источника [4]: $\varphi_{pl} = 0,307$.

Вычислим значение коэффициента $\beta_{f,rs}$ по формуле (4):

$$\beta_{f,rs} = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{com}^{(f)}}{R_y^f}} = \sqrt{1 + \frac{-66,8}{375}} = 0,907.$$

Тогда несущая способность колонны с учётом влияния ОНС проверяется по формуле

$$N = 940,50 \text{ кН} \leq \gamma_c \cdot \beta_{f,rs} \cdot \phi_{pl} \cdot R_y^f \cdot A,$$

$$N = 1 \cdot 0,907 \cdot 0,307 \cdot 37,50 \cdot 84 = 877,11 \text{ кН}.$$

Условие не выполняется, значит, несущая способность колонн среднего ряда не обеспечена.

Проверим несущую способность колонны без учёта влияния ОНС, то есть принимаем коэффициент $\beta_{f,rs} = 1$:

$$N = 940,50 \text{ кН} \leq \gamma_c \cdot \beta_{f,rs} \cdot \phi_{pl} \cdot R_y^f \cdot A,$$

$$N = 1 \cdot 1 \cdot 0,307 \cdot 37,50 \cdot 84 = 967,05 \text{ кН}.$$

В этом случае условие выполняется.

Таким образом, недооценка влияния ОНС при расчётах строительных конструкций может привести к преждевременному отказу. В действующих нормативных документах влияние ОНС на работу конструкций игнорируется.

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Остаточные напряжения отрицательно сказываются на несущей способности, размерной стабильности сварных конструкций.

2. Оценка влияния ОНС и неупругих свойств стали на несущую способность сжатых элементов обычно проводится путём увеличения или уменьшения коэффициента продольного изгиба, но при этом не учитывается методика определения ОНС. При таком подходе учёт степени влияния ОНС на величину коэффициента продоль-

ного изгиба, как правило, основывается на данных экспериментальных исследований.

3. Разработанная инженерная методика оценки влияния нелинейной работы материала и ОНС на несущую способность сжатых элементов даёт возможность определять величины коэффициента продоль-

ного изгиба и условий работы с учётом ОНС и нелинейных свойств стали. Данная методика позволяет путём несложных расчётов 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 [Текст] / А. И. Голоднов. — К. : Сталь, 2008. — 150 с.
2. Винокуров, В. А. Теория сварочных деформаций и напряжений [Текст] / В. А. Винокуров, А. Г. Григорьянц. — М. : Изд-во «Машиностроение», 1984. — 280 с.
3. Николаев, Г. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций [Текст] : учеб. пособие / Г. А. Николаев, С. А. Куркин, В. А. Винокуров. — М. : Изд-во «Высш. школа», 1982. — 272 с.
4. Балашова, О. С. Несущая способность сжатых сварных элементов при наличии остаточного напряжённого состояния [Текст] / О. С. Балашова, А. И. Голоднов // Сб. науч. тр. ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — Вып. 34. — С. 187–198.
5. Балашова, О. С. К расчёту сжатых сварных элементов различного сечения [Текст] / О. С. Балашова // Сб. науч. тр. ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2010. — Вып. 30. — С. 241–248.
6. Проектная документация job № W1-C729 «MIRGOROD» / Design Calculations Ver 99.11 ZS Building 01, Dated 24/08/06. — К. : Industrial Building Technologies LTD, 2006. — 249 с.
7. Правила проектирования. Споруди транспорту. Мости та труби. [Текст] : ДБН В.2.3-14 : утв. М-вом строительства, архитектуры и жилищно-коммунального хозяйства (Минстрой Украины) 06.05.2006. — Введ. 2007–02–01. — К. : Мінбуд України, 2006. — 359 с.
8. Стальные конструкции [Текст] : СНиП II-23-81*: утв. постановлением Госстроя СССР 14.08.1981 № 144. — М. : ЦИТП Госстроя СССР, 1990. — 96 с.

© Балашова О. С.

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В.,
к.т.н., проф., зав. каф. ЗСАиГ ГОУ ЛНР «ЛНАУ» Рогулиным В. В.

Статья поступила в редакцию 21.09.18.

к.т.н. Балашова О. С. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ІНЖЕНЕРНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗВАРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ

Запропоновано інженерну методику врахування впливу залишкового напруженого стану та непружних властивостей сталі на несучу здатність зварних елементів шляхом збільшення або зменшення розрахункового опору сталі за допомогою коефіцієнта, який дозволяє оцінити ступінь впливу залишкових напружень. Вплив непружних властивостей сталі регулюється коефіцієнтом подовжнього вигину в залежності від розрахункового опору сталі, гнучкості, ексцентриситету прикладення навантаження, форми поперечного перерізу.

Ключові слова: несуча здатність, зварні конструкції, залишкові напруження, непружна робота матеріалу, залишковий напружений стан, коефіцієнт подовжнього вигину.

PhD Balashova O. S. (*DonSTU, Alchevsk, LPR*)

ENGINEERING APPROACH TO DETERMINING THE BEARING CAPACITY OF WELDED ELEMENTS WITH REGARD TO THE RESIDUAL STRESS

An engineering technique has been proposed for regarding the influence of the residual stress state and inelastic properties of steel on the bearing capacity of welded elements by increasing or decreasing the design resistance of steel using a coefficient to estimate the degree of influence of residual stresses. Accounting for the inelastic properties of steel is controlled by the buckling index, which depends on the design resistance of the steel, flexibility, eccentricity of the applied load, and cross-sectional shape.

Key words: bearing capacity, welded structures, residual stresses, inelastic material operation, residual stress state, buckling index.

УДК 556.048

к.т.н., проф. Рогулин В. В.,
Берега А. С.
(ЛНАУ, Луганск, ЛНР)

МЕТОДЫ ПРИВЕДЕНИЯ РЯДОВ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИХ ПАРАМЕТРОВ К МНОГОЛЕТНЕМУ ПЕРИОДУ С УЧЁТОМ НАБЛЮДЕНИЙ МЕНЕЕ 6 ЛЕТ

Проведено сравнение методов определения гидрологических характеристик и приведения их к многолетнему периоду. Определены ситуации для каждого метода, в которых их применение наиболее целесообразно.

Ключевые слова: гидрометеорологические изыскания, водомерный пост, пункты-аналоги, средняя квадратическая погрешность, кратковременные наблюдения, коэффициент вариации.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Расчёт гидрологических характеристик имеет важное научное и практическое значение, являясь необходимым разделом (в составе инженерно-гидрометеорологических изысканий) при проектировании любых видов хозяйственной деятельности в пределах долин рек и временных водотоков. Гидрологические характеристики представляют собой количественные оценки элементов гидрологического режима (годовой и сезонный сток, максимальные расходы воды, стои стока весеннего половодья, минимальные расходы за периоды летне-осенней и зимней межени). В частности, определение количественных параметров водного режима требуется при проектировании переходов линейных объектов (дорог, трубопроводов, кабелей ВОЛС, линий ЛЭП и т. д.) через водные преграды, оценке площадей затоплений территории, расчётах интенсивности русловых деформаций. Вместе с тем определение гидрологических характеристик на участках рек, не освещённых данными наблюдений, является задачей, требующей наличия большого перечня исходных данных. Следовательно, очень важным является использование инженером-гидрологом наиболее надёжных методов расчёта гидрологических характеристик [2].

Постановка задачи. Задачей научной статьи является рассмотрение и сравнение

3-х основных методов гидрологических расчётов: метода отношений, метода уравнений регрессии и графического метода.

Метод отношений и графический метод учёта материалов кратковременных полевых гидрометеорологических изысканий предусматривают предварительное приведение к многолетнему периоду параметров и квантилей распределения речного стока исследуемого района (стационарные пункты наблюдений) [1].

Изложение материала и его результаты. *Метод отношений.* Восстановление значений стока за каждый год, а также приведение нормы и квантилей распределения к многолетнему периоду допускается осуществлять по методу отношений, основанному на приблизительном равенстве модульных коэффициентов в пункте с кратковременными наблюдениями и в пунктах-аналогах.

Метод отношений используется при выполнении условия $R \geq R_{кр}$, где R определяется по пространственной корреляционной функции или матрице парных коэффициентов корреляции по данным пунктов-аналогов. Пункты-аналоги обычно выбираются по наименьшему расстоянию между центрами тяжести водосборов проектируемого пункта и пунктов-аналогов. Число привлекаемых в расчётах аналогов определяется как степень гидрологической изученности, так и пространственной

однородностью рассматриваемой гидрологической характеристики. Установлено, что случайные средние квадратические (стандартные) погрешности уменьшаются лишь до трёх аналогов. При наличии нескольких аналогов расчёты осуществляются последовательно по всем аналогам, и результаты осредняются с учётом случайных средних квадратических погрешностей, полученных на независимом от расчёта материале наблюдений.

Средняя квадратическая погрешность расчёта значений стока за каждый год, нормы стока и квантилей распределения определяется по пунктам-аналогам. Для этой цели выбираются два пункта с гидрометрическими наблюдениями в однородном гидрологическом районе проектирования, один из которых условно принимается в качестве исследуемого пункта, а другой — в качестве пункта-аналога. Расчётное значение стока определяется столько раз, сколько имеется наблюдений в створе, принимаемом за исследуемый. В дальнейшем определяется средняя квадратическая погрешность определения годового значения или нормы стока или квантилей распределения по данным одного года наблюдений. В случае, когда рассчитаны стандартные погрешности гидрологических характеристик по данным за один год, при увеличении продолжительности наблюдений рассчитываются стандартные погрешности в первом приближении. Это наиболее типичный случай расчётов, т. к. получить стандартные погрешности методом отношений возможно лишь на независимом от расчёта материале наблюдений применительно к двум пунктам с регулярными и достаточно продолжительными наблюдениями в однородном гидрологическом районе исследования. На основании выполненных расчётов может быть рассчитано необходимое число лет наблюдений по заданной стандартной погрешности расчётной гидрологической характеристики. Полученное число лет может быть использовано при определении

числа лет полевых гидрометеорологических изысканий [4].

Метод уравнений регрессии. Методика восстановления значений стока по уравнениям регрессии состоит в следующем. В случае, когда имеется один год кратковременных наблюдений, рассчитываются уравнения регрессии между наблюдениями за этот год и последовательно со всеми остальными годами, в которых имеются наблюдения в пунктах-аналогах, при условии, что количество пунктов-аналогов должно быть не менее 5. Наиболее эффективным методом, дающим наиболее качественные результаты приведения данных наблюдений к более длительному периоду, является метод расчёта, основанный на пространственных годовичных уравнениях по данным наблюдений в однородном районе.

Методически задача решается следующим образом. При увеличении числа аналогов увеличивается надёжность и точность уравнений регрессии, что приводит к более точным результатам расчёта в исследуемом пункте. Но в этом случае уменьшается число восстановленных лет наблюдений. Обратная картина получается при уменьшении числа принятых в расчёт аналогов. Оптимальное число аналогов, задаваемых при расчёте уравнений регрессии, зависит от гидрологической изученности района исследования и пространственной связанности рассматриваемой гидрологической характеристики. Так, при слабой гидрологической изученности число аналогов, принимаемых в расчёт, может быть уменьшено, а при хорошо изученном в гидрологическом отношении районе исследования число аналогов может быть увеличено. Для дождевого стока, имеющего, как правило, слабую пространственную связанность, число пунктов может быть уменьшено по сравнению с другими гидрологическими характеристиками, имеющими большую пространственную связанность. Следовательно, при назначении наименьшего числа аналогов, которые будут использованы в дальнейших расчётах, необходимо учитывать приведённые сооб-

ражения. При этом возможны и другие гидрологические аспекты, поясняющие назначение наименьшего числа аналогов в регрессионном методе, зависящие от многих факторов, включая региональные особенности рассматриваемого района исследования.

В однородном гидрологическом районе проводятся стационарные гидрометрические наблюдения за изучаемой характеристикой x , а также имеются кратковременные наблюдения y в исследуемом пункте. Наблюдения в расчётном створе могут быть в различном временном интервале от $i=1$ до $i=n$, но, как правило, изыскания проводятся в последние годы к моменту проектирования. Индексация при значениях единая для всех постов: первый индекс обозначает годы наблюдений от $i=1$ до $i=n$, второй индекс — номер гидрометрического стационарного створа наблюдений от $j=1$ до $j=k$, расчётный створ имеет индекс $(k+1)$. Число лет наблюдений в расчётном створе L всегда меньше, чем в стационарных гидрометрических створах. Требуется восстановить сток в расчётном створе за годы, наблюдения по которым имеются в пунктах-аналогах. Для стационарных гидрометрических пунктов для каждого года наблюдений от $i=1$ до $i=n-L-1$ рассчитываются уравнения регрессии.

Восстановленные по уравнениям регрессии значения стока имеют заниженную дисперсию многолетних колебаний, что для инженерных гидрологических расчётов недопустимо, так как при этом занижается расчётное значение рассматриваемой гидрологической характеристики для зоны малых обеспеченностей (различные характеристики максимального стока и уровней воды) и завышается для зоны больших обеспеченностей (различные характеристики минимального стока, стока летней и зимней межени). Исключение систематических погрешностей в оценке коэффициента вариации и стандартного отклонения осуществляется путём перехода от уравнения регрессии к так называемому единому решению, когда в уравнении регрессии ис-

ключается значение коэффициента корреляции (он принимается равным единице). В этом случае принцип наименьших квадратов по шкале ординат заменяется принципом наименьших прямоугольников по шкалам ординат и абсцисс.

По восстановленным годичным значениям за многолетний период гидрометеорологических характеристик можно расчитать параметры (норма, коэффициенты вариации, асимметрии и автокорреляции), а также квантили распределения.

Предложенная схема восстановления может применяться не только для кратковременных наблюдений за гидрологической характеристикой от одного до пяти лет, но и для более продолжительных наблюдений. В основе данного способа восстановления годичных значений, нормы и квантилей распределения лежит пространственная связанность исследуемой гидрометеорологической характеристики. Метод годичных уравнений регрессии, как правило, даёт меньшие стандартные погрешности, чем метод отношений, и рекомендуется в качестве основного метода расчёта гидрологических характеристик при наличии кратковременных наблюдений. Для построения кривой обеспеченности требуется знание трёх параметров: нормы, коэффициентов вариации и асимметрии или отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации. Это соотношение рекомендуется рассчитывать на основе групповой оценки в однородном гидрологическом районе на основе индивидуальных оценок, получаемых по пунктам-аналогам.

Методы, изложенные в настоящей статье, могут быть использованы при числе лет наблюдений больше 5. Но в этом случае следует осуществить восстановление отсутствующей гидрометеорологической информации в соответствии с разделами 2 и 3 методических рекомендаций по определению расчётных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений [4], после чего осущест-

вить тщательный анализ полученных данных. В качестве окончательных значений восстановленных рядов гидрометеорологических характеристик следует использовать средние арифметические значения за каждый год, полученные по каждому из рассмотренных методов расчёта. При этом осреднение результатов расчёта допускается осуществлять с весовыми коэффициентами, обратно пропорциональными дисперсиям стандартных погрешностей.

При наличии двух лет наблюдений будем иметь два уравнения с двумя неизвестными. Число уравнений регрессии может быть увеличено за счёт привлечения нескольких аналогов. Во всех случаях стандартные относительные погрешности расчёта коэффициентов вариации уменьшаются с увеличением числа лет наблюдений. При расчётах коэффициента вариации можно рекомендовать два-три аналога; при числе аналогов более трёх случайные стандартные погрешности практически не уменьшаются, а в некоторых случаях даже возрастают. При использовании одного аналога при двух годах наблюдений стандартные погрешности расчёта коэффициента вариации велики и не могут быть рекомендованы в качестве расчётных [4].

Графический метод. Для предварительной оценки коэффициентов вариации и квантилей распределения речного стока может быть использован графический способ путём построения кривой обеспеченности рассматриваемой характеристики речного стока на клетчатке вероятностей с фиксированным отношением C_s/C_v , полученным для исследуемого района. Шкала ординат на клетчатках вероятностей в данном случае должна быть представлена в виде модульных коэффициентов, значения которых определяются по фактическим наблюдениям в проектируемом пункте и норме стока, определённой ранее изложенными методами. Для определения расчётных значений стока необходимо иметь как минимум два года наблюдений в исследуемом пункте. По данным пунктов-аналогов рассчитывается эм-

пирическая обеспеченность значений стока, которые наблюдались в конкретные годы в пункте проектирования. Рассчитанные модульные коэффициенты k_i соответствующей эмпирической обеспеченности наносятся на клетчатку вероятности с выбранным фиксированным значением C_s/C_v . Разность между эмпирическими обеспеченностями стока за наблюдаемые годы должна быть не менее 10 %. Полученные эмпирические точки k_i аппроксимируются прямой линией, которая продолжается до пересечения со шкалой коэффициентов вариации.

Графический способ рекомендуется и для предварительного определения расчётных значений стока заданной обеспеченности. Для этой цели значения модульных коэффициентов k_i , снятых с кривой распределения, которые рассчитаны по данным двух- или трёхлетних наблюдений, умножаются на норму стока, определённую с использованием кратковременных наблюдений.

Выводы. Метод уравнений регрессии рекомендуется в качестве основного метода восстановления отсутствующей гидрометрической информации за отдельные годы, а также при приведении параметров и квантилей распределения к многолетнему периоду при наличии кратковременных (от одного года до пяти лет) наблюдений, так как он даёт меньшие стандартные погрешности, чем метод отношений. Метод отношений может быть рекомендован при наличии очень хорошего аналога, например, когда водомерные посты расположены на одной реке со сравнительно небольшим приращением площади водосбора (менее пяти процентов). Этот метод даёт хорошие результаты, когда пункт наблюдений переносится из одного места в другое. В последнем случае приращение площади водосбора, как правило, очень малое. Графический метод может быть рекомендован только на предварительных стадиях проектирования. При расчётах с использованием метода отношений и регрессионного метода ввиду очень большого объёма вычислительных работ рекомендуется использовать персональные компьютеры (ПК).

Библиографический список

1. СП 33-101-2003. *Определение основных расчётных гидрологических характеристик [Текст]. — Введ. 2003-26-12. — М. : Госстрой России, 2004. — 73 с.*
2. *Методические указания по оценке влияния хозяйственной деятельности на сток средних и больших рек и восстановлению его характеристик [Текст]. — Л. : Гидрометеиздат, 1986. — 130 с.*
3. Рождественский, А. В. Использование материалов кратковременных гидрометеорологических изысканий в расчётах стока [Текст] / А. В. Рождественский, А. Г. Лобанова // *Метеорология и гидрология*. — 1991. — № 12. — С. 84–92.
4. *Методические рекомендации по определению расчётных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений [Текст] / А. В. Рождественский и др. — С-Пб : ГУ «Государственный гидрологический институт», 2004. — 67 с.*

© Рогулин В. В.

© Береза А. С.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СМІКГ ГОУ ЛНР ЛНАУ Несвитом В. Д.,
к.т.н., доц., и. о. зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В.*

Статья поступила в редакцию 25.09.18.

к.т.н., проф. Рогулін В. В., Береза А. С. (ЛНАУ, Луганськ, ЛНР)

**МЕТОДИ ПРИВЕДЕННЯ РЯДІВ ГІДРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ЇХ
ПАРАМЕТРІВ ДО БАГАТОРІЧНОГО ПЕРІОДУ З УРАХУВАННЯМ СПОСТЕРЕЖЕНЬ
МЕНШЕ 6 РОКІВ**

Проведено порівняння методів визначення гідрологічних характеристик і приведення їх до багаторічного періоду. Визначено ситуації для кожного методу, в яких їх застосування найбільш доцільне.

Ключові слова: *гідрометеорологічні дослідження, водомірний пост, пункти-аналоги, середня квадратична похибка, короткочасні спостереження, коефіцієнт варіації.*

PhD, Prof. Rogulin V. V., Bereza A. S. (LNAU, Lugansk, LPR)

**METHODS FOR ATTRIBUTING SERIES OF HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS AND
THEIR PARAMETERS TO A LONG-TERM PERIOD WITH REGARD TO OBSERVATIONS
LESS THAN 6 YEARS**

There has been made a comparison of methods for determining the hydrological characteristics and bringing them to a long-term period. The situations have been determined for each method where their using is more reasonable.

Key words: *hydrometeorological surveys, gauging station, points-analogues, mean square error, short-time observations, coefficient of variation.*

УДК 624.13

к.т.н. Иванова М. С.

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, marij4444.44@mail.ru)

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА

Работа посвящена усовершенствованию метода испытаний в лабораторных условиях с определением плотности грунтов в воде и получением информации в режиме реального времени. Получение достоверной характеристики о реальной плотности грунта подтвердило высокую вероятность и эффективность применяемого усовершенствованного метода испытаний грунта за счёт автоматизации сбора информации, исключая влияние человека. Данный параметр входит в расчётные формулы, что позволяет проектировать размер фундамента экономичнее.

Ключевые слова: грунт, методика испытаний, плотность, автоматизация процесса сбора информации.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Проблема устройства и проектирования сооружений с правильным подбором технологии их строительства продолжает оставаться актуальной из-за отсутствия достоверных данных, влияющих на формы и размеры фундаментов с последующим поиском возможных вариантов укрепления грунтового массива.

Возникающие проблемы потребовали усовершенствования методики испытания и методики расчёта, что послужило толчком для проведения исследования причин снижающих достоверность параметров, оказывающих влияние на расчётные данные при проектировании несущей способности неустойчивых грунтов, соответственно, влияющих на деформационные свойства грунтов и сооружений, их продолжительность службы.

Анализ последних достижений и публикаций показал, что к настоящему времени опубликовано большое количество работ, в которых эти проблемы рассматриваются с двух точек зрения: геологии, которая изучает эти процессы, на базе метода натурных наблюдений и существующих методов по использованию опыта, накопленного веками [1–2].

Известными авторами теоретически обосновано прямое использование методов без учёта конкретных условий, что во мно-

гих случаях приводит к серьёзным ошибкам. Причиной тому является разнообразие природной обстановки и типов грунтов, влияние человеческого фактора при обработке параметров, входящих в состав расчётных формул; условий залегания грунтов, а также гидрогеологических условий [1–2].

Анализируя причины и факторы, которые влияют на методику расчёта, наиболее перспективным в решении данной проблемы можно назвать усовершенствование методики испытаний и внесения изменений в методику расчёта с целью получения наиболее достоверных характеристик для проектирования фундаментов.

Поэтому целью исследований является решение проблемы повышения достоверности получаемых параметров, входящих в состав расчётных формул, усовершенствованием методики испытаний, влияющих на методику расчёта при проектировании фундаментов.

Задача исследований состояла в создании новых и совершенствовании существующих технологий испытаний, методов расчёта, а также оценки влияния напряжённого состояния грунтовой массы и её деформационных свойств.

Изложение материала и его результаты. Эффективность усовершенствования методики испытаний и методики расчёта, в отличие от базовых стандартных вариан-

тов, изложена в существующих методах, где показано влияние человеческого фактора от использования визуальных наблюдений при их регистрации [1–2].

Для повышения достоверности получаемых характеристик первой задачей стояло составление для управления процессом испытаний алгоритма, не нарушающего модель математической структуры и стандартные требования норм. Вторая задача — обеспечение оборудованием, которое могло бы объединить все процессы и исключить влияние человеческого фактора.

Для решения поставленной задачи были исследованы грунты, представленные суглинками в интервале от 0,5 до 4,5 м, отобранные на территориях Донбасского региона.

Испытания проводились двумя методами: стандартным и предложенным усовершенствованным.

Определение плотности грунтов стандартным методом взвешивания в воде заключалось в следующем. Плотность грунта образцов неправильной формы обычно определялась методом взвешивания в воде на механических лабораторных весах, как показано на рисунке 1.

Полученная информация заносилась в журнал для испытаний и применялась при испытании прочностных характеристик на другом оборудовании.

Достоверность получаемых значений при взвешивании зависела от точности оборудования и влияния фактора человека.

Недостаток известного метода испытания заключён в использовании оборудования, требующего применения ручного труда, и зависимости от человеческого фактора при сборе информации.

При анализе проведённых работ было принято решение устранить этот недостаток усовершенствованием метода испытаний и метода расчёта, что является актуальным вопросом для устранения проблем как факторов, влияющих на достоверность расчётных характеристик.

С целью получения достоверных результатов и уточнения причин их расхождений при исследовании предложен метод испытания грунтов в лабораторных условиях, позволяющий объединить испытания и сбор информации без вмешательства человека в единый комплекс с помощью автоматизированной системы.



1 — образец из грунта с ниткой; 2 — стакан для воды; 3 — опорный мостик; 4 — подставка для опоры (мостика и стакана) для ограничения прикосновения к чашкам весов; 5 — разновесы; 6 — образцы грунта; 7 — весы лабораторные механические

Рисунок 1 Общий вид оборудования для определения плотности грунта

Сущность метода заключается в том, чтобы найти возможность в водной среде определить массу испытуемого грунта, не допустив его насыщения водой, и получить достоверную плотность любого грунта.

Задача была решена комплексно усовершенствованием оборудования и введением в расчётный алгоритм стандартной формулы дополнительных параметров, что позволило изменить методологию испытания и методику расчёта.

Отличительная особенность между предложенной методикой расчёта и стандартной [3, (1)] заложена в усовершенствовании методологии. При испытании плотности запарафинированных образцов грунта в воде добавлены дополнительные параметры, которые определяют массу грунта и влаги из параметра m_2 , и массы параметров m_3 , m_4 , позволяющих получить достоверную плотность грунта в воде, где $m_2 = m_4 - m_3$ — уточнённая масса грунта на момент взвешивания в воде, которая входит в состав формулы (1):

$$\gamma = \frac{0,9 \times m \times \gamma_w}{0,9 \times (m_1 - m_2) - \gamma_w (m - m_1)}, \quad (1)$$

где m — масса грунта до запарафинирования, г; m_1 — масса запарафинированного грунта, г; m_4, m_2 — масса запарафинированного грунта в воде, г; m_3 — масса стакана с водой, г; m_4 — масса стакана с водой и запарафинированным грунтом, г; γ_w — плотность воды, г/см³; 0,9 — плотность парафина, г/см³.

Объектом для исследования послужили грунты, представленные суглинками в интервале от 0,5 до 4,5 метров.

Зная, что плотность (γ) грунта входит в состав расчётных формул СНиП 2.02.01-83*, ДСТУ Б В.2.1-2-96, в уравнения для определения значений расчётного сопротивления (R) и предельного давления (P_u), было принято решение ввести в алгоритм управления формулы

$$R = M_\gamma \cdot b \cdot \gamma + M_c \cdot C, \quad (2)$$

$$P_u = N_\gamma \cdot \xi_\gamma \cdot b \cdot \gamma + N_c \cdot \xi_c \cdot C, \quad (3)$$

где M_γ , M_c — коэффициенты, учитывающие грунтовые условия в зависимости от γ , ширины подошвы фундамента b , нагрузки N_γ , N_c и коэффициентов ξ_γ , ξ_c , учитывающих конструктивные особенности сооружения.

