



СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ

***ДОНБАССКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА***

Выпуск 2 (43) 2014



**Збірник наукових праць
Донбаського державного технічного університету**

**Сборник научных трудов
Донбасского государственного технического
университета**

Collection of Scientific Papers of DonSTU

Збірник

Виходить 1–3 рази на рік

Заснований у червні 1999 р.

Випуск 2 (43) 2014

Алчевськ
2014

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

**Збірник наукових праць
Донбаського державного
технічного університету**

ISSN 2077-1738

Збірник

Випуск 2 (43) 2014

**Засновник:
Донбаський державний технічний
університет**

*Постановою президії Вищої атестаційної комісії
України від 9 червня 1999 р. № 1-05/7 збірник
наукових праць включено до переліку № 1 наукових
фахових видань України в галузі технічних наук*

*Свідоцтво Держкомтелерадіо України
про реєстрацію
серія KB № 10807 від 27.12.2005*

*Постановою президії ВАК України
від 14 жовтня 2009 р. № 1-05/4
збірник пройшов перереєстрацію*

*Свідоцтво Державної реєстраційної служби
України про державну реєстрацію друкованого
засобу масової інформації
серія KB № 20710-10510ПР від 30.04.2014*

*Рекомендовано вченою радою ДонДТУ
(Протокол № 7 від 01.07.2014)*

Включений до наукометричної бази даних РИНЦ

Формат 60×84¹/₈.
Ум. друк. арк. 16,97.
Зам. № 666.
Наклад 100 пр.

Видавництво не несе відповідальності за зміст
матеріалу, наданого автором до друку.

Адреса редакції, видавця та виготовлювача:
Донбаський державний технічний університет
пр. Леніна, 16, м. Алчевськ, Луганська обл., 94204.
E-mail: info@dmmti.edu.ua,
Web-site: http://www.dmmi.edu.ua
(Видавництво "ЛАДО", ауд. 2113,
т/факс: (0642) 2-58-59)
E-mail: info.lado@mail.ru,
Web-site: http://www.testlado.com.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2010 від 12.11.2004

Головний редактор

М. І. Антощенко — д.т.н.

Редакційна колегія:

М. М. Заблудський — д.т.н.,

С. М. Петрушов — д.т.н.,

О. М. Смірнов — д.т.н.,

О. М. Новохатський — д.т.н.,

Г. Г. Литвинський — д.т.н.,

Тадеуш Майхерчик — проф. (Польща),

А. Г. Протосеня — д.т.н. (Росія),

Р. А. Фрумкін — д.т.н.,

Г. В. Бабіюк — д.т.н.,

В. М. Окаєлов — д.т.н.,

М. К. Клішин — д.т.н.,

А. П. Борзих — д.т.н.,

П. М. Должиков — д.т.н.,

З. Л. Фінкельштейн — д.т.н.,

В. Д. Лущик — д.т.н.,

С. В. Корнєєв — д.т.н.,

В. О. Ульшин — д.т.н.,

Хельмут Вайс — проф. (Австрія),

О. І. Голоднов — д.т.н.,

А. Ю. Прокопов — д.т.н. (Росія),

Г. Я. Дрозд — д.т.н.,

В. Н. Ульяницький — проф., к.т.н.,

Ю. Е. Паєранд — проф., к.т.н.,

С. В. Семірягін — к.т.н., заступник головного редактора,

С. А. Скомська — секретар редакційної колегії.

У збірнику публікуються статті, які описують сучасні тенденції у
металургії, будівництві, галузях електротехніки і радіотехніки та при
розробці корисних копалин

Для наукових співробітників, аспірантів, студентів вищих
навчальних закладів

Мова видання:

українська, російська та англійська

Відповідальний за випуск С. А. Скомська

Комп'ютерне верстання Н. В. Пупкова

© ДонДТУ, 2014

© Косик І. М., художнє

оформлення обкладинки, 2013

**РОЗРОБКА КОРИСНИХ
КОПАЛИН**

**РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ**

DEVELOPMENT OF MINERALS

УДК 622.411.33

к.т.н. Филатьев М. В.,
д.т.н. Антощенко Н. И.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина),
Крыжановский Ю. Ю.
(ПАО «Краснодонуголь», г. Краснодон, Украина)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОГНОЗА ДИНАМИКИ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ И ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

Динамика изменения добычи угля и газовыделения из подрабатываемых источников за весь период отработки лав. Зависимость уровня газовыделения от добычи угля на каждой стадии эксплуатации выемочных участков. Методика и порядок расчета параметров динамики газоразделения из подрабатываемых источников.

Ключевые слова: добыча угля, газоразделение, подрабатываемые породы, сдвигание, динамика, параметры, методика расчета.

Отработка выемочных участков длинными лавами, как правило, осуществляется в несколько стадий. Это обусловлено технологическими и организационными особенностями ведения очистных работ. После ввода выемочного участка в эксплуатацию происходит опробывание оборудования и устраняются выявленные недостатки и неисправности. По этой причине практически не возможно с первых дней эксплуатации выемочного участка обеспечить плановые показатели добычи угля. Достижение намеченного уровня добычи угля в реальных условиях может происходить от нескольких недель до нескольких месяцев. В этот период развитие очистных работ связано с удалением забоя от разрезной печи и началом процесса сдвижения подработанных пород. Параллельно с увеличением добычи угля и развитием процессов сдвижения пород происходит рост газоразделения из подрабатываемых источников. На этой стадии отработки выемочного участка газоразделение из указанных источников может достигать своего максимального значения при осадке основной кровли и(или) распространении процессов сдвижения до земной поверхности.

После достижения плановых показателей добычи угля и осадки основной кровли газоразделение из подрабатываемых источников связано только с подвиганием очистного забоя. Плановой добыче угля соответствует определенный уровень газоразделения. Колебания метановыделения в этот период определяются, в значительной степени, процессами сдвижения подработанных пород.

Заключительная стадия эксплуатации выемочного участка связана с постепенным сокращением добычи угля до полного ее прекращения. Снижение скорости подвигания очистного забоя вызывает уменьшение интенсивности сдвижения подработанных пород, что, в свою очередь, приводит к сокращению десорбции газа из подрабатываемых источников.

Приведенный анализ показывает, что отработка выемочных участков длинными лавами характеризуется, как минимум, тремя стадиями. При отработке лав на этих стадиях изменяются факторы, определяющие уровень и колебания газоразделения из подрабатываемых источников. Для про-

© Филатьев М. В., 2014

© Антощенко Н. И., 2014

© Крыжановский Ю. Ю., 2014

гнозирования динамики газовыделения при отработке выемочных участков необходимо изучить особенности метановыделения и влияющие факторы на каждой стадии эксплуатации выемочного участка

Об актуальности рассматриваемого вопроса свидетельствует тот факт, что согласно нормативному документу [1] производится прогноз одного значения среднего уровня газовыделения и при прочих, равных условиях, учитывается только плановая добыча угля. Такой подход не позволяет оценить изменение метановыделения на протяжении всего периода эксплуатации выемочного участка под влиянием изменяющихся параметров очистных работ и в случае необходимости принимать экстренные меры, для нормализации газовой обстановки в горных выработках.

Методикой исследований предусматривался анализ возможных факторов, определяющих газовыделение из подрабатываемых источников на разных стадиях отработки выемочных участков с последующей проверкой соответствия принятых научных положений результатам, полученным в шахтных условиях. К таким факторам на первой стадии эксплуатации выемочного участка отнесли рост добычи угля, развитие очистных работ (удаление забоя от разрезной печи) и связанные с ними процессы сдвижения подработанных пород.

На стадии стабильной работы очистного забоя основным фактором, определяющим уровень газовыделения, является плановая добыча угля. При примерно постоянной нагрузке на очистной забой колебания газовыделения определяются процессами сдвижения подработанных пород.

На заключительной стадии работы лавы происходит снижение добычи угля до полного прекращения очистных работ, что вызывает сокращение газовыделения практически до нуля.

Экспериментальная часть работы проведена в условиях шахт «Суходольская-Восточная» ПАО «Краснодонуголь», им.

газеты «Известия» ГП «Донбассантрацит» и им. А.Ф. Засядько [2] при отработке соответственно пластов i'_3 , I_2^s и m_3 .

Исходя из логических рассуждений сделали предположение, что рост добычи угля (A) после начала эксплуатации выемочного участка и удалении очистного забоя от разрезной печи (L) происходит по экспоненциальной зависимости:

$$A = A_m(1 - e^{-k_1 L}), \quad (1)$$

где A_m — плановый (максимальный) уровень добычи угля, т/сут; k_1 — эмпирический коэффициент, характеризующий изменение добычи угля.

При выборе зависимости газовыделения от расстояния между очистным забоем и разрезной печью (L) исходили из того факта, что метановыделение в эту выработку до начала ведения очистных работ незначительно, и в редких случаях превышает 1 м³/мин. Объясняется это отсутствием отбойки угля во время монтажных работ. Их длительность может составлять от нескольких недель до нескольких месяцев. За это время газовыделение с обнажённых поверхностей разрезной печи снижается до минимальных значений. По этой причине фоновое значение газовыделения до начала очистных работ близко к нулю и текущее изменение метановыделения (I_c) по мере увеличения расстояния (L) можно также описать экспоненциальной кривой, выходящей из начала координатной сетки:

$$I_c = I_m(1 - e^{-k_2 L}), \quad (2)$$

где I_m — уровень газовыделения, который соответствует плановой добыче угля A_m , м³/мин; k_2 — эмпирический коэффициент, характеризующий горно-геологические и горнотехнические условия эксплуатации конкретной лавы.

По мере развития очистных работ метановыделение происходит как в горные выработки, так и в дегазационные скважины. В уравнении (2) учитывали их суммарное значение (I_c).

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

Результаты обработки экспериментальных данных согласно уравнениям (1 и 2) сведены в таблицу 1. В качестве примера (рис. 1) приведены графики изменения уровня добычи угля и суммарного газовыделения в горные выработки и скважины при отработке 25-й западной лавы шахты «Суходольская-восточная». Из графиков видно, что плановые показатели добычи угля были достигнуты при удалении очистного забоя от разрезной печи на 64 м. Суммарное газовыделение, которое соответствовало этому уровню добычи, происходило при расстоянии между очистным забоем и разрезной печью около 200 м. Такое соотношение указывает на то, что при расстоянии менее 200 м на уровень газовыделения оказывали влияние два

фактора — добыча угля и степень развития очистных работ. После удаления на расстояние более 200 м уровень газовыделения ($40,6 \text{ м}^3/\text{мин}$) определялся плановой нагрузкой (1486 т/сут) на очистной забой 25-й западной лавы (табл. 1), а развитие очистных работ (удаление забоя от разрезной печи) уже не влияло на процессы метановыделения (рис. 1).

Такое изменение добычи угля и газовыделения было характерным для выемочных участков шахт «Суходольская-Восточная» и им. А.Ф. Засядько. Это подтверждается (табл. 1) высокими значениями корреляционных отношений (R) как для добычи угля ($0,95 \div 1,00$), так и метановыделения ($0,80 \div 0,99$).

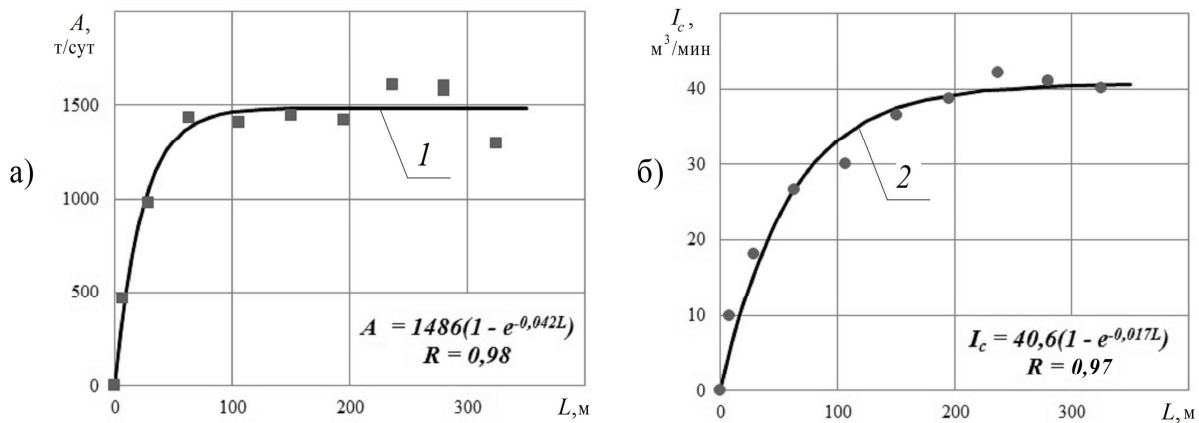
Таблица 1 — Сведения об эмпирических коэффициентах экспоненциальных уравнений (1, 2) и параметрах, характеризующих зависимость добычи угля (A) и газовыделения (I_c) при удалении очистных забоев от разрезных печей

Лавы	Уравнение 1				Уравнение 2			
	добыча A_m , т/сут	эмпирический коэффициент k_1	корреляционное отношение R	среднеквадратическое отклонение σ_A , т/сут	метановыделение I_m , $\text{м}^3/\text{мин}$	эмпирический коэффициент k_2	корреляционное отношение R	среднеквадратическое отклонение σ_{I_c} , $\text{м}^3/\text{мин}$
Шахта "Суходольская-Восточная"								
12-я бис восточ-	1039	0,12	0,96	77	21,9	0,05	0,89	3,2
24-я восточная	2034	0,04	1,00	28	53,3	0,03	0,95	7,8
25-я западная	1486	0,04	0,98	102	40,6	0,01	0,86	2,5
34-я восточная	687	0,09	0,95	65	12,8	0,01	0,97	1,0
37-я западная	954	0,01	0,95	113	16,4	0,02	0,99	0,9
Шахта им. газеты "Известия"								
1-я бис западная	280	0,01	0,87	62	-	-	-	-
2-я западная	1095	0,02	0,90	250	37,3	0,00	0,95	4,4
3-я западная	1313	0,01	0,93	201	37,7	0,01	0,97	4,4
4-я западная	1722	0,00	0,64	397	-	-	-	-
5-я западная	1222	0,01	0,85	261	42,4	0,02	0,91	7,4
6-я западная	775	0,42	0,36	280	22,7	0,05	0,84	4,8
7-я западная	1195	0,02	0,96	145	-	-	-	-
8-я западная	1342	0,01	0,99	71	65,1	0,02	0,96	9,2
9-я западная	872	0,07	0,99	74	13,9	0,03	0,98	1,6
Шахта им. А.Ф. Засядько [2]								
16-я восточная	2878	0,01	0,99	66	80,9	0,01	0,80	14,1

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

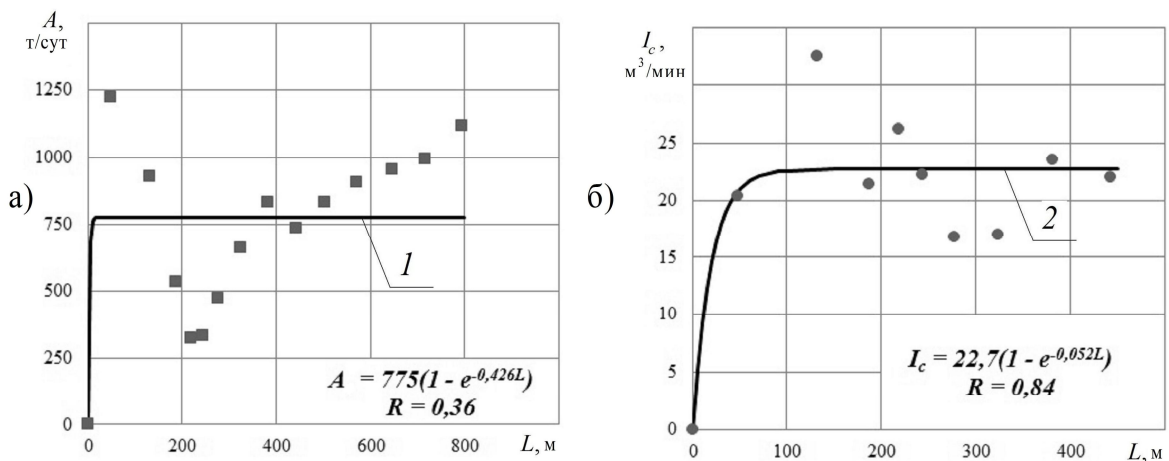
В условиях шахты им. газеты «Известия» рост добычи угля происходил подобным образом (табл. 1) на семи выемочных участках из девяти ($R = 0,85 \div 0,99$). На двух участках корреляционные связи были значительно слабее. При эксплуатации 6-й западной лавы такая зависимость практически отсутствовала ($R = 0,36$). Не типичное изменение добычи угля (рис. 2) из-

за ухудшения горно-геологических условий практически не повлияло на характер изменения суммарного газовыделения ($R = 0,84$). Это свидетельствует о существенном влиянии на уровень газовыделения в начальный период эксплуатации выемочных участков процессов сдвижения подрабатываемых пород при удалении очистных забоев от разрезных печей.



■, ● — экспериментальные данные; 1, 2 — кривые изменения соответственно добычи угля и газовыделения; R — корреляционное отношение.

Рисунок 1 — Пример изменения добычи (A) угля (а) и суммарного газовыделения (I_c) в выработки и скважины (б) от расстояния (L) между очистным забоем и разрезной печью при отработке 25-й западной лавы пласта i_3^I шахтой «Суходольская-Восточная».



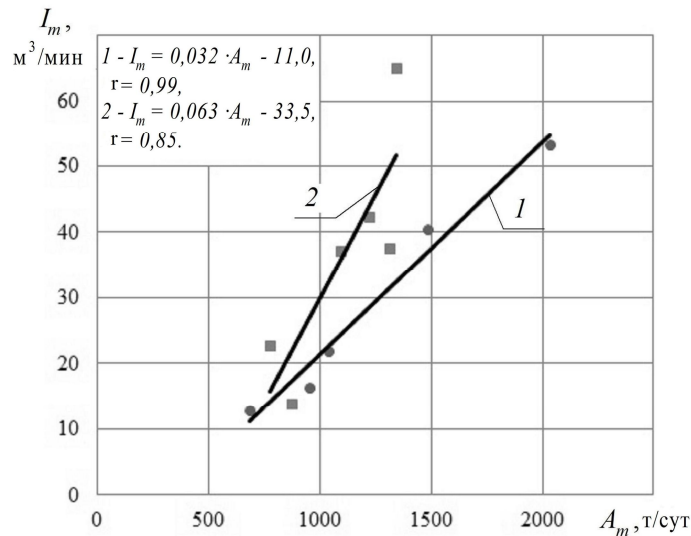
■, ● — экспериментальные данные; 1, 2 — кривые изменения соответственно добычи угля и газовыделения; R — корреляционное отношение.

Рисунок 2 — Пример изменения добычи (A) угля (а) и суммарного газовыделения (I_c) в выработки и скважины (б) от расстояния (L) между очистным забоем и разрезной печью при отработке 6-й западной лавы пласта i_2^6 шахтой им. газеты «Известия».

Приведенные примеры по рассматриваемым шахтам указывают на то, что в большинстве случаев (около 90%) достижение плановых нагрузок происходит согласно экспоненциальной зависимости. В дальнейшем анализировались эмпирические коэффициенты уравнений (1 и 2), для которых корреляционное отношение превышало 0,80. Установлены прямопропорциональные зависимости I_m от A_m . Они сугубо индивидуальны для конкрет-

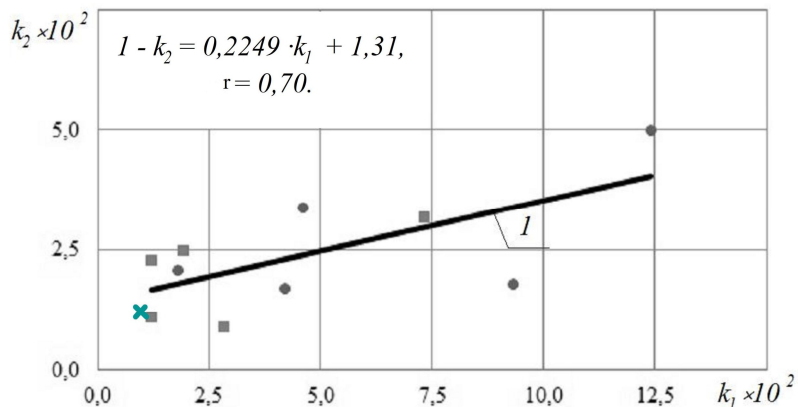
ных горно-геологических и горнотехнических условий (рис. 3).