Значения угла внутреннего трения (φ) и удельного сцепления (C) находятся системой путём решения уравнения при определении R и P_u , имеющего вид

$$\frac{N_c \cdot \xi_c \cdot (R - M_\gamma \cdot b \cdot \gamma)}{M_c} + N_\gamma \cdot \xi_\gamma \cdot b \cdot \gamma - P_u = 0. \quad (4)$$

Решение уравнения (4) выполнялось последовательной подстановкой в него из таблиц значений M_γ , M_c , N_γ , N_c с учётом корректировки плотности грунта γ в процессе эксперимента и различных φ до практического удовлетворения.

Для грунтов оснований фундаментов угол внутреннего трения находится в интервале значений от $\varphi=0^\circ$ (пластичные глины) до $\varphi=45^\circ$ (пески). Значения φ определяются на практике с точностью до одного градуса.

Эти обстоятельства позволяют в автоматизированном режиме вычислить уравнения (1–4) с последующей распечаткой графических построений зависимостей предельного сопротивления $R=f(b)$ и осадки $S=f(P_u)$.

Дальнейшее техническое решение вопроса зависело от оборудования, которым необходимо было управлять, оценивать ситуацию и передавать эту информацию для обработки. Для этой цели был введён автоматизированный комплекс, управляющий процессом испытаний и сбора информации. В отличие от стандартного метода и применяемого оборудования запарафинированный грунт взвешивается на электронных весах, а полученная информация передаётся автоматически в блок «А, Б, В». Соответственно, методика испытаний грунтов в лабораторных условиях по определению плотности (γ) грунта в воде [3] изменяет методологию испытаний и методику исследования (рис. 2).

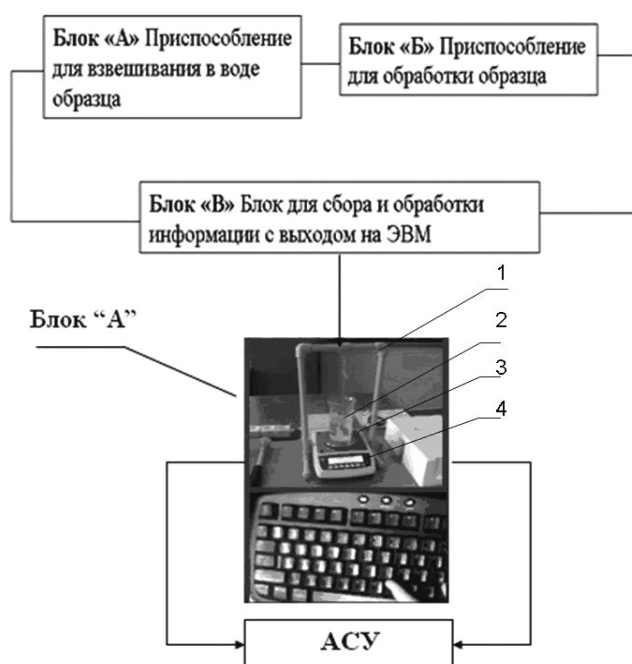


Рисунок 2 Определение плотности грунта взвешиванием в воде

На рисунке 2 приведён предложенный метод, который содержит: комплекс [3, 4], состоящий из автоматизированной системы управления (АСУ) и дополнительных усовершенствованных блоков (А, Б, В), передающих информацию на дисплей с последующей распечаткой.

АСУ взаимодействует с ними через главный алгоритм, управляя технологическим процессом при испытании, где введена дополнительная характеристика — плотность грунта, определяемая в воде.

Определение характеристики производится через самостоятельно действующий блок «А», взаимосвязанный с блоками «Б», «В».

Блок «А» — приспособление для взвешивания в воде образца, содержит: стойку 1 П-образную, имеющую захват (нумерация условно не показана) для подвешивания образца 2, стеклянный стакан 3 с водой, весы лабораторные электронные 4, соединённые с блоком «Б» и блоком «В», [3, 4, см. рис. 2].

Блок «Б» — приспособление для обработки образца содержит: песчаную баню; ёмкость для разогрева парафина (условно не показано).

Блок «В» — входит в состав ЭВМ и выполняет сбор и обработку информации с выходом на дисплей и на АСУ.

Вся информация передаётся на ЭВМ, дисплей и в АСУ. Это даёт возможность определить через дополнительно введённый параметр влажность и плотность грунта в воде, оценить прочностные характеристики (E , S , φ , C), ($a.R.$), взаимосвязанные между собой через плотность грунта (γ).

Определяемый параметр влияет на достоверность прочностных характеристик (E , S , φ , C), входящих в состав расчётной формулы по определению нормативного давления на грунт (R).

Параметр удельного сопротивления (C), в зависимости от угла внутреннего трения φ и плотности γ грунта, определяется путём последовательной подстановки коэффициентов, зависящих от конструктивных особенностей сооружения. Решение примет вид

$$C = \frac{R - M_q \cdot h \cdot \gamma - M_\gamma \cdot b \cdot \gamma}{M_c}. \quad (5)$$

После подстановки в уравнение (5) формула (4) преобразуется в следующий вид:

$$\frac{M_q \cdot \xi_q \cdot h + N_\gamma \cdot \xi_\gamma \cdot b_\gamma + N_c \cdot \xi_c \cdot R - M_q \cdot h \cdot \gamma - M_\gamma \cdot b \cdot \gamma}{M_c} - P_u = 0, \quad (6)$$

где принцип расчёта остаётся таким же, как и у формулы (4), учитывается лишь глубина $h > 0$ заложения и ширина b проектируемой подошвы фундамента, что является новым при определении расчётного и предельного сопротивления грунта с учётом реальной плотности (в процессе испытания корректировалась).

Усовершенствованная методика позволяет повысить точность определения плотности грунта взвешиванием в воде за счёт устройства, которое снабжено электронными весами, П-образной стойкой, выполненной из пластмассово-алюминиевого материала. В верхней части П-образной стойки расположен захват для подвешивания образца, соединённого ниткой, где на одном конце выполнена петля, а на другом подвешен образец из грунта. Предложенная конструкция устройства позволяет исключить влияние человека на точность измерения.

Такая методология, с применением комплексного оборудования и вычисления, обработки результатов прочностных ха-

рактеристик в зависимости от плотности грунта и его влаги, исключает вмешательство человека при сборе и обработке информации, сокращает время на её обработку, обеспечивая большую достоверность получаемых результатов.

Выводы. В заключение можно сказать следующее:

1. С помощью усовершенствованной методики для определения прочностных характеристик возможно повысить точность определения плотности грунта взвешиванием в воде за счёт блока «А», взаимосвязанного с блоками «Б» и «В» через ЭВМ и АСУ, которая управляет ими через главный алгоритм, технологическим процессом при испытании.

2. Обновлён математический аппарат в виде алгоритма, позволяющего оценить плотность грунтового массива, входящего в состав расчётных формул, при проектировании фундаментов.

3. В процессе испытаний при оценке общей ситуации алгоритм способен корректироваться, что является новым при определении расчётного и предельного сопротивления грунта с учётом реальной плотности.

4. Методика может быть использована в области строительства при проведении инженерно-геологических изысканий.

Библиографический список

1. Budhu, M. *Soil Mechanics Fundamentals [Text]* / M. Budhu. — Publishing house : Wiley-Blackwell, 2015.
2. Bowmen, E. T. *General Report of TC 208. Slope Stability in Engineering Practice [Text]* / E. T. Bowmen, R. J. Fannin // *Challenges and Innovation in Geotechnics : Proc. of the 18th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. — Paris, France, 2013. — P. 2137–2144.
3. Пат. 87778 Україна, МПК G01N 9/08. Пристрій для визначення щільності ґрунту зважуванням у воді / М. С. Іванова ; заявник і власник патенту Донбаський держ. техн. ун-т. — № U201306140 ; заявл. 17.05.13 ; опубл. 25.02.00, Бюл. № 4.
4. Иванова, М. С. Программное обеспечение по обработке опытных данных, получаемых методом экспресс-анализа при определении физико-механических характеристик грунтов [Текст] / М. С. Иванова, А. А. Левченко // *Будівельні конструкції. Міжвідомчий науково-технічний збірник*. — К. : НДІБК, 2004. — № 60. — С. 427–428.

© Иванова М. С.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ГиПС ИСА
и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Дроздом Г. Я.,
к.т.н., доц., и. о. зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В.*

Статья поступила в редакцию 11.09.18.

к.т.н. Іванова М. С. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР, marij4444.44@mail.ru)

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ ҐРУНТУ

Робота присвячена вдосконаленню методу випробувань в лабораторних умовах з визначенням щільності ґрунтів у воді і отриманням інформації в автоматизованому реальному режимі. Отримання достовірної характеристики про реальну щільність ґрунту підтвердило високу ймовірність і ефективність застосовуваного удосконаленого методу випробування ґрунту за рахунок автоматизації збору інформації, виключаючи вплив людини. Цей параметр входить в розрахункові формули, що дозволяє проектувати розмір фундаменту економніше.

Ключові слова: ґрунт, методика випробувань, щільність, автоматизація процесу збирання інформації.

PhD Ivanova M. S. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

IMPROVING THE METHOD FOR DETERMINING THE SOIL STRENGTH CHARACTERISTICS

The work is devoted to improving the methodology of testing in laboratory conditions while determining the density of soils in water and obtaining the information in automatic mode to ensure the reliability of the characteristics, excluding the human influence on making changes to the design formulas for designing the dimensions of the foundations being an important task of soil mechanics.

Key words: soil, test methods, density, process automation for collecting information.

УДК 628.47+625.855.1

Бизирка И. И.*(ИСА и ЖКХ ГОУ ВПО ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)*

СВОЙСТВА АСФАЛЬТОБЕТОНОВ НА ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОМ И ИЗВЕСТНЯКОВОМ МИНЕРАЛЬНОМ ПОРОШКАХ ИЗ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ПОКРЫТИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СРОКОВ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

Проведено сравнение основных физико-механических характеристик асфальтобетонных основ на основе органоминерального порошка из осадков сточных вод и известнякового минерального порошка из экспериментального дорожного покрытия. Показано, что органоминеральный порошок существенно улучшает основные механические характеристики асфальтобетона.

Ключевые слова: осадки сточных вод, органоминеральный порошок, утилизация, асфальтобетон.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Для кардинального решения проблем экологии и снижения ресурсоёмкости производства необходимо обеспечить кругооборот сырья, утилизировать вторичные ресурсы. Это обусловлено, прежде всего, огромными объёмами накопленных (депонированных) отходов ОСВ (в Луганской области свыше 200 тыс. т, в Украине около 500 млн т [2, 3, 5]).

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, колеи и т. п. На ремонт и содержание дорог в стране расходуется более 60 % всех потребляемых органических вяжущих и минеральных материалов. Поэтому задачей материаловедения является ресурсосбережение как основной источник материального обеспечения дорожного строительства.

Такие органоминеральные смеси, достаточно сложные по составу, с успехом могут применяться в составах экологически чистых дорожных покрытий, характеризующихся повышенной стойкостью и долговечностью [3, 4].

Анализ последних достижений и публикаций. Наиболее полно вопрос утилизации ОСВ в асфальтобетон освещён в работе [1]. В ней показана возможность использования этого органоминерального отхода в качестве компонента асфальтобетона. При замене минерального порошка на органоминеральный получается асфальтобетон с высокими физико-механическими свойствами.

Цель работы. Изучить физико-механические свойства асфальтобетона на органоминеральном порошке (ОМП) и известняковом минеральном порошке (ИМП) в зависимости от реальных сроков эксплуатации дорожного покрытия.

Материалы и методики исследований. При устройстве верхнего слоя экспериментального покрытия автомобильной дороги по ул. Малюткина в г. Антраците использовали горячие мелкозернистые асфальтобетоны типа Б марки I следующих составов: левая полоса — гранитный щебень Караньского карьера — 25 %, отсев дробления гранита — 70 %, известняковый минеральный порошок — 5 %, битум БНД 60/90 Лисичанского НПЗ — 6,5 %; правая полоса — гранитный щебень Караньского карьера — 25 %, отсев дробления гранита — 70 %, ОМП — 5 %, битум БНД 60/90 Лисичанского НПЗ — 6,5 %.

Исследовали свойства асфальтобетона на основе битума с добавками: минераль-

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

ного порошка, органоминерального порошка (ОСВ).

Результаты и их обсуждение. В период с сентября по октябрь 2010 г. с использованием осадка сточных вод г. Луганска в качестве

органоминерального порошка, гранитного щебня и отсева его дробления (Караньский карьер) была выполнена реконструкция городской улицы им. Малютина в г. Антраците Луганской области (рис. 1).



Рисунок 1 Экспериментальная городская улица г. Антрацита

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

При этом на участке автомобильной дороги по улице Малютинна длиной 250 м и шириной 6 м были выделены два опытных участка 250×3 м: левая полоса дороги была выполнена смесью асфальтобетона с традиционным известняковым минеральным порошком, а правая — на асфальтобетоне с ОМП, за которым установлены систематические наблюдения. Толщина покрытия составила 6 см. Подбор составов асфальтобетонных смесей производился в соответствии с ДСТУ Б В.2.7-119-2011.

Исследованиями определялись: из вырубков (табл. 1, 3) — средняя плотность, кг/м³; водонасыщение, % по объёму; набухание, % по объёму; коэффициент уплотнения; из переформованных образцов (табл. 2, 4) — средняя плотность, кг/м³; водонасыщение, % по объёму; набухание, % по объёму; предел прочности при сжатии (МПа) при температуре 20 °С, 50 °С и 20 °С при водонасыщении; коэффициент уплотнения.

Таблица 1

Зависимость свойств асфальтобетона на ОМП из верхнего слоя покрытия от сроков его эксплуатации (пробы взяты из вырубков)

Сроки взятия пробы	Вырубки			
	Средняя плотность, кг/м ³	Водонасыщение, % по объёму	Набухание, % по объёму	Коэффициент уплотнения
10 дней	2360	3,2	0,30	0,99
1 год	2370	2,4	0,28	0,99
2 год	2375	2,2	0,25	0,99

Таблица 2

Зависимость свойств асфальтобетона на ОМП из верхнего слоя покрытия от сроков его эксплуатации (пробы взяты из переформованных образцов)

Переформованные образцы							
Сроки взятия пробы	Средняя плотность, кг/м ³	Водонасыщение, % по объёму	Набухание, % по объёму	Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре			Коэф-т водостойкости
				20 °С	50 °С	20 °С водонасыщен.	
из смесителя	2350	2,4	0,18	3,5	2,3	3,3	0,93
10 дней	2380	2,5	0,18	3,7	2,3	3,4	0,93
1 год	2390	2,6	0,21	3,8	2,4	3,4	0,90
2 год	2400	2,8	0,21	4,1	2,6	3,6	0,87

Таблица 3

Зависимость свойств асфальтобетона на ИМП из верхнего слоя покрытия от сроков его эксплуатации (пробы взяты из вырубков)

Сроки взятия пробы	Вырубки			
	Средняя плотность, кг/м ³	Водонасыщение, % по объёму	Набухание, % по объёму	Коэффициент уплотнения
10 дней	2335	3,4	0,60	0,99
1 год	2350	3,0	0,50	0,99
2 год	2370	2,8	0,47	0,99

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Таблица 4

Зависимость свойств асфальтобетона на ИМП из верхнего слоя покрытия от сроков его эксплуатации (пробы взяты из переформованных образцов)

Переформованные образцы							
Сроки взятия пробы	Средняя плотность, кг/м ³	Водонасыщение, % по объёму	Набухание, % по объёму	Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре			Кэф-т водостойкости
				20 °С	50 °С	20 °С водонасыщен.	
из смесителя	2340	6,5	0,38	3,3	1,2	2,8	0,9
10 дней	2350	2,6	0,42	3,5	1,1	3,0	0,96
1 год	2375	2,8	0,53	3,6	1,2	3,0	0,88
2 год	2400	3,1	0,55	3,8	1,3	3,1	0,85

Выводы:

1. Двухлетние наблюдения за дорожным полотном экспериментальной дороги в г. Антраците показали, что асфальтобетон на основе органоминерального порошка имеет технические характеристики, конкурентные асфальтобетону на традиционном известняковом минеральном порошке, а именно:

– водонасыщение образцов примерно на 20 % меньше;

– набухание образцов асфальтобетона примерно на 50 % меньше;

– предел прочности на сжатие при повышенных температурах как минимум вдвое выше, чем у аналогов.

2. Полученные данные свидетельствуют о перспективах широкого использования органоминерального порошка в дорожном строительстве.

Библиографический список

1. Бреус, Р. В. Зниження об'ємів накопичених відходів водоочищення — осадів стічних вод — шляхом їх утилізації в асфальтобетон [Текст] : автореф. дис. канд. тех. наук : 21.06.01 / Бреус Роман Володимирович. — Харків : УНДІЕП, 2007. — 21 с.
2. Дрозд, Г. Я. Предложения по вовлечению депонированных осадков сточных вод в хозяйственный оборот [Текст] / Г. Я. Дрозд // Материалы Международного конгресса «ЭТЭВК». — Ялта, 2009. — С. 230–242.
3. Дрозд, Г. Я. Утилизация осадков сточных вод в дорожном строительстве [Текст] / Г. Я. Дрозд, Р. В. Бреус // Вісті автомобільно-дорожнього інституту. — Горлівка : ДНТУ, 2009. — С. 186–193.
4. Сжигание осадков сточных вод коммунального хозяйства в псевдоожигенном слое катализатора [Текст] / А. Д. Симонов и др. // Альтернативная энергетика и экология. — 2010. — №6 (86). — 61–66.
5. Яковлев, С. В. Водоотведение и очистка сточных вод [Текст] / С. В. Яковлев, Ю. В. Воронов. — М. : АСВ, 2004. — 704 с.

© Бизирка И. И.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ГиПС ИСА
и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Дроздом Г. Я.,
к.т.н., доц., и. о. зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В.

Статья поступила в редакцию 07.09.18.

Бізірка І. І. (ІБАіЖКГ ДОУ ВПО ЛНУ ім. В. Даля, м. Луганськ, ЛНР)

**ВЛАСТИВОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОНІВ НА ОРГАНОМІНЕРАЛЬНОМУ
І ВАПНЯКОВОМУ МІНЕРАЛЬНОМУ ПОРОШКАХ З ВЕРХНЬОГО ШАРУ ПОКРИТТЯ
ЗАЛЕЖНО ВІД ТЕРМІНІВ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Проведено порівняння основних фізико-механічних характеристик асфальтобетону на основі органічного мінерального порошку з осадів стічних вод і вапнякового мінерального порошку з експериментального дорожнього покриття. Показано, що органічний мінеральний порошок істотно покращує основні механічні характеристики асфальтобетону.

Ключові слова: осад стічних вод, органічний мінеральний порошок, утилізація, асфальтобетон.

Bizirka I. I. (ICA and HCS LNU after V. Dahl, Lugansk, LPR)

**PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE BASED ON ORGANOMINERAL POWDER AND
LIMESTONE MINERAL POWDER FROM THE TOP COATING CONSIDERING THE
COATING OPERATION TERM**

A comparison of the main physical and mechanical characteristics of asphalt concrete based on organic mineral powder from sewage sludge and limestone mineral powder from an experimental pavement was carried out. It is shown that organic powder significantly improves the basic mechanical characteristics of asphalt concrete.

Key words: sewage sludge, organic mineral powder, utilization, asphalt.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ
И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**МАШИНОБУДУВАННЯ
ТА МАШИНОЗНАВСТВО**

**MECHANICAL ENGINEERING
AND MACHINE SCIENCE**

УДК 621.876.212

д.т.н. Корнеев С. В.,
к.т.н. Доброногова В. Ю.,
Долгих В. П.,
Захаров О. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СТЫКОВ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ

Приводится модель и результаты моделирования напряжённно-деформированного состояния механического стыка конвейерных лент в программном комплексе ANSYS Workbench. В процессе моделирования устанавливаются характеристики напряжённно-деформированного состояния механического стыка, а именно: компоненты тензора, главные напряжения, направляющие косинусы, коэффициенты концентрации напряжений и фактические запасы прочности конструктивных элементов.

Ключевые слова: конвейерная лента, механический стык, напряжённно-деформированное состояние, моделирование, ANSYS Workbench.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Конвейерные ленты с резиноканевым каркасом соединяют механическим способом или вулканизацией в соответствии с рекомендациями заводов-изготовителей, руководствами по стыковке лент и отраслевыми стандартами по эксплуатации ленточных конвейеров [1, 2, 3, 4].

Для конвейеров, расположенных в участках горных выработках угольных шахт, особенно в выработках, прилегающих к очистным и подготовительным забоям, характерно периодическое сокращение или наращивание става. Это приводит к частым перемотажам стыков ленты для изменения длины конвейера; для телескопических конвейеров обычно — на 40...50 м. В этих условиях стыки, как правило, выполняются механическим способом. К преимуществам механических стыков, если сравнивать их со стыками, выполненными холодной или горячей вулканизацией, прежде всего, следует отнести простоту стыковки при малых затратах времени: до 2...4 часов на один стык. Кроме того, механические соединения рекомендуются при непродолжительной работе ленточного конвейера на одном рабочем месте, при отсутствии необходимых для

вулканизации материалов и оборудования, а также в тех случаях, когда вулканизация стыков затруднена или нецелесообразна по причине пылевого или газового режима работы конвейера [3].

Соединение лент механическим способом осуществляется заклёпками, П-образными и крючкообразными скобами. В мировой практике наибольшее распространение получили шарнирные соединения скобами «Штальгрубер», «Мато» (Германия), «Флекско» (США).

Для стыковки конвейерных лент, например в Кузбассе, применяются заклёпочные шарнирные механические соединения «Флекско» типоразмеров R5½, R6/RAR6, R8/RAR8. Средний срок службы механического стыка на шахтах Кузбасса составляет 2...6 месяцев, а максимальный — 14...15 месяцев [5].

Стандартом на соединение пластинчатыми или проволочными скобами и ремонт резиноканевых лент шириной 800, 1000, 1200 мм с агрегатной прочностью не более 1000 Н/мм и толщиной 7...13 мм предусмотрено отношение прочности соединения к прочности ленты не менее 60 % и срок службы не менее 5 месяцев [6].

Опыт эксплуатации показывает, что относительные прочность и долговечность

механических стыков в среднем составляют: для заклёпочных соединений соответственно 39 % и 13 %; для стыков с крючкообразными скобами — 51 % и 19 %; с П-образными скобами — 77 % и 35 %. В результате применения на шахтах Кузбасса и Воркуты соединений типа «Флекско», например, установлено, что их прочность на резинотканевых многослойных лентах достигает 60 %, а на лентах с цельнотканым каркасом — 75 % от прочности ленты.

Анализ конструктивных особенностей и опыт эксплуатации также указывают на ряд недостатков механических стыков, таких как: малый срок службы — 2...5 месяцев; большие эксплуатационные расходы на подстыковку и ремонт стыков; повышенная динамика при их взаимодействии с элементами конвейера и, как результат, снижение срока службы и износ обечайки барабанов и роликов. При некачественном стыке и образовании в ряде случаев волнистой кромки ленты или деформациях скоб возможно образование зазоров между концами ленты, а затем — просыпи транспортируемого груза и засорение подконвейерного пространства, что приводит к заштыбовке роликов става и увеличению сопротивления движению ленты.

Большой разброс устанавливаемых опытным путём значений прочности и долговечности механических стыков указывает на скрытые возможности их совершенствования применительно к условиям эксплуатации. Вместе с тем в настоящее время при значительной потребности соединений конвейерных лент механическим способом и необходимости повышения прочности и долговечности механических стыков отсутствуют теоретические исследования и методики расчёта напряжённо-деформированного состояния (НДС) и оптимизации параметров их конструктивных элементов.

Постановка задачи. Задачей работы является разработка модели механического соединения резинотканевых конвейерных лент для исследования статического напряжённо-деформированного состояния элементов стыка.

Изложение материала и его результаты. Задача исследования решается в результате моделирования с использованием программного комплекса ANSYS Workbench [7]. В процессе моделирования устанавливаются характеристики НДС механического стыка, а именно: компоненты тензора, главные напряжения, направляющие косинусы, коэффициенты концентрации напряжений и фактические запасы прочности конструктивных элементов.

Применение ANSYS Workbench, основывающегося на методе конечных элементов (КЭ), позволяет при достаточно глубокой детализации элементов стыка и значительном объёме информации об их геометрических параметрах и физико-механических свойствах максимально приблизить модель механического соединения к реальному объекту и рассчитывать сложные НДС элементов стыка. Данная работа является первым этапом планируемых обширных исследований механических соединений лент. Рассматривается плоская задача исследования НДС, что, впрочем, отвечает реальным участкам ленты, которая при прохождении тягового контура выполаживается перед различного рода барабанами и после них.

При составлении модели механического стыка принимаются следующие допущения:

1) основным конструктивным элементом любой соединительной скобы или заклёпки является взаимодействующий непосредственно с лентой абсолютно жёсткий цилиндрический стержень;

2) лента ввиду симметрии стыка относительно поперечной оси шарниров на начальном этапе исследований представляется в виде одного плоского отрезка с рядом отверстий, в которых расположены фиксируемые в продольном направлении и способные перемещаться вместе с лентой в поперечном направлении нормальные к поверхности ленты цилиндрические стержни скоб;

3) лента является слоистой композицией из упругих тканевых прокладок, представляемых в виде ортотропного материала.

ла, и изотропных резиновых прослоек и обкладок;

4) на свободный конец ленты действует равномерно распределяемое между прокладками и по ширине ленты растягивающее усилие S .

Расчётная схема механического стыка как системы, состоящей из набора конструктивных элементов ленты и соединительных скоб, представлена на рисунке 1.

В качестве исходных данных принимаются геометрические параметры и физико-механические свойства конструктивных элементов механического соединения ленты. Для оценки её технического состояния под воздействием растягивающей нагрузки также принимаются во внимание прочностные свойства прокладки — разрывные нормальные напряжения $[\sigma]_x$ и $[\sigma]_y$ соответственно в продольном (по основе) и поперечном (по утку) направлениях. Моделирование стыка проводится поэтапно согласно структурной схеме, приведённой на рисунке 2.

Вначале в блоке **Engineering Data** из набора типовых моделей выбираются модели, наилучшим образом отражающие определённые физико-механические свойства структурных элементов механического стыка.

Резиновые обкладки и прослойки ленты представляются в виде двухпараметрической модели Муни – Ривлина, которая обычно используется для описания гиперупругих материалов. Модель определяется коэффициентами C_{10} и C_{01} в зависимости «напряжение - деформация». Значения коэффициентов получены расчётным путём [8] на основании известных экспериментальных зависимостей «нагрузка – деформация». Установлено: $C_{10}=0,66$ МПа, $C_{01}=0,324$ МПа.

Построение трёхмерной геометрической модели механического стыка реализуется в модуле **Design Modeler** (блок **Geometry**).

После нанесения конечно-элементной сетки (блок **Model**) задаются параметры контактного взаимодействия элементов и внешние воздействия на систему.

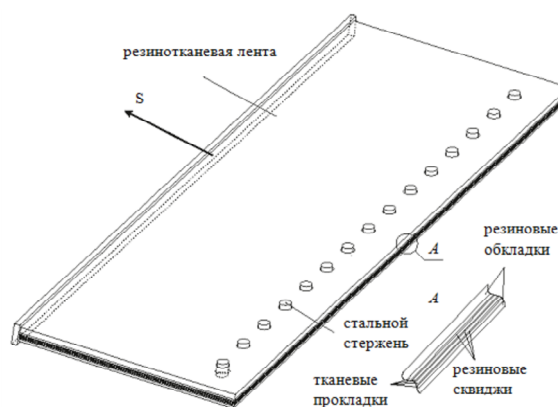


Рисунок 1 Расчётная схема механического соединения конвейерной ленты

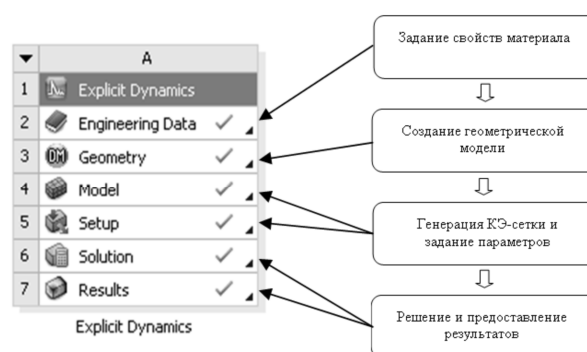


Рисунок 2 Структурная схема моделирования в ANSYS Workbench механического соединения ленты

Геометрическая модель механического стыка и нанесённая на неё конечно-элементная сетка отражены на рисунках 3 и 4. Оси координат x , y и z направлены, соответственно, вдоль (по основе), поперёк ленты (по утку) и по нормали к её поверхности. Задаётся минимальное значение шага сетки. В процессе моделирования шаг сетки, обеспечивающий заданную точность расчётов, может увеличиваться программой автоматически.

Для имитации натяжения ленты к её торцу прикрепляется абсолютно жёсткая планка, к центру которой приложена растягивающая сила S , равномерно распределяющаяся между прокладками и по ширине ленты. Также следует отметить возможность свободного перемещения по оси y вместе с лентой стержней, что отвечает реальной работе стыка.

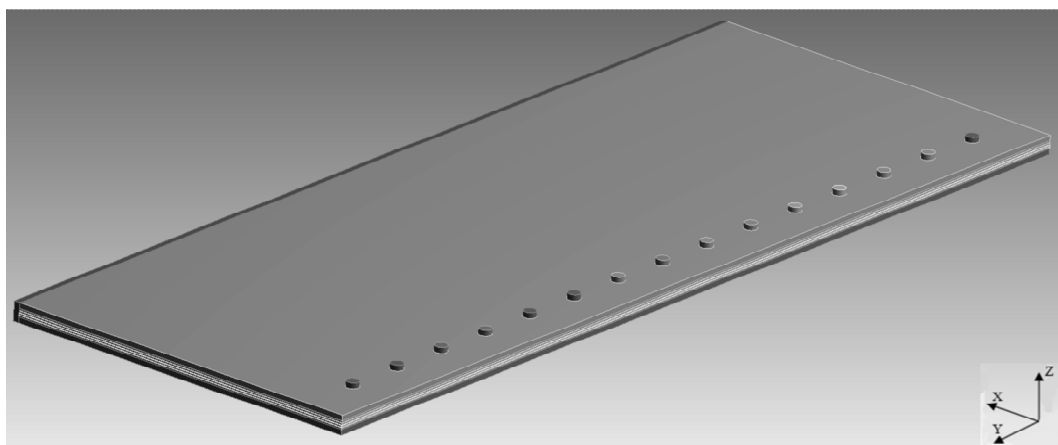


Рисунок 3 Геометрическая модель механического стыка

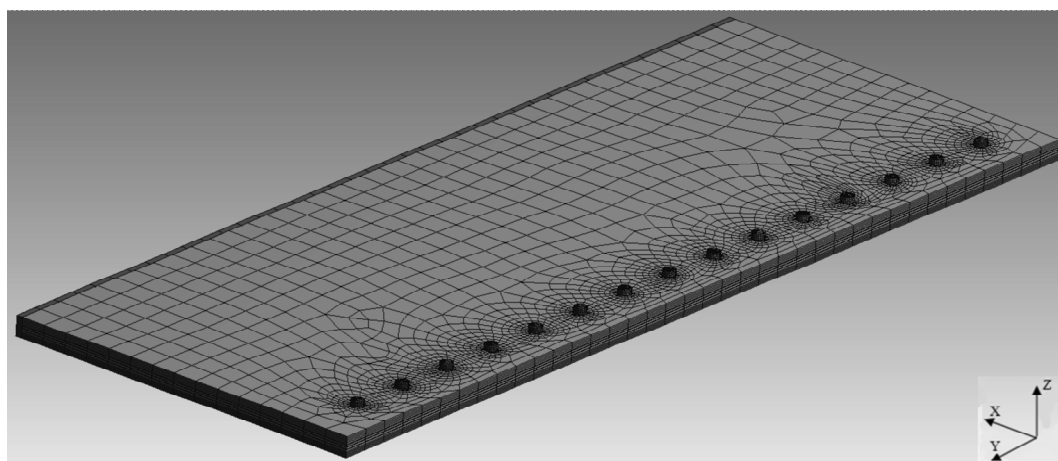


Рисунок 4 Конечно-элементная сетка модели механического стыка ленты

Процесс моделирования завершается при достижении установившегося напряжённо-деформированного состояния (НДС) ленты.

В качестве примера произведено моделирование НДС механического стыка четырёхпрокладочной резинотканевой конвейерной ленты 800 EP-800/4-5+2 фирмы «Phoenix» (Германия) П-образными скобами.

Исходные данные: обкладочная резина класса А; ширина ленты — 0,8 м; натяжение ленты в направлении оси x — 10 кН; параметры тканевой прокладки ленты: модули упругости по осям x , y и z — $E_x=3 \cdot 10^8$ Па, $E_y=6 \cdot 10^7$ Па, $E_z=5 \cdot 10^8$ Па, модули сдвига по осям x , y и z — $G_x=2,85 \cdot 10^8$ Па, $G_y=G_z=1,14 \cdot 10^8$ Па [9]; коэффициент Пуассона для тканевой прокладки: по основе — $\mu_{то}=0,275$, по утку — $\mu_{ту}=0,135$, для рези-

ны — $\mu_p=0,4$; прочность тканевых прокладок по основе $[\sigma]_x$ и по утку $[\sigma]_y$ равна 166,7 и 45,8 МПа соответственно; толщина тканевых прокладок $\delta_n=1,2$ мм; толщина резиновых прослоек (сквиджей) $\delta_c=0,5$ мм. Диаметр d и шаг установки l стержней принимаются равными 11 и 50 мм соответственно. Стержни устанавливаются в один ряд.

В результате моделирования определены нормальные и касательные напряжения на площадках, нормальных к осям x и y , главные σ_1 , σ_2 и σ_3 .

На рисунках 5 и 6 отражено распределение нормальных напряжений σ_x в прокладках ленты вокруг отверстия. В прокладках наблюдаются области растяжения ($\sigma_x > 0$) и сжатия ($\sigma_x < 0$). Все прокладки

нагружаются с определённой регулярностью и практически одинаково.

Максимальные напряжения растяжения прокладок $\sigma_{x \max}$ возникают на поверхностях отверстий в плоскости, проходящей через оси отверстий, и достигают 15,01 МПа. При этом коэффициент концентрации напряжений

$$k_x = \sigma_{x \max} / \sigma_{x \text{ ср}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{x \text{ ср}}$ — среднее нормальное напряжение в сечении прокладки плоскостью yz , проходящей через оси отверстий. В данном случае $k_x=4,7$.

Фактический коэффициент запаса прочности прокладки по основе в этом же сечении

$$n_x = [\sigma]_x / k_x \sigma_{x \text{ ср}} = 166,7 / 4,7 \cdot 2,6 = 13,6. \quad (2)$$

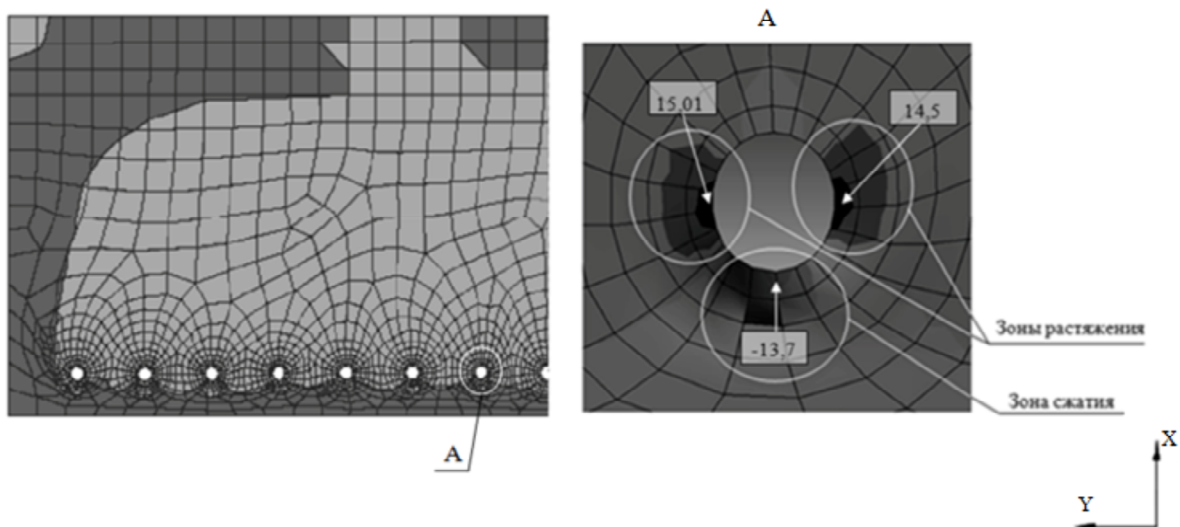


Рисунок 5 Распределение нормальных напряжений σ_x в прокладках ленты 800 EP-800/4-5+2 (сечение в плоскости xy)

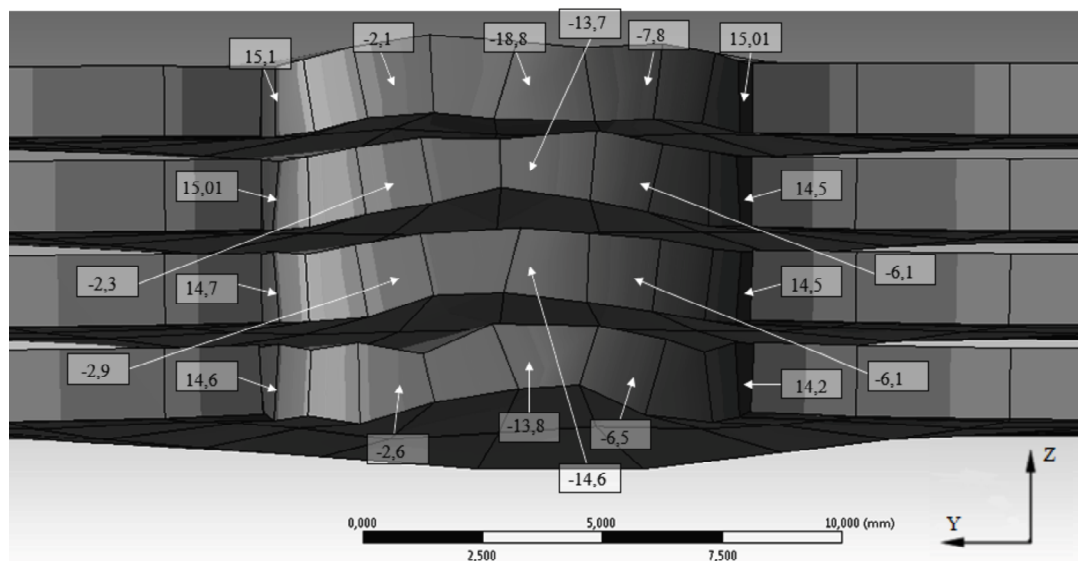


Рисунок 6 Распределение нормальных напряжений σ_x в прокладках ленты 800 EP-800/4-5+2 вокруг отверстия (сечение в плоскости yz)

В рассматриваемом примере запас прочности превышает его нормативные значения n_n (обычно $n_n=8\dots10$). При изменении натяжения S или параметров стыка ситуация может измениться, что в случае $n_x \leq n_n$ может привести к разрыву ленты по основе.

Для большей наглядности на рисунке 7 приводится распределение напряжений σ_x в одной из прокладок в виде диаграммы с указанием зон растяжения и сжатия.

На рисунках 8 и 9 отражена аналогичная картина распределения напряжений σ_y в прокладке ленты по утку. Максимальное значение напряжения $\sigma_{y \max}$ в области растяжения составляет 4,2 МПа.

Фактический коэффициент запаса прочности прокладки по утку в этом же сечении

$$n_y = [\sigma]_y / \sigma_{y \max} = 45,8 / 4,2 = 10,9. \quad (3)$$

Анализ результатов моделирования:

1) наблюдается практически регулярное распределение нагрузок σ_x в поперечных сечениях ленты, что позволяет ограничиться

анализом НДС участка ленты, расположенного между осями двух смежных стержней;

2) нагрузка распределяется равномерно между прокладками, что указывает на возможность рассмотрения НДС одной прокладки;

3) максимальные нагрузки растяжения в прокладках в продольном направлении возникают между стержнями на поверхности отверстий, которые в данном случае являются концентраторами напряжений, максимальные нагрузки в поперечном направлении — на поверхности отверстий, обращённой к кромке стыка;

4) при заданной нагрузке расчётные значения запасов прочности превышают нормативные значения, т. е. нагрузки удовлетворяют условиям прочности стыка;

5) разработанная модель механического соединения ленты позволяет провести дальнейшие исследования НДС при различных значениях геометрических параметров стыка (диаметра и шага установки стержня, числа рядов стержней и т. д.) для их оптимизации.

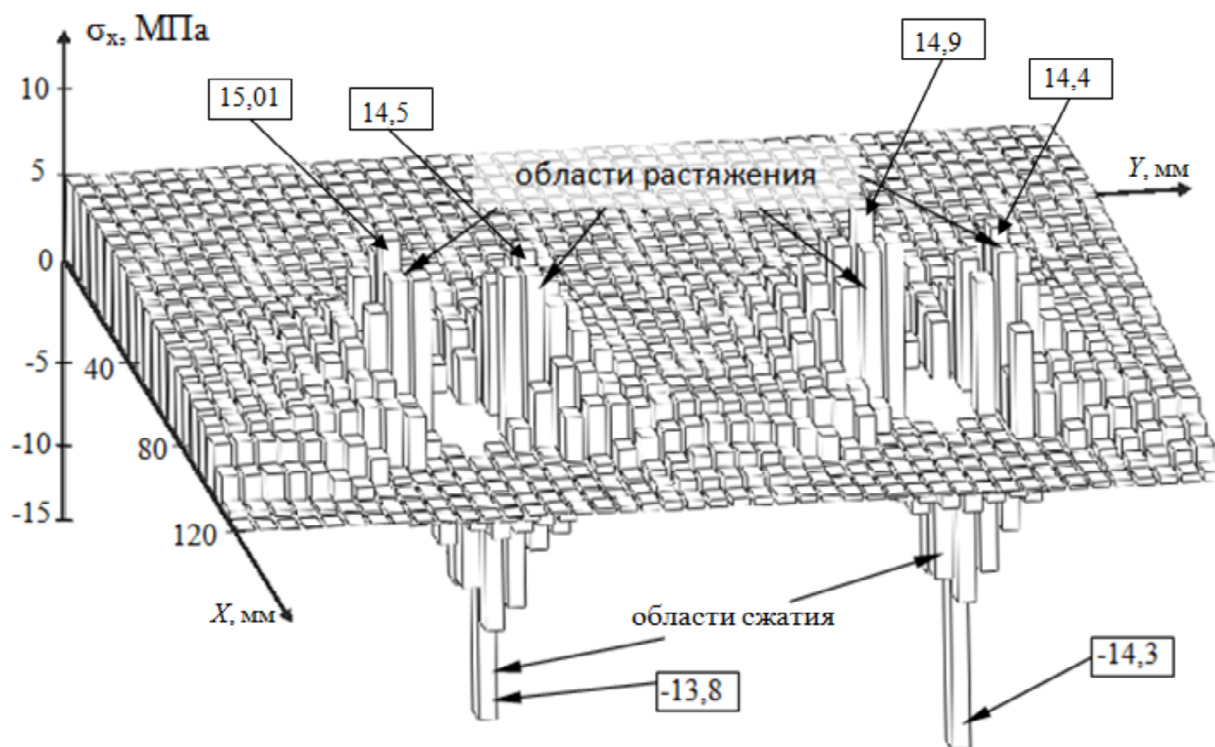


Рисунок 7 Фрагмент диаграммы распределения нормальных напряжений σ_x в прокладке ленты 800 EP-800/4-5+2

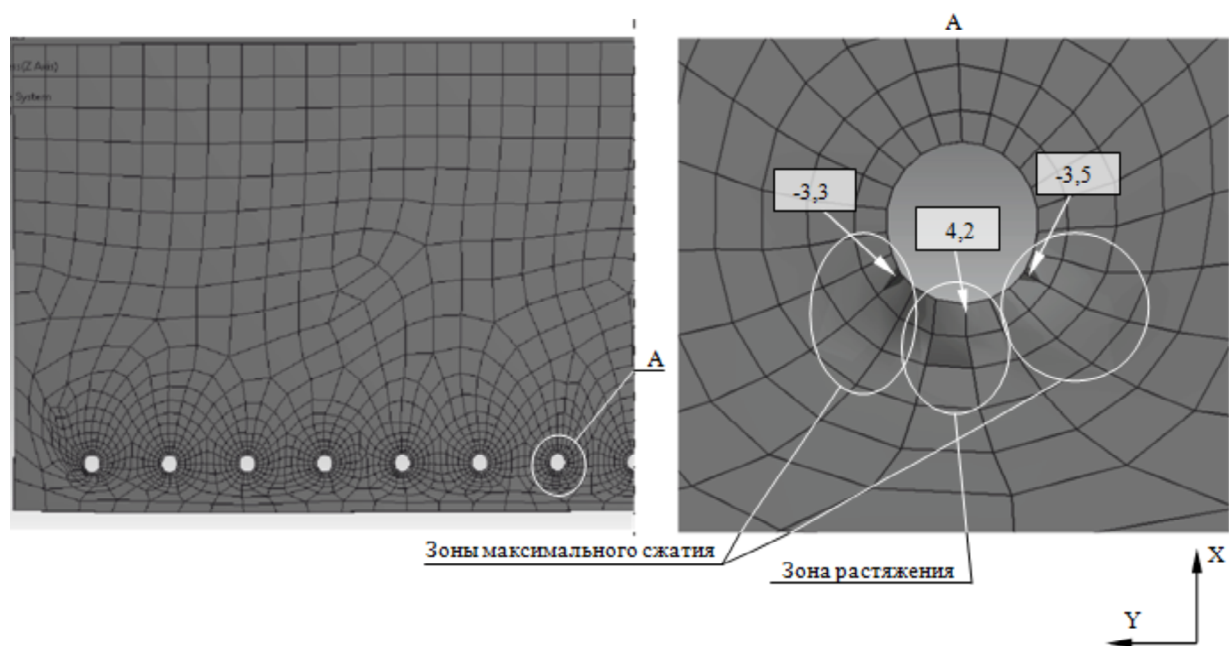


Рисунок 8 Распределение нормальных напряжений σ_y в прокладке ленты 800 EP-800/4-5+2 вокруг отверстия (сечение в плоскости xy)

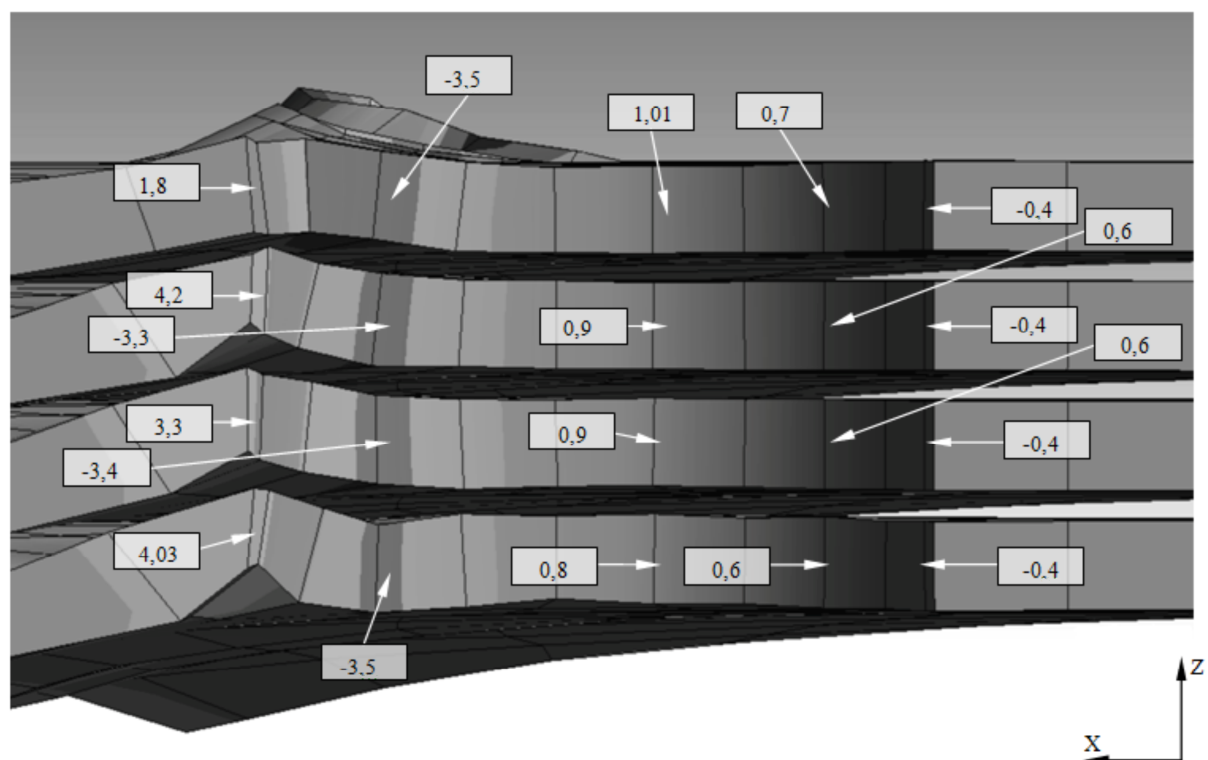


Рисунок 9 Распределение нормальных напряжений σ_y в прокладке ленты 800 EP-800/4-5+2 вокруг отверстия (сечение в плоскости xz)

Выводы и направления дальнейших исследований. Разработана компьютерная модель механического соединения резиноканевых конвейерных лент с применением программного комплекса ANSYS Workbench, позволяющая проводить исследования напряжённно-деформированного состояния элементов конвейерной ленты

при всём многообразии их геометрических параметров, физико-механических свойств ленты и внешних воздействий. Предполагается адаптация модели для исследования напряжённно-деформированного состояния стыка на криволинейных поверхностях барабанов и определения зависимостей напряжения ленты от параметров стыка.

Библиографический список

1. Правила технической эксплуатации ленточных конвейеров на предприятиях чёрной металлургии [Текст]. — М. : Металлургия, 1987. — 104 с.
2. ДСТУ 10124183643.001-2003. Змикання та ремонт гумовотканевих конвеєрних стрічок рознімними з'єднувачами. Вимоги до технології виконання [Текст] : чинний від 2003-10-14. — Київ : Мінпаливенерго України, 2003. — 46 с.
3. Руководство по выбору и эксплуатации конвейерных лент ЗАО «Курскрезинотехника» [Текст] / Под ред. Ю. А. Михайлова, Ю. А. Кондрашина. — [2-е изд., перераб. и доп.]. — М. : ЗАО «Курскрезинотехника», НПК «Трансбелт», 2004. — 132 с.
4. Скворцов, А. М. Совершенствование стыковки конвейерных лент [Текст] / А. М. Скворцов, Б. А. Кроль, В. В. Шконда // Шахтный и карьерный транспорт. — М. : Недра, 1983. — Вып. 8. — С. 26–30.
5. Кондрашов, Ю. А. Опыт эксплуатации механических соединений «Флекско» для стыковки конвейерных лент на угольных шахтах и промышленных предприятиях России [Текст] / Ю. А. Кондрашов, А. Н. Комраков, Вальтер Зюльце, Рудольф Вебер и др. // Горная промышленность. — М. : Гемос Лимитед, 2002. — № 2. — С. 39–45.
6. Комраков, А. Н. Применение механических соединений для стыковки конвейерных лент на угольных шахтах и промышленных предприятиях России [Текст] / А. Н. Комраков, А. Ю. Кондрашин, Р. Н. Николаев // Горный инженер : горный информационно-аналитический бюллетень. — М. : Горная книга, 2009. — № 10. — С. 44–55.
7. Бруйка, В. А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench [Текст] : учеб. пособ. / В. А. Бруйка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова. — Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. — 271 с.
8. Корнеев, С. В. Коэффициенты модели Муни – Ривлина в пакете программ ANSYS WORKBENCH, полученные для обкладочной резины шахтных конвейерных лент [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ИПЦ «Ладо», 2014. — Вып. 42. — С. 45–49.
9. Галкин, В. И. Влияние типов и характеристик лент на эксплуатационные параметры специальных ленточных конвейеров [Текст] / В. И. Галкин, Е. Е. Шешко, Е. С. Сазанкова // Горный журнал. — М. : Издательский дом «Руда и металлы», 2015. — № 8. — С. 88–91.

© Корнеев С. В.

© Доброногова В. Ю.

© Долгих В. П.

© Захаров О. В.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н., к.т.н., доц., и. о. зав. каф. ГЭиТС СУНИГОТ ЛНУ им. Даля Петровым А. Г.

Статья поступила в редакцию 17.09.18.