Эмпирические коэффициенты k_1 и k_2 практически не зависели от A_m . Коэффициенты корреляции (r) соответственно равны 0,30 и 0,14. В свою очередь значения k_1 и k_2 коррелируют между собой (рис.4), что, очевидно, обусловлено схожими процессами сдвижения подработанных пород в разных горно-геологических условиях.



●, ■ — экспериментальные данные; 1,2 — осредняющие прямые соответственно для выемочных участков шахт «Суходольская-Восточная» и им. газеты «Известия»; r — коэффициент корреляции.

Рисунок 3 — Зависимость максимального газовыделения (I_m) от плановой нагрузки (A_m) на очистные забои.



●, ■, × — экспериментальные данные соответственно для выемочных участков шахт «Суходольская-Восточная», им. газеты «Известия» и им. А.Ф. Засядько; 1 — осредняющая прямая; r — коэффициент корреляции.

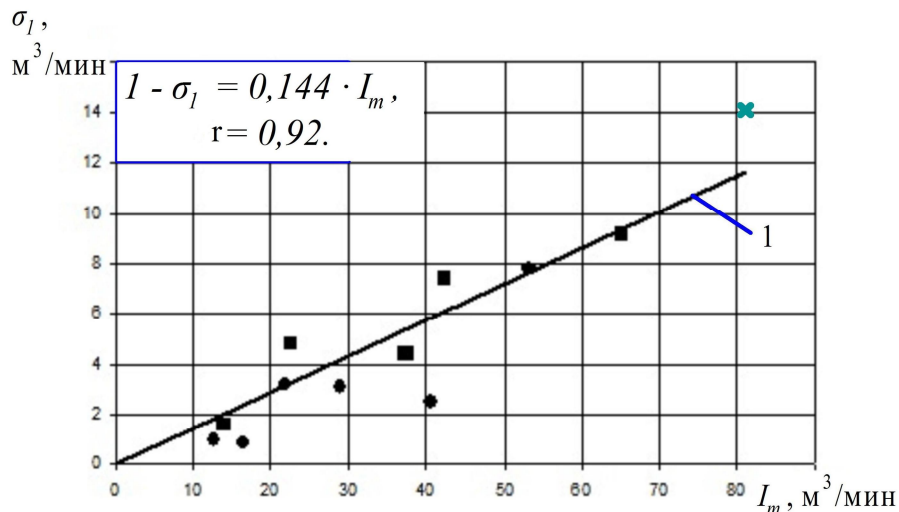
Рисунок 4 — Зависимость эмпирического коэффициента k_2 от k_1 .

Чем больше по абсолютной величине k_1 , тем круче кривая роста добычи угля соответствующая уравнению 1. Исходя из соотношения между $k_1 > k_2$, зависимость газовыделения согласно уравнению (2) будет более пологой по сравнению с кривой роста добычи угля (1) при удалении очистного забоя от разрезной печи. Это указывает на то, что увеличение газовыделения отстаёт во времени и пространстве от роста нагрузки на очистной забой.

Для рассматриваемых выемочных участков (табл.1) не установлена корреляционная зависимость между среднеквадратическим отклонением σ_I и значением I_m ($r = 0,20$), что, очевидно, связано с разной

механизацией, технологией и организацией производственных циклов на выемочных участках.

Между среднеквадратическим отклонением газовыделения σ_I и значением I_m наблюдалась прямопропорциональная зависимость (рис. 5). Соотношение между σ_I и I_m свидетельствует, что изменение σ_I происходит пропорционально I_m . Это указывает на то, что с увеличением I_m коэффициент неравномерности газовыделения остается примерно постоянным, а не уменьшается как принято согласно [1].



●, ■, × — экспериментальные данные соответственно для выемочных участков шахт «Суходольская-Восточная», им. газеты «Известия» и им. А.Ф. Засядько; 1 — осредняющая прямая; r — коэффициент корреляции.

Рисунок 5 — Зависимость среднеквадратического отклонения метановыделения (σ_I) от максимального его значения (I_m).

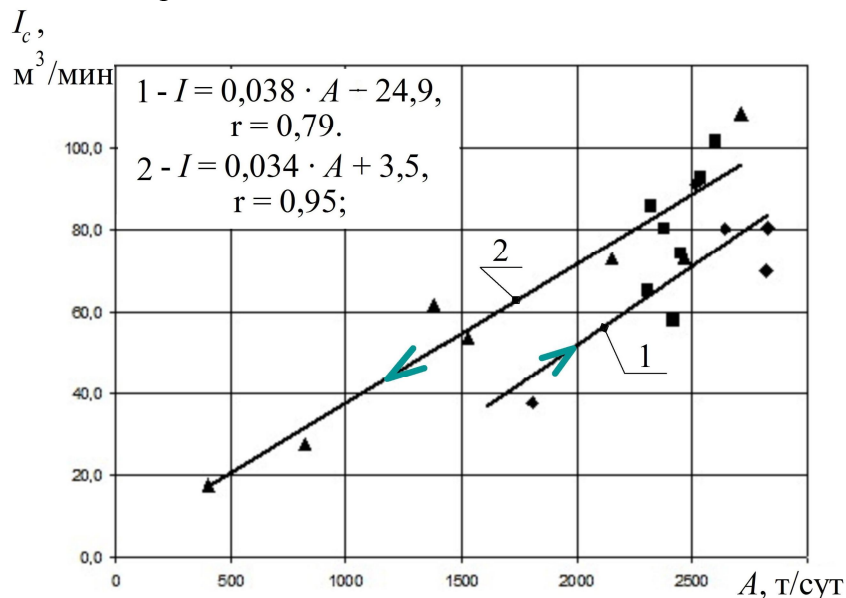
Вторая стадия эксплуатации выемочных участков характеризовалась стабильной добычей угля и соответствующим ей уровнем газовыделения. Колебания газовыделения на этой стадии происходили в большей степени по сравнению с изменением добычи угля. Например, в условиях шахты им. А.Ф. Засядько согласно данным [2] среднемесячная добыча находилась в диапазоне 2308÷2716 т/сут, а газовыделение в пределах 57,7÷108,5 м³/мин. В дан-

ном случае при изменении добычи угля менее чем на 20% колебания газовыделения составляли около 90%. Это указывает на то, что при стабильной работе выемочного участка неравномерность газовыделения в большей степени определялась процессами сдвижения подработанных пород или другими факторами. Доказательством факта неодинаковой степени влияния добычи угля на разных стадиях эксплуатации выемочного участка свиде-

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

тельствуют графики (рис. 6) зависимости $I_c = f(A)$. Осредняющая прямая (1), соответствующая зависимости в начальный период эксплуатации выемочного участка, не совпадает с аналогичной зависимостью (2) на заключительной стадии доработки лавы. Первая осредняющая получена при увеличении добычи угля до плановых показателей на стадии развития очистных работ, а вторая — при снижении добычи угля, обусловленная доработкой выемочного участка.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволяют, в первом приближении, предложить общий



◆, ■, ▲ — экспериментальные данные, полученные соответственно на 1-й, 2-й и 3-й стадиях отработки выемочного участка; 1, 2 — осредняющие прямые экспериментальных данных, полученных соответственно на 1-й и 3-й стадиях отработки выемочного участка; ➔ — направление изменения добычи угля; r — коэффициент корреляции.

Рисунок 6 — Зависимость суммарного газовыделения (I_c) от среднемесячной нагрузки на очистной забой (A) при отработке 16-й восточной лавы пласта m_3 шахтой им. А. Ф. Засядько, согласно данным [2].

— приняв текущее значение $I_c \approx I_m$ из уравнения 2 определяется расстояние L на котором будет достигаться газовыделение I_m ;

— используя один из известных способов прогноза для плановой добычи угля (A_m) определяется уровень газовыделения (I_m). Кроме прогноза газовыделения согласно нормативному документу [1] можно использовать эмпирические зависимости аналогичные, приведенным на рисунку 3;

порядок прогнозирования основных параметров динамики газовыделения на всех стадиях эксплуатации выемочных участков. Этот порядок предусматривает следующие расчеты:

— задав степень близости текущих значений добычи угля (A) к плановому показателю (A_m) и удаления очистного забоя от разрезной печи (L), на котором $A \approx A_m$ из уравнения (1) определяется коэффициент k_1 ;

— согласно уравнению (рис. 4) по значению k_1 рассчитывается коэффициент k_2 уравнения 2;

— для стадии стабильной работы выемочного участка определяются возможные колебания I_m с учетом среднеквадратического отклонения (σ_I), определяемого согласно зависимости (рис. 5);

— на заключительной стадии доработки лавы газовыделение будет снижаться пропорционально сокращению добыче угля (рис. 6). Темпы ее снижения можно предусмотреть исходя из условий доработки выемочного участка.

Проведенные исследования позволили установить закономерности изменения некоторых параметров динамики газовыделения за весь период эксплуатации выемочных участков в зависимости от уровня добычи угля и степени развития очистных работ. Они заключаются в следующем:

- в большинстве случаев (около 90%) рост добычи угля на выемочных участках удовлетворительно описывается экспоненциальной зависимостью;
- динамика газовыделения соответствует экспоненциальной кривой при удалении очистного забоя от разрезной печи;
- для конкретных горно-геологических условий имеется своя характерная индивидуальная зависимость уровня газовыделения от плановой (максимальной) добычи угля;

– увеличение газовыделения в начальный период эксплуатации выемочного участка отстаёт во времени от роста добычи угля;

– установлена прямопропорциональная зависимость между коэффициентами k_1 и k_2 уравнений 1 и 2;

– коэффициент неравномерности газовыделения из подрабатываемых источников в условиях рассматриваемых шахт оставался практически постоянным;

– проведенные исследования позволили впервые предложить порядок расчета основных параметров динамики газовыделения для всех стадий отработки выемочных участков.

Бібліографічний список

1. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт / ред. кол.: С.В. Янко [и др.] ; под ред. С.В. Янко. — Киев: Основа. — 1994. — 311 с.
2. Бокий Б.В. Перспектива извлечения метана из техногенных скоплений / Б.В. Бокий, О.И. Касимов // Уголь Украины. — 2005. — №5. — С. 17–21.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Окаленовым В. Н.,
д.т.н., зам.директора МакНИИ Коптиковым В. П.*

Статья поступила в редакцию 16.06.14.

к.т.н. Філатєв М. В., д.т.н., проф. Антощенко М. І. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна),
Крижановський Ю. Ю. (ПАТ «Краснодонвугілля», м. Краснодон, Україна)

ТЕОРЕТИЧНІ І ПРАКТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ПРОГНОЗУ ДИНАМІКИ ГАЗОВИДІЛЕННЯ З ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ, ЩО ПІДРОБЛЯЮТЬСЯ, ТА ВМІЩУЮЧИХ ПОРІД

Динаміка зміни видобутку вугілля і газовиділення з джерел, що підробляються, за увесь період відробки лав. Залежність рівня газовиділення від видобутку вугілля на кожній стадії експлуатації виїмкових ділянок. Методика і порядок розрахунку параметрів динаміки газовиділення з джерел, що підробляються.

Ключові слова: видобуток вугілля, газовиділення, породи, що підробляються, зрушення, динаміка, параметри, методика розрахунку.

Filatyev M.V. Candidate of Engineering Sciences, Antoshchenko N.I. Doctor of Engineering Sciences, Professor (DonSTU, Alchevsk, Ukraine), Kryzhanovsky Yu.Yu. (PSC “Krasnodonugol”, Krasnodon, Ukraine)

THEORETICAL AND PRACTICAL INDICATIONS OF DYNAMIC FORECAST OF GAS EMISSION FROM UNDERMINE COAL BEDS AND ADJACENT STRATA

The dynamics of changes of coal production and gas emission from undermine sources during the period of face development is defined. Level dependence of gas emission from coal production on each stage of working areas exploitation is set up. The technique and the order of dynamic gas emission parameters calculation from undermine sources is developed.

Key words: coal production, gas emission, undermine rocks, shift, dynamics, parameters, calculation technique.

УДК 519.86:622.3.012

д.т.н. Мнухін А. Г.
(МакНДІ, м. Макіївка, Україна),
к.т.н., доц. Кобилянський Б. Б.
(ІНППІ УПА, м. Артемівськ, Україна)

ПЛАНУВАННЯ РОБОТИ ВУГІЛЬНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ МІЖ СОЦІАЛЬНИМИ І ТЕХНІЧНИМИ ЧИННИКАМИ

В статті проведено оцінку тенденції зміни загального видобутку вугілля та факторів, що впливають на нього, проаналізовано взаємозв'язки видобутку з добовим навантаженням на лаву, з продуктивністю праці, чисельністю робітників по видобутку і кількістю профзахворювань. Запропонована методологія для здійснення кількісного динамічного планування роботи вугільної промисловості. Зроблено висновок перспективності техніко-економічних заходів, пов'язаних із збільшенням чисельності робітників на видобуток порівняно із підвищенням продуктивності.

Ключові слова: методи регресійного аналізу, середньомісячна заробітна плата, чисельність гірників, капітальні витрати.

Сьогодні, як і в радянський час, Донецька промисловість має величезне значення для національної економіки, так промислові запаси «чорного золота» тільки на діючих шахтах Донбасу становлять 3,4 млрд. тонн

Відомо що від поставок вугілля залежить стабільність роботи теплових електростанцій, а також металургійних підприємств, що використовують у виробництві кокс. Крім того, вугілля традиційно служить в якості побутового палива. Незважаючи на істотне зниження обсягів виробництва, Донецька область забезпечує майже половину вуглевидобутку на Україні.

При вивченні складних багатофакторних систем, особливо соціально-економічних, важливо встановити залежності між соціальними і технічними факторами, що дозволить правильно сконцентрувати зусилля і засоби на вирішення соціальних завдань. Можна стверджувати, що збільшення капітальних витрат у галузі, у тому числі спрямованих на поліпшення соціальних умов трудящих, викликає приплив робочої сили і зниження середнього віку робітника. Природно, що підвищення кількості шахт пов'язано із зростанням числа родин, що потребують поліпшення житлових умов, однак спроби безпосереднього встановлення залежності та їх чисельної оцінки пов'язані з помил-

ками та диспропорціями між умовами праці робітників і досягнутими кінцевими результатами.

Для вирішення завдань, пов'язаних з управлінням вугільною промисловістю, робилися спроби застосовувати методи регресійного аналізу [1], однак вони не охоплювали проблему соціального розвитку галузі, обмежуючись лише аналізом технічних факторів. Тому дані, отримані на основі вивчення роботи вугільної промисловості 45 факторами, що визначають технічний і соціальний стан галузі (загальний видобуток, виконання плану, втрати робочого часу з різних причин, кількість проведених виробок різного призначення, число вибоїв і навантаження на них, чисельність працівників і їх зарплата, середній вік гірника і т. д.), досліджувалися для видачі обґрунтованих рекомендацій, спрямованих на вирішення соціальних проблем. Попередня оцінка даних методами дисперсійного аналізу [2] показала, що всі вони можуть бути описані з допомогою нормального закону розподілу, а це робить коректним застосування методів класичної (параметричної) статистики.

© Мнухін А. Г., 2014

© Кобилянський Б. Б., 2014

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

Розрахунки здійснювалися на ЕОМ. В табл. 1 наведено граничні значення (мінімальне F_{\min} і максимальне F_{\max}) і параметри законів розподілу (середнє значення \bar{M} і дисперсія σ) експериментальних даних, що з'явилися основою для подальшої побудови регресійних моделей. При побудові моделей і подальшої оцінки застосовувалися методи регресійного аналізу [3], в результаті чого отримані лінійні моделі виду

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i \quad (1)$$

і ряд статистичних критеріїв для оцінки якості рівняння (критерій Фішера F), суттєвості кожного із вхідних факторів (критерій Стюдента T), незалежності і нормальності ряду залишків (критерій Пірсона χ^2), коефіцієнти парної r і множинною R

лінійної кореляції, довірчі інтервали Δ і значення F_{\max} , F_{\min} прогнозів при рівні значущості 95%.

З ряду моделей відбиралися найбільш стійкі (табл. 2). За отриманим регресійним рівнянням будувалися залежності вихідного фактора від одного з вхідних, значення інших вхідних факторів приймалися екстремальними (рис. 1, 2, 3). Залежності представлені з допомогою графіків і діаграм. Для кожного графіка, наприклад на рис. 1а і 1б, на діаграмі існує відповідний рядок з номером цієї залежності (криві 1, 2 і 3). Стрілкою пов'язані вхідний і вихідний фактори, прямокутниками показані рівні інших факторів (min, max), прийнятих незмінними. Всі криві 2 побудовані виходячи з середніх значень, а графіки 1 і 3 відповідають граничним максимальним і мінімальним вихідних факторів.

Таблиця 1 — Організаційні чинники

Фактор	3	16	19	22	35	36	37	41	45
F_{\min}	-12850	1,2	393,8	199	64 239	826,6	241	27	34,9
F_{\max}	8652	32,8	493,2	341,5	112 537	1496,3	372	83	39,9
\bar{M}	2340	15,9	443,8	269,7	81 382	1091,6	288,1	44,9	38,1
σ	5692,6	10,6	29,3	50,6	13 547,9	186,1	49,6	17,8	1,5

Примітка. В якості факторів тут і далі по тексту представлені:

F (3) — перевиконання (недовиконання) плану видобутку вугілля, тис т;

F (16) — рівень комбайнового проведення виробок, %;

F (19) і F (22) — чисельність робітників з видобутку, тис чол., і середньомісячна заробітна плата такого працівника, грн.;

F (35) — кількість сімей, які потребують поліпшення житлових умов;

F (36) — капітальні витрати по регіону, включаючи власне будівництво, млн. грн.;

F (37) — загальна кількість шахт;

F (41) — кількість шахт, віднесених до I категорії по газу та пилу;

F (45) — середній вік гірника, років.

Залежність середньомісячної зарплати робітників по видобутку F (22) від виконання плану F (3) та рівня комбайнового проведення виробок F (16) прямо пропорційна. При перевиконанні на 4,3 % і недовиконання плану на 6,3 % зарплата робітника може бути змінена на 2,1 2,9 %, при одночасному ефективному застосуванні комбайнового проведення виробки і перевиконання плану (рис. 1а).

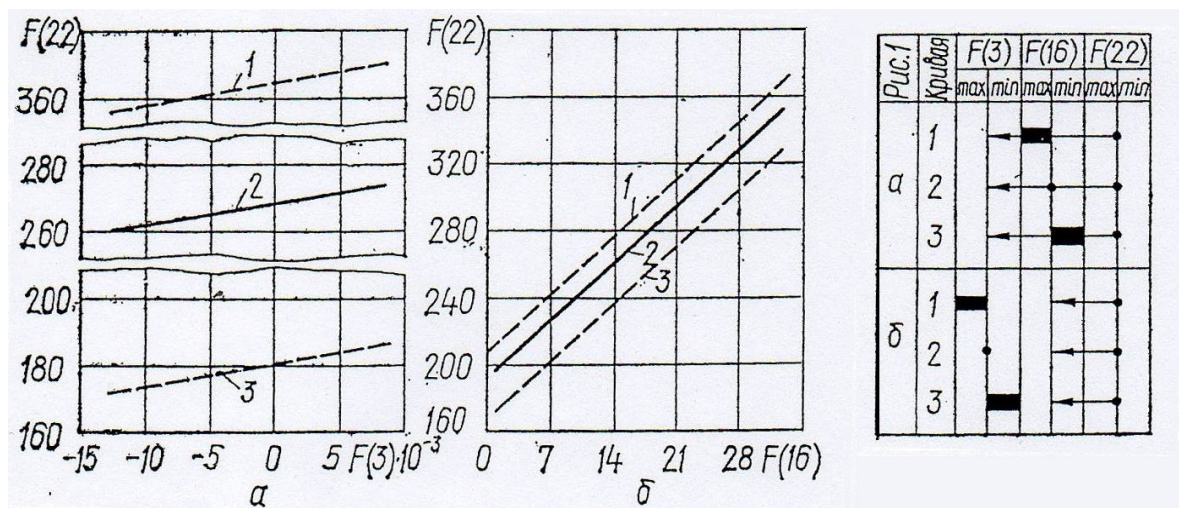
Аналіз даних за двадцятирічний період показав, що зі збільшенням рівня комбай-

нового проведення виробок від 1,2 до 32,8% при виконанні планових завдань середня зарплата зростає 78%. Ця методика дозволяє здійснювати прогноз та за межами значень вхідних факторів, отриманих в результаті спостережень, тобто на перспективу. Наприклад, в конкретному випадку можна встановити, чи підвищиться зарплата гірників при подальшому збільшенні рівня механізації процесу навіть без урахування позитивного впливу інших факторів.