д.т.н. Корнєєв С. В., к.т.н. Доброногова В. Ю., Долгих В. П., Захаров О. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕХАНІЧНИХ СТИКІВ КОНВЕЄРНИХ СТРИЧОК

Наводиться модель і результати моделювання напружено-деформованого стану механічного стику конвеєрних стрічок в програмному комплексі ANSYS Workbench. В процесі моделювання встановлюються характеристики напружено-деформованого стану механічного стику, а саме: компоненти тензора, головні напруження, напрямні косинуси, коефіцієнти концентрації напружень і фактичні запаси міцності конструктивних елементів.

Ключові слова: конвеєрна стрічка, механічний стик, напружено-деформований стан, моделювання, ANSYS Workbench.

Doctor of Tech. Sc. Korneiev S. V., PhD Dobronogova V. Yu., Dolgikh V. P., Zaharov O. V. (SEI HPE "DonSTU", Alchevsk, LPR)

MODELING THE STRESS-STRAIN STATE OF MECHANICAL JOINTS OF CONVEYOR BELT

There have been given the model and the results of modeling the stress-strain state of mechanical joint of conveyor belt in software environment ANSYS Workbench. When modeling there has been determined the characteristics of stress-strain state of mechanical joint, namely: tensor components, principal stresses, directional cosines, stress concentration factor and real strength reserves of design elements.

Key words: conveyor belt, mechanical joint, stress-strain state, modeling, ANSYS Workbench.

УДК 621.774.3

д.т.н. Еронько С. П.,
к.т.н. Ткачёв М. Ю.,
к.т.н. Ошовская Е. В.,
Ковалёва О. А.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ НОЖНИЦ ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОЙ РЕЗКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ

Представлены конструктивные особенности, а также результаты теоретических и экспериментальных исследований параметров работы ножниц для качественной резки тонкостенных труб. Ножницы позволяют реализовать двухстадийный процесс разделения трубы на мерные длины, при котором исключается смятие её торцевых поверхностей.

Ключевые слова: тонкостенная труба, смятие торца, клиновой нож, сила реза, гидроцилиндр, электропривод, крутящий момент.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Заключительной технологической операцией производства проката, как известно, является его порезка на мерные длины. При этом используют различные способы разделения на части прокатной продукции с применением дисковых пил, абразивных кругов или ножниц. Выбор типа оборудования, с помощью которого осуществляют указанную операцию в потоке прокатного стана, зависит в первую очередь от формы поперечного сечения выпускаемой продукции. В частности, при производстве труб предпочтение отдают порезке пилами или абразивными кругами, что обусловлено стремлением получить требуемое качество торцевых частей разделяемого профиля, от которого зависит его товарный вид [1–3].

Следует отметить, что процесс резки фасонных профилей вращающимися с большой скоростью дисковыми элементами сопровождается значительным шумовым эффектом с одновременным выбросом большого количества искр и абразивных частиц, а это требует применения дополнительных мер по охране труда рабочего персонала. В связи с этим в последние годы проводились исследования, направленные на изучение возможности успешного применения ножниц для резки сложных прокатных профилей [4–6].

Постановка задачи. Целью данной работы является обоснование конструктивных и энергосиловых параметров ножниц, позволяющих при резке тонкостенных труб устранить деформацию их торцевой поверхности и тем самым улучшить товарный вид и исключить потери полых профилей, связанные с необходимостью удаления деформированных частей.

Изложение материала и его результаты. Как показали результаты модельных исследований процесса резки тонкостенных труб клиновыми ножами, проведённые ранее сотрудниками кафедры «Механическое оборудование заводов чёрной металлургии им. профессора Седуша В. Я.» Донецкого национального технического университета, смятие торцевых поверхностей сварных и цельнотянутых труб можно исключить при двухстадийном их разделении на части. Для этого на трубе в месте реза предварительно выполняют лыску, ослабляющую поперечное сечение прокатного профиля, а затем клиновым ножом осуществляют его резку. Для наглядности на рисунке 1 приведены фотографии торцевых частей труб, разделённых на части по одной и двухстадийной схемам резки [7].

Реализация резки по второй схеме предполагает наличие ножниц, имеющих в своём составе два механизма, обеспечи-

вающих одновременное движение с разными скоростями в двух взаимно перпендикулярных плоскостях ножей, осуществляющих соответственно надрез на наружной поверхности трубы и последующее разделение её на части. При этом горизонтально перемещающийся нож должен выполнить лыску на трубе до момента контакта с нею острия вертикально опускающегося клинового ножа.

В результате выполненного поиска по литературным и патентным фондам уда-

лось выявить несколько конструктивных схем режущих систем, отличающихся способом реализации силового воздействия двух ножей на разрезаемую трубу и согласования порядка их относительного перемещения в процессе резки. Все отобранные для сопоставительного анализа кинематические схемы известных систем качественной резки трубного профиля можно разделить на две основные группы в зависимости от числа приводов, применяемых в них для сообщения движения двум ножам.

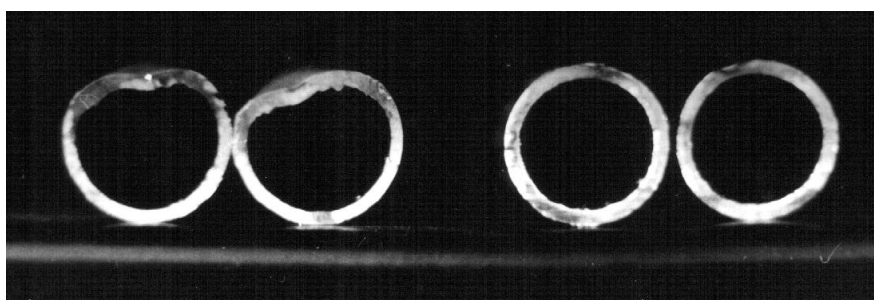


Рисунок 1 Вид торцевой части труб после разделения на части по одно- (а) и двухстадийной (б) схемам резки

К первой группе следует отнести ножницы с двумя гидравлическими цилиндрами, которые последовательно включают в работу с заданным временным интервалом по запускающей команде, поступающей от блока управления. Для согласованного действия обоих силовых цилиндров ножницы снабжены достаточно сложной системой регулирования, требующей настройки в случае необходимости перехода к порезке трубы другого диаметра.

Ножницы, отнесённые ко второй группе, имеют один силовой агрегат, приводящий в движение оба ножа по закону, задаваемому механической автоматикой благодаря применению в них специальных кинематических схем.

С учётом достоинств и недостатков выявленных аналогов авторами была предложена конструкция малогабаритных ножниц с комбинированным режущим блоком, схема которого представлена на рисунке 2. Требуемая последовательность взаимодей-

ствия элементов разработанной системы ножниц реализована за счёт обеспечения кинематической связи между ними посредством двух вертикальных и одной горизонтальной зубчатых реек, находящихся в зацеплении с размещёнными на одном валу зубчатыми колёсами с разными диаметрами делительных окружностей, соотносящимися между собой так, что скорость горизонтальной рейки превышает скорость движения вертикальных реек в 1,5 раза.

Указанный режущий блок может работать в комплектации с гидравлическим или электромеханическим приводами (рис. 3).

В первом варианте перемещение суппорта с клиновым ножом обеспечивает вертикально закреплённый на станине ножниц силовой гидроцилиндр, шток которого посредством шарнира соединён с подвижной частью режущего блока.

Ножницы с электромеханическим приводом дополнительно включают одноколесный вал с шатуном для сообщения суп-

порту с верхним клиновым ножом вертикального перемещения, тихоходную зубчатую передачу, двухступенчатый коническо-цилиндрический редуктор и электродвигатель. При этом колесо тихоходной зубчатой передачи является одной из щёк одноко-

ленного вала, что позволило обеспечить достаточную компактность привода.

Расчёт и конструирование предложенных малогабаритных ножниц предполагают наличие информации о технологической нагрузке, преодолеваемой их приводом.

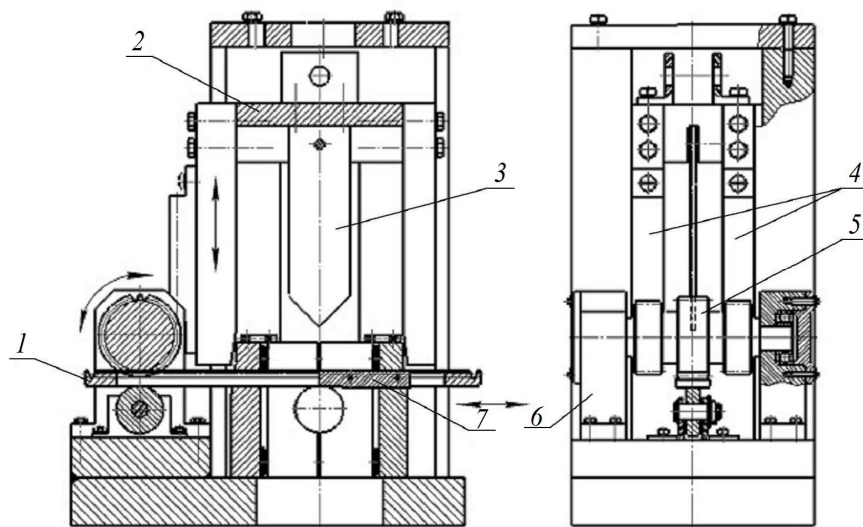


Рисунок 2 Кинематическая схема механической синхронизации движения горизонтального и вертикального ножей режущего блока ножниц:
1 — горизонтальная зубчатая рейка; 2 — суппорт; 3 — вертикальный клиновидный нож;
4 — вертикальные зубчатые рейки; 5 — вал с зубчатыми колёсами;
6 — подшипниковая опора вала; 7 — горизонтальный нож

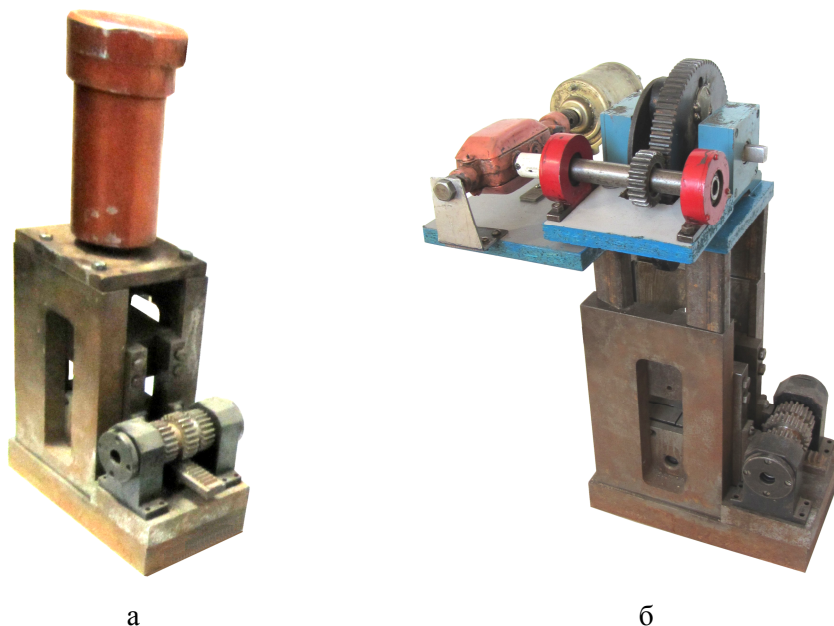


Рисунок 3 Конструктивное исполнение разработанных ножниц с гидравлическим (а) и электромеханическим (б) приводами

Значительную её часть наряду с силами сопротивления, действующими в узлах сочленения элементов механической системы, составляет сила, необходимая для разрушения целостности трубы [8].

В соответствии с методикой определения усилия резания наклонными ножами, описанной в работе [9], искомую силу можно рассчитать по формуле

$$P = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \sigma_B \cdot 2F_{рез}, \quad (1)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий отношение максимального сопротивления срезу к пределу прочности; k_2 — коэффициент, учитывающий увеличение усилия резания при затуплении ножей; k_3 — коэффициент, учитывающий увеличение усилия резания из-за наличия бокового зазора между ножами; σ_B — предел прочности материала разрезаемой трубы, МПа; $F_{рез}$ — площадь сечения трубы в момент начала сдвига металла, мм².

На основании практических данных следует принимать следующие значения приведенных коэффициентов: $k_1=0,6-0,7$; $k_2=1,15-1,25$; $k_3=1,2-1,3$.

При разделении трубы клиновидным ножом сопротивление резанию оказывает не вся площадь её поперечного сечения, а только часть, форма и размеры которой при одинаковом перемещении режущих кромок постоянно изменяются. В качестве примера на рисунке 4 показана схема разбиения площади поперечного сечения трубы с наружным диаметром D и внутренним диаметром d при дискретном перемещении клиновидного ножа с шагом Δ .

Для нахождения площадей сечения трубы, подверженных сдвигу при переходе вертикального режущего ножа из одного положения в следующее, использовали одну из функций САПР «КОМПАС», которая позволяет с высокой точностью получить нужную расчётную информацию для любых диаметров труб с различной толщиной стенок и заданной ширины ре-

жущего ножа. Поскольку сдвиг стенки трубы в зоне реза происходит одновременно по двум плоскостям контакта клиновидного ножа с нижними блоками профилированных ножей, то в формулу (1) подставляют удвоенное значение площади сечения трубы, подвергаемой сдвигу.

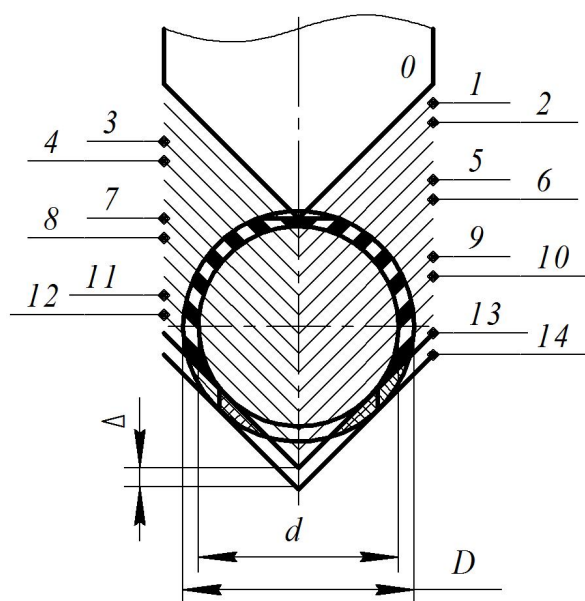


Рисунок 4 Расчётная схема для определения площади срезаемого элемента в поперечном сечении трубы при пошаговом перемещении клиновидного ножа

По полученным текущим значениям площади срезаемого сечения трубы с использованием приведённой выше зависимости рассчитывали соответствующие силовые нагрузки, преодолеваемые приводом ножниц в процессе разделения круглого профиля. На рисунке 5 приведены графики изменения силы резания труб диаметром 10, 20 и 30 мм с толщиной стенок 1, 2 и 3 мм в зависимости от вертикального перемещения клиновидного ножа, построенные по расчётным данным в соответствии со схемой, показанной на рисунке 4.

По максимальному значению силы P для трубы с наибольшим диаметром, которая может быть разрезана на проектируемых ножницах, определяют диаметр поршня силового гидроцилиндра $d_{ц}$ при выбранном из стандартного ряда значений

давления p_n , развиваемого насосом приводной маслостанции. Затем с учётом скорости движения штока цилиндра, равной скорости движения ножа, рассчитывают требуемый расход насоса станции Q .

В случае расчёта энергосиловых параметров электромеханического привода ножниц, используя взятые из графиков на рисунке 5 текущие значения силы P , передаваемой шатуном при фиксированных углах поворота одноколенного вала φ , и соответствующие им плечи, путём их перемножения получают зависимость изменения момента сопротивления, преодолеваемого приводом, в течение выполнения одного реза трубы. В качестве примера на рисунке 6 показан характерный вид графиков изменения указанных параметров.

Далее с использованием построенной нагрузочной диаграммы определяют значение эквивалентного момента по формуле

$$M_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{\sum t_i}}.$$

Здесь M_i и t_i — момент и время для простых участков, на которые разбита нагрузочная диаграмма.

Тогда расчётную мощность привода ножниц вычисляют по формуле

$$N_{\text{пр}} = \frac{M_{\text{экв}} \omega_{\text{кв}}}{\eta},$$

где $\omega_{\text{кв}}$ — угловая скорость поворота одноколенного вала; η — общий КПД механической системы.

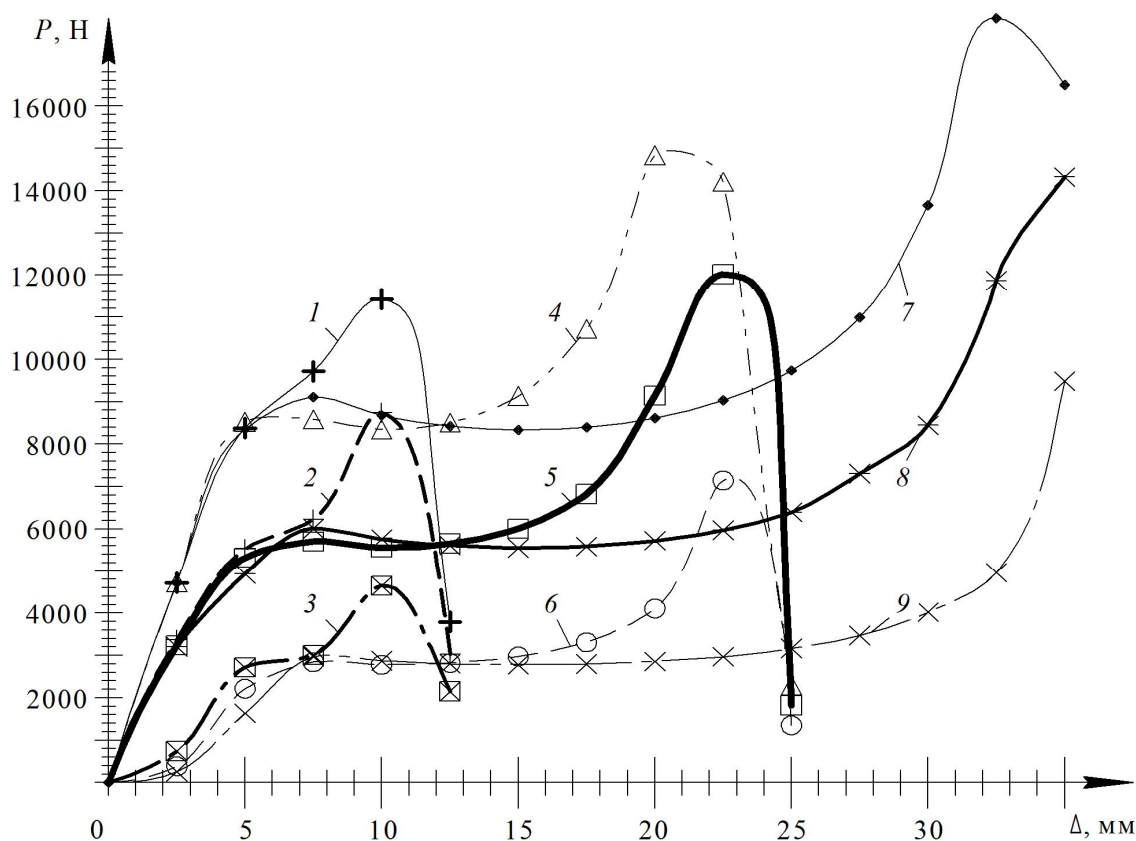


Рисунок 5 Графики зависимости $P = f(\Delta)$ для тонкостенных труб различного типоразмера:

- 1 — $D = 10$ мм, $d = 6$ мм; 2 — $D = 10$ мм, $d = 8$ мм; 3 — $D = 10$ мм, $d = 9$ мм;
 4 — $D = 20$ мм, $d = 14$ мм; 5 — $D = 20$ мм, $d = 16$ мм; 6 — $D = 20$ мм, $d = 18$ мм;
 7 — $D = 30$ мм, $d = 24$ мм; 8 — $D = 30$ мм, $d = 26$ мм; 9 — $D = 30$ мм, $d = 28$ мм

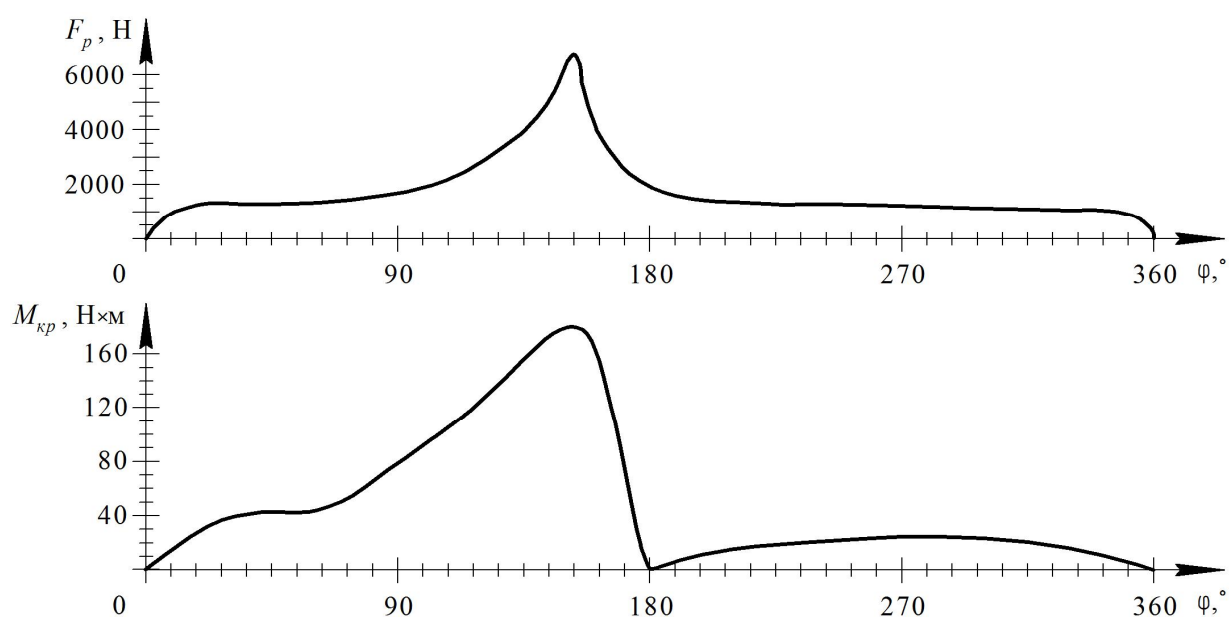


Рисунок 6 Нагрузочная диаграмма электромеханического привода ножниц при порезке трубы диаметром 20 мм с толщиной стенки 1 мм

Выбранный из каталога по полученному значению мощности электродвигатель проверяют на перегруз:

$$M_{\max} / M_n \leq \lambda,$$

где M_{\max} — максимальное значение момента, преодолеваемого приводом ножниц, взятое из нагрузочной диаграммы; M_n — паспортное значение номинального

момента, развиваемого выбранным двигателем привода; λ — допускаемое кратковременное превышение номинальной нагрузки по паспорту двигателя.

По приведённым зависимостям рассчитали энергосиловые параметры приводов ножниц, предназначенных для порезки тонкостенных труб различного диаметра (данные таблицы 1).

Таблица 1

Расчётные параметры привода ножниц для резки труб

Размеры трубы, мм		Максимальная силареза P , Н	Скорость движения ножа, м/с	Тип привода						
				Гидравлический			Электромеханический			
Значения параметров				Значения параметров						
D	d			p_n , МПа	d_u , мм	Q , л/мин	$\omega_{кв}$, с ⁻¹	M_{max} , Н·м	$M_{экв}$, Н·м	N , кВт
10	9	4300	0,04	1,0	75	11	1,5	163	95	0,18
	8	8300		1,0	100	19		315	185	0,35
	6	11200		1,0	120	27		425	250	0,47
20	18	7200	0,04	2,0	65	8	1,5	273	160	0,3
	16	12000		2,0	90	15		456	265	0,5
	14	15000		2,0	100	19		570	330	0,62
30	28	9800	0,04	2,5	70	9	1,5	372	215	0,4
	26	14000		2,5	85	14		532	310	0,58
	24	17000		2,5	90	15		640	375	0,7

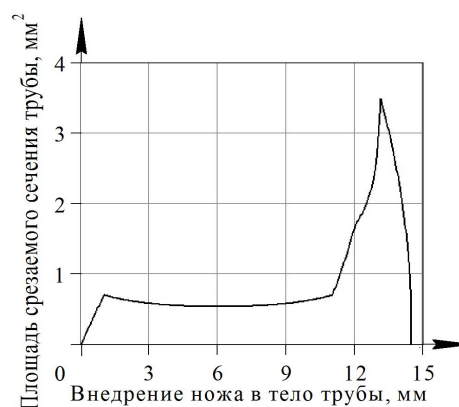
Экспериментальную проверку правильности расчётных данных выполнили на лабораторных ножницах, показанных на рисунке 3,а. В ходе эксперимента осуществляли контроль нагрузок, действующих на режущий механизм. При этом использовали тензометрический преобразователь, работающий в комплексе с усилителем, АЦП и ЭВМ. Тензодатчики сопротивлением 200 Ом, собранные в мостовую схему, наклеивали на боковые поверхности суппорта. Электрический сигнал, возникающий при разбалансе измерительного моста в момент силового взаимодействия ножа с разрезаемой трубой, по экранированному кабелю поступал на вход усилителя. Далее усиленный сигнал, представляющий собой напряжение переменного тока, преобразовывался АЦП в двенадцатиразрядный числовой код. Последующая обработка цифрового представления сигнала выполнялась ЭВМ в реальном масштабе времени при помощи прикладной программы OSCILLOSCOPE фирмы L-CARD, поставляемой в комплекте с АЦП. Для опытной резки использовали алюминиевую трубу диаметром 12 мм с толщиной стенок 1 мм.

На полученном графике изменения усилия резания во времени (рис. 7, б) можно выделить участки, соответствующие трём периодам процесса разделения трубного проката на части: началу внедрения ножа в тело трубы, сдвигу металла по плоскости резания и скалыванию (отрыву) оставшейся неразрезанной части сечения трубы [10].

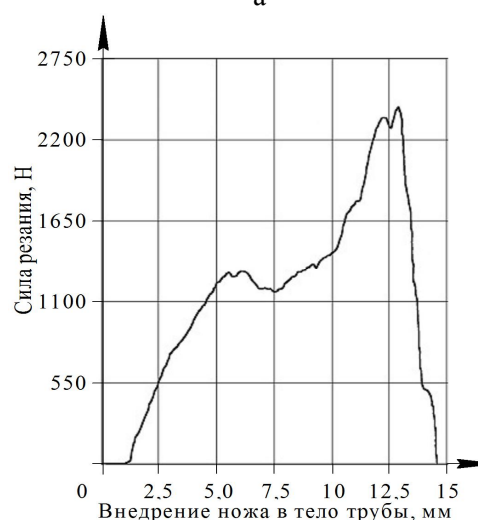
Сопоставление расчётных значений силы резания с данными, полученными экспериментальным путём, показало, что максимальное расхождение между ними не превышало 15 %, т. е. предложенная методика определения энергосиловых параметров процесса резки труб клиновыми ножками приемлема для выполнения инженерных расчётов.