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

Таблиця 2 — Технологічні чинники

Вихідний фактор y_i	Вхідний фактор x_i	Коеф. регресії b_i	Вільний член a_0	Коеф. кореляції вхідного та вихідного факторів r	Коеф. множинної кореляції R	F -критерій	T -критерій	χ^2 нормальності ряду залишків	χ^2 незалежності ряду залишків	Довірчий інтервал для прогнозу Δ	Значення прогнозу: F_{\max} , F_{\min}
22	3	0,00063	189,25	0,66	0,99	760,1	1,97	1,93	6,07	12,22 9,34 15,13	369,82
	16	4,9677		0,99			29,19				—
	19	104,8442		0,78			1,31			16	202,30
35	36	63,4135	-57	0,84	0,90	23,6	4,04	4,39	2,69	084,61	134557,6
	37	79,44104	671,81	0,21			1,84			10	—
										249,61	68 064,2
45	36	-0,00424		0,57	0,57	2,6	1,62	5,37	5,53	12	41,98
	37	0,00214	42,02	0,37			0,18			444,66	—
	41	0,00250		0,46			0,06			2,48 2,16 2,55	33,72



а — виконання плану F (3); б — рівня комбайнового проведення виробок F (16);

Рисунок 1 — Вплив на середньомісячну заробітну плату робочих по видобутку F (22)

Таким чином, саме зниження частки ручної праці на проходженні виробок при ритмічній роботі шахти дозволяє істотно збільшити заробітну плату гірників. Передбачувану зміну можна визначити, здійснюючи заплановані технічні заходи.

Залежності на рисунку 2 дають можливість оцінити вплив чисельності робітників по видобутку F (19), капітальних витрат по регіону F (36) і кількості шахт F (37) на такий важливий соціальний фактор, як число сімей, які потребують поліпшення житлових умов F (35). Збільшення чисельності гірників на 25,2% навіть у гра-

ничному випадку (рис. 2, а, крива 1) не призводить до істотного зростання дефіциту житла (8,1%). Пояснюється подібна залежність тим, що приплив робочої сили без розширення виробництва, пов'язаного зі значними капітальними витратами, забезпечується з довколишніх населених пунктів, в яких є певний житловий фонд.

У разі значного збільшення обсягу капітальних витрат (до 80,6%), обумовленого введенням в експлуатацію нових адміністративно-технічних одиниць (рис. 2, б і 2, в), різко підвищується кількість сімей, що потребують поліпшення житлових умов (на 45,9%).

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

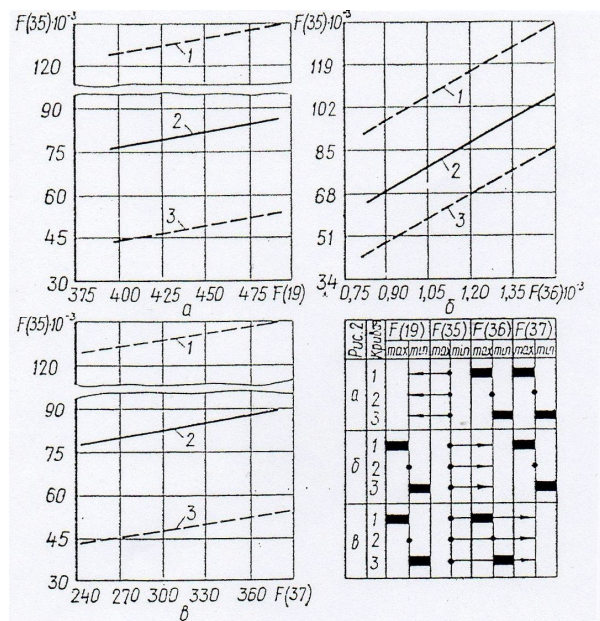


Рисунок 2 — Вплив різних факторів на кількість сімей, які потребують поліпшення житлових умов

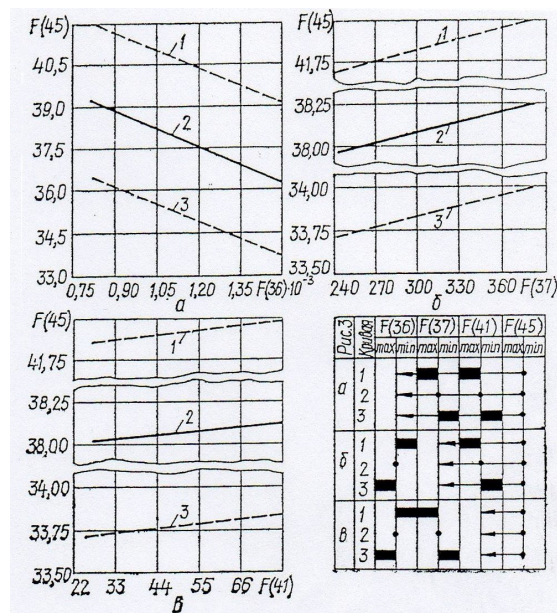


Рисунок 3 — Вплив різних факторів на середній вік робітника

Зазначені залежності необхідно враховувати при плануванні коштів, що виділяються на розширення підприємств галузі, промислові та соціальні потреби. В іншому випадку неминуче погіршаться соціальні умови, що призведе до відтоку кадрів і неритмічної роботи підприємств.

Середній вік робітника будь-якої галузі — один з найважливіших факторів, що впливає на стабільність її роботи в наступні роки.

Визначимо, які технічні фактори впливають на вік гірників, і виразимо це в чисельному вигляді. Так, збільшення капітальних витрат (рис. 3, а), пов'язане з будівництвом шахт і житлового фонду, істотно знижує середній вік гірників (з 41,98 до 33,72 років, або на 19,7%). Підвищення ж серед підприємств регіону числа шахт, небезпечних по газу і пилу, зокрема 1 категорії - F (41) з 27 до 83 (на 207,4%), пов'язане з необхідністю

мати персонал високої кваліфікації, призводить до незначного збільшення віку гірників, в середньому на 0,3%. Отже, природним шляхом зниження віку гірників є збільшення капітальних витрат на створення нових, більш великих і високопродуктивних шахт за рахунок скорочення дрібних і малопродуктивних. Виконаний аналіз дозволив оцінити вплив ряду технічних факторів на соці-

альні, що характеризують роботу вугільної промисловості. За допомогою наведених залежностей можна оптимізувати динамічне планування роботи галузі в цілях її стабілізації. Використання запропонованої методики планування роботи підприємств вугільної промисловості дозволило б більш детально і коректно здійснити планування витрат на соціальні і технічні потреби.

Бібліографічний список

1. Математические методы и модели в планировании и управлении горным производством / А. Г. Протосеня, С. А. Кулиш, Б. К. Азбель [и др.]. — М.: Недра, 1985. — 288 с.
2. Шеффе Г. Дисперсионный анализ / Г. Шеффе. — М.: Наука, 1980. — 512 с.
3. Дрейпер Н. Прикладной регрессионный анализ / Н. Дрейпер, Г. Смит. — М.: Финансы и статистика, 1986. — Т.1. — 366 с.
4. Мнухин А. Г. Исследования зависимостей между социальными и техническими факторами при планировании работы угольной промышленности / А. Г. Мнухин, А. П. Бережной // Уголь Украины. — 1989. — №8. — С. 13–15.

*Рекомендовано до друку д.т.н., проф. ДонДТУ Антощенко М. І.,
д.т.н., проф. МакНДІ Колосюком В. П.*

Стаття надійшла до редакції 17.06.14.

д.т.н. Мнухин А. Г. (МакНДІ, г. Макеевка, Україна), к.т.н., доц. Кобылянский Б. Б. (УНППІ УИПА г. Артемівськ, Україна)

ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ СОЦИАЛЬНЫМИ И ТЕХНИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ

В статье проведена оценка тенденции изменения общей добычи угля и факторов, которые влияют на него, проанализированы взаимосвязи добычи с суточной нагрузкой на лаву, с производительностью труда, численностью рабочих по добыче и количеством профзаболеваний. Предложена методология для осуществления количественного динамического планирования работы угольной промышленности. Сделан вывод перспективности технико-экономических мероприятий, связанных с увеличением численности рабочих на добычу сравнительно с повышением производительности.

Ключевые слова: методы регрессионного анализа, среднемесячная заработная плата, численность горняков, капитальные затраты.

Mnuhin A. G. Doctor of Engineering Sciences (MSRI, Makeevka, Ukraine), Kobilyansky B. B. Candidate of Engineering Sciences (ESPPI UEPA, Artemovsk, Ukraine)

WORK PLANNING OF COAL MINING IN DEPENDENCE RESEARCH BETWEEN SOCIAL AND TECHNICAL FACTORS

The estimation of tendencies changes of total coal production and factors influencing on it, is done. The interactions of coal production with daily loading on face, with labour production, with the number of professional diseases are analyzed. The methodology for qualitative dynamic work planning of coal mining is suggested. The conclusion of perspectiveness of technical and economic activities, connected with the increase of the number of worker on production comparing with the productivity increase is done.

Key words: regression analysis methods, average salary, the number of miners, capital expenses.

УДК 622.831.325

*д.т.н., проф. Антощенко Н. И.,
к.т.н. Филатьев М. В.,
Гасюк Р. Л.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ СХЕМ ПРОВЕТРИВАНИЯ ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ПРИ АКТИВИЗАЦИИ СДВИЖЕНИЯ ПОДРАБОТАННЫХ ПОРОД

Теоретические и экспериментальные исследования соотношения количества газа, выделяющегося непосредственно из выработанного пространства эксплуатируемого участка и за его пределами под воздействием активизации сдвижения пород над остановленными лавами.

Ключевые слова: метановыделение, выемочный участок, дегазационные скважины, горные выработки, схемы проветривания, утечки воздуха.

Явление активизации сдвижения пород при отработке угольных пластов смежными лавами теоретически обосновано и подтверждено практикой ведения горных работ несколько десятков лет назад [1, 2]. Позже было установлено влияния этих процессов на газопроявление при ведении очистных работ [3, 4]. До настоящего времени при выборе схем проветривания выемочных участков рекомендациями нормативных документов не учитывается увеличение газовыделения из источников, обусловленное активизацией сдвижения подработанных пород. Наиболее оптимальными вариантами в условиях газовых шахт во всех случаях считается применение прямооточных схем проветривания с подсыжением исходящей вентиляционной струи воздуха. Об актуальности рассматриваемого вопроса свидетельствуют факты эксплуатации выемочных участков, когда прямооточные схемы проветривания не обеспечивали требуемую их эффективность [5, 6]. Одной из причин возникновения таких ситуаций было повышенное газовыделение из выработанного пространства ранее отработанных лав, связанное с процессами активизации сдвижения подработанных пород над смежными выемочными участками.

Недостаточно изученными остаются вопросы возможного уровня и количества

выделяющегося газа из выработанного пространства смежных лав, а также не установлено местоположение зон непосредственного метановыделения в пределах отработанных выемочных участков.

Целью работы является определение соотношения количества газа, выделяющегося непосредственно из выработанного пространства эксплуатируемого участка и за его пределами, а также установление зон поступления метана при активизации сдвижения пород в границах остановленных выемочных участков.

Для решения поставленных задач проанализировали экспериментальные данные при отработке антрацитового пласта l_2^6 мощностью 0,9 м 7-й, 8-й и 9-й западными лавами шахты им. газеты «Известия» ГП «Донбассантрацит».

Соотношение газовыделения из выработанного пространства эксплуатируемой и остановленных лав установили на примере отработки 7-й и 8-й западных лав. Доработка 7-й западной лавы происходила в надработанной пластом l_4 зоне и в условиях уменьшения газоносности разрабатываемого и сближенных пластов. Газовыде-

© Антощенко Н. И., 2014

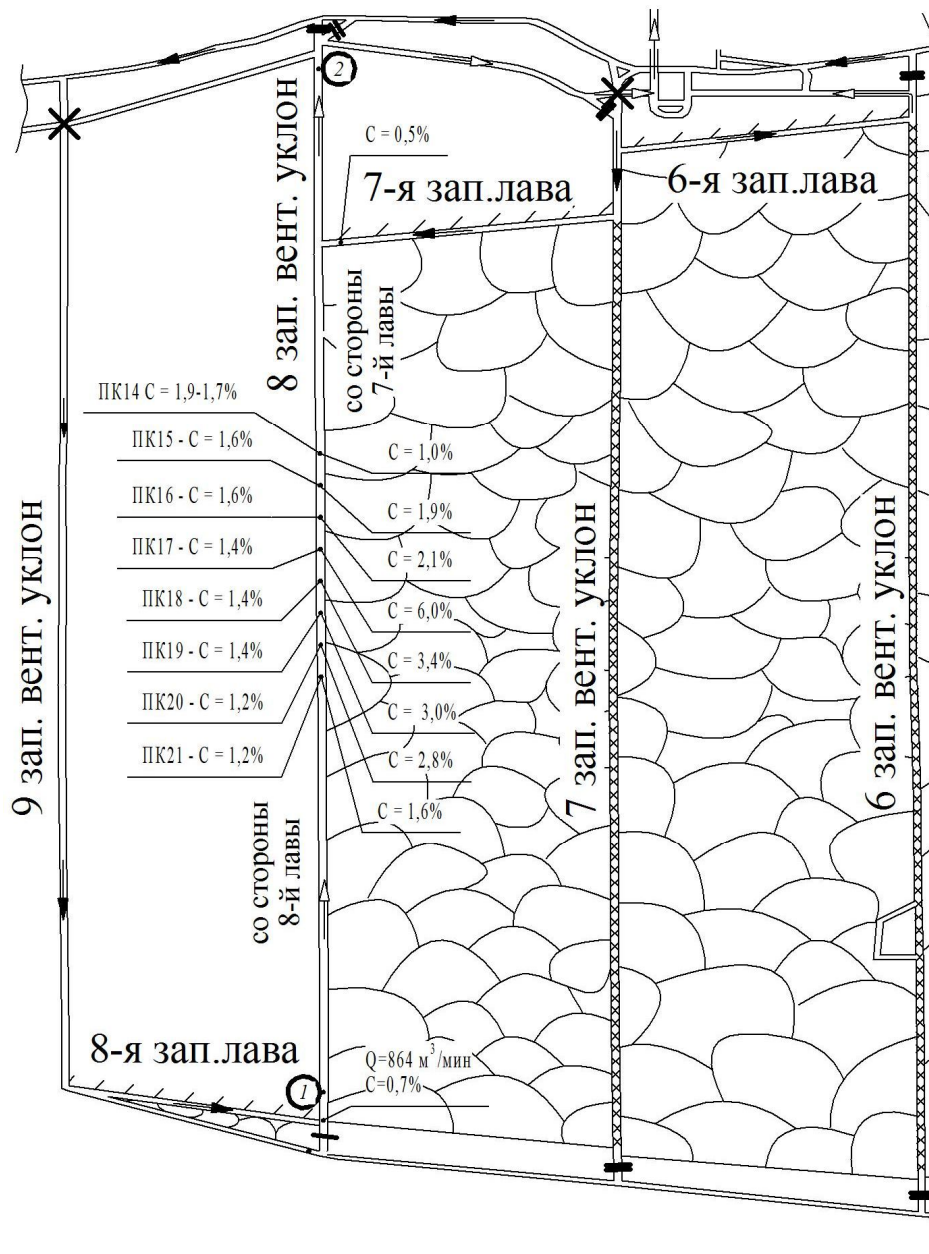
© Филатьев М. В., 2014

© Гасюк Р. Л., 2014

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

ление в исходящую вентиляционную струю воздуха 7-й западной лавы имело тенденцию к снижению и не превышало $6 \text{ м}^3/\text{мин}$. По этой причине при вводе в эксплуатацию 8-й западной лавы было решено временно, на период доработки 7-й за-

падной лавы, проветривание двух выемочных участков производить с отводом исходящих вентиляционных струй воздуха по одной выработке – 8-му западному уклону (рис. 1).



①, ② — пункты замеров соответственно в исходящей вентиляционной струе воздуха из очистного забоя 8-й западной лавы и выемочных участков; — струя свежего воздуха; — струя отработанного воздуха, ПК17-ПК21 — номера пикетов, С — концентрация метана, %, Q — расход воздуха, $\text{м}^3/\text{мин}$.

Рисунок 1 — Схема проветривания выемочных участков при доработке 7-й и начале эксплуатации 8-й западных лав

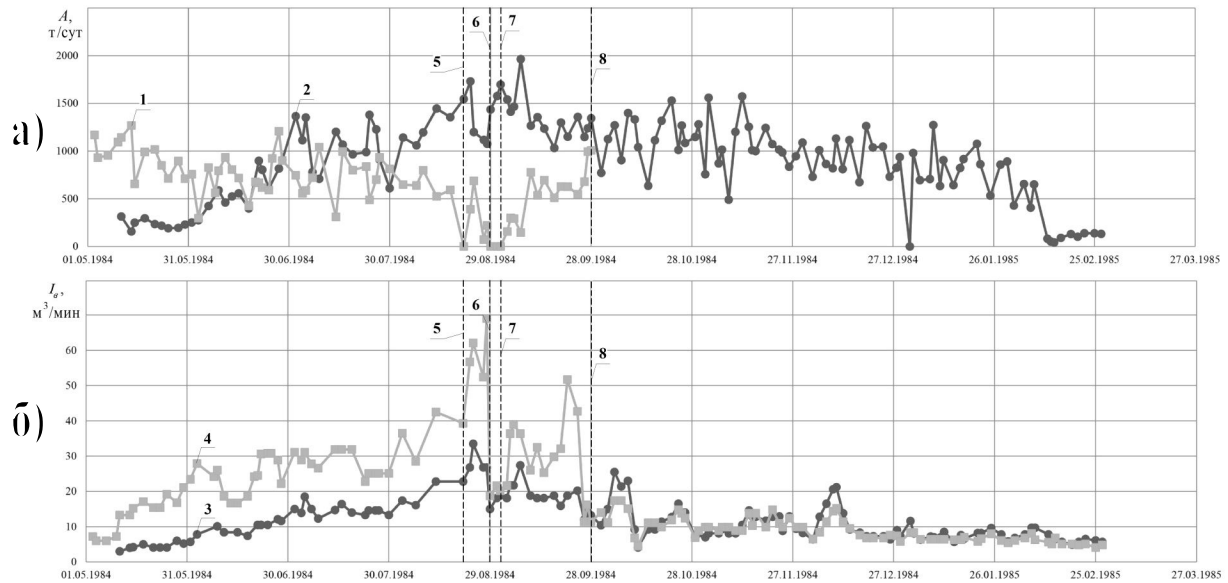
После ввода в эксплуатацию 8-й западной лавы ещё до осадки основной кровли наблюдался существенный рост газовыделения в общую исходящую вентиляционную струю воздуха двух участков. Такое увеличение было обусловлено дополнительным поступлением метана в 8-й западный уклон на всём его протяжении между очистными забоями со стороны выработанного пространства 7-й западной лавы. Концентрация метана в исходящей вентиляционной струе воздуха из призабойного пространства 8-й западной лавы составляла 0,7 %. По мере движения струи воздуха по 8-му западному уклону концентрация метана возрастала по всему сечению выработки. Максимальное её значение (6,0 %) было достигнуто со стороны выработанного пространства 7-й западной лавы. Содержание метана непосредственно в призабойном пространстве 7-й западной лавы не увеличивалось и даже в добычные смены не превышало 0,5 % (рис. 1).

Такое изменение газового баланса могло произойти только под влиянием активизации сдвижения пород над выработанным пространством 7-й западной и других, ранее отработанных лав. Эти процессы усиливались по мере развития очистных работ в 8-й западной лаве, что вызвало увеличение газовыделения в замерных пунктах 1 и 2 в 8-м западном уклоне. Изменение газовыделения в пункте 1 характеризовало непосредственное развитие очистных работ в 8-й западной лаве, а в пункте 2 — общее метановыделение в исходящую вентиляционную струю двух выемочных участков. Увеличение добычи угля в 8-й западной лаве и развитие процессов сдвижения пород при удалении очистного забоя от разрезной печи вызвало увеличение газовыделения как в пункте 1, так и в пункте 2. Метановыделение под влиянием работы 7-й западной лавы по прежнему имело тенденцию к снижению.