Благодаря компактности и относительно небольшой массе разработанный режущий блок, снабжённый гидроприводом, может быть легко встроен в конструктивную схему

летучих ножниц, работающих в потоке трубосварочного стана. В этом случае режущий блок с помощью специального механизма должен перемещаться вместе с трубой и приводиться в действие в момент выравнивания их скоростей. Причём привод механизма реза летучих ножниц следует дополнительно снабдить гидравлическим аккумулятором для осуществления ускоренной резки трубы в процессе её движения. Наличие аккумулятора позволяет отказаться от использования приводной маслостанции с большой объёмной подачей рабочей жидкости в силовой гидроцилиндр и тем самым снизить мощность её электродвигателя.



а



б

Рисунок 7 Изменение площади срезаемого сечения (а) и силы сопротивления, действующей на клиновое лезвие при резке алюминиевой трубы диаметром 12 мм с толщиной стенки 1 мм

Вместе с тем следует отметить, что применяемый в ножницах механизм фиксации трубы рассчитан на её конкретный типоразмер (наружный диаметр). Это требует замены двух пар неподвижных ножей при переходе на порезку профиля с другими геометрическими параметрами поперечного сечения и наличия необходимого сменного комплекта нижних ножевых блоков, соответствующих сортаменту производимых на стане тонкостенных труб.

Ножницы с механическим приводом рекомендуются применять в условиях проведения ремонтных работ, когда требуется автономность их функционирования, а про-

должительность реза не является лимитирующим фактором. В этом случае их можно размещать на тележке, благодаря чему легко менять положение на ремонтной площадке.

Выводы и направление дальнейших исследований. Практическое применение разработанных ножниц позволит предотвратить деформацию торцевых частей тонкостенных труб, разрезаемых на мерные длины в потоке трубосварочного стана, и тем самым устранить потери трубного профиля из-за необходимости удаления его деформированных частей, которые составляют от 0,5 до 1 % в зависимости от наружного диаметра.

Библиографический список

1. Ищенко, А. А. Пилы горячей резки проката. Конструкция и расчёт [Текст] : монография / А. А. Ищенко, Е. А. Лоза. — Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ», 2012. — 251 с.
2. Лоза, Е. А. Исследование геометрических и энергосиловых характеристик при упрочнении пильных дисков [Текст] // Захист металургійних машин від поломок : зб. науков. праць. — Вип. 14. — Мариуполь. — 2012. — С. 130–135.
3. Карнаух, С. Г. Разработка оборудования для разделения сортового проката (труб) на мерные заготовки с применением нитинола [Текст] / С. Г. Карнаух, Д. С. Карнаух, Н. В. Чоста // Сб. научн. тр. ДГМА. — Краматорск : ДГМА. — 2015. — № 2. — С. 323–326.
4. Петров, П. А. Динамика усилий и моментов резания сортового металлопроката в горячем состоянии [Текст] / П. А. Петров, Е. В. Полилов, Д. И. Морозов // Сб. научн. трудов. ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ. — 2009. — Вып. 29. — С. 241–251.
5. Боровик, П. В. Теоретическое определение силы резки ножницами фасонных профилей [Текст] / П. В. Боровик, П. А. Петров // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2013. — № 5. — С. 41–44.
6. Ульяницкий, В. Н. Влияние формы и расположения профиля на энергосиловые параметры резки фасонного металлопроката сортовыми ножницами [Текст] / В. Н. Ульяницкий, П. А. Петров // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ. — 2016. — Вып. 3. — С. 149–156.
7. Моделирование процесса качественной резки тонкостенных труб на летучих ножницах [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у металургії і машинобудуванні : зб. наук. праць. — Краматорськ, 2000. — С. 125–128.
8. Расчёт силы резания тонкостенных труб клиновыми ножами [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : международный сб. научн. трудов. — Донецк : ДонНТУ. — 2003. — Вып. 24. — С. 61–66.
9. Королев, А. А. Механическое оборудование прокатных цехов чёрной и цветной металлургии [Текст] / А. А. Королев. — М. : Металлургия, 1976. — 544 с.
10. Теоретические и экспериментальные исследования силовых параметров процесса резки тонкостенных труб клиновыми ножами [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Вестник ДонНТУ. — 2016. — № 5 [5]. — С. 15–21.

© Еронько С. П.
 © Ткачёв М. Ю.
 © Ошовская Е. В.
 © Ковалёва О. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., доц. каф. ОПМ ДонНТУ Ченцовым Н. А.,
д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.*

Статья поступила в редакцию 05.10.18.

**д.т.н. Єронько С. П., к.т.н. Ошовська О. В., к.т.н. Ткачов М. Ю., Ковальова О. О. (ДонНТУ,
м. Донецьк, ДНР)**

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ НОЖИЦЬ ДЛЯ ЯКІСНОГО РІЗАННЯ ТОНКОСТІННИХ ТРУБ

Наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень параметрів роботи ножиць для якісного різання тонкостінних труб. Ножиці дозволяють реалізувати двохстадійний процес розділення труби на мірні довжини, при якому виключається зминання її торцевих поверхонь. Ріжучий блок ножиць може працювати з використанням як гідравлічного, так і електро механічного приводів.

Ключові слова: тонкостінна труба, зминання торця, клиновий ніж, сила різання, гідроциліндр, маслостанція, крутний момент, електропривод.

**Doctor of Tech. Sc. Eron'ko S. P., PhD Oshovskaya E. V., PhD Tkachov M. Yu., Kovaleva O. A.
(DonNTU, Donetsk, DPR)**

RESEARCH ON THE POWER AND FORCE PARAMETERS OF SHEARS FOR HIGH- QUALITY CUTTING OF THIN-WALLED PIPES

The results of theoretical and experimental studies on the working parameters of shears for high-quality cutting of thin-walled pipes are presented. Shears allow providing a two-stage process of dividing the pipe into dimensional lengths that eliminates crushing of its end surfaces. Shears' cutting unit can work using both hydraulics and electromechanical drives.

Key words: thin-walled pipe, end crushing, wedge knife, cutting force, hydraulic cylinder, oil station, torque, electric drive.

УДК 669.14

д.т.н. Еронько С. П.,
к.т.н. Ошовская Е. В.,
к.т.н. Ткачёв М. Ю.,
Понамарёва Е. А.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ВИБРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СИСТЕМ КОВШОВЫХ ЗАТВОРОВ

Приведены результаты сопоставительных экспериментальных исследований параметров функционирования трёх типов вибраторов, предназначенных для установки на шиберный затвор сталеразливочного или промежуточного ковшей с целью снижения интенсивности процесса зарастания выпускного канала за счёт вибрационного разрушения связей между частями слоя отложений, формирующегося на его стенках. Даны рекомендации по практическому применению устройства, обеспечивающего реализацию предложенного технического решения.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, шиберный затвор, выпускной канал, тугоплавкие включения, направленное вибрационное воздействие, колебания, частота, амплитуда.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Уменьшение проходного сечения выпускного канала сталеразливочного или промежуточного ковшей вследствие отложения на его стенках тугоплавких неметаллических включений является одной из проблем, которую до настоящего времени не удалось полностью решить, несмотря на многочисленные исследования, проводившиеся в последнее десятилетие на ряде отечественных и зарубежных металлургических предприятий. Её сложность обусловлена тем, что формирование в канале шиберного затвора слоя отложений зачастую связано с одновременным развитием в разной степени тепловых, гидродинамических и химических процессов [1]. В связи с этим предлагаемые меры по снижению интенсивности затягивания канала ковшовых затворов предполагают применение разнообразных технических и технологических решений, призванных ослабить негативное влияние установленных ранее факторов.

В качестве действенных приёмов, позволяющих замедлить процесс зарастания каналов огнеупорных элементов шиберного затвора, следует признать:

– применение профиля продольного сечения сталевыпускного канала с мини-

мально возможными местными гидравлическими сопротивлениями [2];

– нанесение на стенки канала специального покрытия, образующего при взаимодействии с неметаллическими включениями легкоплавкие соединения, смываемые с контактной поверхности потоком разливаемой стали [3];

– подачу в канал шиберного затвора через пористые вставки инертного газа, пузырьки которого препятствуют образованию слоя включений [4];

– осуществление подогрева корпуса разливочного стакана за счёт тепла, выделяемого при сгорании специальной газовой смеси, вдуваемой через пористый элемент нижней огнеупорной плиты затвора при кратковременном перекрытии его выпускного канала [5];

– использование электрического подогрева корпуса разливочного стакана с помощью специального нагревательного элемента, вмонтированного в гнездовой блок днища ковша [6].

Анализ информации об эффективности использования на практике отмеченных мероприятий позволяет сделать вывод о том, что данный вопрос по-прежнему остаётся актуальным и поиски его решения должны быть продолжены.

Постановка задачи. Задачей данной работы является поиск технического решения, позволяющего обеспечить активное влияние на интенсивность процесса затягивания сталевого канала разливочного ковша.

Изложение материала и его результаты. Сотрудниками кафедры «Механическое оборудование заводов чёрной металлургии им. профессора Седуша В. Я.» Донецкого национального технического университета проведены модельные исследования, результаты которых свидетельствуют о возможности активного влияния вибрационного воздействия на снижение интенсивности развития процесса зарастания канала шибера затвора путём возбуждения вертикально направленных колебаний с заданными амплитудой и частотой. Для этого предлагается разливочный узел ковша снабдить специальным устройством, возбуждающим вибрацию [7].

Предварительная конструктивная проработка такого технического решения показала, что эффективность его промышленного применения в значительной мере будет зависеть от того, в какой мере вибратор, являющийся вспомогательным структурным элементом системы ковшевого затвора, отвечает комплексу требований: компактность; простота и безопасность подвода энергоносителя, необходимого для возбуждения низкочастотной вибрации; возможность гибкого регулиро-

вания параметров колебательного процесса; минимизация числа дополнительных операций, связанных с обслуживанием.

Для обоснования выбора конструктивного исполнения такого вибратора и выдачи рекомендаций по его практическому применению необходимо проведение при одинаковых условиях сопоставительных испытаний нескольких типов устройств, обеспечивающих возбуждение направленных колебаний с соответствующей частотой и амплитудой. С этой целью из всего многообразия известных технических решений, позволяющих реализовать колебательный процесс, были отобраны три типа вибраторов и изготовлены их действующие образцы, имевшие одинаковую инерционную массу подвижных элементов. Речь идёт об электромеханическом, пневматическом и электромагнитном вибраторах, схематично представленных на рисунках 1–3.

Первый из них являлся двухдебалансным вибратором направленного действия. Он включал два параллельных вала 1, установленных в подшипниковых опорах, синхронизированных между собой парой зубчатых колёс 2 и 8 с одинаковым числом зубьев и несущих на своих консольных хвостовиках дебалансы 7. Крутящий момент каждому валу передавался посредством клиноременной передачи 4 от отдельного микродвигателя постоянного тока 3 с регулируемой частотой вращения.

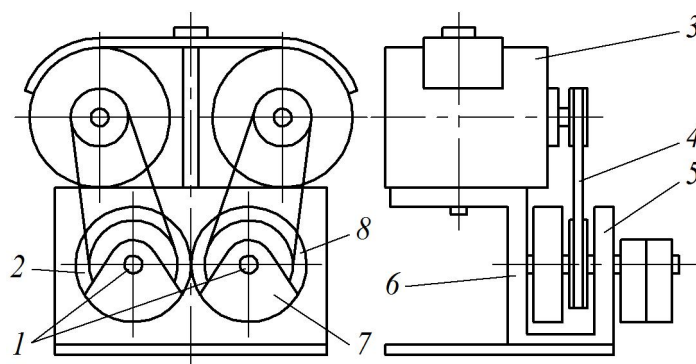


Рисунок 1 Схема электромеханического вибратора направленного действия

Вибратор был укомплектован набором съёмных дебалансов с целью возможности ступенчатого изменения обеспечиваемой им возмущающей силы за счёт варьирования количества закрепляемых на его валах грузов со смещённым центром массы. Развиваемую им вибрационную нагрузку задавали частотой колебаний и амплитудой. Амплитуду A вычисляли, используя выражение

$$A = \frac{m_{\partial} \varepsilon_{\partial}}{m_{\partial}},$$

где m_{∂} — масса дебалансов вибратора; ε_{∂} — эксцентриситет дебаланса; m_{∂} — масса вибратора.

Интенсивность вибрационного воздействия, оцениваемую виброускорением, определяли как

$$W = A\omega^2,$$

где ω — угловая скорость дебалансов.

Пневматический вибратор направленного действия (рис. 2) включал пустотелый цилиндрический корпус 5 с ввинченной в него крышкой 6, снабжённый хвостовиком 11 с наружной резьбой. Внутри корпуса размещён с возможностью относительного продольного перемещения сдвоенный поршень 2, удерживаемый в среднем положении частично сжатыми пружинами 4 и 10. В стенке пустотелого цилиндрического корпуса имеются два перепускных канала 7 и 9, а также два выпускных отверстия 1 и 3.

Подаваемый по трубопроводу 8 в среднюю часть рабочей полости сжатый воздух по каналу 7 поступает в нижнюю полость под сдвоенный поршень 2, который под действием давления переместится вверх, сжимая пружину 10 и вытесняя через открытое отверстие 1 в атмосферу воздух из полости, находящейся над ним. Вблизи своего крайнего верхнего положения сдвоенный поршень 2 перекроет выпускное отверстие 1 и перепускной канал 7 и одновременно с этим откроет выпускное отверстие 3 и перепускной канал 9, в результате

чего произойдёт реверсирование движения самого поршня. Под действием давления на верхнюю часть поршня он начнёт перемещение вниз, сжимая пружину 4 и вытесняя воздух через отверстие 3 в атмосферу из нижней части рабочей полости. Достигнув своего крайнего нижнего положения, поршень откроет выпускное отверстие 1 и перепускной канал 7, т. е. начнёт совершать колебания, частота и амплитуда которых зависит от давления воздуха и жёсткости пружин 4 и 10.

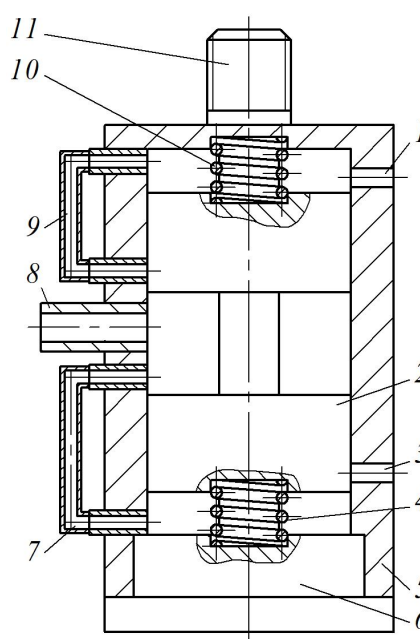


Рисунок 2 Схема пневматического вибратора направленного действия

Амплитуду колебаний A , возбуждаемых пневматическим вибратором, вычисляли по формуле

$$A = \frac{m_n s_n}{m_{\partial}},$$

где m_n — масса сдвоенного поршня вибратора; s_n — ход сдвоенного поршня из среднего положения в крайнее; m_{∂} — масса вибратора.

Электромагнитный вибратор (рис. 3) включал катушку, помещённую в метал-

лический корпус 2, закреплённый на основании 1. Внутри катушки размещён с возможностью относительного продольного перемещения медный боек-сердечник 4 с буртиком, упирающимся в несущую платформу 5, посредством двух шпилек 3 связанную с основанием катушки. Между верхним торцом корпуса катушки и буртиком бойка-сердечника коаксиально ему установлена цилиндрическая витая пружина 6. Перемещение бойка-сердечника в одну сторону осуществляется электромагнитными силами катушки, а в другую — силами упругости пружины. Частоту срабатывания электромагнитного вибратора

задавали с помощью специального регулятора, включавшего электродвигатель постоянного тока 7, приводившего через клиноременную передачу 8 во вращение установленный вертикально в подшипниковой опоре диск 9 по краю которого крепилась кулачки 10. При вращении диска кулачки поочерёдно замыкали контакт 11, через который от источника питания на обмотку катушки подавался ток. За счёт изменения скорости вращения диска и количества равномерно рассредоточенных по его периметру кулачков обеспечивалось регулирование в значительных пределах частоты колебаний сердечника катушки.

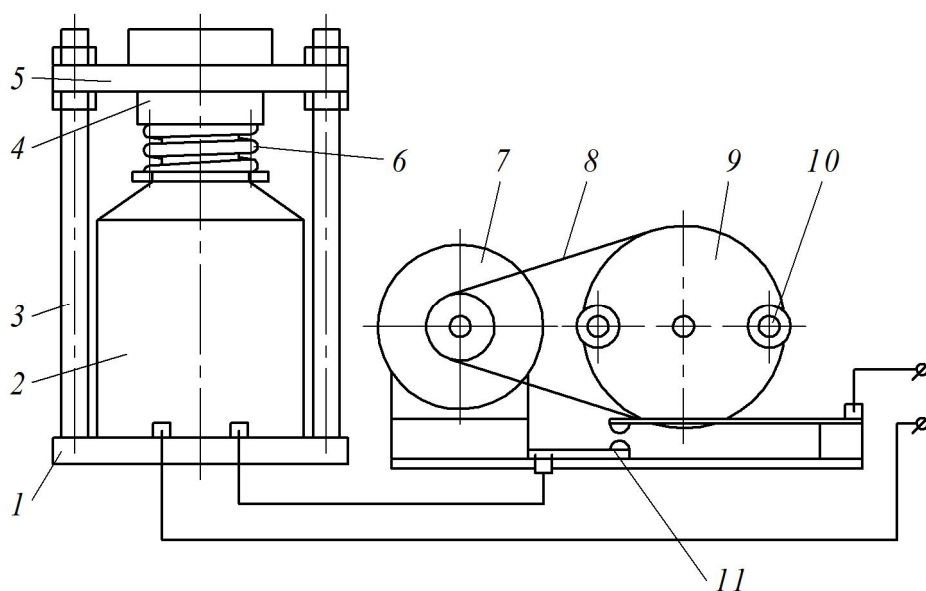


Рисунок 3 Схема электромагнитного вибратора направленного действия

Амплитуду колебаний при работе электромагнитного вибратора A вычисляли как

$$A = \frac{m_{\delta} s_{\delta}}{m_{\delta}},$$

где m_{δ} — масса бойка-сердечника; s_{δ} — ход бойка-сердечника; m_{δ} — масса вибратора.

В соответствии с планом эксперимента в ходе проводившихся модельных исследований получили информацию, необходимую для сопоставления значений пара-

метров функционирования трёх выбранных вибраторов, а также потребляемую ими мощность при развиваемой силе вибрационного воздействия.

Для контроля параметров исследуемого вибрационного процесса применили контрольно-измерительный комплекс, включавший двухкоординатный акселерометр ADX 1.210 фирмы ANALOG DEVICES и IBM-совместимый компьютер с установленной на его шине платой L-154 12-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) фирмы L-CARD.

Акселерометр позволял фиксировать линейное ускорение в пределах от $-10g$ до $+10g$ при частоте записи сигнала $1-10$ кГц. Требуемую частоту опроса акселерометра назначали исходя из условия

$$f_n \leq \frac{1}{T} \leq f_v,$$

где T — длительность импульса, составляющая $0,0002-0,001$ с.

Обработку цифрового представления сигналов, поступающих от акселерометра, выполняли на ЭВМ в реальном масштабе времени при помощи прикладной программы Power Graph 2.0.

Учитывая особенности функционирования каждого из трёх выбранных вибраторов во время проводившихся опытов для каждого из них, внимание уделяли в первую очередь тем параметрам, которые оказывали преобладающее влияние на эффективность работы конкретной вибрационной системы.

При работе с электромеханическим вибратором провели три серии измерений,

во время которых варьировали амплитуду и частоту возбуждаемых колебаний, чтобы оценить обеспечиваемую интенсивность вибрационного воздействия. Одновременно по показаниям вольтметра и амперметра блока питания двигателей постоянного тока, приводивших во вращение дебалансы, фиксировали потребляемую ими электрическую мощность для каждого опыта. Значения амплитуды колебаний, вызываемых вибратором, дискретно изменяли путём дискретного уменьшения массы его дебалансов с 45 до 15 г, а частоту их вращения — за счёт регулировали напряжения питания приводных электродвигателей. На рисунке 4 приведены характерные виды сигналов, зарегистрированных во время работы электромеханического вибратора направленного действия с различной частотой вращения двух дебалансов при неизменной их массе, а в таблице 1 представлены зафиксированные значения параметров функционирования данной вибрационной системы.

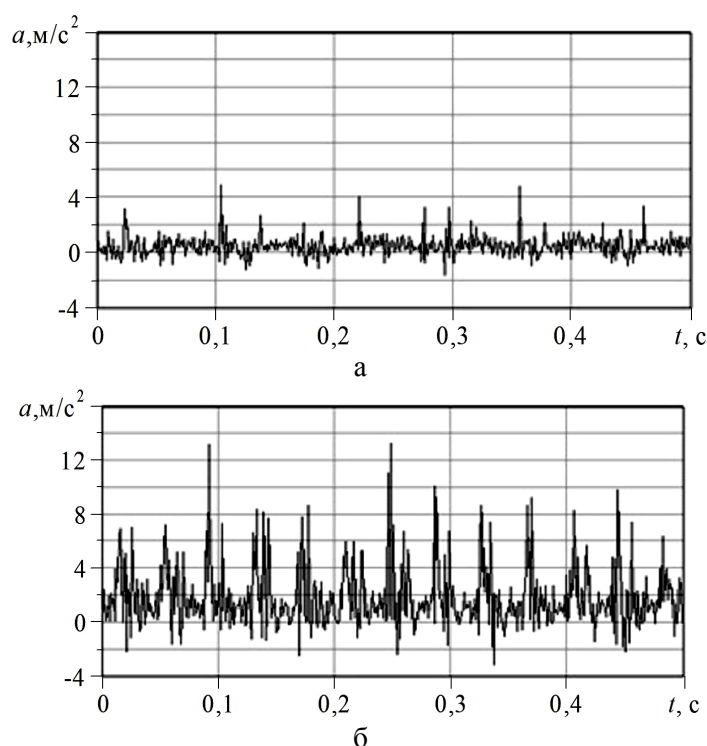


Рисунок 4 Виброускорение a , развиваемое электромеханическим вибратором при одинаковой массе дебалансов (45 г), вращающихся с частотой 50 с^{-1} (а) и 100 с^{-1} (б)

Таблица 1

Зафиксированные значения параметров функционирования электромеханического вибратора

Параметры дебалансов		Амплитуда колебаний вибратора, мм	Частота вращения дебалансов, с ⁻¹	Возникающее виброускорение, м/с ²	Развиваемая сила вибровоздействия, Н	Потребляемая вибратором мощность, Вт
Масса, г	Эксцентриситет, мм					
45	1		52	2,7	1,2	3
			104	10,82	4,87	6
			157	24,85	11,18	9
30	0,6		52	1,62	0,33	3
			10	6,49	2,92	6
			157	14,79	6,66	9
15	0,33		52	0,89	0,4	3
			104	3,57	1,6	6
			157	8,13	3,16	9

Во время исследования особенностей работы пневматического вибратора масса его подвижной части — сдвоенного поршня — была неизменной и составляла 25 г. Наряду с этим меняли жёсткость пружин, удерживавших его в среднем положении, а также варьировали давление и расход сжатого воздуха, выступавшего в качестве энергоносителя, обеспечивавшего функционирование вибрационной системы. Характерный вид сигналов, зафиксированных при работе пневматического вибратора с пружинами разной жёсткости, показан на рисунке 5.

Расход и давление воздуха, поступавшего в рабочую полость вибратора от мини-компрессора, контролировали соответственно с помощью ротаметра и манометра. Значение указанных величин затем использовали для расчёта значений потребляемой пневматическим вибратором мощности при различных его исходных параметрах. Зафиксированные значения исследуемых величин приведены в таблице 2.

При проведении опытов с использованием электромагнитного вибратора, как и в случае с пневматической вибросистемой, масса подвижной части, т. е. бойка-сердечника, оставалась неизменной (50 г), а на параметры возбуждавшихся колебаний влияли за счёт изменения жёсткости пружины, выталкивающей его из катушки

в момент отключения электропитания, а также напряжения, подаваемого на её обмотки с различной частотой замыкания контактов с помощью кулачков, установленных на вращающемся диске (рис. 3). Потребляемую электромагнитным вибратором электрическую мощность оценивали по произведению показаний вольтметра и амперметра использовавшегося блока питания вибрационной системы.

На рисунке 6 показаны формы сигналов о виброускорении, развиваемом электромагнитным вибратором при одинаковой жёсткости его возвратной пружины и различной частоте замыкания контактов в цепи электропитания обмоток катушки, а в таблице 3 приведены значения параметров реализации колебательного процесса для разных соотношений влияющих на него величин.

Анализ информации, полученной в результате проведённых лабораторных экспериментов, позволил сделать несколько практических выводов относительно перспектив использования каждого из трёх исследовавшихся вибраторов в составе системы шибера затвора для активного влияния на интенсивность развития процесса затягивания сталевыпускного канала разливочного или промежуточного ковшей. Из данных, приведённых в таблицах, следует, что развиваемая сила вибрационного

воздействия и возникающее виброускорение при функционировании сравниваемых систем близки по своим значениям.

Электромеханический вибратор позволяет выполнять как плавное, так и дискретное регулирование обеспечиваемых им параметров колебательного процесса, а по потребляемой мощности занимает промежуточное положение среди опробованных вибрационных систем. Однако при его использовании необходим подвод к шиберному затвору электрической энергии для питания электродвигателя, что усложнит эксплуатацию и обслуживание всей системы в целом и потребует принятия дополнительных мер по обеспечению безопасности её работы.

Такие же по сути проблемы могут возникнуть в случае применения в шиберном затворе электромагнитного вибратора, требующего для своей работы электрической энергии, а также дополнительного механического или электронного регулятора частоты колебаний.

Поэтому для оборудования шиберного затвора в наибольшей мере подходит вибратор, работающий от сжатого воздуха, так как он соответствует таким предъявляемым требованиям, как компактность, безопасность и удобство в эксплуатации. Это обусловлено тем, что у современных ковшовых затворов кассетного типа для прижатия огнеупорных плит применяют блоки тарельчатых или витых пружин, в обязательном порядке охлаждаемых во время разливки стали воздухом, подаваемым по трубопроводу под избыточным давлением от цеховой магистрали. Поэтому этот воздух можно одновременно использовать в качестве энергоносителя для приведения в действие возбудителя колебаний ковшового затвора. При этом параметры колебательного процесса, реализуемого в системе шиберного затвора, можно регулировать путём изменения в нужных пределах давления и расхода воздуха, подаваемого к вибратору, а также выбирая соответствующую жёсткость его пружин.