Рост газовыделения в пунктах 1 и 2 наблюдался в течении нескольких месяцев

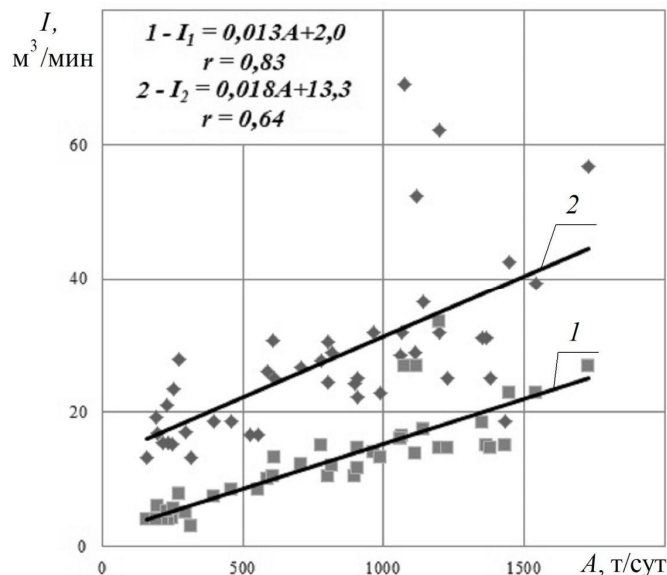
по мере увеличения нагрузки на очистной забой 8-й западной лавы (рис. 2). Очистные работы в 7-й западной лаве после превышения норм концентрации метана в пункте 2 были прекращены на одни сутки, но это не привело к снижению газовыделения в общей исходящей вентиляционной струе воздуха двух выемочных участков. После возобновления работ по добыче угля в 7-й западной лаве газовыделение в пункте 2 достигло 69 м³/мин и она была остановлена на трое суток с изменением направления вентиляционной струи воздуха по призабойному пространству лавы. Это привело к изменению направления утечек воздуха через выработанное пространство 7-й лавы. До изменения схемы проветривания утечки воздуха были направлены к 8-му западному уклону, которыми в общую исходящую вентиляционную струю воздуха двух участков выносился газ, выделявшийся в выработанное пространство отработанных лав под влиянием активизации сдвижения подработанных пород. После изменения направления вентиляционной струи по 7-й лаве утечки воздуха под влиянием общешахтной депрессии были направлены от 8-го западного уклона. Это привело к снижению газовыделения в пункте 2 с 69 до 18,7 м³/мин.

Доказательством тому, что повышенное газовыделение из выработанного пространства отработанных лав вызвано активизацией сдвижения пород под влиянием очистных работ в 8-й западной лаве, является график зависимости метановыделения в пунктах 1 и 2 от уровня добычи угля (рис.3). Они характеризовались тесной корреляционной зависимостью. Коэффициенты корреляции (r) соответственно равнялись 0,83 и 0,64. Это указывает на влияние режима работы 8-й западной лавы как на газовыделение из выработанного пространства эксплуатируемого участка, так и из выработанного пространства ранее отработанных лав.



■, ● — экспериментальные данные; 1, 2 — добыча угля соответственно в 7-й и 8-й западных лавах; 3, 4 — газовыделение в 8-й западный уклон соответственно в пунктах 1 и 2 (рис.1); 5 — дата прекращения работ по добыче угля в 7-й западной лаве на одни сутки без изменения схемы проветривания участков; 6 — дата прекращения очистных работ в 7-й западной лаве на трое суток с изменением направления вентиляционной струи воздуха по призабойному пространству этой лавы; 7 — дата возобновления очистных работ в 7-й западной лаве с возвращением к прежней схеме проветривания; 8 — дата прекращения очистных работ в 7-й западной лаве и перехода к схеме проветривания с направлением утечек воздуха от 8-го западного уклона.

Рисунок 2 — Изменение добычи угля (а) и газовыделения (б) в пунктах 1 и 2 8-го западного уклона при доработке 7-й и вводе в эксплуатацию 8-й западных лав шахты им. газеты «Известия»



◆, ■ — экспериментальные данные; 1, 2 — осредняющие прямые газовыделения соответственно в пунктах 1 и 2; r — коэффициент корреляции.

Рисунок 3 — Зависимость газовыделения (I) в пунктах 1 и 2 от добычи (A) угля в 8-й западной лаве

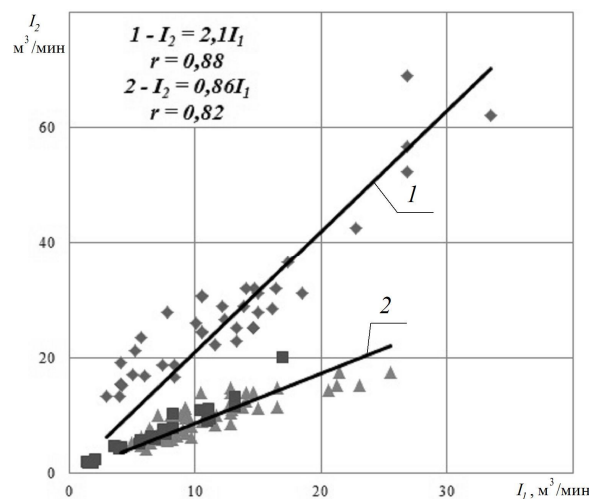
Необходимость доработки 7-й западной лавы была вынужденной причиной возврата к прежней схеме проветривания выемочных участков. По этой схеме участки проветривались около месяца. После остановки 7-й западной лавы утечки воздуха были направлены через её выработанное пространство от 8-го уклона. Это позволило нормализовать газовую обстановку при дальнейшей эксплуатации 8-й западной лавы. При таком варианте возвратноточной схемы проветривания расход метана в пункте 2 был даже несколько меньше по сравнению с метановыделением в пункте 1. Это подтверждается статистической обработкой экспериментальных данных, полученных при совместной отработке 8-й и 9-й западных лав (рис. 4). Близкое значение расходов в пунктах 1 и 2 указывает на отсутствие дополнительного поступления метана в исходящую вентиляционную струю воздуха из выработанного пространства ранее отработанных лав.

При направлении утечек воздуха через выработанное пространство отработанных лав к участковой выработке газовыделение в пункте 2 по сравнению с пунктом 1 увеличивалось более чем в 2 раза (рис.4). Это

подтверждается также расчётом общего количества метана, выделившегося в этот период. В пункт 1 поступило 2,159 млн.м³ метана, а в пункт 2 — 4,661 млн. м³. Увеличение произошло в 2,16 раза.

Направление утечек воздуха через выработанное пространство остановленных выемочных участков играет важную роль для обеспечения безопасных условий отработки газоносных угольных пластов. Следует отметить, что аналогичные сложности, связанные с направлением утечек воздуха, возникали и при применении прямоточных схем проветривания [5, 6]. Это указывает на необходимость внесения в нормативные документы дополнительных требований, определяющих эффективность схем проветривания выемочных участков при проявлении активизации сдвижения подработанных пород.

При ухудшении газовой обстановки были вскрыты ранее заглушенные скважины, пробуренные из 8-го уклона на участке 7-западной лавы. Наблюдалось самоистечение метановоздушной смеси, содержащей 15-90% метана. Повторно были подключены к дегазационному газопроводу тринадцать скважин (табл. 1).



◆, ■ - экспериментальные данные, полученные при эксплуатации 8-й западной лавы; ▲ - экспериментальные данные, наблюдаемые при отработке 9-й западной лавы; 1, 2 — осредняющие прямые при направлении утечек воздуха через выработанное пространство отработанных лав соответственно к участковой выработке с исходящей вентиляционной струей воздуха и от неё; r — коэффициент корреляции.

Рисунок 4 — Зависимость газовыделения (I_2) в пункте 2 от газовыделения (I_1) в пункте 1 при отработке 8-й и 9-й западных лав и разных вариантах возвратноточных схем проветривания

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

Газовыделение характеризовалось высокой неравномерностью, оно увеличивалось при проявлении повышенного горного давления на крепь в районе расположения скважин. О сдвигении пород свидетельствовало и обильное поступление воды из кровли выработки. Много воды выделялось и из скважин, что требовало установки водоотделителей на каждую из них. Газовыделение в скважины во второй период началось с момента отработки 8-й западной лавы и продолжалось до погашения выработки после прохода устьев скважин очистным забоем 8-й лавы. Длительность функционирования повторно подключенных к газопроводу скважин превысила 6 месяцев, ими отведено газа в 2,7 раза больше, чем при отработке 7-й лавы. Повторное подключение данной группы скважин заметно повлияло на снижение газовыделения в исходящую струю выемочного участка. При отработке 7-й западной лавы из 8-го уклона было пробурено 46 дегазационных скважин, ими отведено 4,3 млн. м³ (в среднем одной скважиной каптировалось 93,7 тыс. м³) метана. Во

время работы 8-й западной лавы повторно подключено 13 скважин, которыми каптировано 1,6 млн. м³ метана (38,5% количества метана, отведенного дегазацией в период эксплуатации 7-й лавы). Одной скважиной в среднем каптировалось 127,6 тыс. м³, что в 1,4 раза больше, чем при работе 7-й лавы.

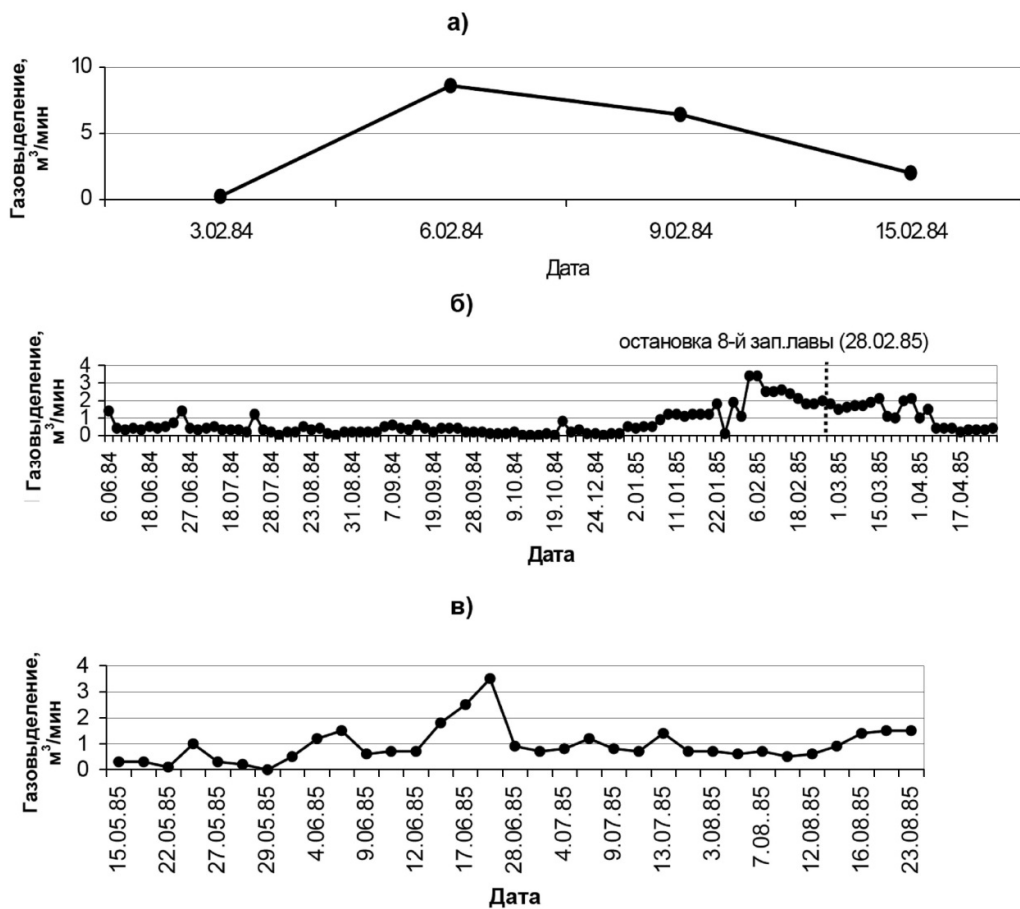
После отработки 8-й лавы очистные работы в крыле шахтного поля не велись более трёх месяцев. За этот период газовыделение в выработки и дегазационные скважины заметно снизилось. Учитывая накопленный опыт дегазации при активизации сдвигения пород, в период подготовки к эксплуатации 9-й западной лавы скважины, пробуренные на участке 8-й лавы, были заранее подключены к газопроводу. В качестве эксперимента оставили подключенной к газопроводу скважину №839, пробуренную на участке 7-й лавы. Газовыделение в эту скважину увеличилось, когда начали вести очистные работы в 9-й западной лаве, т.е. намного раньше осадки основной кровли (рис. 5).

Таблица 1 — Сведения об эксплуатации дегазационных скважин, повторно подключенных на участке 7-й западной лавы

Номера скважин	Кол-во метана, отведённого в период работы лав, тыс. м ³		Максимальное выделение метана, м ³ /мин	Максимальное содержание метана в отводимой газовой смеси, %
	7-й зап.	8-й зап.		
823	68,2	1,4	3,2/0,4*	78/52,5*
824	105,1	2,9	2,7/0,6	90/30
825	89,3	217,4	3,7/3,1	75/90
830	145,4	267,8	7,0/4,4	98/82,5
837	64,8	254,9	7,4/3,9	68/69
838	82,1	290,9	7,6/3,9	70/58,5
839	80,6	312,5	8,6/3,4	80/48
841	139,7	20,2	6,6/1,2	72/27
844	67,7	47,5	6,0/2,2	53/22,5
847	13,0	112,3	3,4/3,6	78/45
849	13,0	44,6	2,1/2,5	33/60
850	33,1	31,7	2,5/1,9	69/35
855	33,1	54,7	1,7/1,5	17/30
Всего	935,1	1658,8	-	-

* Примечание. В числителе данные при работе 7-й западной лавы, в знаменателе — 8-й.

РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН



а) — при первичной подработке 7-й западной лавой; б) — при вторичном подключении и работе 8-й западной лавы; в) — при работе 9-й западной лавы;

Рисунок 5 — Газовыделение в дегазационную скважину № 839, пробуренную на участке 7-й западной лавы пласта l_2^B шахты имени газеты "Известия"

Отмечено три всплеска газовыделения в скважину №839. Первый — при первичной подработке пород, вызванной подработкой после прохода очистного забоя 7-й западной лавы. По продолжительности он составил менее двух недель. За этот период произошёл рост газовыделения от нуля до 8 $\text{м}^3/\text{мин}$ и снижение метановыделения до незначительных величин. По этой причине скважина была отключена от газопровода. Второй и третий периоды вызваны активизацией сдвижения пород, соответственно при эксплуатации 8-й и 9-й западных лав. Повторно скважина была подключена через месяц после начала эксплуатации 8-й лавы. Газовыделение редко превышало 1 $\text{м}^3/\text{мин}$. Существенный всплеск газовыделения до 2÷3 $\text{м}^3/\text{мин}$ произошёл при попадании скважины в зону непосредствен-

ного влияния движущегося очистного забоя. Забой 8-й лавы был остановлен в сорока метрах от устья скважины. Через месяц газовыделение практически прекратилось. Второй период эксплуатации скважины длился десять месяцев (рис. 5, б). Новое увеличение газовыделения отмечено после начала работ в 9-й западной лаве (рис. 5, в). Замеры в скважине производились более трёх месяцев и были прекращены из-за отсутствия доступа к замерному устройству после возведения глухой перемычки в 8-м уклоне.

Опыт эксплуатации скважины № 839 указывает на распространение активизации сдвижения пород на значительные расстояния, превышающие длину смежной лавы.

Проведенные исследования позволили установить возможные места поступления газа в выработанное пространство отработанных лав под воздействием активизации сдвижения пород. Одним из эффективных способов борьбы с такими газопроявлениями может быть направление утечек воздуха от выработок эксплуатируемого участка под воздействием общешахтной депрессии. Особенно долго каналы для утечек воздуха (несколько десятков лет) могут сохраняться на границе выработанного пространства и массива угля [7]. Это позволяет их использовать для управления газопроявлениями на выемочных участках.

Выводы и направление дальнейших исследований:

- уровень добычи угля определяет метановыделение как из выработанного пространства эксплуатируемой лавы, так из ранее отработанных выемочных участков;
- наиболее опасным случаем проявления дополнительного газовыделения при активизации сдвижения подработанных пород является период доработки одной лавы и ввод в эксплуатацию новой;

- в нормативных документах отсутствует методика расчёта газовыделения при активизации сдвижения подработанных пород над смежными выемочными участками. Такое газовыделение может превышать более чем в два раза метановыделение в пределах эксплуатируемого выемочного участка;

- нормативными документами при классификации схем проветривания не учитывается направление утечек воздуха через выработанное пространство отработанных лав, что может приводить к аномальному газовыделению в участковые выработки;

- при активизации сдвижения пород над смежными отработанными выемочными участками возобновляется метановыделение в дегазационные скважины остановленных лав;

- одним из наиболее эффективных мер борьбы с газопроявлениями при активизации сдвижения пород является применение схем проветривания, при которых утечки воздуха через выработанное пространство отработанных лав направлены от участковых выработок под воздействием общешахтной депрессии.

Бibliографический список

1. Сдвижение горных пород при подземной разработке угольных и сланцевых месторождений / А. Г. Акимов, В. Н. Земисев, Н. Н. Кацнельсон [и др.]. — М.: Недра, 1970. — 224 с.
2. Иофис М. А. Инженерная геомеханика при подземных разработках / М. А. Иофис, А. И. Шмелев. — М.: Недра, 1985. — 248 с.
3. Драбик А. С. Опыт дегазации отработанного выемочного участка / А. С. Драбик, Н. И. Антощенко, Б. А. Инюшин // Уголь Украины. — 1984. — № 2. — С. 29–30.
4. Антощенко Н. И. О газопроявлениях при отработке смежных лав / Н. И. Антощенко, М. В. Павлив // Уголь. — 1987. — №8. — С. 24–25.
5. Ефремов И. А. О целесообразности применения схем прямооточного проветривания / И. А. Ефремов, Б. В. Бокий, О. И. Касимов // Уголь Украины. — 2008. — №7. — С. 18–21.
6. Антощенко Н. И. О классификации и факторах, определяющих эффективность проветривания выемочных участков угольных шахт / Н. И. Антощенко, С. Л. Сятковский, М. В. Филатьев // Сб. научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2009. — Вып. № 28. — С. 31–43.
7. Антощенко Н. И. Прохождение выработкой полости с газом / Н. И. Антощенко, М. В. Павлив // Безопасность труда в промышленности. — 1988. — №9. — С. 18–20.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Должиковым П. Н.,
д.т.н., зам.директора МакННН Коптиковым В. П.**

Статья поступила в редакцию 17.04.14.

д.т.н., проф. Антощенко М. І., к.т.н. Філат'єв М. В., Гасюк Р. Л. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)
**ПРО ЕФЕКТИВНІСТЬ СХЕМ ПРОВІТРЮВАННЯ ВИЙМКОВИХ ДІЛЬНИЦЬ
ВУГІЛЬНИХ ШАХТ ПРИ АКТИВІЗАЦІЇ ЗРУШЕННЯ ПІДРОБЛЕНИХ ПОРІД**

Теоретичні та експериментальні дослідження співвідношення кількості газу, що виділяється безпосередньо з виробленого простору експлуатованої ділянки і за її межами під впливом активізації зсування порід над зупиненими лавами.

Ключові слова: метановиділення, виймкова діляниця, дегазаційні свердловини, гірничі виробки, схеми провітрювання, витоки повітря.

Antoshchenko N. I. Doctor of Engineering Sciences, Professor, Filatyev M. V. Candidate of Engineering Sciences, Gasyuk R. L. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

**ABOUT EFFICIENCY OF VENTILATION SCHEMES OF COAL MINES EXCAVATION
SITES IN ACTIVISATION SHIFT OF UNDERWORKED ROCKS**

Theoretical and experimental investigation of volume gas correlation, released just from the excavated area, of exploitation site and beyond its borders under the influence of shift rocks activation over the stopped faces are done.

Key words: Methane release, excavation site, degasification wells, excavation, ventilation schemes, ventilation losses.

УДК 622.285.001.2

к.т.н. Степанов Е. И.,
канд. психол. наук Авершин А. А.,
(СУНИГОТ УИПА, г. Стаханов, Украина)

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ ИНДИКАЦИИ ПРОЯВЛЕНИЙ ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ В ЛАВЕ

Предложен алгоритм построения системы индикации горного давления в очистном забое. Сигнал, отображающий продолжительность проявления горного давления определяется количеством жидкости вытесняемой из поршневой полости гидравлической стойки секции механизированной крепи при срабатывании предохранительного клапана стоечного гидроблока.

Ключевые слова: *жидкость, гидравлическая стойка, секция механизированной крепи, стоечный гидроблок, предохранительный клапан, алгоритм, система индикации.*

Постановка проблемы. Гидравлические стойки (гидростойки) секций механизированной крепи при проявлении горного давления оказывают сопротивление опусканию пород в призабойном (рабочем) пространстве лавы. Давление рабочей жидкости в поршневой полости гидростойки повышается до давления срабатывания предохранительного клапана стоечного гидроблока секции. Жидкость при его срабатывании поступает в сливную гидромагистраль или выбрасывается наружу. Под действием горного давления происходит опускание пород кровли и выдвижной части гидростоек. Это приводит к уменьшению площади поперечного сечения лавы (призабойного пространства) в свету, для прохода воздуха, работы и перемещения обслуживающего персонала.