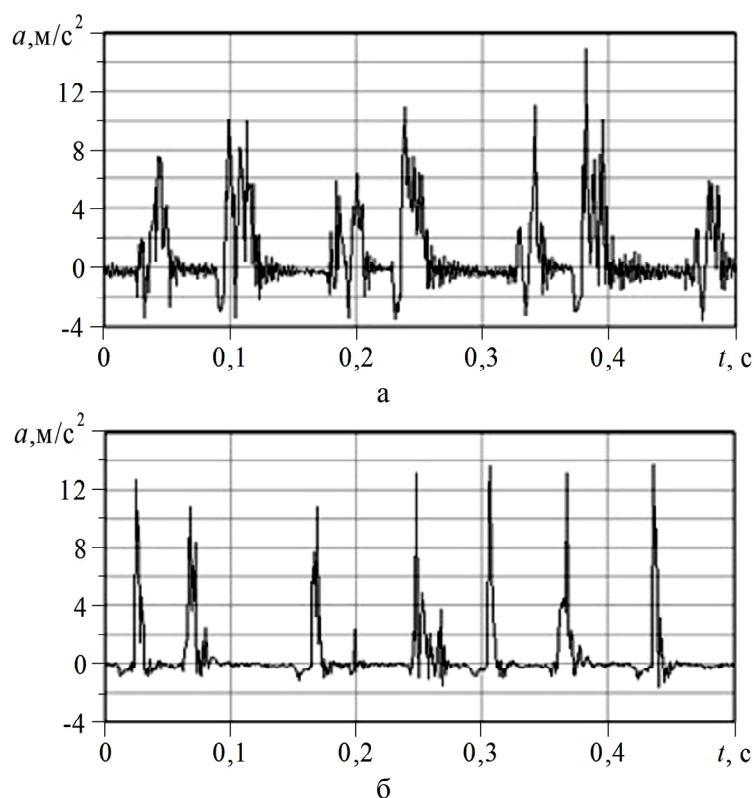
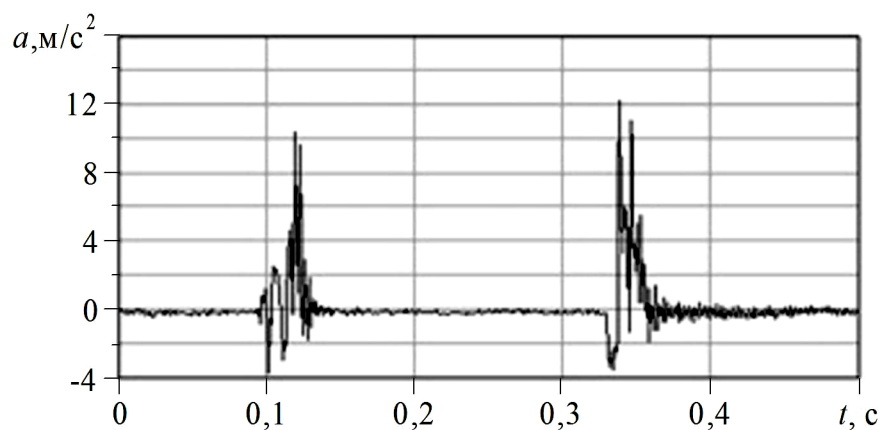


Рисунок 5 Виброускорение a , развиваемое пневматическим вибратором при жёсткости пружин $0,45 \text{ Н/мм}$ и расходе воздуха $11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ (а), а также $0,36 \text{ Н/мм}$ и $18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ (б)

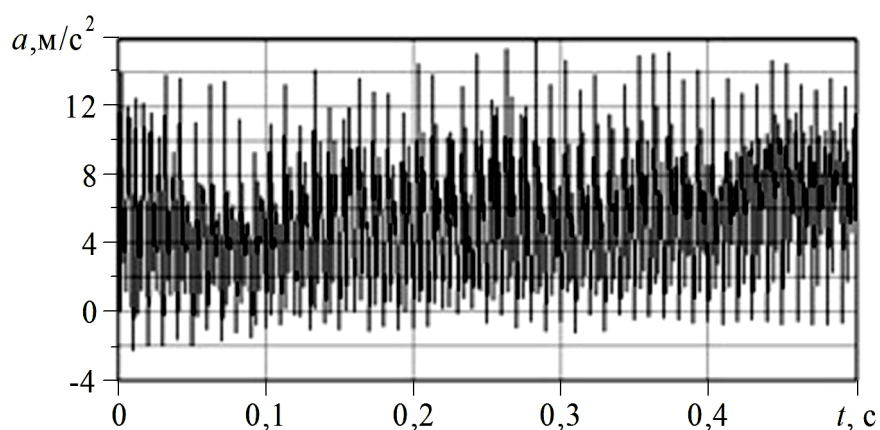
Таблица 2

Зафиксированные значения параметров функционирования пневматического вибратора

Амплитуда колебаний вибратора, мм	Жёсткость пружин вибратора, Н/мм	Давление воздуха, Н/м ²	Расход воздуха, м ³ /с	Частота возбуждаемых колебаний, с ⁻¹	Возникающее виброускорение, м/с ²	Развиваемая сила вибровоздействия, Н	Потребляемая вибратором мощность, Вт
1,0	0,45	40·10 ³	11·10 ⁻⁶	5	11	3,3	0,44
			56·10 ⁻⁶	25	15	4,95	2,24
			11·10 ⁻⁵	50	18	5,95	4,4
	0,36	32·10 ³	18·10 ⁻⁶	8	12	3,6	0,58
			90·10 ⁻⁶	40	16	5,28	2,88
			11·10 ⁻⁵	80	20	6,6	5,76



а



б

Рисунок 6 Виброускорение a , зафиксированное во время работы электромагнитного вибратора с частотой колебаний 4 с^{-1} (а) и 120 с^{-1} (б) при жёсткости его возвратной пружины $0,36 \text{ Н/мм}$

Таблица 3

Зафиксированные значения параметров функционирования электромагнитного вибратора

Жёсткость возвратной пружины вибратора, Н/мм	Масса бойка- сердечника вибратора, г	Амплитуда колебаний вибратора, мм	Частота возбуждаемых колебаний, с ⁻¹	Возникающее виброускорение, м/с ²	Развиваемая сила вибровоздействия, Н	Потребляемая вибратором мощность, Вт
0,25	40	1	4	10	3	5,5
			60	12	3,6	8
			120	14	4,2	12
0,36			4	11	3,3	11
			60	14	4,2	15
			120	16	4,8	20

Выводы и направление дальнейших исследований. Для условий функционирования шиберных затворов наиболее приемлемым для практического использования в них в качестве возбудителя направленных колебаний, снижающих интенсивность развития процесса затягивания сталевыпускного канала, следует признать пневматический вибратор.

Количество таких вибраторов и геометрические размеры их подвижных элементов, возбуждающих вертикально направленные колебания, воздействующие на ковшовый затвор, должны быть рассчитаны на основе положений теории динамики машин с последующей экспериментальной проверкой на натурных образцах разливочных устройств шиберного типа.

Библиографический список

1. Предотвращение процесса затягивания канала сталеразливочного узла промежуточного ковша МНЛЗ [Текст] / Л. М. Аксельрод [и др.] // Новые огнеупоры. — 2007. — № 2. — С. 9–14.
2. Horiuchi, T. «MOGUL» — lined submerged entry nozzle [Текст] / T. Horiuchi, M. Kajimura // UNITECR'05, 9th Biennial Worldwide Congress on Refractories 9. — 11 November 2005.
3. Аксельрод, Л. М. Разработка технологии изготовления огнеупорного материала, замедляющего процесс затягивания [Текст] / Л. М. Аксельрод, Г. Г. Мельникова, Г. О. Бодина // Огнеупоры и техническая керамика. — 2001. — № 2. — С. 22–25.
4. Предотвращение процесса затягивания канала сталеразливочного узла промежуточного ковша МНЛЗ [Текст] / Л. М. Аксельрод [и др.] // Новые огнеупоры. — 2007. — № 2. — С. 9–14.
5. Кононов, В. А. Разработка шиберных систем для разливки мелких слитков и фасонного литья [Текст] / В. А. Кононов, В. П. Василенко, А. А. Алпатов // Новые огнеупоры. — 2011. — № 11. — С. 18–24.
6. Жилин, Д. И. Повышение эффективности шиберного затвора с дополнительным подогревом разливочного канала [Текст] / Д. И. Жилин // Заготовительные производства в машиностроении. — 2015. — № 11. — С. 3–6.
7. Еронько, С. П. Модельные исследования процесса зарастания канала ковшового затвора [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачёв, Е. А. Пономарёва // Инновационные перспективы Донбасса : сб. тр. 4-й Межд. науч.-практ. конф. в 6-ти т. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Донецк : ДонНТУ, 2018. — С. 11–15.

© Еронько С. П.
 © Ошовская Е. В.
 © Ткачёв М. Ю.
 © Пономарёва Е. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Сидоровым В. А.,
д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.*

Статья поступила в редакцию 05.10.18.

д.т.н. Єронько С. П., к.т.н. Ошовська О. В., к.т.н. Ткачов М. Ю., Понамарьова О. О.
(ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)

**МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ
ДЛЯ СИСТЕМ КОВШОВИХ ЗАТВОРІВ**

Наведено результати порівняльних експериментальних досліджень параметрів функціонування трьох типів вібраторів, які призначені для розміщення на шиберному затворі сталерозливного або проміжного ковшів з метою зниження інтенсивності процесу затягування випускного каналу за рахунок вібраційного руйнування зв'язків поміж частками шару відкладень, що формується на його стінках. Надано рекомендації з практичного використання пристрою, який забезпечує реалізацію запропонованого технічного рішення.

Ключові слова: сталерозливальний ківш, шиберний затвор, випускний канал, тугоплавкі включення, вібратор, спрямована вібраційна дія, коливання, частота, амплітуда.

**Doctor of Tech. Sc. Eron'ko S. P., PhD Oshovskaya E. V., PhD Tkachov M. Yu.,
Ponamaryova E. A. (DonNTU, Donetsk, DPR)**

**MODEL STUDING THE OPERATION PARAMETERS OF VIBRATION DEVICES FOR
LADLE SLIDE GATE SYSTEMS**

The results are presented of the comparative experimental studies on the operation parameters of three types of vibrators to be placed on the ladle or tundish slide gate system aiming to reduce the obliteration of nozzle channel. This is achieved due to the vibrational break of ties between the particles of the layer of formed sediments on its walls. Recommendations are made on practical application of the device providing implementation of the proposed technical solution.

Key words: ladle, slide gate system, nozzle channel, refractory inclusions, directional vibration, oscillation, frequency, amplitude.

УДК 621.771.01

к.т.н. Петров П. А.,
к.т.н. Ульяницкий В. Н.,
к.т.н. Балашова О. С.,
Орлов А. А.,
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ВАЛКОВОГО УЗЛА КЛЕТИ КВАРТО И СНИЖЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА

В статье рассмотрены основные параметры, обуславливающие качественные показатели производства листового металлопроката. Разработана математическая модель определения жёсткости рабочей клетки кварто с учётом системы противоизгиба рабочих валков, установлена степень влияния на поперечную разнотолщинность прокатываемого листа конструктивных и технологических параметров валковой системы.

Ключевые слова: клеть кварто, валковый узел, жёсткость клетки, поперечная разнотолщинность проката, шейка валка, подшипниковая опора.

Повышение конкурентоспособности продукции листовых станов горячей и холодной прокатки всегда актуально. Качество листов и полос определяется точностью их размеров и формы, химическим составом и физико-механическими свойствами стали, состоянием поверхности. Сортамент, требования к точности прокатки, плоскостности, характеру кромки листовой горячекатаной и холоднокатаной стали шириной 500 мм и более, изготавливаемой в листах и рулонах, регламентированы ГОСТ 19903-90 и 19904-90.

Точность полосы характеризуется отклонением геометрических размеров раската от номинала и включает в себя продольную и поперечную разнотолщинность, разнотолщинность, форму полосы в плане и неплоскостность [1, 2].

Разнотолщинность полосы в процессе прокатки формируется под воздействием дестабилизирующих факторов, к которым относятся: вариации силы и скорости прокатки, натяжения и начальных размеров раската, неконтролируемые изменения межвалкового зазора (биение валков, эффект подшипников жидкостного трения), износ и тепловое расширение валков. Имеют место факторы, стабилизирующие процесс прокатки: принудительный изгиб валков в вертикаль-

ной и горизонтальной плоскостях, контролируемые изменения скорости и силы прокатки, межвалкового зазора и натяжения.

Анализ работ [1–7] свидетельствует о тесной связи параметров точности прокатки с параметрами жёсткости элементов рабочей клетки, регулируемыми воздействиями и режимами обжатий.

Существующие способы воздействия на активную образующую бочки прокатных валков достаточно разнообразны. Основными из них считаются [3, 4]: профилирование и оптимизация диаметра рабочих валков; применение систем автоматического регулирования толщины (САРТ) и профиля (САРП); использование усовершенствованных конструкций валковых узлов; установка систем силовой профилировки (противоизгиба) рабочих или опорных валков; тепловая профилировка образующей бочек рабочих валков. Наиболее эффективными способами влияния на межвалковый зазор в рабочих клетях широкополосных и листовых станов горячей прокатки являются гидравлический изгиб и осевая сдвижка рабочих валков.

В связи с этим возрастает актуальность задач рационального выбора и оптимизации параметров, влияющих на прогиб валковой

системы и жёсткость рабочей клетки, что требует дополнительных исследований и анализа существующих методик расчёта упругой деформации листопркатных клетей.

В ряде случаев повышение плоскостности прокатываемого листа, а также снижение упругой деформации клетки может достигаться путём задеирования системы противоизгиба валков, как, например, в чистовой клетке кварто толстолистового стана 3000 Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис», оборудованной гидроблоками уравнивания и противоизгиба рабочих валков. Оценка способности клетки прокатывать лист с минимальными отклонениями по форме и размерам может быть получена в результате математического моделирования упругой деформации (вычисления модуля жёсткости) клетки с учётом действия сил противоизгиба рабочих валков.

Обзор известных методов [3–6] определения упругого сплющивания и деформации валков клетки кварто показал отсутствие чётких критериев по выбору величины силы противоизгиба Q_p и плеча её приложения c_p относительно оси опоры валка. В технической литературе силу Q_p предложено принимать как долю от силы прокатки P , но при этом рекомендованные значения силы противоизгиба изменяются в достаточно широком диапазоне от $(0,07...0,10)P$ [4] до $(0,2...0,3)P$ [2], что требует уточнения. Кроме того, следует учитывать, что действие дополнительных сил на опоры рабочего валка снижает надёжность и долговечность данного узла клетки.

Основу математической модели определения жёсткости клетки кварто, оборудованной системой противоизгиба рабочих валков, составили классические методики [3, 5, 6] и работа [7], посвящённая упругим деформациям многовалковых клетей, адаптированные для условий клетки кварто толстолистового стана горячей прокатки.

Модуль жёсткости клетки кварто определяется по формуле

$$M_{\text{кл}} = P / f_{\text{кл}}, \quad (1)$$

где $f_{\text{кл}}$ — упругая деформация клетки, которая включает: прогиб валковой системы $f_{\text{в}}$, деформацию станины $f_{\text{ст}}$ и упругие перемещения остальных деталей $f_{\text{дет}}$ клетки (нажимных винтов и гаек $f_{\text{ну}}$, подушек валков $f_{\text{под}}$, подшипников $f_{\text{подш}}$, подпятников $f_{\text{подп}}$):

$$f_{\text{кл}} = f_{\text{в}} + f_{\text{ст}} + f_{\text{ну}} + f_{\text{дет}}. \quad (2)$$

С учётом того, что прогиб валков может достигать 48 % от общей упругой деформации клетки кварто [5], важно контролировать суммарную упругую деформацию валковой системы в середине бочки валка (рис. 1):

$$f_{\text{в}} = 2(y_a + \delta_{\text{п-р}} + \delta_2 - y_{Q_p}), \quad (3)$$

где y_a — прогиб середины бочки опорного валка относительно линии опор, который состоит из прогиба от действия изгибающих моментов и прогиба от действия поперечных сил; $\delta_{\text{п-р}}$ — упругое сжатие рабочего валка в контакте с полосой; δ_2 — упругое сжатие рабочего и опорного валков; y_{Q_p} — прогиб рабочего валка от действия силы противоизгиба.

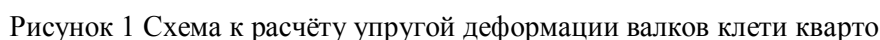
Поперечная разнотолщинность прокатываемого листа [7]:

$$\delta h = 2(y_a - y_b - y_{Q_p}), \quad (4)$$

где y_b — прогиб опорного валка по кромке полосы с учётом действия изгибающих моментов и поперечных сил.

Зависимости (1)–(4) положены в основу разработанной математической модели вычисления упругих деформаций клетки кварто.

Это позволило моделировать жёсткость чистовой клетки стана 3000 в зависимости от величины силы Q_p противоизгиба рабочих валков, изменяемой в диапазоне от $0,1P$ до $0,25P$ ($P=45$ МН), с целью анализа эффективности силовой профилировки валков при регулировании показателей точности прокатываемых листов.



В таблице 1 представлены сравнительные показатели жёсткости и упругой деформации элементов клетей кварто листопрокатных станов (клетки 2800, 3200) и данные по клетке 3000, полученные в ходе расчёта при следующих исходных параметрах: сила $P=45$ МН и момент $M_{\text{пр}}=3$ МНм прокатки; $b=2900$ мм — ширина прокатываемой полосы; $a_{\text{ОП}}=4100$ мм — расстояние между опорами; $L_{\text{ОП}}=2800$ мм — ширина бочки опорного вала; $L_{\text{АКТ}}=2720$ мм — активная длина межвалкового контакта; $c_p=550$ мм — плечо приложения силы про-

Однако силы противоизгиба увеличивают нагрузку на узел опор рабочего вала, действие которых отрицательно сказывается на долговечности подшипников и прочности шеек рабочих валков, что требует усовершенствования конструкции валковой системы.

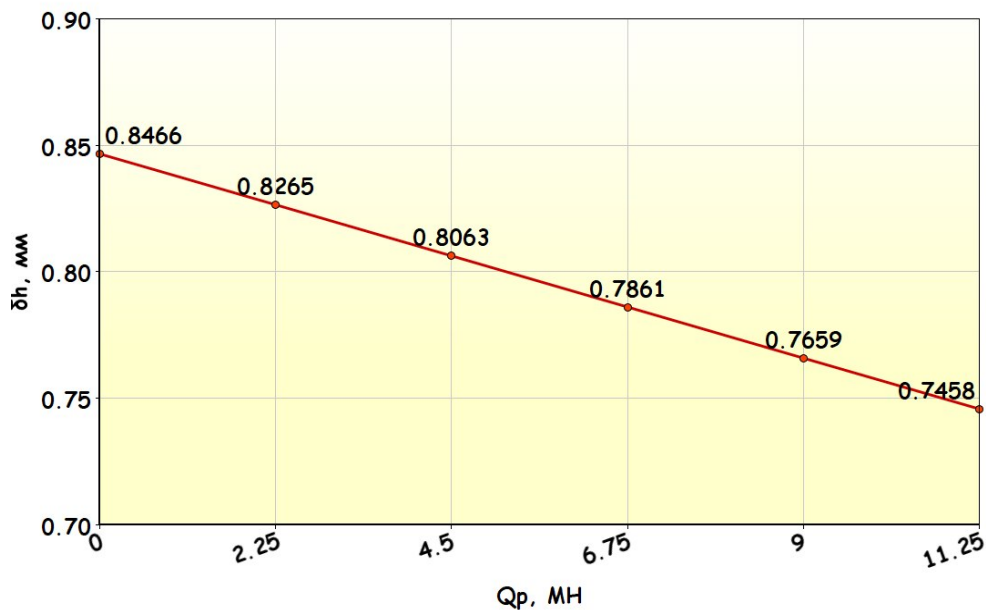
Рисунок 2 График изменения разнотолщинности δh от силы противоизгиба Q_p

Таблица 1

Показатели жёсткости и упругой деформации клеток кварто листопрокатных станков

Клеть	Диаметр валков, мм		Размеры листов, мм		Усилие прокатки, МН	Перемещение отдельных деталей клетки, в % от суммарной деформации				Максимальное перемещение посередине валка, мм	Жёсткость клетки, МН/мм
	рабочих	опорных	минимальная толщина	ширина		подшипники и подушки	нажимные винты и гайки	прогиб валков	станина		
Кварто 2800	900	1600	5	2600	30	37,7	15,1	28,4	15,6	6	5
Кварто 3200	950	1700	5	3000	38	35	15,9	31,3	14,9	7,3	5,21
Кварто 3000*	840	1500	4	2900	45	37,5		35,9	26,6	5,024	8,957

*результаты получены при $D_{оп}=1500$ мм, $D_p=840$ мм, $c_p=550$ мм.

В этой связи целесообразно рассмотреть применение удлиненной шейки с целью размещения на ней более габаритной и надёжной подшипниковой опоры.

Так, применение удлиненной шейки (увеличение плеча c_p с 550 мм до 710 мм), оказывает незначительное влияние на прогиб валков клетки кварто, но сопровождается ростом напряжений изгиба

в опасном сечении рабочего вала (сечение I–I, рис. 1). Такой недостаток компенсируется увеличением диаметра опасного сечения шейки вала и (или) использованием более высокопрочного материала рабочего вала. График зависимости результирующих напряжений $\sigma_{рез}$, учитывающих действие изгибающего и крутящего момента в опасном сечении шейки рабочего вала

диаметром $d_{шр}=820$ мм (рис. 1), от плеча c_p представлен на рисунке 3.

Конструктивная реализация подшипниковой опоры рабочего вала предполагает размещение в каждой опоре вала двух подушек (рис. 4). Между собой подушки 2 свя-

заны тягами 4, установленными на осях 3, запрессованных в тело подушек. Это позволит обеспечить более равномерное распределение суммарной силы, действующей на опору, между рядами тел качения и увеличит долговечность подшипников.

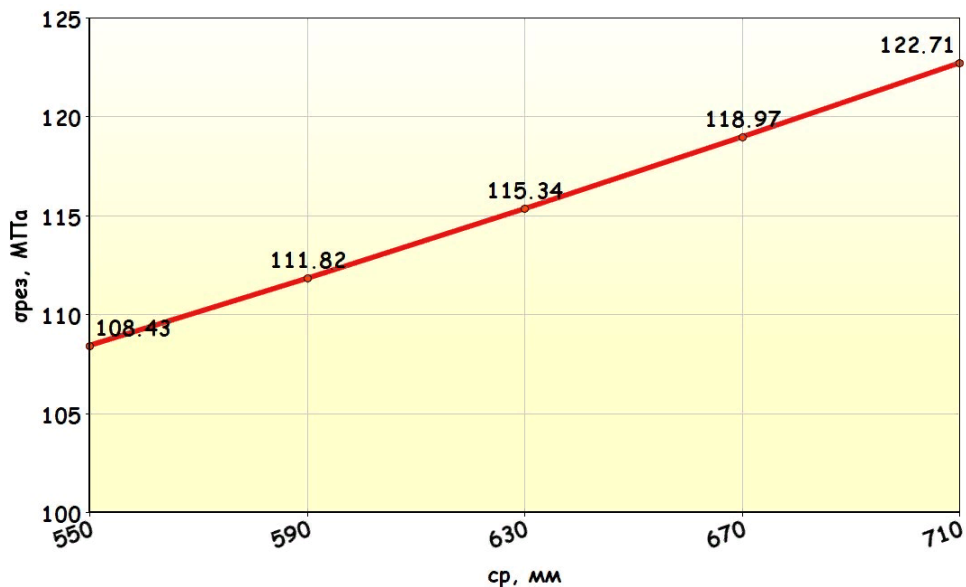
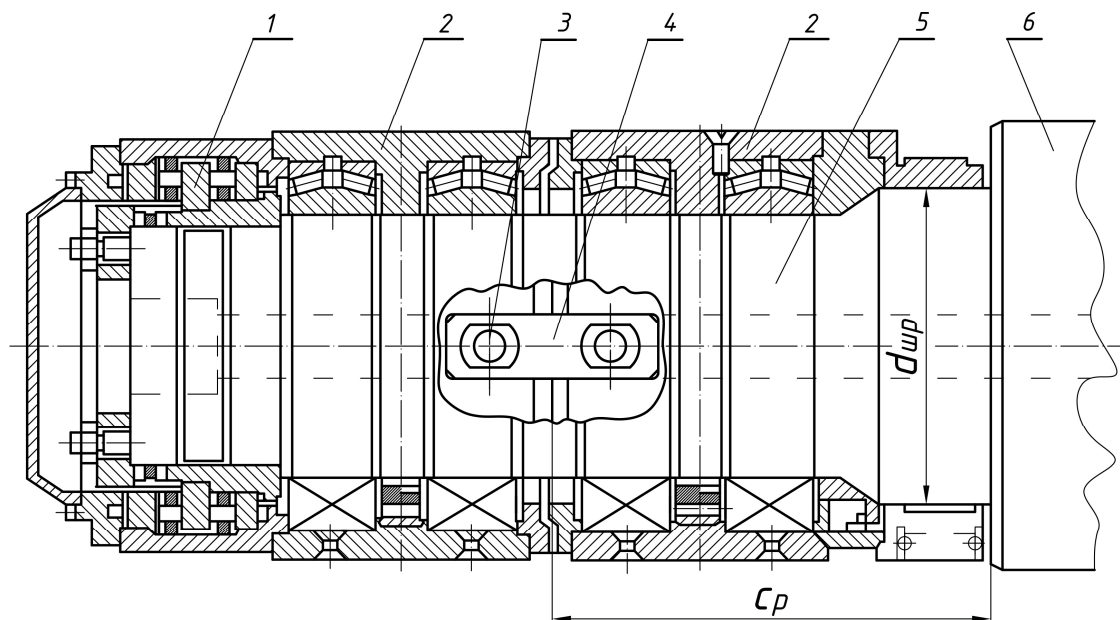


Рисунок 3 График зависимости напряжения $\sigma_{рез}$ в опасном сечении шейки рабочего вала от плеча c_p приложения силы противоизгиба



1 — упорный узел; 2 — подушка; 3 — ось; 4 — тяга; 5, 6 — шейка и бочка рабочего вала

Рисунок 4 Конструкция подшипниковой опоры рабочего вала

Выводы. Дополнена и адаптирована для инженерного расчёта математическая модель упругой деформации клетки кварто с противоизгибом рабочих валков.