Оперативное оповещение технического персонала о проявлениях горного давления по линии забоя в лаве, о вхождении очистного комплекса в зону горно-геологических нарушений, актуально, а разработка системы сигнализации представляет собой сложную научно-техническую задачу.

Анализ исследований и публикаций. В гидросистемах механизированной крепи для контроля давления в поршневой полости гидростойки секции используются индикаторы давления, которые обычно komponуются вместе с предохранительными

клапанами в стоечных гидроблоках [1, 2]. Также средством «наглядной индикации» повышения горного давления, в ряде случаев, является рабочая жидкость, выбрасываемая из поршневой полости гидростойки наружу [3].

Известна замкнутая гидросистема секции механизированной крепи, в которой энергия выброшенной (отведенной) рабочей жидкости из поршневой полости гидростойки используется для индикации срабатывания предохранительного клапана стоечного гидроблока при проявлении горного давления на перекрытия секций [4]. Рабочая жидкость проходит через сигнализатор давления, который устанавливается последовательно с предохранительным клапаном и выполняется в виде устройства, преобразующего кинетическую энергию движущегося потока жидкости в потенциальную энергию закручиваемой пружины. Затем, после прекращения движения жидкости, энергия пружины преобразуется в акустический сигнал.

Информация, которая поступает от индикаторов давления, обычно представляется в виде акустического или визуального сигнала, имеет локальный ограниченный характер и доступна только персоналу, находящемуся вблизи источника сигнала. К

остальным работникам очистного забоя информация не поступает. Кроме того, в условиях производственного процесса (шум и вибрация работающих механизмов, запыленность, влажность, эхо и т.д.) она трудно воспринимается работающим персоналом, не отображается по линии забоя лавы, не поступает своевременно к диспетчеру и в службы слежения за состоянием оборудования.

Целью данной работы является построение системы оперативной индикации проявлений горного давления в очистном забое.

Изложение материала. При работе крепи в режиме постоянного сопротивления при проявлениях горного давления высота гидростойки уменьшается на величину, определяемую количеством рабочей жидкости, вытесняемой из поршневой полости гидростойки и прошедшей через предохранительный клапан стоечного гидроблока в сливную магистраль или наружу [1-3].

В Стахановском учебно-научном институте горных и образовательных технологий Украинской инженерно-педагогической академии предложено техническое решение, позволяющее определить информативные параметры процесса истечения жидкости через предохранительный клапан стоечного гидроблока: длительности истечения, частоты проявления горного давления и, наконец, количества жидкости. Параметры истечения жидкости несут практически полную информацию о проявлениях горного давления на перекрытие секции крепи. Данное устройство защищено патентом Украины [5].

В данном устройстве каждый стоечный гидроблок секций крепи необходимо оборудовать сигнализатором давления, выполненным в виде устройства, преобразующего информацию о количестве выбрасываемой рабочей жидкости в аналоговый сигнал. Сигнализатор подключен последовательно с предохранительным клапаном.

Гидравлическая схема подключения стоечного гидроблока к гидростойке с датчиком горного давления, дополненная системой, преобразующей аналоговый сигнал, показана на рисунке 1. Она включает в себя гидростойку 1, стоечный гидроблок 2 с предохранительным 3 и разгрузочным 4 клапанами и индикатором давления 5, гидромагистраль 6 — 11, а также датчик горного давления 12 с преобразователем 13.

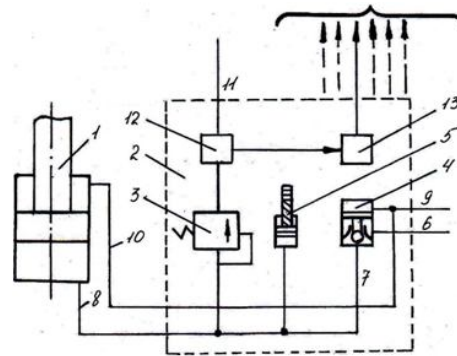


Рисунок 1 — Гидравлическая схема подключения стоечного гидроблока к гидростойке

Система работает следующим образом. Рабочая жидкость из напорной гидромагистрали очистного комплекса от гидрораспределителя поступает по гидромагистрали 6 через разгрузочный клапан 4 стоечного гидроблока 2, гидромагистралям 7, 8 в поршневую полость гидростойки 1. При этом гидростойка 1 распирается с усилием начального распора $N = pS$, где S — площадь поршня гидростойки, а p — давление в магистрали.

После распора гидростойки с усилием N разгрузочный клапан 4 закрывается, и поршневая полость гидростойки оказывается запертой. При проявлении горного давления в поршневой полости гидростойки давление повышается. При достижении давлением предельного значения, определяемого настройкой предохранительного клапана 3 стоечного гидроблока 2, клапан срабатывает. Рабочая жидкость из поршневой полости гидростойки через гидромагистраль 8, предохранительный клапан

3, датчик горного давления 12, по гидромагистрالی 11 выбрасывается наружу. Датчик конструктивно представляет собой тахогенераторный расходомер.

Аналоговый сигнал, поступающий от датчика 12, форма которого отражена на рисунке 2, преобразуется посредством преобразователя 13 в прямоугольный импульс (рис. 3). Длительность обоих сигналов одинакова.

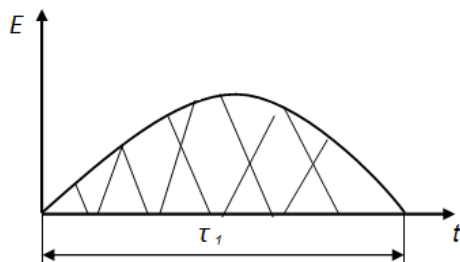


Рисунок 2 — Форма сигнала, поступающего от датчика горного давления, длительностью τ_1

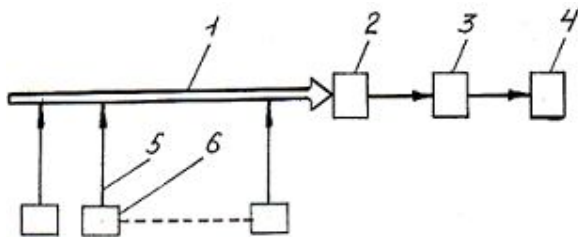
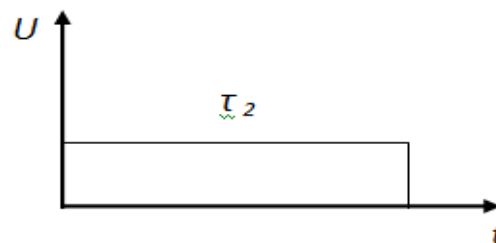


Рисунок 3 — Форма сигнала на выходе преобразователя длительностью τ_2

Длительность прямоугольного сигнала отображает продолжительность проявления горного давления на перекрытие секции крепи, а площадь под кривой на рисунке 2 отображает количество выброшенной рабочей жидкости. Эти сигналы по линиям связи подаются в компьютеризированную телекоммуникационную систему, находящуюся на поверхности шахты, а именно, в блоки приема информации и регистрации. Посредством специально разработанного программного обеспечения отображается продолжительность и частота проявления горного давления на секции крепи и, что особенно важно, фактическая площадь поперечного сечения

призабойного пространства лавы в свету по линии забоя. Перечисленные факторы коррелируют с состоянием призабойной части угольного пласта, а последний фактор служит к тому же для управления количеством воздуха, подаваемого в лаву по мере изменения режима проветривания.

На рисунке 4 показана структурная схема обобщенной архитектуры построения системы индикации наличия горного давления. Функционально эта система индикации содержит типовые элементы коммуникации и может не только отображать информацию, но и реагировать на изменение состояний горного давления.



1 — информационная шина; 2 — блок приема информации; 3 — блок регистрации; 4 — блок компьютера с программным обеспечением; 5 — линии связи; 6 — преобразователи

Рисунок 4 — Структурная схема системы индикации горного давления

Будучи подсистемой системы УТАС шахтой оповещать работающий персонал через систему громкоговорящей связи в лаве об изменении условий работы и перемещения людей, что способствует снижению уровня травматизма. На базе такой системы может осуществляться мониторинг проявления горного давления на секции механизированной крепи по всей длине лавы и оповещения. Службы слежения за процессами выемки полезного ископаемого оповещаются об изменении условий проветривания очистного забоя лавы из-за нарушений аэродинамических сопротивлений и состояния призабойной части горного массива пласта лавы. Поступающая информация о вхождении очистного комплекса в зону горно-геологических нарушений служит для проведения комплекса

необходимых мероприятий и управлений, а именно: реконструкции системы вентиляции добычного участка, подготовки специальных технических средств и приспособлений для прохождения под их прикрытием очистным комплексом зоны горно-геологических нарушений.

Выводы и направления дальнейших исследований. Предложена система индикации наличия горного давления в породах кровли угольного пласта лавы, позволяющая определять продолжительность и частоту его проявления, а также отображать

фактическую площадь поперечного сечения лавы в свету по линии забоя. В основу построения системы положен принцип использования энергии объема жидкости, вытесняемой из поршневой полости гидростоек секций при срабатывании предохранительного клапана. Предложенное техническое решение расширяет функциональные возможности телекоммуникационной системы путем мониторинга и управления технологическими процессами в механизированных лавах.

Бібліографічний список

1. Солод В. И. Проектирование и конструирование горных машин и комплексов / В. И. Солод, В. Н. Гетопанов, В. М. Рочек. — М.: Недра, 1982. — 350 с.
2. Совершенствование очистных механизированных комплексов на шахтах Кузбасса / Б. Г. Никитичев, В. С. Баринков, Р. П. Рочек [и др.]. — М.: ЦНИИУголь. — 1992. — 199 с.
3. Хорин В. Н. Расчет и конструирование механизированных крепей / В. Н. Хорин. — М.: Недра. — 1988. — С. 31–34.
4. Пат. 54772 Україна, МПК E21F 17/00. Секція механізованого кріплення / Плєтньов М. В., Степанов Е. І., Амірахов А. А., Рогов А. А. ; заявник і патентовласник УІПА. — №U201005605 ; заявл. 11.05.10 ; опубл. 25.11.10, Бюл. №22.
5. Пат. 81573 Україна, МПК E21F 17/00. Секція механізованого кріплення / Степанов Є. І., Плєтньов М. В., Альохін Р. П., Клевцов О. В. ; заявник і патентовласник УІПА. — №U201213442 ; заявл. 26.11.12 ; опубл. 10.07. 13, Бюл. №13.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Корнеевым С. В., к.т.н., проф. СУНИГОТ УИПА Алексеенко С. Ф.

Статья поступила в редакцию 06.05.14.

к.т.н. Степанов Є. І., к. психол. н. Авершин А. О. (СНИГОТ УИПА, м. Стаханов, Україна)
ПОБУДУВАННЯ СИСТЕМИ ІНДИКАЦІЇ ПРОЯВУ ГІРНИЧОГО ТИСКУ В ЛАВІ

Запропоновано алгоритм побудування системи індикації гірничого тиску в лаві. Сигнал який відображає подовження прояву гірничого тиску визначається кількістю рідини, витиснутої з поршневої порожнини гідравлічного стояка секції механізованого кріплення при спрацьованні запобіжного клапана стоякового гідроблока.

Ключові слова: рідина, гідравлічний стояк, секція механізованого кріплення, стояковий гідроблок, запобіжний клапан, алгоритм, система індикації.

Stepanov E. I. Candidate of Engineering Sciences, Avershin A. A. Candidate of Psychological Sciences (SSRIMET UEPA Stakhanov, Ukraine)

INDICATION OF ROCK PRESSURE MANIFESTATION IN FACE SYSTEM INTEGRATION

Algorithm of rock pressure indication system manifestation in face was suggested. The signal, reflecting duration of rock pressure manifestation is defined by liquid quality thrown away from head end of hydraulic support of powered support unit in safety-valve operation of support hydraulic block.

Key words: liquid, hydraulic stand, powered support unit, support hydraulic block, safety-valve, algorithm, indication system.

УДК 622.23.

*Пыжов С. В. (Минэнергоугля Украины),
д.т.н. Антощенко Н. И.,
к.т.н. Филатов М. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)*

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИНИМАЛЬНОВОЗМОЖНОЙ СТЕПЕНИ ПОДРАБОТАННОСТИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ВЫЕМКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

Приведен анализ параметров начала процесса сдвижения подработанных пород и земной поверхности для разных горно-геологических и горнотехнических условий. Предложена схема влияния очистных работ, которая дает теоретические обоснования для разработки рекомендаций по определению размеров очистных выработок, обеспечивающих минимально возможную степень подработки земной поверхности.

Ключевые слова: *земная поверхность, безопасная подработка, сдвижение, выработанное пространство, мулда сдвижения, подработанные породы, угольные пласты.*

Во всех случаях отработки угольных пластов в Донбассе имеется необходимость разработки мероприятий по защите объектов на земной поверхности и решения экологических задач по уменьшению вредного влияния очистных работ. Такая ситуация обусловлена тем, что при выемке угольных пластов даже на глубинах более 1000 м наблюдается образование мульд сдвижения на земной поверхности [1]. В результате этого появляется дополнительная необходимость финансовых затрат на поддержание объектов на земной поверхности в рабочем и безопасном состоянии. Разработка и теоретическое обоснование мероприятий по недопущению или сокращению до минимума негативных последствий для земной поверхности при её подработке угольными пластами относятся к актуальной задаче.

Одним из вариантов решения указанной задачи является идея предотвращения начала сдвижения земной поверхности за счет уменьшения размеров очистных выработок (длины лав или выработанных пространств). Возможность реализации этой идеи подтверждается результатами обработки экспериментальных данных [2,3]. Сдвижение некоторой точки земной поверхности возможно только после осад-

ки основной кровли при определённом развитии очистных работ.

Влияние размеров выработанного пространства на процессы сдвижения подработанных пород подтверждено многолетним опытом безлюдной выемки камерами длиной 100–120 м и шириной 10–30 м [4]. Интенсивность сдвижения пород непосредственной кровли зависела от ширины камеры. Исходя из этих данных следует, что подобрав один из размеров выработанного пространства, можно до минимума сократить распространение процессов сдвижения подработанных пород и обеспечить незначительную степень подработанности земной поверхности.

Методикой нормативного документа [5] степень подработанности земной поверхности оценивается в двух взаимоперпендикулярных направлениях обособленно и не зависимо от размеров очистной выработки в этих направлениях. Такой подход к решению рассматриваемой задачи не является достаточно корректным и подтверждает необходимость теоретического обоснования параметров процессов сдвижения подработанных пород и земной по-

© Пыжов С. В., 2014

© Антощенко Н. И., 2014

© Филатов М. В., 2014

верхности от одновременного влияния двух размеров очистной выработки (выработанного пространства).

Одной из первых рассмотреть суммарное влияние двух размеров очистной выработки была попытка в работе [3]. Её недостатком является ограниченность использованных экспериментальных данных в одних горно-геологических условиях и отсутствие общей схемы, объединяющей параметры степени развития очистных работ с процессами сдвижения подработанных пород и земной поверхности. Разработка такой схемы стала возможной при объединении результатов работ [6,7]. При её обосновании использовали одно из научных положений [6], которое заключается в следующем:

- формирование области полных сдвижений кровли происходит в процессе отхода лавы от разрезной печи на расстояние, равное длине лавы или ширине выработанного пространства, образовавшегося при отработке нескольких смежных лав. В выемочном поле лавы образуется квадрат выработанного пространства, который представляет собой зону влияния очистных работ. При дальнейшем подвигании лавы происходит образование зоны влияния выработанного пространства, в которой параметры полных сдвижений кровли не изменяются до отработки лавой всего выемочного поля.

Это научное положение позволило дополнить схему [7] и объяснить механизм образования зоны полных сдвижений в подработанных породах с использованием данных о степени развития очистных работ и параметров мульды сдвижения на земной поверхности (рис. 1).

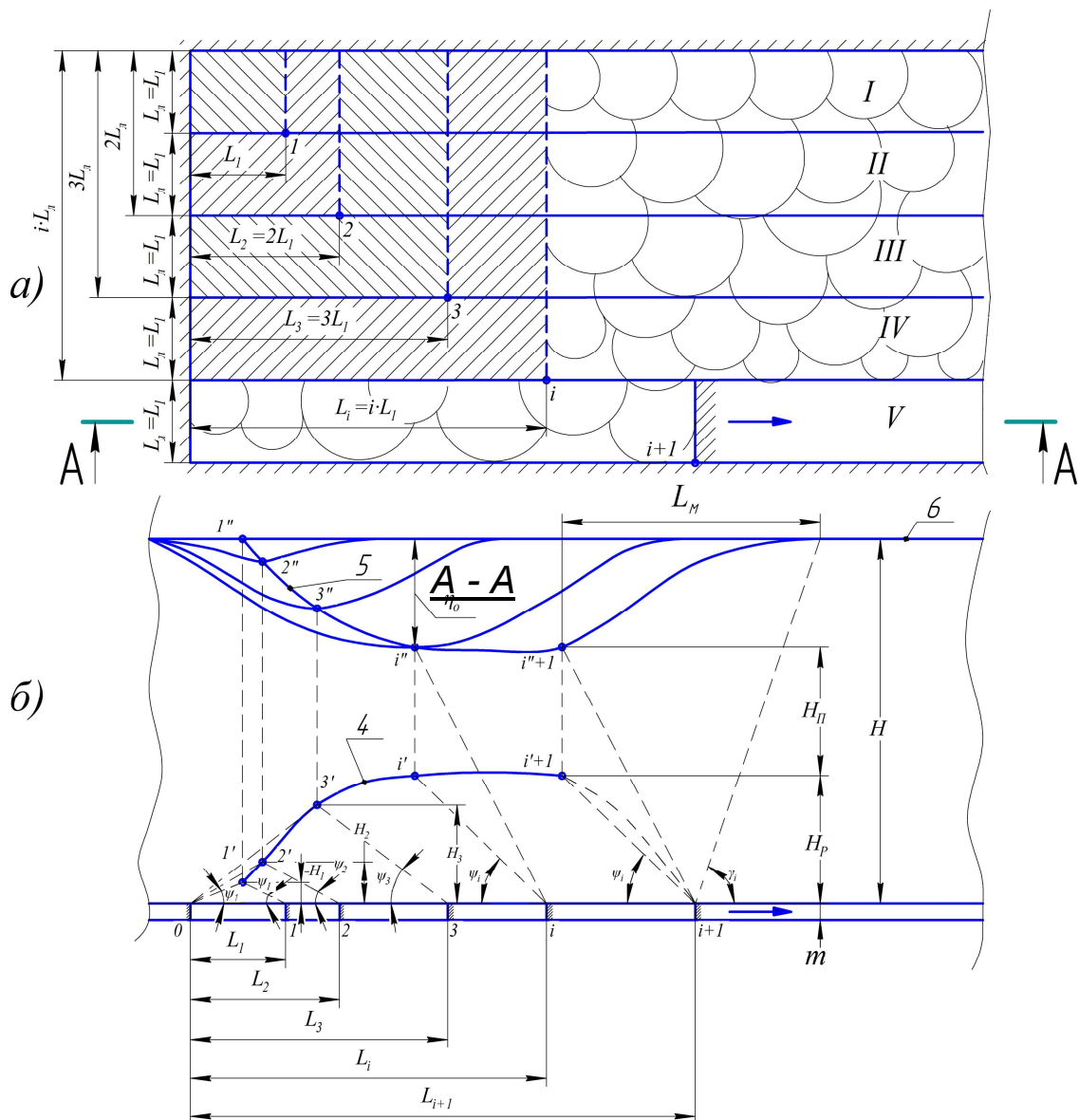
Исходя из этой расчетной схемы следует, что при длине лавы (L_n), равной отходу очистного забоя от разрезной печи на расстояние L_1 , происходит первичная осадка основной кровли. Верхняя граница зоны полных сдвижений определяется точкой I' . Она располагается на расстоянии H_1 от разрабатываемого пласта, которому соответствуют углы полных сдвижений ψ_1 . Дальнейшее подвигание очистного забоя

до отработки всего выемочного столба не приводит к изменению параметров полных сдвижений подработанных пород кровли, в том числе и параметра H_1 [6].

В настоящее время выбор длины лавы производится, в основном, исходя из возможностей имеющегося оборудования. Горно-геологические и горнотехнические факторы, определяющие процессы сдвижения подработанных пород и земной поверхности во внимание не принимаются. По этой причине при рассмотрении многих задач горного производства не учитывается, что одинаковая длина лавы в разных условиях может вызывать разные последствия подработки пород и земной поверхности. Согласно нормативному документу [5] начало сдвижения земной поверхности происходит при удалении очистного забоя от разрезной печи на расстояние, равное $0,1 \div 0,3$ глубины (H) ведения очистных работ. Исходя из этого следует, что первичная осадка основной кровли происходит на расстоянии $L_1 \leq (0,1 \div 0,3)H$. Если же длина лавы выбрана из условия $L_n = L_1$, то сдвижение точки I'' на земной поверхности при дальнейшей отработке выемочного столба (I) происходить не будет. В этом случае параметры зоны полных сдвижений определяются квадратом выработанного пространства, сторона которого равна L_1 [6].

Образование следующего квадрата выработанного пространства с размером стороны $2L_1$, который будет формировать зону влияния очистных работ, должно произойти при отработке следующего выемочного столба (II) в шахтном поле (рис. 1).

Образование мульды сдвижения на земной поверхности с максимальным оседанием точки $2''$ произойдет в результате влияния квадрата выработанного пространства, сторона которого L_2 равна длинам двух лав ($2L_1$). Максимальному оседанию точки $2''$ земной поверхности в этом случае соответствует точка $2'$, определяющая верхнюю границу зоны полных сдвижений (H_2) в подработанных породах. Значение H_2 остается постоянным параметром при отработке выемочного столба II .



I, II, III, IV, V — порядок отработки выемочных участков; L_1 и L_i — соответственно длина лавы и удаление очистного забоя от разрезной печи при первичной осадке основной кровли в выемочном столбе *i*; $L_2, L_3 \dots L_i$ — расстояния между очистными забоями и разрезными печами соответственно при отработке *II, III, IV* выемочных столбов, которые образуют квадрат выработанного пространства влияния очистных работ до полной подработки земной поверхности; L_{i+1} — текущее положение очистного забоя после полной подработки земной поверхности; *1, 2, 3...i...i+1* — текущие положения очистных забоев, характеризующие их удаление от разрезных печей; $\psi_1, \psi_2, \psi_3 \dots \psi_i$ — углы полных сдвижений подработанных пород; γ_i — граничный угол влияния очистных работ; *1', 2', 3'...i'...i'+1* — точки, характеризующие верхнюю границу зоны полных сдвижений подработанных пород (кривая 4); *1'', 2'', 3''...i''...i''+1* — точки траектории (кривая 5) максимального оседания земной поверхности и соответствующие им мульды сдвижения; *m* — мощность разрабатываемого пласта; *H* — глубина ведения очистных работ; $H_1, H_2, H_3 \dots H_p$ — верхние границы распространения зоны полных сдвижений в подработанных породах; H_Π — мощность породных слоев, параллельно перемещающихся после полной подработки земной поверхности; L_m — длина полумульды сдвижения земной поверхности после её полной подработки; η_o — глубина плоского дна мульды сдвижения; \longrightarrow — направление подвигания очистного забоя.

Рисунок 1 – План отработки выемочных участков в крыле шахтного поля (а) и параметры процессов сдвижения подработанных пород и земной поверхности в вертикальной плоскости при развитии очистных работ (б)

Аналогичный механизм образования квадрата выработанного пространства и его влияния на параметры зоны полных сдвижений подработанных пород и мульды на земной поверхности будет происходить до полной ее подработки (образования плоского дна мульды сдвижения).

В расчетной схеме (рис. 1) условно принято, что полная подработка земной поверхности наступила при образовании квадрата влияния выработанного пространства с размером его стороны L_i . Дальнейшее развитие очистных работ, как в пределах одного выемочного участка, так и всего шахтного поля, не влияет на удаление верхней границы полных сдвижений подработанных пород (H_p) от разрабатываемого пласта. На земной поверхности ей будет соответствовать плоское дно мульды глубиной η_o .

После полной подработки земной поверхности развитие очистных работ (в том числе и удаление забоя от разрезной печи) практически не влияют на формирование параметров зоны полных сдвижений подработанных пород и мульды земной поверхности. Главным фактором, определяющим их формирование, является подвигание очистного забоя. Например, расположение полумульды длиной L_m на земной поверхности и остальные параметры сдвижения (γ_i , ψ_i , H_p , H_{II}) зависят только от расположения ($i + I$) очистного забоя в выемочном столбе V (рис. 1).

Следует отметить, что образование плоского дна мульды сдвижения на земной поверхности может происходить при отработке одного выемочного участка. Это на-

блюдается при ведении очистных работ на малых глубинах (как правило менее 200м) и непрочных вмещающих породах. С другой стороны установлено, что при отработке антрацитовых пластов на глубоких горизонтах плоское дно мульды сдвижения на земной поверхности не образуется даже при отработке нескольких лав [8]. Разработанная схема влияния очистных работ позволяет определить взаимозависимые параметры сдвижения подработанных пород и земной поверхности для всего разнообразия горно-геологических и горнотехнических условий выемки пологих угольных пластов.

Предлагаемая схема дает теоретические обоснования для разработки рекомендаций по определению размеров очистных выработок, обеспечивающих минимально возможную степень подработки земной поверхности. Для полной практической реализации этой схемы и подтверждения ее отдельных теоретических положений необходимо провести исследования в следующих направлениях:

- проанализировать и обобщить известные работы по установлению параметров развития очистных работ, при которых происходит начало сдвижения земной поверхности;
- выявить непосредственные и косвенные факторы, определяющие первичную и последующие осадки кровли;
- установить влияние расстояния между очистным забоем и разрезной печью и других горно-геологических и горнотехнических факторов на начало сдвижения земной поверхности.

Библиографический список

1. Гавриленко Ю. Н. Динамика оседаний земной поверхности при большой глубине разработки и высокой скорости подвигания забоя / Ю. Н. Гавриленко, Н. М. Папазов, Т. В. Морозова // *Збірник наукових праць Донецького державного технічного університету «Проблеми гірського тиску»* — 2000. — №4. — С. 108–119.
2. Чепурная Л. А. Определение условий начала сдвижения земной поверхности при отработке угольных пластов / Л. А. Чепурная, М. В. Филатьев, Н. И. Антощенко // *Уголь Украины*. — 2014. — №4. — С. 7–9.
3. Чепурная Л. А. О подработке земной поверхности антрацитовыми пластами / Л. А. Чепурная, М. В. Филатьев, Н. И. Антощенко // *Уголь Украины*. — 2014. — №6. — С. 3–7.

4. Пучков Б. М. Технология и параметры безлюдной выемки весьма тонкого пласта / Б. М. Пучков, А. И. Филобок // Уголь Украины. — 1981. — №12. — С. 13–15.

5. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом: ГСТУ 101.00159226.001 – 2003. — Київ. : 2004. — 128 с. — (Галузевий стандарт України).

6. Лобков М. І. Розвиток наукових основ прогнозу обвалення порід покрівлі при вийманні лавою пологого пласта: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук: спец. 05.15.02. «Підземна розробка родовищ корисних копалин» / М. І. Лобков — Донецьк, 2012. — 36 с.

7. Чепурная Л. А. Обобщённая схема сдвижения земной поверхности до и после образования плоского дна мульды / Л. А. Чепурная, Н. И. Антощенко // Сб. научных трудов Донбасского государственного технического университета. — Алчевск. : ДонГТУ, 2013. — Вып. 40. — С. 46–50.

8. Борзых А. Ф. Влияние ширины выработанного пространства на активизацию сдвижения угленосного массива / А. Ф. Борзых, Е. П. Горовой // Уголь Украины. — 1999. — №9. — С. 26–30.

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

Статья поступила в редакцию 17.04.2014.

Пижов С. В. (Мінерговугілля України), **д.т.н., проф. Антощенко М.І., к.т.н. Філат'єв М. В.,** (Донбаський ДТУ, м. Алчевськ, Україна)

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МІНІМАЛЬНОМОЖЛИВОГО СТУПЕНЯ ПІДРОБКИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ВИЙМАННІ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ

Приведений аналіз параметрів початку процесу зрушення підроблених порід і земної поверхні для різних гірничо-геологічних і гірничотехнічних умов. Запропонована схема впливу очисних робіт, яка дає теоретичні обґрунтування для розробки рекомендацій за визначенням розмірів очисних виробок, що забезпечують мініальноможливий ступінь підробки земної поверхні.

Ключові слова: земна поверхня, безпечна підробка, зрушення, вироблений простір, мульда зрушення, підроблені породи, вугільні пласти.

Pyzhov S. V. (Ministry of Energy and Coal of Ukraine), **D.Sc. in engineering, professor** **Antoshchenko N. I., Candidate of Technical Sciences** **Philatiev M. V.** (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF PARAMETERS OF IRREDUCIBLE DEGREE OF EARTH SURFACE UNDERWORKING AT COAL- SEAM EXCAVATION

Analysis of parameters of undermined rocks and trough displacement beginning in the diversity of mining-geological and mining-technological conditions is given. The scheme of the second works influence, which gives a theoretical basis for the development of recommendations as to dimensioning of the room, providing irreducible degree of the earth surface undermining is suggested.

Key words: earth surface, safe underworking, displacement, mined-out space, movement trough, underworked rocks, coal seams.

МЕТАЛУРГІЯ

МЕТАЛУРГІЯ

METALLURGY

УДК 621.965.01

к.т.н. Боровик П. В.

(ДГМА, г. Краматорск, Украина, borovikpv@mail.ru)

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ МЕТАЛЛА В ХОЛОДНОМ СОСТОЯНИИ НА НОЖНИЦАХ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМИ НОЖАМИ

На базе известных зависимостей предложен метод получения кривых текучести материала при моделировании методом конечных элементов процесса разделения металла на ножницах в холодном состоянии. Выполнено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Обоснована необходимость использования коэффициента перехода для пересчета напряжений текучести при переходе от условий растяжения к срезу. Определены расчетные значения коэффициента перехода для рассмотренных материалов и предложена регрессионная модель по его расчету. Предложены зависимости степени и скорости пластической деформации по перерезаемому сечению от относительной глубины внедрения ножей в металл.

Ключевые слова: кривая текучести, ножницы, коэффициент перехода, деформация, скорость деформации.

В настоящее время, в условиях современного прокатного производства широко используются ножницы продольной и поперечной резки проката [1], которые являются весьма сложными машинами по кинематике и конструкции. При этом актуальными задачами являются расширение технологических возможностей уже эксплуатируемого и вновь проектируемого оборудования, повышение точности производимых конструкторских расчетов и увеличение степени научной обоснованности при принятии проектных и технологических решений.

Следует отметить, что экспериментальные исследования процессов обработки давлением не всегда способны обеспечить полноту информации, либо это требует целого ряда дополнительных финансовых затрат и организационных действий. Благодаря росту возможностей вычислительной техники, успешно развиваются подходы теоретических исследований, базирующиеся на разработке численных математических моделей. В основу данных моделей положены методы теории упругости и пластичности, а также вопросы механики разрушения, что, при достоверной информации о механических свойствах конкретного материала, позволяет в максимально полной степени отображать реаль-

ные физические процессы, протекающие в металле.

Особое место в решении таких задач [2–4] занимает метод конечных элементов (МКЭ). Однако максимально полная степень отображения реального процесса в ходе моделирования МКЭ возможна только при наличии достоверных кривых текучести и диаграмм пластичности [5] в исследуемых диапазонах температур, степени и скорости деформации, учитывающие специфику процесса.

Целью данной работы является расширение представления о протекании процесса разделения металла в холодном состоянии на ножницах с параллельными ножами и поиск возможностей дальнейшего совершенствования методов расчета.

Практически для любой марки стали в справочной литературе, можно найти результаты испытаний на растяжение, характеризующиеся пределом текучести $\sigma_{0,2}$ и пределом прочности σ_b материала при растяжении, а также относительным удлинением δ , которые учитывают способ производства и термическую обработку металла.

Кроме того известно, что процессы обработки давлением сопровождаются тер-

модинамическими эффектами, однако, в условиях холодной деформации, поведение материалов может быть диаметрально противоположным и способствовать, как увеличению, так и уменьшению сопротивления деформации. Учитывая, что нагрев металла имеет место в небольших локальных объемах, то влиянием термодинамических эффектов было решено пренебречь.

При построении кривых текущей скорости деформации учитывалось влияние скорости деформации производилось по известной зависимости [6]:

$$\sigma_u = \sigma_{cm} K_v, \quad (1)$$

где σ_{cm} — сопротивление деформации при статических испытаниях; K_v — скоростной коэффициент.

Сопротивление деформации при статических испытаниях определялось из уравнения, предложенного в работе [7]:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{0,2} (\bar{\varepsilon}_p / 0,002)^{m_0}, \quad (2)$$

где $\bar{\varepsilon}_p$ — степень истинной пластической деформации; m_0 — показатель упрочнения, который зависит от соотношения предела прочности к пределу текучести $\sigma_b / \sigma_{0,2}$.

Для определения показателя упрочнения, по данным работы [7], была получена следующая аппроксимация:

$$m_0 = 0,008 + 0,2515 \ln(\sigma_b / \sigma_{0,2})^{0,818}. \quad (3)$$

Скоростной коэффициент, определялся из выражения [6]:

$$K_v = (\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_{cm})^{m_1}, \quad (4)$$

где $\dot{\varepsilon}$ — текущая скорость деформации; $\dot{\varepsilon}_{cm}$ — скорость деформации при статических испытаниях; m_1 — степенной показатель, определяемый механическими свойствами материала [6].

Затем, используя МКЭ, осуществлялось моделирование процесса холодной резки параллельными ножами на базе программного комплекса Abaqus. Математическая

модель описывала плоскую задачу резки параллельными ножами с учетом жесткости станины [8].

В качестве исходных данных для моделирования были взяты результаты экспериментальных исследований процесса холодной резки параллельными ножами приведенные в работе [1].

Кроме того, были использованы результаты лабораторных экспериментальных исследований при резке алюминиевого сплава АА6066, которые проводились в условиях кафедры «Машины металлургического комплекса и прикладная механика» Донбасского государственного технического университета (г. Алчевск) на лабораторной установке кривошипно-шатунных ножниц с параллельными ножами.

В таблице 1 приведены, названия материалов, их механические свойства и условия процесса резки параллельными ножами. По результатам моделирования МКЭ были получены соответствующие зависимости силы резки, которые во всех рассмотренных случаях имели завышенный результат в диапазоне порядка 15...43% по отношению к экспериментальным данным.

Такое явление, вполне объяснимо, поскольку в классических методиках расчета максимальной силы резки [1] используют коэффициент перехода от предела прочности при растяжении к пределу прочности при срезе. Величина этого коэффициента зависит от разрезаемого металла и по данным различных исследователей, для разных материалов, может колебаться в пределах $K_\sigma = 0,6...0,9$.

В соответствии с этим, на следующем этапе исследования, путем соотношения результатов моделирования и экспериментальных данных были получены расчетные значения коэффициентов перехода K_σ , при которых максимальные значения силы резки соответствовали экспериментальным данным. Величины коэффициентов перехода K_σ для каждого из экспериментальных образцов приведены в таблице 2.

Таблица 1 — Характеристика экспериментальных образцов и условий реализации эксперимента

№	Марка материала*	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	m_1	Сторона квадрата, мм	Скорость ножа, мм/с
1	АА6066	360	395	18	0,020	10	30
2	Сталь 20	418	527	21,7	0,019	25	300
3	Сталь 45 (канатная сталь)	347	660	19,7	0,019	25	300
4	ШХ10	439	822	16,6	0,019	25	300
5	Сталь 75 (пружинная сталь)	574	989	10,8	0,019	25	300
6	Сталь 15 (1015)	177	373	32	0,019	25	300
7	Сталь 18Х2Н4ВА (Э16)	910	1128	9	0,019	25	300
8	Сталь 12Х18Н9 (ЭЯ1)	230	589	45	0,019	25	300

* — в скобках указаны названия в соответствии с данными А.И. Целикова

Таблица 2 — Расчетные значения коэффициента перехода K_σ

АА6066	Сталь 20	Сталь 45 (канатная сталь)	ШХ10	Сталь 75 (пружинная сталь)	Сталь 15 (1015)	Сталь 18Х2Н4ВА (Э16)	Сталь 12Х18Н9 (ЭЯ1)
0.87096	0.8265	0.8075	0.6982	0.76	0.779	0.84	0.87

В качестве сравнения полученных результатов, на рисунке 1 показаны кривые удельного сопротивления срезу для 5 марок стали. При этом на оси абсцисс показано относительное смещение ножа, вместо традиционного относительного внедрения ножей в металл. Это обусловлено тем, что при проведении экспериментальных исследований в работе [1] не учитывалась упругая деформация станины ножниц, которая, как было показано в работе [8], несколько видоизменяет зависимость удельного сопротивления срезу от относительного внедрения ножей в металл.

При оценке влияния механических свойств материала при растяжении на коэффициент перехода K_σ , в ходе регрессионного анализа были определены коэффициенты корреляции коэффициента перехода с каждым отдельно взятым параметром. Однако гипотеза о линейной зависимости между коэффициентом перехода и каким-либо из рассмотренных параметров не подтвердилась.

В связи с этим была предпринята попытка перебора параметров с применением итерационных процедур и метода наименьших квадратов, с целью получения максимального значения коэффициента корреляции. В результате был получен показатель механических свойств материала:

$$X_\sigma = \left[\varepsilon_n^{\sqrt{2}} m_0^2 \left[\frac{\ln\left(\frac{3}{2} + \delta^3\right)}{\ln(1 + \delta)} \right]^{m_0+1} - 1 \right]^{\frac{1}{10}}. \quad (5)$$

Коэффициент корреляции, в данном случае, составил $R = -0,9763$.

Уравнение регрессии коэффициента перехода, при этом определяется выражением:

$$K_\sigma = \ln(8) - \sqrt{3} X_\sigma. \quad (6)$$

Погрешность между значениями коэффициента перехода K_σ , представленными в таблице 1 и полученными из уравнения (6) составила не более $\pm 3\%$.

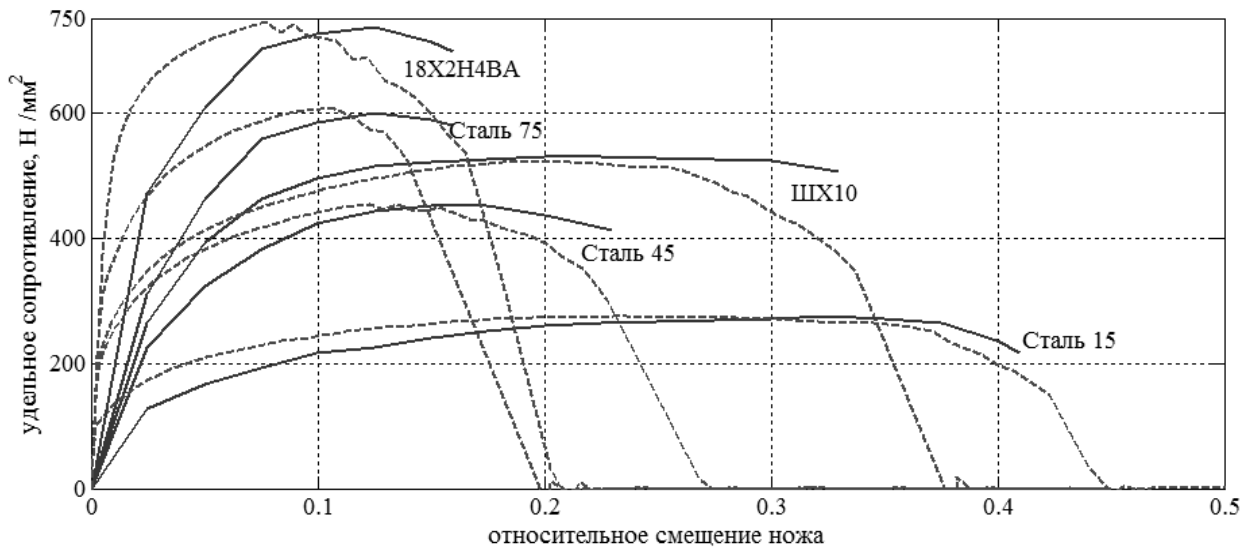


Рисунок 1 — Кривые удельного сопротивления срезу по данным работы [1] (—) и по результатам моделирования МКЭ при использовании коэффициента перехода представленного в таблице 2 (---)

Окончательно, при моделировании МКЭ процесса разделения металла на ножницах, целесообразно ввести в уравнение (1) коэффициент перехода K_σ :

$$\sigma_u = \sigma_{cm} K_v K_\sigma, \quad (7)$$

При дальнейшем анализе процесса резки устанавливалась связь между относительной глубиной внедрения ножей в металл ε (отношение величины внедрения к разрезаемой толщине) и величиной пластической деформации.

Поскольку величина пластической деформации в ходе процесса резки представляет собой интегральный показатель, вначале были определены элементы, которые претерпевают разрушение и величины пластической деформации для соответствующих им элементарных объемов. Затем были получены усредненные значения пластической деформации для всех разрушаемых элементов.