С помощью вариации конструктивных и технологических параметров выявлена степень влияния силы противоизгиба на разнотолщинность листового проката.

Исследована возможность увеличения длины опоры рабочего валка с установкой

подшипника более высокой грузоподъёмности, что позволит повысить надёжность клетки.

Результаты исследования могут быть использованы в проектно-конструкторских разработках клеток кварто и анализе их эффективности при регулировании показателей точности и плоскостности прокатываемых полос.

Библиографический список

1. Повышение качества листового проката [Текст] / В. Л. Мазур, А. П. Качайлов, В. Г. Иванченко, А. И. Добронравов. — К. : Техніка, 1979. — 143 с.
2. Валковые узлы и качество листового проката [Текст] / В. С. Горелик, В. Д. Елякин, В. Н. Зимин, О. М. Горячковская. — К. : Техника, 1989. — 127 с.
3. Машины и агрегаты металлургических заводов : учебник для вузов в 3-х т. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката / А. И. Целиков [и др.] [Текст]. — [2-е изд., перераб. и доп.] — М. : Металлургия, 1988. — 680 с.
4. Николаев, В. А. Проблемы регулирования прогиба валков клетки кварто [Текст] / В. А. Николаев // Теоретические проблемы прокатного производства : труды V Международной научно-технической конференции. — Днепропетровск : Металлургическая и горнорудная промышленность, 2000. — № 08–09. Спецвыпуск. — С. 157–159.
5. Иванченко, Ф. К. Розрахунок машин і механізмів прокатних цехів [Текст] : навч. посіб. / Ф. К. Иванченко, В. М. Гребеник, В. І. Ширяєв. — К. : Вища шк., 1995. — 455 с. : іл.
6. Машиностроение. Энциклопедия : в 40 т. Т. IV-5. Машины и агрегаты металлургического производства / Н. В. Пасечник [и др.] ; под общ. ред. В. М. Синицкого, Н. В. Пасечника [Текст]. — М. : Машиностроение, 2000. — 912 с. : ил.
7. Болобанова, Н. Л. Развитие методов моделирования профилировок и упругих деформаций валков листовых станов с целью совершенствования технологии прокатки широких полос [Текст] / Н. Л. Болобанова. — Череповец, 2015. — 123 с.

© Петров П. А.
 © Ульяницкий В. Н.
 © Балашова О. С.
 © Орлов А. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А., д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еронько С. П.

Статья поступила в редакцию 09.10.18.

к.т.н. Петров П. О., к.т.н. Ульяницкий В. Н., к.т.н. Балашова О. С., Орлов А. А. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАЛКОВОГО ВУЗЛА КЛІТИ КВАРТО І ЗНИЖЕННЯ ПОПЕРЕЧНОЇ РІЗНОТОВЩИННОСТІ ЛИСТОВОГО МЕТАЛОПРОКАТУ

У статті розглянуто основні параметри, що зумовлюють якісні показники виробництва листового металопрокату. Розроблено математичну модель визначення жорсткості робочої кліти кварто з урахуванням системи протизгину робочих валків, встановлено ступінь впливу на поперечну різнотовщинність листа, що прокатується, конструктивних і технологічних параметрів валкової системи.

Ключові слова: кліть кварто, валковий вузол, жорсткість кліті, поперечна різномовчинність прокату, шийка валка, підшипникова опора.

PhD Petrov P. A., PhD Ulianitskiy V. N., PhD Balashova O. S., Orlov A. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

INCREASING THE RELIABILITY OF MILL BLOCK OF FOUR-HIGH MILL STAND AND REDUCING THE WIDTHWISE THICKNESS DISTRIBUTION OF SHEET METAL

The paper deals with the main parameters that stipulate qualitative factors of sheet metal production. There has been developed the mathematical model for determining the rigidity of the operating four-high mill stand considering the work roll bending system, there has been determined the degree of influence of the design and process parameters of roll system on the rolled sheet widthwise thickness distribution.

Key words: four-high mill stand, mill block, widthwise thickness distribution of rolled stock, roll neck, bearing assembly.

УДК 621.926

Тумин А. Н.,
к.т.н. Левченко Э. П.,
д.э.н. Бизянов Е. Е.,
д.э.н. Коваленко Н. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

РАСЧЁТ ВЫНУЖДЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ ТОЛКАТЕЛЕЙ ДИСКОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПРИ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ

Проведены исследования возможностей обеспечения качательных движений рабочим органом дисковой дробильно-измельчительной машины с помощью гидротолкателей. В соответствии с поставленной задачей разработана гидросхема работы толкателей и проведён расчёт их вынужденных колебаний при пропорциональной нагрузке. Построен график амплитудно-частотной характеристики гидропривода дискового измельчителя.

Ключевые слова: дисковая мельница, качание дисков, эффективность, закон движения, аналитический расчёт.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Основным путём повышения эффективности работы дисковых измельчителей является создание в рабочей камере условий сочетания разнообразных нагрузок на материал, желательного знакопеременного характера.

Существующие конструкции таких машин [1–6] имеют сложный механизм привода толкателей, ограничение скорости сжатия дисков, при этом отсутствуют возможности контроля усилий их сдавливания между собой. Кроме того, применяемые в гидротолкателях элементы обладают высокой стоимостью, для приведения их в движение необходимо большое количество электроприводов, а в целом весь набор элементов обладает существенной инерционностью управления, вызванной суммарными задержками периодов срабатывания в системе электродвигатель-насос-толкатель.

Поэтому актуальным является обеспечение возможности осуществления управления режимом качания дисков от единого привода на основе схематических решений, основанных на гидравлическом принципе действия.

Постановка задачи. Задачей исследований является повышение эффективности работы дискового измельчителя с помо-

щью создания условий импульсного воздействия на материал за счёт организации качания диска гидротолкателями.

В зависимости от режимов работы, свойств и видов измельчаемых материалов подбирается оптимальное соотношение гидротолкателей к мощности гидропривода и всей установки в целом. При этом стоит отметить, что число гидротолкателей в дисковой мельнице может быть установлено в любом необходимом для обеспечения эффективной работы машины количестве.

Изложение материала и его результаты. Теоретические исследования в этой области показывают, что вращение режущей гарнитуры в комбинации с её качательными движениями в процессе измельчения существенно увеличивает производительность дискового измельчителя.

Основными достоинствами предложенной гидравлической схемы (рис. 1) являются: возможность синхронности работы всех гидроцилиндров (ГЦ) вне зависимости от приложенной нагрузки на каждый из них; отсутствие дорогостоящих элементов, таких как электрогидравлические толкатели; высокое быстродействие системы вследствие низкой инерционности; простота исполнения системы управления [7–8].

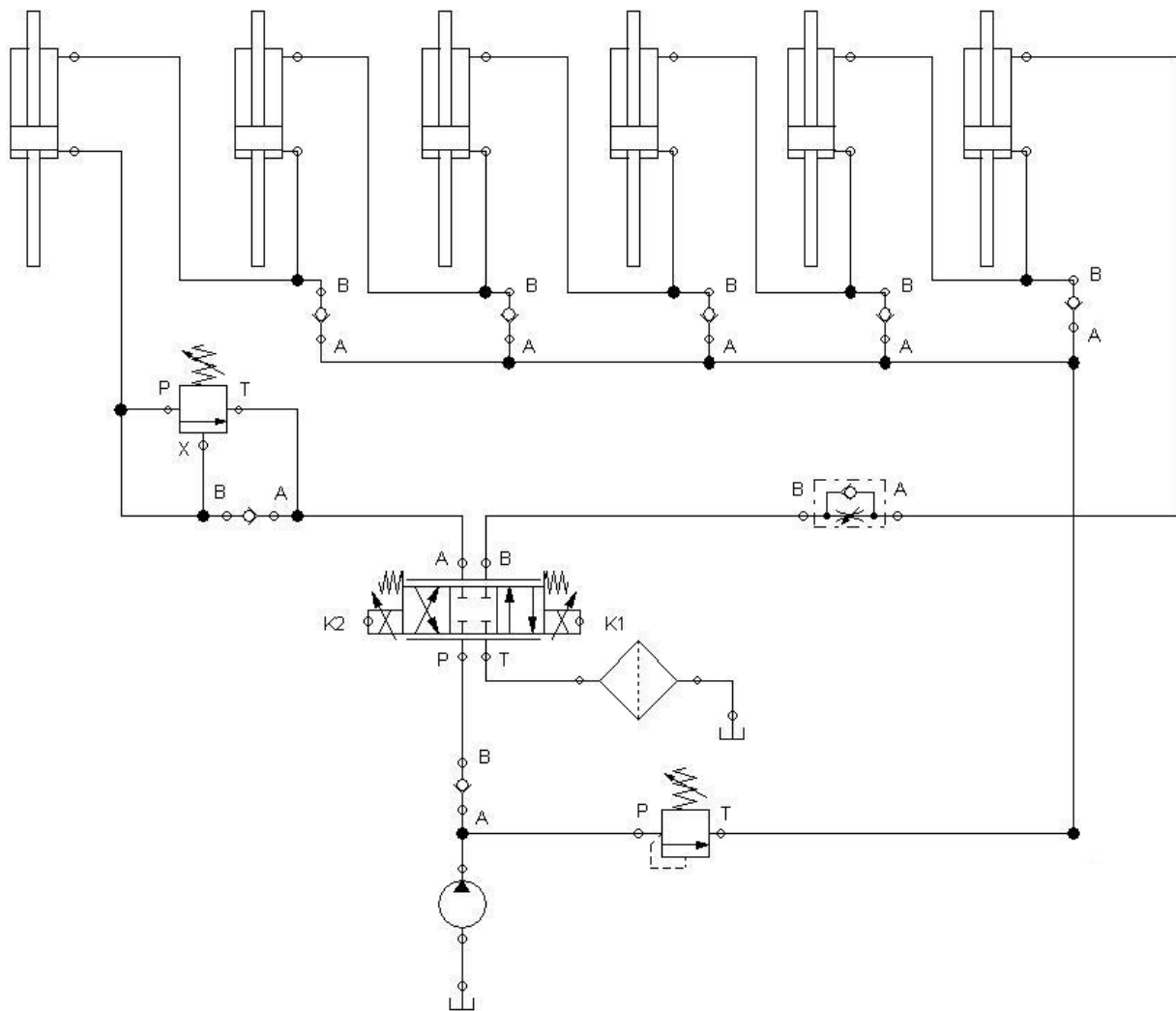


Рисунок 1 Гидравлическая схема работы толкателей дискового измельчителя

Принцип синхронизации работы ГЦ состоит в следующем: 6 гидроцилиндров с двухсторонним штоком одинаковых размеров последовательно подключаются друг к другу. За счёт этого они работают синхронно и повторяют движение первого ГЦ, в рабочую полость которого подаётся под давлением жидкость от насоса. Для компенсации внутренних и внешних утечек рабочей жидкости в рассматриваемой гидросистеме присутствует дополнительная магистраль — линия подпитки [9].

Поскольку диск мельницы совершает колебательное (возвратно-поступательное) движение, то вполне очевидно, что золотник также должен совершать колебательное движение определённой частоты и амплитуды. Для настройки системы управления определим реакцию поршня при синусоидальном перемещении золотника и параметры генератора [10–12].

Рассмотрим перемещение поршня механизма, определяемого нелинейным дифференциальным уравнением (1):

$$\frac{dy}{dt} = k_v \sqrt{1 - \frac{|P_{mp}|}{p_0 F_n} - \frac{1}{p_0 F_n} \left(m \frac{d^2 y}{dt^2} + h \frac{dy}{dt} + c_n y + P_0 \right) \operatorname{sgn}(x) x}, \quad (1)$$

где k_v — крутизна скоростной характеристики холостого хода гидравлического исполнительного механизма с идеальным золотником; p_0 — давление в трубопроводе на входе в золотник; P_{mp} — сила трения, действующая на поршень; P_0 — постоянная сила, действующая на поршень; F_n — эффективная площадь поршня; m — масса или момент инерции подвижных частей гидродвигателя и нагрузки, приведённые к поршню; d — диаметр гидроцилиндра; h — коэффициент вязкого трения нагрузки, приведённый к поршню; c_n — жёсткость внешней нагрузки, приведённая к поршню; x — смещение золотника от среднего положения; $\text{sgn}(x)$ — знак «+» или «-», учитывающий направление смещения золотника от своего среднего нейтрального положения.

За исходное уравнение движения исполнительного механизма движения режущей гарнитуры дисковой мельницы примем уравнение (1), в котором положим $x = x^* \sin(\omega t)$, $m = h = P_0 = P_{mp} = 0$.

Тогда

$$\frac{dy}{dt} = k_v \sqrt{1 - \frac{c_n y}{p_0 F_n}} \text{sgn}(\sin(\omega t)) x^* \sin(\omega t), \quad (2)$$

где x^* — амплитуда колебаний золотника; ω — частота управляющего сигнала.

Для решения уравнения (2) разделим переменные

$$\frac{dy}{\sqrt{1 - \frac{c_n y}{p_0 F_n}} \text{sgn}(\sin(\omega t))} = k_v x^* \sin(\omega t) dt. \quad (3)$$

Полученное уравнение в интервалах изменения ωt , кратных π , интегрируется, поскольку знак перемещения золотника $\text{sgn}(\sin(\omega t))$ внутри каждого интервала постоянен.

Интегрирование уравнения (3) в первом интервале, когда $\text{sgn}(\sin(\omega t)) \equiv (+)$ даёт

$$-\frac{2p_0 F_n}{c_n} \sqrt{1 - \frac{c_n y_1}{p_0 F_n}} + C_{11} = \frac{k_v x^*}{\omega} \cos(\omega t), \quad (4)$$

где y_1 — координата поршня в первом интервале.

При $y_1|_{t=0} = y_0^*$

$$C_{11} = -\frac{2 \cdot \sqrt{1 - \frac{c_n y_0^*}{p_0 F_n}}}{\frac{c_n}{p_0 F_n}} - \frac{k_v x^*}{\omega}. \quad (5)$$

Подставляя значение C_{11} в уравнение (4), получим

$$y_1(t) = y_0^* + \frac{k_v x^*}{\omega} \sqrt{1 - \frac{c_n y_0^*}{p_0 F_n}} (1 - \cos(\omega t)) - \frac{c_n}{p_0 F_n} \left(\frac{k_v x^*}{2\omega} \right)^2 (1 - \cos(\omega t))^2. \quad (6)$$

Для второго интервала $\text{sgn}(\sin(\omega t)) \equiv (-)$.

Тогда уравнение (3) примет вид

$$\frac{dy}{\sqrt{1 + \frac{c_n y}{p_0 F_n}}} = k_v x^* \sin(\omega t). \quad (7)$$

После его интегрирования и определения произвольной постоянной из условия $y_2|_{t=0} = y_1^*$, получим

$$y_1(t) = y_0^* - \frac{k_v x^*}{\omega} \sqrt{1 + \frac{c_n y_0^*}{p_0 F_n}} (1 - \cos(\omega t)) + \frac{c_n}{p_0 F_n} \left(\frac{k_v x^*}{2\omega} \right)^2 (1 - \cos(\omega t))^2, \quad (8)$$

где y_1^* — значение координаты поршня в конце первого и начале второго интервала.

Сравнивая уравнения (6) и (8) и принимая во внимание, что

$$y(t) = y_1(t)_{0 < \omega t < \pi} + y_2(t)_{\pi < \omega t < 2\pi} + \dots + y_n(t)_{(n-1)\pi < \omega t < n\pi} + \dots, \quad (9)$$

можно получить

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[y_{n-1}^* - (-1)^n \frac{k_v x^*}{\omega} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{1 + (-1)^n \frac{c_n y_{n-1}^*}{p_0 F_n}} (1 - \cos(\omega t)) + \right. \\ \left. + \frac{c_n}{p_0 F_n} \left(\frac{k_v x^*}{2\omega} \right)^2 (1 - \cos(\omega t))^2 \right]. \quad (10)$$

Полином (10) определяет вынужденный периодический процесс гидравлического исполнительного механизма, нагруженного пропорциональной нагрузкой.

Используя полученные результаты, оценим сначала переходный процесс поршня при положительной нагрузке. В этом случае процесс определится тремя параметрами: наибольшим отклонением поршня от среднего положения, амплитудой установившихся колебаний и длительностью.

Наибольшее отклонение поршня при нулевых начальных условиях определим из уравнения (6). Полагая $\omega t = \pi$, имеем

$$y_1(t) = y_{\max}^* = \frac{k_v x^*}{\omega} \left(2 - \frac{k_v x^*}{\omega} \cdot \frac{c_n}{p_0 F_n} \right). \quad (11)$$

Таким образом, наибольшее отклонение поршня при позиционной нагрузке будет меньше отклонения холостого хода на величину

$$\Delta y_1 = \left(\frac{k_v x^*}{\omega} \right)^2 \cdot \frac{c_n}{p_0 F_n}. \quad (12)$$

Найдём отношение амплитуды перемещения золотника к частоте его колебаний

$\kappa = \frac{x^*}{\omega}$, при котором сила, развиваемая давлением жидкости, уравновесится внешней пропорциональной нагрузкой при наибольшем отклонении поршня.

При этом условии $y_{\max} = \frac{p_0 F_n}{c_n}$, и уравнение (6) примет вид

$$\frac{p_0 F_n}{c_n} = k_v \kappa \left(2 - k_v \kappa \cdot \frac{c_n}{p_0 F_n} \right). \quad (13)$$

Решая это уравнение относительно κ , получим

$$\kappa = \frac{x^*}{\omega} = \frac{p_0 F_n}{k_v c_n}. \quad (14)$$

Таким образом, гидравлический исполнительный механизм дроссельного управления при синусоидальном перемещении золотника и пропорциональной положительной нагрузке будет работать в режиме двигателя лишь при выполнении условия

$$\frac{x^*}{\omega} < \frac{p_0 F_n}{k_v c_n}. \quad (15)$$

Проведя аналогичный анализ для отрицательной пропорциональной нагрузки, можно получить

$$\frac{x^*}{\omega} < 0,41 \frac{p_0 F_n}{k_v c_n}. \quad (16)$$

При нарушении условия (16) поршень (дисковая гарнитура), дойдя до своего максимального отклонения, определяемого сигналом управления, не будет возвращаться к начальному положению, а продолжит перемещение до упора под действием внешней нагрузки. Из-за разрыва непрерывности потока жидкости в гидравлическом тракте исполнительный механизм потеряет управление.

Найдём амплитуду установившихся колебаний поршня $y_{уст}^*$, а также и амплитудно-частотную характеристику исполнительного механизма при $c_n > 0$.

Подставив в уравнение (10) $y=0$ при $\cos(\omega t)=0$, имеем

$$y_{уст}^* = x^* \frac{k_v}{\omega} \left(1 - \frac{c_n k_v}{4 p_0 F_n} \cdot \frac{x^*}{\omega} \right). \quad (17)$$

Тогда амплитудно-частотная характеристика исполнительного механизма запишется в виде

$$A(\omega) = \frac{y_{уст}^*}{x^*} = \frac{k_v}{\omega} \left(1 - \frac{c_n k_v}{4 p_0 F_n} \cdot \frac{x^*}{\omega} \right). \quad (18)$$

Крутизна скоростной характеристики холостого хода гидравлического исполнительного механизма с идеальным золотником

$$k_v = \mu \frac{l}{F_n} \sqrt{\frac{g p_0}{\gamma}}. \quad (19)$$

График амплитудно-частотной характеристики холостого хода гидравлического исполнительного механизма с идеальным

золотником приведён на рисунке 2. Для его построения по уравнению (18) были использованы следующие численные значения параметров гидропривода: давление $p_0=20$ МПа; суммарная площадь шести цилиндров $F_n=800$ см²; жёсткость внешней нагрузки, приведённая к поршню, $c_n=400$ кг/см; крутизна скоростной характеристики холостого хода гидравлического исполнительного механизма с идеальным золотником $k_v=15,5 \cdot \text{с}^{-1}$, определяемая по (19); коэффициент расхода золотника $\mu=0,6$.

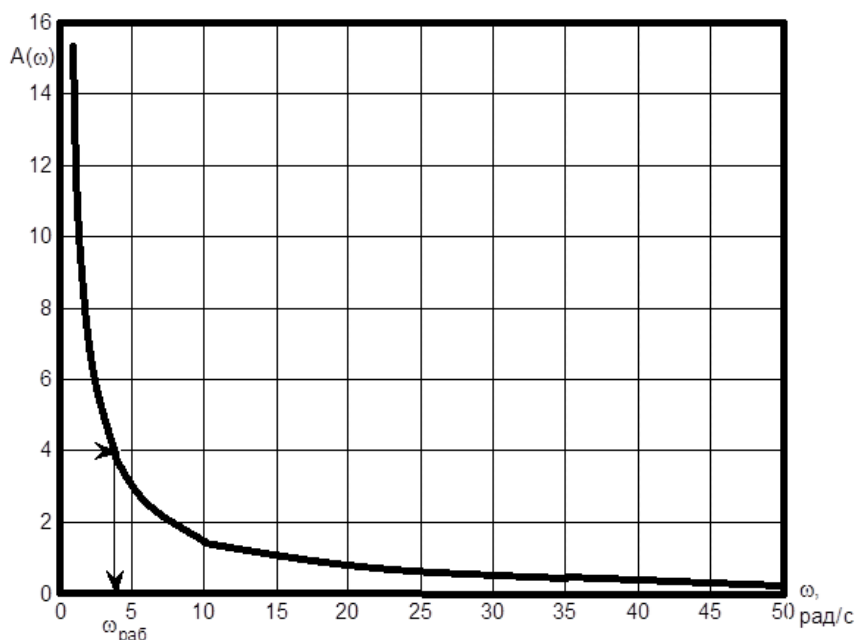


Рисунок 2 График амплитудно-частотной характеристики разрабатываемого гидропривода дискового измельчителя

Выводы и направление дальнейших исследований. Как видно из приведённого графика, амплитудно-частотная характеристика гидропривода похожа на амплитудно-частотную характеристику идеального интегрирующего звена и является низкочастотной. Диапазон рабочих частот составляет от 1 рад/с до 30 рад/с (0,16 Гц–4,77 Гц), при этом амплитуда колебаний поршней изменяется от 14 до 0,5 мм в зависимости от частоты входного воздействия.

Сдвиг по фазе между движением поршня, нагруженного позиционной (посредст-

вом пружин) нагрузкой, и перемещением золотника равен $(-\pi/2)$, что совпадает с фазовым сдвигом в ненагруженном исполнительном механизме.

Определить длительность процесса в общем виде трудно, поэтому её можно найти ориентировочно по характеру изменения наибольших отклонений поршня, подсчитанных по уравнению (10) либо по виду переходных характеристик, получаемых в результате моделирования работы системы на различных задающих частотах генератора.

Библиографический список

1. База патентов СССР [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://patents.su/2-317741-diskovaya-melnica.html>.
2. База патентов СССР [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://patents.su/2-502994-diskovaya-melnica.html>.
3. База патентов СССР [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://patents.su/4-1618436-diskovaya-melnica.html>.
4. База патентов СССР [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://patents.su/4-1703749-diskovaya-melnica.html>.
5. База патентов СССР [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://patents.su/3-364175-diskovaya-melnica-s-reguliruemojj-shheliyu-pomola.html>.
6. А. с. № 1747151 СССР, МКІР В 02 С 7/08. Мельница / А. И. Свеженец, В. Н. Алтухов. — № 4828110 ; заявл. 29.05.90 ; опубл. 15.07.92, Бюл. № 26.
7. Алфёров, Н. Г. Гидравлическое управление сжимающими нагрузками в дисковой мельнице [Текст] / Н. Г. Алфёров, Э. П. Левченко, А. Н. Тумин // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : материалы международной научно-технической конференции ДонГТУ. — Алчевск, 2016. — С. 26–27.
8. Тумин, А. Н. Разработка системы управления для реализации вынужденных колебаний рабочей гарнитуры в дисковой мельнице [Текст] / А. Н. Тумин, Э. П. Левченко, А. М. Новохатский, А. П. Жильцов // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2018. — Вып. 52. — С. 142–148.
9. Финкельштейн, З. Л. Расчёт, проектирование и эксплуатация объёмного гидропривода [Текст] : учебное пособие / З. Л. Финкельштейн, О. М. Яхно, В. Г. Чебан, З. Я. Лурье, И. А. Чекмасова. — К. : НТУУ «КПИ», 2006. — 216 с.
10. Богданович, Л. Б. Объёмные гидроприводы [Текст] / Л. Б. Богданович. — К. : Техника, 1971. — 172 с.
11. Попов, Д. Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем [Текст] / Д. Н. Попов. — М. : Машиностроение, 1988. — 512 с.
12. Чупраков, Ю. И. Гидропривод и средства гидропневмоавтоматики [Текст] / Ю. И. Чупраков. — М. : Машиностроение, 1979. — 232 с.

© Тумин А. Н.
 © Левченко Э. П.
 © Бизянов Е. Е.
 © Коваленко Н. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.,
 д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еронько С. П.**

Статья поступила в редакцию 09.10.18.

**Тумін О. М., к.т.н. Левченко Е. П., д.е.н. Бізянов Є. Є., д.е.н. Коваленко Н. В. (ДонДТУ,
 м. Алчевськ, ЛНР)**

РОЗРАХУНОК ПРИМУСОВИХ ПЕРІОДИЧНИХ РУХІВ ШТОВХАЧІВ ДИСКОВОГО МЛИНА ПРИ ПРОПОРЦІЙНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Проведено дослідження можливостей забезпечення качальних рухів робочим органам дискової дробарно-здрібнювальної машини за допомогою гідроштовкачів. У відповідності до поставленого завдання розроблено гідросхему роботи штовхачів та проведено розрахунок їх примусових коливань при пропорційному навантаженні. Побудовано графік амплітудно-частотної характеристики гідроприводу дискового подрібнювача.

Ключові слова: дисковий млин, качання дисків, ефективність, закон руху, аналітичний розрахунок.

Tumin A. N., PhD Levchenko E. P., Doctor of Economics Bizianov E. E., Doctor of Economics Kovalenko N. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

CALCULATING THE FORCED PERIODIC MOTION OF DISK MILLS PUSHERS AT PROPORTIONAL LOADING

The research have been carried out on possibility to provide the swinging motion with operating element of crushing and grinding disk reducer using the hydraulic pushers. As requested, there has been developed the hydraulic diagram of the pushers operating and there has been made a calculation of their forced motions at proportional loading. The diagram of amplitude-frequency power characteristics of the hydraulic drive of disk reducer has been made.

Key words: disk mill, swinging of the disks, efficiency, motion law, analytical computation.

ТРЕБОВАНИЯ
к рукописям научных статей в сборник научных трудов
Государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
Луганской Народной Республики
«Донбасский государственный технический университет»

Научные статьи, предоставляемые в редакцию, должны соответствовать требованиям ВАК МОН ДНР (Приложение 1 к правилам формирования в уведомительном порядке перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (п. 4)) и базовым издательским стандартам по оформлению статей по ГОСТ 7.5-98 «Журналы, сборники, информационные издания».