При этом установлено, что степень пластической деформации по перерезаемому сечению зависит от относительной глубины внедрения и описывается следующей зависимостью:

$$\bar{\varepsilon} = \bar{\varepsilon}_{\max} \frac{e^{\frac{5}{2}\varepsilon_n} - 1}{\frac{5}{2} - 1} \cdot \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (8)$$

где $\bar{\varepsilon}_{\max}$ — максимальная степень пластической деформации в очаге резки, при полном разделении; ε_n — относительное внедрение до скола.

Для определения скорости деформации $\dot{\varepsilon}$ в ходе процесса резки с известной скоростью движения ножа следует относительное внедрение ножей в металл представить в виде:

$$\varepsilon = \frac{vt}{h}, \quad (9)$$

где v — скорость движения ножа; t — время движения ножа; h — толщина разрезаемого листа.

Подставив (9) в (8) и продифференцировав по времени скорость, после преобразования, скорость деформации $\dot{\varepsilon}$ можно представить как функцию относительного внедрения ножей в металл:

$$\dot{\bar{\varepsilon}} = \frac{\bar{\varepsilon}_{\max} v}{h \varepsilon_n \left(e^{\frac{5}{2}} - 1 \right)} \left[\frac{5}{2} e^{\frac{5}{2} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n}} \times \right. \\ \left. \times \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n} \right)^{\frac{1}{2}} - \frac{1}{2} \left(e^{\frac{5}{2} \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n}} - 1 \right) \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_n} \right)^{-\frac{1}{2}} \right]. \quad (10)$$

На рисунке 2 показаны кривые напряжение-деформация, полученные МКЭ и на базе алгоритма (2)–(10).

Как можно видеть из представленных зависимостей кривые напряжение-деформация имеют достаточно высокую сходимость при интенсивности деформаций в зависимости от марки материала $\bar{\varepsilon}_i \leq 0,2 \dots 0,4$, что указывает на адекватность полученного алгоритма. Увеличение расхождения между данными зависимостями при росте интенсивности деформаций можно объяснить тем, что по мере роста деформации в материале заготовки постепенно накапливаются повреждения, что влияет на поведение материала. Таким образом, существует необходимость проведения дополнительных теоретических и

экспериментальных исследований в данном направлении с целью выявления ряда закономерностей, позволяющих расширить представление о поведении материала и собственно процессе.

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

- на базе известных зависимостей разработан метод построения кривых текучести материала при моделировании МКЭ процесса холодного разделения на ножницах с параллельными ножами;

- показано, что использование данного метода позволяет получать результаты, которые хорошо согласуются с экспериментальными данными;

- получены зависимости степени и скорости пластической деформации по перерезаемому сечению от относительной глубины внедрения ножей в металл;

- предложенный алгоритм может явиться основанием для дальнейшего совершенствования методов расчета энергосиловых параметров и основных показателей качества при разделении на ножницах в холодном состоянии.

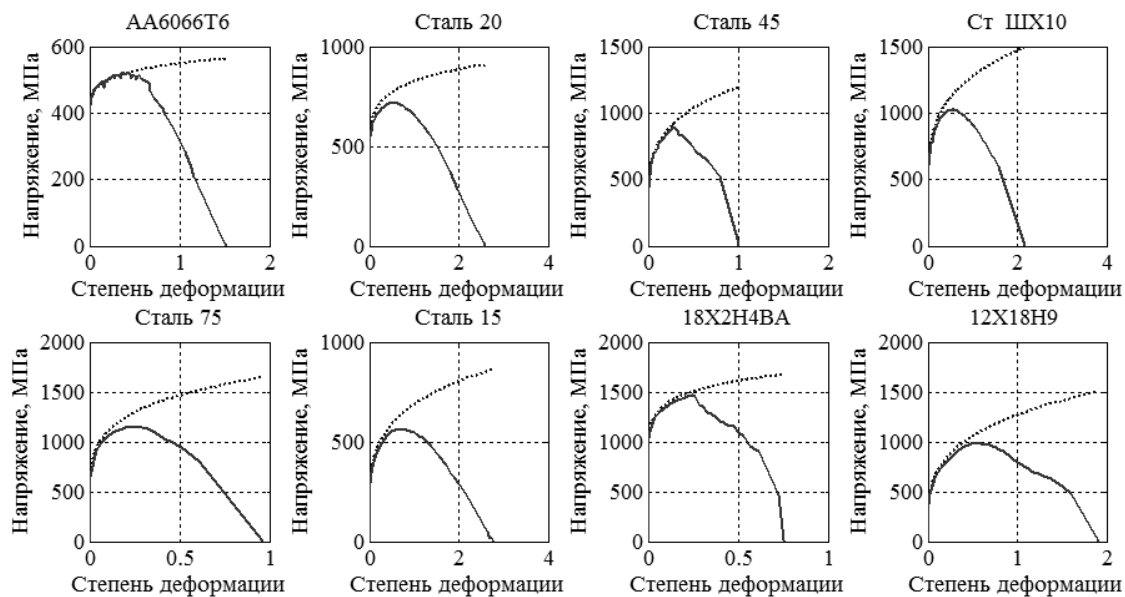


Рисунок 2 — Кривые напряжение-деформация, полученные при обработке результатов моделирования МКЭ (—) и на базе разработанного алгоритма (---)

Результаты работы могут быть использованы при дальнейших исследованиях разделительных операций металлопроката профилей на ножницах в холодном состоянии. В перспективе это позволит по

результатам моделирования разрабатывать рекомендации направленные на совершенствование существующих и разработку новых проектно-конструкторских и технологических решений.

Библіографічний список

1. Машиностроение: энциклопедия / [ред. совет: К. В. Фролов (пред.) и др.]. — М.: Машиностроение, 2000. — Т. IV—5: Машины и агрегаты металлургического производства / [Н. В. Пасечник, В. М. Синицкий, В. Г. Дрозд и др.]; под. ред. В. М. Синицкого, Н. В. Пасечника. — 2000. — 912 с.
2. Боровик П. В. Математическое моделирование процесса резки толстолистовых раскатов в горячем состоянии на дисковых ножницах / П. В. Боровик // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні: Зб. наук. пр. — Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля. — 2013. — №1(14). — С. 69–76.
3. 3D numerical simulation of anisotropic thin sheet metal slitting process using fully coupled constitutive equations including ductile damage / K. Saanouni, N. Belamri, P. Autesserre // International Journal of Material Forming, August 2009. — Volume 2, Issue 1 Supplement. — P. 535–538.
4. Numerical simulation of the fine blanking process of sheet titanium / J. Adamus, P. Lacki, W. Wieckowsky // Archives of metallurgy and materials, 2011. — Volume 56, Issue 2. — P. 431–437.
5. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / В. А. Огородников. — К.: Вища шк., 1983. — 175 с.
6. Ушаков М. В. Учет влияния скорости деформации и температуры на процессы, происходящие в зоне первичной деформации при резании металлов / М. В. Ушаков, С. Ю. Ильяхин, И. А. Воробев // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 4. — Ч. 2. — Тула: ТулГУ, 2010. — С. 89–93.
7. Механические свойства сталей и сплавов при нестационарном нагружении : справочник / Д. А. Гохфельд, Л. Б. Гецов, К. М. Кононов [и др.]. — Екатеринбург: УрО РАН, 1996. — 408 с.
8. Боровик П. В. Математическое моделирование процесса резки на ножницах с учетом упругой деформации станины / П. В. Боровик // Вестник национального технического университета ХПИ. — Харьков, 2011. — Вып. 47. — С. 76–80.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. ДонГТУ Ульяницким В. Н.,
д.т.н., проф. ВНУ им. Даля Харламовым Ю. А.**

Статья поступила в редакцию 05.06.14.

к.т.н. Боровік П. В. (ДДМА, м. Краматорськ, Україна, borovikpv@mail.ru)

АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ РОЗДІЛЕННЯ МЕТАЛУ В ХОЛОДНОМУ СТАНІ НА НОЖИЦЯХ З ПАРАЛЕЛЬНИМИ НОЖАМИ

На базі відомих залежностей запропоновано метод отримання кривих текучості матеріалу при моделюванні методом скінчених елементів про-процесу розділення металу на ножницях в холодному стані. Виконано порівняння результатів моделювання з експериментальними даними. Обґрунтовано необхідність використання коефіцієнта переходу для перерахунку напружень текучості при переході від умов розтягування до зрізу. Визначено розрахункові значення коефіцієнта переходу для розглянутих матеріалів і запропонована регресійна модель його розрахунку. Запропоновано залежності ступеня і швидкості пластичної деформації по перетину, що перерізається, від відносної глибини проникнення ножів в метал.

Ключові слова: крива текучості, ножиці, коефіцієнт переходу, деформація, швидкість деформації.

Borovik P.V., Candidate of Engineering Sciences (DSMA, Kramatorsk, Ukraine, borovikpv@mail.ru)

**METAL SEPARATION IN COLD CONDITION ON SHEARS WITH PARALLEL BLADES
PROCESS ANALYSIS**

Method of obtaining material stress-strain curves in simulation with the help of finite elements of metal separation process on shears in cold condition was suggested on the basis of known dependences. The comparison of simulation results with experimental data was done. The necessity of usage of conversion index for recalculation of tensile stress-strain from tensile state to shear was grounded. Calculations of conversion index for materials observed are defined, and regression model on its calculation is suggested. Dependences of plastic strain and strain rate on separate section from relative depth of blades in metal were offered.

Key words: *stress-strain curve, shears, conversion index, strain, strain rate.*

УДК 669.14.018.262

к.т.н. Кузнецов Д. Ю.

(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина, MChM-DonGTU@yandex.ru)

ВОССТАНОВЛЕНИЕ КРЕМНИЯ В СИСТЕМЕ МЕТАЛЛ-ШЛАК ПРИ ВНЕПЕЧНОЙ ОБРАБОТКЕ МАЛОКРЕМНИСТОЙ СТАЛИ В АКП

Приведены результаты лабораторных экспериментов по исследованию возможности протекания в условиях агрегата ковш-печь процессов алюминио- и карботермического восстановления кремния из SiO_2 рафинировочного шлака. Определена доля кремния, восстанавливаемого из кремнезема шлака при получении в агрегате ковш-печь низкоуглеродистой малокремнистой раскисленной алюминием стали, которая для процесса карботермии кремния углеродом графитированных электродов составляет 87–93%, а для процесса алюминотермии кремния алюминием, растворенным в металле, – 7–13%.

Ключевые слова: кремний, малокремнистая сталь, агрегат ковш-печь, шлак, карботермия, алюминотермия.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Присутствие в низкоуглеродистой стали, применяемой для глубокой и особо сложной вытяжки, минимального содержания кремния (на уровне следов) является неизменным требованием технологов-прокатчиков при производстве изделий для кузовов автомобилей, поскольку кремний повышает предел текучести и предел прочности, но вместе с тем снижает относительное удлинение стали [1]. Вместе с тем, в настоящее время среди технологов и ученых-металлургов нет единого мнения ни в вопросе определения главного источника и механизма поступления кремния в металл, ни в решении задачи удаления избыточного кремния при производстве малокремнистых автолистовых сталей.

Среди зарубежных металлургических предприятий, близким по условиям производства к современным украинским заводам, наибольший опыт по производству малокремнистой автолистовой стали накоплен в России.

Так, учеными Магнитогорского государственного технического университета были проведены исследования поведения кремния при внепечной обработке указанных сталей в агрегате ковш-печь (АКП) Магнитогорского металлургического комбината [2]. Заметный прирост содержания

кремния при обработке стали в АКП авторы связывают с раскислением расплава алюминием и активизацией процесса алюминотермического восстановления кремния из (SiO_2).

На Новолипецком металлургическом комбинате также проводились исследования по оптимизации технологии производства малокремнистой стали, предназначенной для оцинкованного листа [3]. Авторы считают, что превышение регламентированной концентрации кремния, прежде всего, связано с его вводом с ферросплавами и предлагают проводить его окисление при обработке металла.

Особенности внепечной обработки малокремнистой, раскисленной алюминием конвертерной стали рассматривались и технологами Западносибирского металлургического комбината [4]. По мнению авторов, глубина раскисления шлака на малокремнистых сталях, требуемая для эффективной десульфурации, ограничена именно восстановлением кремния из (SiO_2) и возможностью превышения его содержания над требуемым в готовой стали. Рост концентрации кремния в металле связывают как с его приходом из ферросплавов, так и восстановлением из (SiO_2)

шлака при раскислении алюминием в АКП.

В исследованиях, проведенных на Алчевском металлургическом комбинате, отмечено, что другой фактор, влияющий на процесс восстановления кремния, — длительность ковшевой обработки. Для получения требуемого содержания серы в низкоуглеродистой стали плавку обрабатывают в течение более длительного времени, что приводит к увеличению содержания в ней кремния, восстановителем которого может быть углерод графитовых электродов. Таким образом, источником восстановления кремния из (SiO_2) может быть также реакция его карботермии [5].

Постановка задачи. Целью данного исследования является экспериментальная проверка теоретических предположений о возможности протекания в АКП процессов алюино- и карботермического восстановления кремния из SiO_2 рафинировочного шлака, а также количественная оценка этих процессов.

Изложение материала и его результаты. Для достижения поставленной цели были проведены лабораторные исследования, в ходе которых изучалось поведение кремния в системе металл-шлак при отсутствии электродугового нагрева. При таком условии появляется возможность разделить процессы алюино- и карботермии кремния и оценить вклад каждого из них в общую величину прироста содержания кремния в металле.

При подготовке опытов десять образцов металла и шлака, отобранных в конце внепечной обработки малокремнистой автолитовой стали марки SAE 1006 в АКП, были помещены в специально подобранные алундовые тигли. Во всех опытах масса металла составила 160 г, а масса шлака 4 г, что соответствует соотношению масс металла и шлака в сталеразливочном ковше в реальных условиях в АКП ПАО «АМК» (кратность шлака 2,5), где толщина наводимого шлакового слоя поддерживается на 20–25% больше длины дуги для

обеспечения экономичной работы установки и снижения газопроницаемости шлака.

Металл и шлак нагревались в лабораторной криптоловой печи и выдерживались в расплавленном состоянии при температурах 1600–1680⁰С, характерных условиям внепечной обработки в АКП.

Для защиты металла и шлака от взаимодействия с окислительной средой окружающего воздуха тигли вводились в печь с помощью специальной оснастки, которая предусматривает подвод защитного газа (аргона) в полую огнеупорную подставку через патрубок, выполненный в подъемно-поворотном стенде печи и затем в жаровую трубу через сквозное отверстие в подставке. Отвод отходящих газов (аргона и продуктов горения криптола) обеспечивался с помощью вытяжного устройства печи.

В каждом из десяти проведенных опытов готовый расплав металла и шлака выдерживали в печи 20 минут, в течение которых проводили механическое перемешивание расплава огнеупорной алундовой палочкой. Это обеспечило усреднение расплава в пограничном слое между металлом и шлаком как при продувке аргоном в сталеразливочном ковше во время доводки стали в АКП.

После окончания опытов образцы металла и шлака охлаждали на воздухе, после чего проводили их химический анализ согласно стандартной методике. Полученный в результате исследования химический состав проб металла и шлака до и после проведения опытов приведен в табл. 1 и 2 соответственно.

На основании приведенных данных о химическом составе металла был отмечен незначительный прирост содержания кремния в стали (от 0,0009 до 0,0017%). Причем, как видно из табл. 1, он обусловлен только процессом алюинотермии кремния из кремнезема шлака, так как содержание углерода в металле осталось неизменным (0,036%), а содержание алюминия — уменьшилось (на 0,005–0,007%).

МЕТАЛУРГІЯ

Таблица 1 — Начальный и конечный химический состав проб металла

№ опыта	Компонент металла					
	C	Mn	Si	S	P	Al
Начальный, %	0,036	0,210	0,0090	0,011	0,007	0,024
Средний конечный, %	0,036	0,214	0,0105	0,010	0,007	0,018

Таблица 2 — Начальный и конечный химический состав проб шлака

№ опыта	Компонент шлака							
	FeO	SiO ₂	CaO	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	S	P ₂ O ₅
Начальный, %	0,93	8,12	56,15	5,90	0,31	28,07	0,49	0,03
Средний конечный, %	0,71	8,09	55,97	5,88	0,17	28,19	0,50	0,03

Расчет материального баланса опытов показал, что алюминий, растворенный в металле, израсходовался на восстановление оксидов железа, марганца и кремния, о чем свидетельствует как уменьшение их количества в покровном шлаке, так и увеличение количества (Al₂O₃) (табл. 1). Уменьшение содержания оксидов кальция и магния можно объяснить увеличением общей массы шлака (по данным материального баланса — на 0,3%) за счет прироста (Al₂O₃).

По результатам опытов с нагревом расплава металла и шлака в криптоловой печи (т.е. при отсутствии электродугового нагрева) среднее значение прироста содержания кремния в стали составило $\Delta Si_{Al} = 0,0015\%$ или 17% по массе.

Величина прироста содержания кремния на опытно-промышленных плавках малокремнистых автолитовых сталей с нагревом электрической дугой в АКП составляет $\Delta Si_{\Sigma} = 0,0131\%$ или 168% по массе. Результаты обработки паспортных данных этой группы плавок были приведены в работе [5].

Количество восстановленного в результате карботермии кремния ΔSi_C можно определить как разницу между общим количеством поступившего в металл кремния и количеством кремния, восстановленным в результате алюминотермии

$$\Delta Si_C = \Delta Si_{\Sigma} - \Delta Si_{Al} =$$

$$= 0,0131 - 0,0015 = 0,0116\%.$$

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что описанный ранее процесс алюминотермического восстановления кремния из шлака получает весьма слабое развитие (7–13% от общего количества восстановленного кремния), а основным источником восстановления кремния из шлака является процесс карботермии (87–93%), протекающий на границе раздела шлака и графитированных электродов АКП.

Для подтверждения этих данных были рассчитаны и сопоставлены доля шлака, который может участвовать в реакции карботермического восстановления кремния, и доля шлака, в котором существуют температурные условия для реакции карботермии кремния.

Согласно стехиометрии реакции карботермии кремния, масса кремнезема, участвующего в восстановлении 0,0116% кремния, составляет $\Delta M_{SiO_2} = 74,6$ кг. В то же время, при массе шлака около 6000 кг в нем содержится 720 кг SiO₂ (12%). Таким образом, доля кремнезема, участвующего в реакции карботермии кремния, от общего количества (SiO₂) составляет 10,4%. Исходя из этого, можно предположить, что доля шлака, который может участвовать в реакции карботермического восстановления кремния, также составляет около 10%.

С другой стороны, по данным работы [6] для трехфазных систем нагрева можно рассчитать площадь горячей зоны в облас-

ти горения дуг, в которой существует перегрев (градиент температуры) расплава.

Градиент температуры между столбом дуги и основным объемом расплава в ковше в данном случае составит

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 6175 - 1600 = 4575^\circ\text{C},$$

где t_1 — температура столба дуги, $^\circ\text{C}$;
 t_2 — температура основного объема расплава в ковше, $^\circ\text{C}$.

Площадь горячей зоны равна

$$F = \frac{\pi}{4} (D_{\text{эл}} + 4l)^2 = \\ = \frac{\pi}{4} (0,45 + 4 \cdot 0,2)^2 = 1,23 \text{ м}^2,$$

где $D_{\text{эл}}$ — диаметр электрода, м; l — длина дуги, м.

Согласно проведенным термодинамическим расчетам, температура начала реакции карботермии кремния в условиях АКП составляет около 1900°C . Если в первом приближении принять линейное распределение температуры в горячей зоне, то площадь горячей зоны с градиентом температуры

$$\Delta t = t_1 - t_2 = 6175 - 1900 = 4275^\circ\text{C}$$

будет пропорциональна общей площади горячей зоны и составит $1,15 \text{ м}^2$. Тогда объем шлака, в котором существуют температурные условия для реакции карботермии кремния, составит

$$V = Fh = 1,15 \cdot 0,2 = 0,23 \text{ м}^3,$$

где h — толщина слоя шлака, м.

Если объем шлака в ковше составляет в среднем $2,26 \text{ м}^3$, тогда доля шлака, в котором существуют температурные условия для реакции карботермии кремния, составляет $10,2\%$, что достаточно хорошо согласуется с результатом лабораторного эксперимента.

Полученные в ходе эксперимента данные подтверждаются также балансом расходования графитированных электродов при внепечной обработке стали в АКП.

Расход электродов в АКП ПАО «АМК» составляет в среднем $0,241 \text{ кг/т}$ стали или $72,3 \text{ кг/плавку}$. При этом необходимо учитывать, что часть углерода электродов расходуется на науглероживание металла. Для малокремнистых автолистовых сталей SAE 1006 и 1008 величина прироста содержания углерода в металле за время внепечной обработки составляет $0,0024\%$ или $7,2 \text{ кг}$ (за вычетом углерода, поступающего в расплав с ферромарганцем).