Сборник научных трудов издаётся 1–4 раза в год. Сборник формирует информационный отдел: 94204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16, ДонГТУ; тел./факс: (06442) 2-68-87, e-mail: info@dstu.education (тема: для редакции сборника научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ»); секретарь редакционной коллегии Скомская Светлана Анатольевна.

Сборник содержит следующие разделы: «Науки о земле», «Металлургия и материаловедение», «Машиностроение и машиноведение», «Строительство и архитектура».

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 предоставляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, несоблюдение действующих стандартов и недостоверность приведённых в статье данных полностью несут авторы статьи.

Статья должна сопровождаться:

– внутренней и внешней рецензиями (на усмотрение автора, рекомендовано два вида рецензий: рецензия в произвольном изложении; международная форма рецензирования статьи);

– лицензионным договором с автором(и).

Текст статьи предоставляется на электронном носителе и в печатном виде, сопроводительная документация только в печатном виде.

Рекомендуемое количество авторов статьи — до 3-х человек. При необходимости, по решению редколлегии, количество авторов может быть увеличено до 5-ти.

Языки предоставления статей: русский, английский, украинский.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Текст рукописи статьи от 5 до 10 страниц в книжной ориентации на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) с полями: верхнее, нижнее — 27 мм; левое — 23 мм, правое — 25 мм. Различать колонтитулы чётных и нечётных страниц: от края до верхнего колонтитула — 2 см; от края до нижнего колонтитула — 2 см. Страницы не нумеруются. Рукопись статьи оформляется с применением редактора **MS Word (не ниже Word 97 и не старше Word 2003)**: шрифт — Times New Roman, размер — 12 пт, интервал — одинарный, выравнивание — по ширине, абзацный отступ — 0,5 см.

Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **активирована**. Весь материал подаётся в чёрно-белом оформлении (без градиентов серого или цветовой палитры).

Не допускается использование списков (маркированных и нумерованных) и элементов «Надпись».

Оформление статей

Статья подаётся отдельным файлом «*Статья.doc*».

УДК проставляется вверху, выравнивание по левому краю, шрифт полужирный, без абзацного отступа. УДК можно определить самостоятельно с помощью классификатора <https://teacode.com/online/udc>. Проверить корректность расшифровки известного УДК можно здесь — <http://scs.viniti.ru/udc/Default.aspx>.

Через один интервал — учёная степень, фамилия, инициалы, разделённые пробелом. С новой строки в круглых скобках через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. Шрифт полужирный, курсив, выравнивание по правому краю, без абзацного отступа.

С новой строки — название статьи. Выравнивание по центру, шрифт Arial, полужирный, видоизменение — все прописные, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца — 12 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. **Не допускается** набор всего названия заглавными буквами (Caps Lock).

С новой строки — краткая аннотация на языке публикации: размер шрифта — 11 пт, курсив. В аннотации сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

После аннотации с новой строки — ключевые слова (6–8 слов на языке статьи), курсивом, размером 11 пт, интервал после абзаца — «Авто». Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

С новой строки — текст статьи в **две колонки** одинаковой ширины, промежуток между колонками — 0,5 см.

Слова «рисунок» и «таблица» при упоминаниях в тексте пишутся полностью (пример: «... на рисунке 2 ...»), а в ссылках в конце предложения — сокращённо в скобках (примеры: «... схема инвертора (рис. 2).», «... получены экспериментальные данные (табл. 4).»).

После текста статьи полужирным шрифтом размером 11 пт располагается заголовок «Библиографический список»: интервал перед абзацем — 12 пт, после абзаца — 8 пт, выравнивание по левому краю.

Библиографический список оформляется согласно ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления» размером 11 пт, курсивом и должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Рекомендованное количество ссылок — не более восьми источников с датой их издания не ранее чем 20 лет назад.

Через один интервал — учёная степень, фамилия, инициалы, полное название организации, название статьи, аннотации и ключевые слова на оставшемся языке из двух (русский, украинский), размером шрифта 11 пт.

Учёная степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. В круглых скобках курсивом через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора.

С новой строки, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю — название статьи заглавными буквами.

С новой строки — краткая аннотация курсивом.

С новой строки — ключевые слова курсивом. Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

Оформление аннотаций отдельным файлом

Аннотация и ключевые слова дополнительно подаются на двух языках (русский, украинский) отдельным файлом «*Аннотация.doc*», размером шрифта 11 пт.

Учёная степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. В круглых скобках курсивом через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. С новой строки, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю — название статьи заглавными буквами.

С новой строки — краткая аннотация курсивом.

С новой строки — ключевые слова курсивом. Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

Не допускается внедрение в текст аннотации объектов (формул, рисунков и т. д.).

Оформление рефератов отдельным файлом

Реферат подаётся на двух языках (русский, украинский) отдельным файлом «*Реферат.doc*»: размер шрифта — 11 пт, без абзацного отступа, выравнивание — по левому краю. Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **выключена**.

Фамилия, имя, отчество оформляются полужирным шрифтом.

С новой строки — учёная степень, должность.

С новой строки — название подразделения.

С новой строки через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора.

Через интервал повторить данные для каждого автора.

Через интервал — название статьи (полужирным начертанием).

Через интервал — текст реферата. Реферат объёмом от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель, методика, результаты, научная новизна, практическая значимость. Фразы «Цель.», «Методика.», «Результаты.», «Научная новизна.», «Практическая значимость.» (на русском языке), «Мета.», «Методика.», «Результати.», «Наукова новизна.», «Практична значущість.» (на украинском языке), «Aim.», «Technique.», «Results.», «Scientific novelty.», «Practical significance.» (на английском языке) размещаются с новой строки и выделяются полужирным начертанием. Реферат не должен повторять название статьи.

Не допускается внедрение в текст реферата объектов (формул, рисунков, и т. д.).

Рисунки

Рисунки вставляются в текст единым объектом и могут быть представлены:

– *растровыми форматами* — gif, tiff, jpg, bmp и им подобными (качество 300 dpi);

– векторными форматами — emf, wmf (графики, диаграммы).

Рисунки, выполненные в программах Corel, CAD, Word и др., переводятся в один из описанных выше форматов, предпочтительно векторный.

Графический материал следует располагать непосредственно после текста, в котором он упоминается впервые, или на следующей странице. Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте и нанесены слева направо, сверху вниз. Перед рисунком интервал 12 пт. Выравнивание по центру, ширина в одну колонку (большие рисунки располагают на ширину страницы вверху или внизу). Рисунки размещают в тексте (не в таблицах), обтекание рисунка — «в тексте». Все рисунки подаются дополнительно отдельными файлами.

Допускается размещение пояснительных данных под иллюстрацией (подрисуночный текст) с выравниванием по центру, без абзацного отступа, размером 10 пт.

Под каждым рисунком (подрисуночным текстом) располагается надпись в формате «Рисунок № Название» с выравниванием по центру без абзацного отступа, интервалом перед и после абзаца — «Авто», размером шрифта 11 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. Статья не должна заканчиваться рисунком. Рекомендуются, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема статьи.

Формулы

Абзац, содержащий формулы, должен иметь следующие параметры: выравнивание по левому краю, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца 6 пт, позиции табуляции — 3,93 см по центру (для расположения формулы) и 7,85 см по правому краю (для расположения номера формулы). Формулы целиком (включая размерности) выполняются с помощью редактора формул **Microsoft Equation 3** математическим стилем, обычное начертание шрифта (нормальный), со следующими размерами:

Full (обычный).....	12 pt
Subscript/Superscript (крупный индекс).....	9 pt
Sub-Subscript/Superscript (мелкий индекс).....	7 pt
Symbol (крупный символ).....	14 pt
Sub-Symbol (мелкий символ).....	12 pt
Формат	по центру
Междустрочный интервал.....	200 %

Недопустимо масштабирование и размещение формул в табличном формате. В одном блоке формулы, попадающем на границу колонок, допускается только одна строка (многострочные формулы разбиваются на блоки). Упоминание элементов формул в тексте статьи также выполняется в редакторе формул.

Таблицы

Все таблицы располагаются после упоминания в тексте и должны иметь нумерационный заголовок и название (размер шрифта 11 пт). Нумерационный заголовок (*Таблица 1*) выравнивается по правому краю над таблицей, курсив, интервал перед абзацем — 12 пт. С новой строки помещают название выравниванием по центру, без абзацного отступа, с запретом автоматического переноса слов в абзаце; интервал после абзаца — 6 пт.

Таблица выравнивается по центру контейнера, в книжной ориентации, шириной в 1 колонку (большие таблицы располагаются на ширину страницы вверху или внизу). Текст в таблице оформляется размером шрифта 11 пт или 12 пт без абзацного отступа. **Не допускается** заливка ячеек таблицы цветом. **Запрещается** располагать таблицу в альбомной ориентации. После таблицы отступается один интервал.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

<i>Литвинский Г. Г.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА. СПИРАЛЬ АРХИМЕДА	5
<i>Полозов Ю. А., Лазебник А. Ю.</i> ГИДРОИЗОЛЯЦИЯ И УКРЕПЛЕНИЕ НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ МЕТОДОМ ТАМПОНАЖА	22
<i>Аверин Г. А., Филонюк Ю. В., Корецкая Е. Г.</i> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ ОБРУШЕНИЯ ПОРОД КРОВЛИ	29
<i>Ларченко В. Г., Коваленко Е. В., Маталкина Ю. А.</i> МАКСИМАЛЬНЫЕ ОСЕДАНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПОДРАБОТКЕ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ	33
<i>Палейчук Н. Н., Пронский Д. В., Бизянов Е. Е., Коваленко Н. В.</i> О ФОРМИРОВАНИИ НАГРУЗКИ НА КРЕПЬ ВЫРАБОТОК В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКИХ АНТРАЦИТОВЫХ ШАХТ	41

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Куберский С. В.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ВТОРИЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ НЕПРЕРЫВНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ МИКРОЗАВОДОВ	49
<i>Куберский С. В., Проценко М. Ю., Воронько М. И., Проценко В. И.</i> АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА ЭЛЕКТРОДНОЙ СМЕСИ НА ТЕМПЕРАТУРУ СТОЛБА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ	57

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Рогулин В. В., Николаева Е. К., Пушко Н. И.</i> ПРОБЛЕМЫ ЦВЕТОВОГО РЕШЕНИЯ ФАСАДОВ ЗДАНИЙ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ГОРОДОВ ДОНБАССА	69
<i>Балашова О. С.</i> ИНЖЕНЕРНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЁТОМ ВЛИЯНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ	75
<i>Рогулин В. В., Береза А. С.</i> МЕТОДЫ ПРИВЕДЕНИЯ РЯДОВ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИХ ПАРАМЕТРОВ К МНОГОЛЕТНЕМУ ПЕРИОДУ С УЧЁТОМ НАБЛЮДЕНИЙ МЕНЕЕ 6 ЛЕТ ...	82
<i>Иванова М. С.</i> УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРУНТА	87
<i>Бизирка И. И.</i> СВОЙСТВА АСФАЛЬТОБЕТОНОВ НА ОРГАНОМИНЕРАЛЬНОМ И ИЗВЕСТНЯКОВОМ МИНЕРАЛЬНОМ ПОРОШКАХ ИЗ ВЕРХНЕГО СЛОЯ ПОКРЫТИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СРОКОВ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ	93

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Корнеев С. В., Доброногова В. Ю., Долгих В. П., Захаров О. В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СТЫКОВ КОНВЕЙЕРНЫХ ЛЕНТ	101
<i>Еронько С. П., Ткачёв М. Ю., Ошовская Е. В., Ковалёва О. А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ НОЖНИЦ ДЛЯ КАЧЕСТВЕННОЙ РЕЗКИ ТОНКОСТЕННЫХ ТРУБ	110

<i>Еронько С. П., Ошовская Е. В., Ткачёв М. Ю., Понамарёва Е. А.</i> МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ВИБРАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СИСТЕМ КОВШОВЫХ ЗАТВОРОВ	119
<i>Петров П. А., Ульяницкий В. Н., Балашова О. С., Орлов А. А.</i> ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ВАЛКОВОГО УЗЛА КЛЕТИ КВАРТО И СНИЖЕНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ РАЗНОТОЛЩИННОСТИ ЛИСТОВОГО МЕТАЛЛОПРОКАТА	129
<i>Тумин А. Н., Левченко Э. П., Бизянов Е. Е., Коваленко Н. В.</i> РАСЧЁТ ВЫНУЖДЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ДВИЖЕНИЙ ТОЛКАТЕЛЕЙ ДИСКОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ ПРИ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОЙ НАГРУЗКЕ	136

ЗМІСТ**НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ**

<i>Литвинський Г. Г.</i> ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ БУРОВОГО ІНСТРУМЕНТУ. СПІРАЛЬ АРХІМЕДА	5
<i>Полозов Ю. А., Лазебнік О. Ю.</i> ГІДРОІЗОЛЯЦІЯ І ЗМІЦНЕННЯ НЕЗВ'ЯЗНИХ ҐРУНТІВ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД МЕТОДОМ ТАМПОНАЖУ	22
<i>Аверін Г. О., Філонюк Ю. В., Корецька О. Г.</i> МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДИЧНОСТІ ОБВАЛЕННЯ ПОРІД ПОКРІВЛІ	29
<i>Ларченко В. Г., Коваленко О. В., Маталкіна Ю. А.</i> МАКСИМАЛЬНІ ОСІДАННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЇ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ПІДРОБЦІ НА ЗНАЧНИХ ГЛИБИНАХ	33
<i>Палейчук М. М., Пронський Д. В., Бізянов Є. Є., Коваленко Н. В.</i> ПРО ФОРМУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА КРІПЛЕННЯ ВИРОБОК В УМОВАХ ГЛИБОКИХ АНТРАЦИТОВИХ ШАХТ	41

МЕТАЛУРГІЯ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

<i>Куберський С. В.</i> ОПТИМІЗАЦІЯ ВТОРИННОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ПІД ЧАС БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ В УМОВАХ МІКРОЗАВОДІВ	49
<i>Куберський С. В., Проценко М. Ю., Воронько М. І., Проценко В. І.</i> АНАЛІЗ ВПЛИВУ СКЛАДУ ЕЛЕКТРОДНОЇ СУМІШІ НА ТЕМПЕРАТУРУ СТОВПА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ	57

БУДІВНИЦТВО ТА АРХІТЕКТУРА

<i>Розулін В. В., Ніколаєва О. К., Пушко М. І.</i> ПРОБЛЕМИ КОЛІРНОГО РІШЕННЯ ФАСАДІВ БУДІВЕЛЬ ДЛЯ ПРОМИСЛОВИХ МІСТ ДОНБАСУ	69
<i>Балашова О. С.</i> ІНЖЕНЕРНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ЗВАРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ	75
<i>Розулін В. В., Береза А. С.</i> МЕТОДИ ПРИВЕДЕННЯ РЯДІВ ГІДРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТА ЇХ ПАРАМЕТРІВ ДО БАГАТОРІЧНОГО ПЕРІОДУ З УРАХУВАННЯМ СПОСТЕРЕЖЕНЬ МЕНШЕ 6 РОКІВ ...	82
<i>Іванова М. С.</i> ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ ҐРУНТУ	87
<i>Бізірка І. І.</i> ВЛАСТИВОСТІ АСФАЛЬТОБЕТОНІВ НА ОРГАНОМІНЕРАЛЬНОМУ І ВАПНЯКОВОМУ МІНЕРАЛЬНОМУ ПОРОШКАХ З ВЕРХНЬОГО ШАРУ ПОКРИТТЯ ЗАЛЕЖНО ВІД ТЕРМІНІВ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЇ	93

МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАШИНОЗНАВСТВО

<i>Корнєєв С. В., Доброногова В. Ю., Долгих В. П., Захаров О. В.</i> МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕХАНІЧНИХ СТИКІВ КОНВЕЄРНИХ СТРИЧОК	101
<i>Єронько С. П., Ошовська О. В., Ткачов М. Ю., Ковальова О. О.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОСИЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ НОЖИЦЬ ДЛЯ ЯКІСНОГО РІЗАННЯ ТОНКОСТІННИХ ТРУБ	110

Єронько С. П., Ошовська О. В., Ткачов М. Ю., Понамарьова О. О. МОДЕЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ СИСТЕМ КОВШОВИХ ЗАТВОРІВ	119
Петров П. О., Ульяницький В. Н., Балашова О. С., Орлов А. А. ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВАЛКОВОГО ВУЗЛА КЛІТІ КВАРТО І ЗНИЖЕННЯ ПОПЕРЕЧНОЇ РІЗНОТОВЩИННОСТІ ЛИСТОВОГО МЕТАЛОПРОКАТУ	129
Тумін О. М., Левченко Е. П., Бізянов Є. Є., Коваленко Н. В. РОЗРАХУНОК ПРИМУСОВИХ ПЕРІОДИЧНИХ РУХІВ ШТОВХАЧІВ ДИСКОВОГО МЛИНА ПРИ ПРОПОРЦІЙНОМУ НАВАНТАЖЕННІ	136

CONTENT**GEOSCIENCES**

<i>Litvinskiy G. G.</i> OPTIMIZATION OF DRILLING TOOL PARAMETERS. ARCHIMEDES SPIRAL	5
<i>Polozov Yu. A., Lazebnik A. Yu.</i> WATERPROOF AND STRENGTHENING THE LOOSE SOIL OF HYDRAULIC STRUCTURES BY GROUTING	22
<i>Averin G. A., Filoniuk Yu. V., Koretskaia E. G.</i> TECHNIQUE OF DETERMINING THE REGULARITY OF ROOF CAVING	29
<i>Larchenko V. G., Kovalenko E. V., Matalkina Yu. A.</i> MAXIMUM EARTH CRUST SUBSIDENCE AND DEFORMATION AT GREAT DEPTH UNDERMINING	33
<i>Paleychuk N. N., Pronskiy D. V., Bizianov E. E., Kovalenko N. V.</i> FORMING THE SUPPORT LOADING UNDER THE ANTHRACITE MINE CONDITIONS	41

METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES

<i>Kuberskiy S. V.</i> OPTIMIZATION OF SECONDARY COOLING WITH CONTINUOUS STEEL CASTING IN THE CONDITIONS OF MICROFACTORIES	49
<i>Kuberskiy S. V., Protsenko M. Yu., Voron'ko M. I., Protsenko V. I.</i> ANALYSIS OF ELECTRODE MIXTURE COMPOSITION IMPACT ON THE TEMPERATURE OF THE ELECTRIC ARC	57

CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

<i>Rogulin V. V., Nikolaieva Ye. K., Pushko N. I.</i> PROBLEMS OF FACADE COLORS CHOICE FOR THE BUILDINGS IN THE INDUSTRIAL TOWNS OF DONBASS	69
<i>Balashova O. S.</i> ENGINEERING APPROACH TO DETERMINING THE BEARING CAPACITY OF WELDED ELEMENTS WITH REGARD TO THE RESIDUAL STRESS	75
<i>Rogulin V. V., Bereza A. S.</i> METHODS FOR ATTRIBUTING SERIES OF HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS AND THEIR PARAMETERS TO A LONG-TERM PERIOD WITH REGARD TO OBSERVATIONS LESS THAN 6 YEARS	82
<i>Ivanova M. S.</i> IMPROVING THE METHOD FOR DETERMINING THE SOIL STRENGTH CHARACTERISTICS	87
<i>Bizirka I. I.</i> PROPERTIES OF ASPHALT CONCRETE BASED ON ORGANOMINERAL POWDER AND LIMESTONE MINERAL POWDER FROM THE TOP COATING CONSIDERING THE COATING OPERATION TERM	93

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Korneiev S. V., Dobronogova V. Yu., Dolgikh V. P., Zaharov O. V.</i> MODELING THE STRESS-STRAIN STATE OF MECHANICAL JOINTS OF CONVEYOR BELT	101
<i>Eron'ko S. P., Oshovskaya E. V., Tkachov M. Yu., Kovaleva O. A.</i> RESEARCH ON THE POWER AND FORCE PARAMETERS OF SHEARS FOR HIGH-QUALITY CUTTING OF THIN-WALLED PIPES	110

<i>Eron'ko S. P., Oshovskaya E. V., Tkachov M. Yu., Ponamaryova E. A.</i> MODEL STUDING THE OPERATION PARAMETERS OF VIBRATION DEVICES FOR LADLE SLIDE GATE SYSTEMS	119
<i>Petrov P. A., Ulianitskiy V. N., Balashova O. S., Orlov A. A.</i> INCREASING THE RELIABILITY OF MILL BLOCK OF FOUR-HIGH MILL STAND AND REDUCING THE WIDTHWISE THICKNESS DISTRIBUTION OF SHEET METAL	129
<i>Tumin A. N., Levchenko E. P., Bizianov E. E., Kovalenko N. V.</i> CALCULATING THE FORCED PERIODIC MOTION OF DISK MILLS PUSHERS AT PROPORTIONAL LOADING	136

УДК 622(06) + 669(06) + 69(06) + 65.011.56 + 621.3 +
+ 33 + 621.37 + 1

**Збірник наукових праць
Донбаського державного
технічного університету**

Збірник

Випуск 11 (54) 2018

**Засновник:
Донбаський державний технічний
університет**

*Свідоцтво Міністерства інформації,
друку і масових комунікацій ЛНР
про державну реєстрацію засобу масової
інформації МІ-СГР ПІ 000003
від 05.02.2016*

*Наказом Міністерства освіти і науки Донецької
Народної Республіки від 2 травня 2017 р № 464
збірник наукових праць включений до Переліку
рецензованих наукових видань, в яких повинні
бути опубліковані основні наукові результати
дисертацій на здобуття наукового ступеня
кандидата наук, на здобуття наукового ступеня
доктора наук, затвердженого наказом
Міністерства освіти і науки Донецької Народної
Республіки від 1 листопада 2016 р № 1134, згідно
з додатком І.*

*Рекомендовано вченою радою
ДСУ ВПО ЛНР «ДонДТУ»
(Протокол № 2 від 26.10.2018)*

Включений до наукометричної бази даних РИНЦ

Формат 60×84¹/₈.
Ум. друк. арк. 9,5.
Зам. № 364.
Наклад 100 пр.

Видавництво не несе відповідальності за зміст
матеріалу, наданого автором до друку.

Адреса редакції, видавця
та виготовлювача:
ДСУ ВПО ЛНР
«Донбаський державний технічний університет»
пр. Леніна, 16, м. Алчевськ, ЛНР, 94204.
E-mail: info@dstu.education
Web-site: <http://www.dstu.education>

ВИДАВНИЧО-ПОЛІГРАФІЧНИЙ ЦЕНТР,
ауд. 2113, т./факс 2-58-59
Свідоцтво про державну реєстрацію видавця,
виготовлювача
і розповсюджувача засобу масової інформації
МІ-СГР ВД 000055 від 05.02.2016.

Головний редактор

Зінченко А. М. — к.е.н., в.о. ректора

Заступник головного редактора

Новохатський А. М. — д.т.н., проф.

Редакційна колегія:

Литвинський Г. Г. — д.т.н., проф.
Фінкельштейн З. Л. — д.т.н., проф.
Корнєєв С. В. — д.т.н., проф.
Леонов А. О. — к.т.н., доц.
Харламов Ю. А. — д.т.н., проф.
Ульяницький В. Н. — к.т.н., проф.
Зелінський А. М. — к.т.н., проф.
Куберський С. В. — к.т.н., проф.
Денищенко П. М. — к.т.н., доц.
Дрозд Г. Я. — д.т.н., проф.
Шолух М. В. — д. арх., проф.
Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.
Псюк В. В. — к.т.н., доц.
Скомська С. А. — секретар редакційної
колегії.

Для наукових співробітників, аспірантів,
студентів вищих навчальних закладів

Мова видання:
російська, українська та англійська

Комп'ютерна верстка і коректура
Ісмаїлова Л. М.

© ДСУ ВПО ЛНР «ДонДТУ», 2018
© Чернишова Н. В., художнє
оформлення обкладинки, 2018

**UDK 622(06) + 669(06) + 69(06) +
+ 65.011.56 + 621.3 + 33 + 621.37 + 1**

**Collection of scientific papers
of Donbass State Technical
University**

Collection

Issue 11 (54) 2018

**Establisher: Donbass
State Technical
University**

*Certificate of Ministry of Information,
Press and Mass Communication of LPR
for mass media registration
MI-SGR PI 000003
dated 05.02.2016*

*By order of the Department of Education and
Science of Donetsk People Republic of 2 May
2017 № 464 the Collection of scientific papers
is being offered in the list of peer-reviewed
scientific editions with required publications
of the main scientific PhD and Doctor's thesis
results, approved by an order of the Department
of Education and Science of Donetsk People
Republic of 1 November 2016 № 1134,
according to annex 1.*

*Recommended by academic council of DonSTU
(Record № 2 dated 26.10.2018)*

Added to scientometrical data base of RSCI

Format 60×84%.
Conventional printed sheet 9,5.
Order № 364.

Circulation 100 copies
Publishing office is not responsible for
material content giving by author for
publishing.

Address of editorial office, publishing and
establishing: Donbass State Technical
University
Lenin avenue, 16, Alchevsk, LPR
94204
E-mail: info@dstu.education
Web-site: <http://www.dstu.education>

**PUBLISHING AND PRINTING
CENTER,**

Room 2113, tel/fax 2-58-59
Certificate of State registration for mass
media publisher, owner and distributor
MI-SGR ID 0000055 dated 05.02.2016

Editor-in-chief

Zinchenko A. M. — PhD in Engineering,
acting rector

Deputy chief editor

Novohatskyi A. M. — Doctor of tech. sc., prof.

Editorial board:

Litvinskyi G. G. — Doctor of tech. sc., prof.
Finkelstein Z. L. — Doctor of tech. sc., prof.
Korneiev S. V. — Doctor of tech. sc., prof.
Leonov A. A. — PhD in Engineering
Kharlamov Yu. A. — Doctor of tech. sc., prof.
Uliianitskyi V. N. — PhD in Engineering, prof.
Zelinskyi A. N. — PhD in Engineering, prof.
Kuberskyi S. V. — PhD in Engineering, prof.
Denisschenko P. N. — PhD in Engineering
Drozd G. Ya. — Doctor of tech. sc., prof.
Sholukh N. V. — Doctor of arch., prof.
Bondarchuk V. V. — PhD in Engineering
Psjuk V. V. — PhD in Engineering
Skomskaia S. A. — Secretary to the editorial board.

For research scientists, PhD seekers, students of
higher educational institutions.

Issue language:

Russian, Ukrainian, English

Computer layout and proofreading
Ismailova L. M.

© SEIHPE «DonSTU», 2018

© Chernyshova N.V., graphic, 2018