Поскольку на период прироста содержания кремния в металле (по данным паспортов внепечной обработки) приходится около 50% времени электродугового нагрева, то и расход электродов в этот период равен 50% от общего расхода, т.е. 36 кг , из которых на науглероживание металла расходуется 50% от количества углерода, поступающего в металл, т.е. $3,6 \text{ кг}$. Таким образом, на процессы карботермического восстановления в шлаке расходуется $32,4 \text{ кг}$ углерода, а на восстановление из шлака $0,0116\%$ или $34,8 \text{ кг}$ кремния согласно стехиометрии реакции карботермии кремния требуется $29,8 \text{ кг}$ углерода. Остальное количество углерода ($2,6 \text{ кг}$), вероятно, расходуется на восстановление металлов из других оксидов шлака.

Исключить хотя бы один из главных факторов (поступление кремнезема в рафинировочный шлак, электродуговой нагрев, интенсивное перемешивание металла), влияющих на процесс карботермического восстановления кремния, при существующих технологических условиях внепечной обработки малокремнистых автолистовых сталей в АКП и без значительных капитальных затрат не представляется возможным.

В связи с этим, разработанная автором технология проведения процесса силикотермии магния для удаления уже восстановленного и перешедшего в сталь кремния [7] является как технологически, так и экономически наиболее целесообразным путем решения задачи обеспечения регламентированного содержания кремния в малокремнистых автолистовых сталях.

Выводы и направление дальнейших исследований. Таким образом, наличие при доводке стали высокотемпературной области электрической дуги и необходимого количества углерода в качестве восстановителя обеспечивает протекание процесса карботермического восстановления кремния. Установлено, что количество кремния, вос-

становливаемого из шлака процессом алюминотермии, составляет 7–13% от общего количества восстановленного кремния, а процессом карботермии — 87–93%. Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование технологии доводки автолитовых сталей в АКП с использованием полученных результатов.

Бібліографічний список

1. Пройдак Ю. С. Технология выплавки и внепечной обработки особонизкоуглеродистых сталей для производства высокопластичной стали / Ю. С. Пройдак // МеталлИнформ. — 2007. — № 26–27. — С. 30.
2. Валиахметов А. Х. Особенности изменения содержания кремния в малоуглеродистой стали во время ковшевой обработки / А. Х. Валиахметов // Сталь. — 2004. — № 7. — С. 22–23.
3. Драгман А. И. Оптимизация технологии выплавки низкокремнистой и малосернистой стали / А. И. Драгман // Сталь. — 2005. — № 7. — С. 37–38.
4. Носов Ю. Н. Особенности десульфурации на АКП низкокремнистой, раскисленной алюминием конвертерной стали / Ю. Н. Носов // Сталь. — 2009. — № 2. — С. 17–19.
5. Кузнецов Д. Ю. Исследование поведения кремния при производстве малоуглеродистой стали / Д. Ю. Кузнецов, С. В. Куберский, Д. Б. Васильев, Д. В. Переяслов, А. С. Сергухин, А. В. Паченко // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск: ДонГТУ, 2007. — № 23. — С. 269–274.
6. Леушин А. И. Дуга горения / А. И. Леушин. — М.: Металлургия, 1973. — 240 с.
7. Кузнецов Д. Ю. Разработка технологии внепечной обработки автолитовых сталей с удалением кремния / Д. Ю. Кузнецов, С. В. Куберский, А. И. Ямполь // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск: ДонГТУ, 2011. — № 33. — С. 208–214.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Новохатским А. М., д.т.н., проф. ДонНТУ Смирновым А. Н.

Статья поступила в редакцию 16.06.14.

к.т.н. Кузнецов Д. Ю. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

ВІДНОВЛЕННЯ КРЕМНІЮ В СИСТЕМІ МЕТАЛ-ШЛАК ПІД ЧАС ПОЗАПІЧНОЇ ОБРОБКИ МАЛОКРЕМЕНИСТОЇ СТАЛІ В АКП

Приведені результати лабораторних експериментів по дослідженню можливості протікання в умовах агрегату ківш-піч процесів алюміно- і карботермічного відновлення кремнію з SiO_2 рафінувального шлаку. Визначена доля кремнію, відновлюваного з кремнезему шлаку при отриманні в агрегаті ківш-піч низьковуглецевої малокременистої розкисленої алюмінієм сталі, яка для процесу карботермії кремнію вуглецем графітованих електродів складає 87–93%, а для процесу алюмінотермії кремнію алюмінієм, розчиненим в металі, — 7–13%.

Ключові слова: кремній, малокремениста сталь, агрегат ківш-піч, шлак, карботермія, алюмінотермія.

Kuznetsov D. Y. Candidate of Technical Sciences (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

SILICON RECONDITIONING IN METAL-SLAG SYSTEM UNDER SECONDARY REFINING OF LOW-SILICA STEEL IN LADLE FURNACE

The results of laboratory experiments as to the research of possibility of aluminum and carbothermic silicon reconditioning from SiO_2 (refining slag) in ladle furnaces are introduced. The proportion of silicon, reconditioned from silica slag, obtained in ladle furnace from low-silica and carbon aluminum deoxidized steel, which for the process of karbothermity of silicon by carbon of graphite electrodes is 87–93%, and for the process of aluminothermy of silicon by aluminum dissolved in the metal — 7–13% is determined.

Key words: silicon, low-silica steel, ladle furnace, slag, carbothermy, aluminothermy.

UDC 669.431.6:66.087.2:519.87

*Candidate of chemical sciences
Smirnova I. V., Bozhanova E. S.
(DonSTU, Alchevsk, Ukraine)*

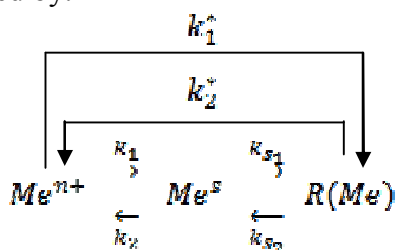
MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROREDUCTION OF METALS ON AMALGAM ELECTRODES OF LIMITED VOLUME

A mathematical model of electrode processes in systems with amalgam electrodes of limited volume is considered. The influence of the concentration values of the supporting electrolyte solution (background) on the peak height of dissolution is researched. The mechanism of the influence of the double electric layer on the kinetics of dissolution of metal amalgam is offered. Data obtained by mathematical model allow to calculate basic characteristics of amalgam extraction of valuable metals from metal-containing wastes.

Key words: mathematical model, amalgam electrodes of limited volume, double electric layer, metal-containing wastes.

A mathematical modeling of electrode processes in systems with amalgam electrodes of limited volume is performed in the research [1].

The scheme of amalgam electroextraction of a metal from low concentrated metal systems (wastes), dissolved in water, can be represented by:



where Me^{n+} — volumetric body (metal ions in the bulk solution); Me^s — surface body — metal (ion of metal) on the surface of the mercury foam; k_1 — kinetic constant of surface body formation Me^s ; k_2 — kinetic constant of separation Me^s from the surface of the mercury foam; k_{s1} — kinetic constant of metal reduction from the surface body Me^s ; k_{s2} — kinetic constant of metal tarnishing by surface body Me^s ; k_1^* — kinetic constant of metal reduction by free surface of

electrode; k_2^* — kinetic constant of metal tarnishing by free surface of electrode;

Hereinafter $k_2^* = k_a$.

This process is described by diffusion, surface and kinetic equations in the bulk solution and on the surface of the amalgam mercury-foam electrode and in its volume.

Dissolution of metal from amalgam is the basic stage of electroextraction of metals from aqueous multicomponent metal solution. Velocity of this stage (and of the whole process) depends first of all on scanning velocity of potential and kinetic constant of electroextraction. Provided that, characteristic of metal nature is peak potential.

Theoretical correlation of peak potential and kinetic constant of electrochemical dissolution stage of metal dissolution from amalgam is suggested in the work [2]:

$$\varphi_p = \frac{RT}{\beta Z F} \cdot \ln(\omega) + \frac{RT}{\beta Z F} \cdot \ln\left(\frac{l}{k_a} \cdot \frac{\beta Z F}{RT}\right), \quad (1)$$

where φ_p — peak potential; R — absolute gas constant; T — system temperature; β — coefficient of charge transfer; Z — body of

electrons taking part in electrode process; F — Faraday constant; ω — scanning velocity of potential; δ — thickness of electrode mercury foam.

Peak potential increases linearly with the logarithm of scanning velocity of potential. According to this correlation, the greater kinetic constant (i.e. to a lower activation energy of the process) corresponds to a smaller peak potential (more negative), and vice versa.

In the study of the influence of supporting electrolyte concentration value (background) in solution on the height of dissolution peak [3] it was discovered that change in concentration of the background causes also the potential shift of the peak. Moreover, increase of background concentration results in decrease of peak potential, accelerating the process of metal dissolution.

Figure 1 shows the correlation of peaks potentials φ_p and natural logarithm of scanning velocity $\ln(\omega)$ for ions Zn^{2+} , Cd^{2+} and Pb^{2+} . Linear correlations confirm formula (1). From the slope of these curves the value β can be estimated.

Such regularity at first sight seems paradoxical: background cations under the influence of the negative field of electrode concentrate at its surface, forming double electric layer (DEL), and must prevent metal ions yielding from amalgam.

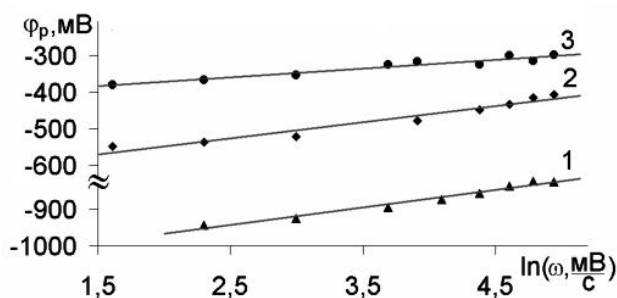


Figure 1 — Correlation of peak potential φ_p and $\ln(\omega)$ for ions Zn^{2+} (1), Cd^{2+} (2) and Pb^{2+} (3).

In addition, the rise of coefficient of charge transfer β under increasing of background concentration is discovered.

In the description of DEL it is divided into two parts: a dense layer comprising solvated counterions (CI), almost closely drawn to the electrode surface, and diffuse layer, formed by ions, located at a greater distance from the electrode, than CI. In highly concentrated solutions (more than 0.1 M), diffusion layer is practically absent: all ions DEL are concentrated in dense part [4]. In this case, the electrochemical kinetics of metal ions yielding from amalgam into solution is affected only by CI of the dense layer.

Metal in amalgam can be represented in the form of ions Me^{n+} , which, like mercury ions, are immersed into electron gas environment. The process of metal dissolution from amalgam into solution is stepwise. At first ion diffuses in the volume of mercury to its boundary (Figure 2, a) and takes marginal position (Figure 2b). Thus, it loses some of the kinetic energy and acquires a certain potential (surface) energy [5], which increases its time on the amalgam surface. In this position, the separation of the ion of metal from mercury is prevented by the activation barrier of ionization, which is reduced with approaching of the electrode potential to the potential of metal dissolution in the process of inversion. Removal of ion Me^{n+} from the surface of the amalgam occurs in the direction of reaction coordinate of its ionization. At decreasing of activation barrier ion Me^{n+} may take more remote location from mercury atoms penetrating into the volume of solution. Such penetration leads to a positive micropotential causing local rearrangement of the dense layer CI: background cations replace anions (Figure 2, b, c). To implement such rearrangement it is necessary that the time of metal ion remaining on the surface of electrode in the process of diffusion drift was much more than the time of rearrangement of the CI content in the field of micropotential. Thus penetrated into a dense layer anions create in turn negative potential ψ (Figure 2, c), which reduces the activation barrier of separation of metal ion from the surface of the mercury electrode. Detachment occurs at a distance δ , proportional to the radius of the solvated ion (Figure 2, c).

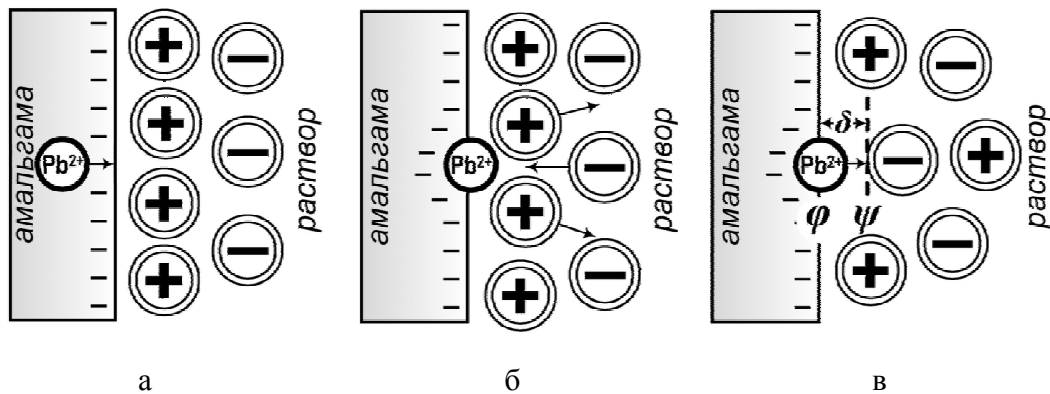


Figure 2 — Stages of the dense part DEL rearrangement in the process of metal dissolution from amalgam

The timing parameters can be estimated as follows. Period between the acts of diffusion drift of metal in the volume of amalgam is estimated as $\tau_v = \frac{s_{Hg}^2}{6D_{Pb(Hg)}} = \tau_0 \exp\left(\frac{W_v}{kT}\right)$ [5],

where $D_{Pb(Hg)}$ — diffusion coefficient of metal in amalgam, W_v — activation energy of drift act in the volume, k — Boltzmann constant, τ_0 — average period of the fluctuations in the position of temporary equilibrium, and s_{Hg} — average distance between the positions of temporary equilibrium, defined by interatomic distance in amalgam. Value s_{Hg} for mercury is approximately $3 \cdot 10^{-8}$ cm according to the evaluation by the formula:

$s_{Hg} = 3 \sqrt{\frac{\mu_{Hg}}{N_A \rho_{Hg}}}$ [5], where μ_{Hg} and ρ_{Hg} — molar mass and mercury density respectively, N_A — Avogadro's constant.

The time of metal ion remaining on the surface of mercury is estimated as $\tau_s = \tau_0 \exp\left(\frac{W_s}{kT}\right)$, where W_s — activation energy for the act of metal diffusion transition from the surface position to volumetric. The correlation of τ_s and τ_v is: $\frac{\tau_s}{\tau_v} = \exp\left(\frac{W_s - W_v}{kT}\right)$. Diminution of energies $W_s - W_v$ is defined by the surface tension coefficient of mercury

σ_{Hg} : $W_s - W_v = 2\pi r_{Pb}^2 \sigma_{Hg}$, where r_{Pb} — ion radius Me^{n+} , and $2\pi r_{Pb}^2$ — area of the hemisphere. Thus: $\frac{\tau_s}{\tau_v} = \exp\left(\frac{2\pi r_{Pb}^2 \sigma_{Hg}}{kT}\right)$.

Time of rearrangement τ_e of CI content in the field of micropotential can be estimated from the velocity of ion migration u in electric field with E intensity, connected by the relation: $u = bE$, where b — ion mobility [4]. E intensity of Coulomb field $2e$ of ion Me^{n+} (e — elementary charge) is defined by the formula: $E = \frac{2e}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2} = \frac{e}{2\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$, where ϵ_0 —

electrical constant, ϵ — relative dielectric constant of water, r — distance from Coulomb field. Thus: $u(r) = \frac{be}{2\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$. Differential

of ion displacement dr in time dt is equal to: $dr = u(r)dt = \frac{be}{2\pi\epsilon_0\epsilon r^2} dt$. Time of displacement

at distance from r_b to r_f (required time τ_e) is defined by integral:

$$\tau_e = \int_{r_b}^{r_f} \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon r^2}{be} dr = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{3be} (r_f^3 - r_b^3). \quad \text{Evaluation}$$

for the situation when background cation leaves the dense part of DEL passing the distance equal to the thickness of the dense layer h (wherein $r_b = h$, $r_f = 2h$) leads to the ex-

pression: $\tau_E = \frac{14\pi\epsilon_0\epsilon}{3be}h^3$. Value of h is usually considered to be equal to the sum of the diameter of the solvent molecules (diameter of water molecule is equal to 0.276 nm [6]) and ion radius [7].

It is possible to describe the dependence of peak potential of metal dissolution from potential ψ numerically, using the correlations outlined in the work [2]. Within the frames of two proved approximations a kinetic equation for the concentration of C_{Red} of reduced form of metal Red in the volume of amalgam was derived:

$$\frac{dC_{\text{Red}}}{d\varphi} = -\frac{k}{\omega\ell} C_{\text{Red}} \cdot \exp\left(\beta \frac{ZF}{RT} \varphi\right), \quad (2)$$

where: k — kinetic constant of ionization, ω — rate of potential inversion, ℓ — thickness of the mercury-foam electrode (MFE). Adopted approximations: Red concentration is constant across the width of mercury-foam electrode; analytical signal is generated only by ionization reaction. In view of potential impact $\psi(\varphi, C_f)$, which may generally depend on φ as well as on concentration of background electrolyte C_f , the expression (2) becomes [4]:

$$\frac{dC_{\text{Red}}}{d\varphi} = -\frac{k}{\omega\ell} C_{\text{Red}} \cdot \exp\left(\beta \frac{ZF}{RT} [\varphi - \psi(\varphi, C_f)]\right). \quad (3)$$

The second derivative of equation (3) can be written as:

$$\frac{d^2C_{\text{Red}}}{d\varphi^2} = \frac{k}{\omega\ell} \cdot \exp\left(\beta \frac{ZF}{RT} [\varphi - \psi]\right) \cdot \left[\frac{dC_{\text{Red}}}{d\varphi} + C_{\text{Red}} \cdot \beta \frac{ZF}{RT} \left(1 - \frac{\partial\psi}{\partial\varphi}\right)\right]. \quad (4)$$

Since the analytical signal is proportional to the derivative $\frac{dC_{\text{Red}}}{d\varphi}$, peak potential φ_p can

be found on condition that $\frac{d^2C_{\text{Red}}}{d\varphi^2} = 0$. Substitution in (4) the value of the derivative (3) and equating the result to zero determines the required formula for peak potential:

$$\varphi_p = \frac{RT}{\beta ZF} \ln\left(\beta \frac{ZF}{RT} \omega \frac{\ell}{k}\right) + \psi(\varphi_p, C_f) + \frac{RT}{\beta ZF} \ln\left(1 - \left(\frac{\partial\psi(\varphi_p, C_f)}{\partial\varphi}\right)_{\varphi_p}\right). \quad (5)$$

To test the experimental data the task of the certain type of a function $\psi(\varphi, C_f)$ is needed. In the classical works on electrochemistry a theoretical derivation of the equation of the double layer is outlined and approximate formulas for potential ψ are given. Unless taking into account weak dependence of ψ on the electrode potential, then in the case of 1–1-valent of background electrolyte with a high concentration for potential, created by anions, the following approximate formula is valid:

$$\psi \approx \psi_0 - \frac{RT}{F} \ln(C_f), \quad (6)$$

where ψ_0 — invariable. In this case, the functional dependence of peak potential on the concentration of the background electrolyte is as follows:

$$\varphi_p(C_f) = \frac{RT}{\beta ZF} \ln\left(\beta \frac{ZF}{RT} \omega \frac{\ell}{k}\right) + \psi_0 - \frac{RT}{F} \ln(C_f). \quad (7)$$

Thus, the proposed mechanism explains the influence of DEL on kinetics of dissolution of metal from amalgam, and mathematical model of dependence of the peak potential on the concentration of the background after its experimental confirmation will allow to calculate main characteristics of amalgam extraction of valuable metals from metal-containing wastes and evaluate ecological-economic efficiency of the use of metal-containing wastes as secondary raw materials.

References

1. Smirnova I. V. *Modeling of electrode processes in electrochemical methods of analysis: Monograph.* / I.V. Smirnova, V. V. Shelepenko, Z. P. Popovich. — Alchevsk : DonSTU 2010. — 145 p.

2. Shelepenko V. V. Approximation formula of symmetric anode analytical signal in stripping voltammetry with a mercury-foam electrode / V. V. Shelepenko, I. V. Smirnova, Z. P. Popovich // Ukr. chem. magazine. — 2010. — № 11. — P.17-22.

3. Identification of kinetics parameters of mass transfer processes in liquid multicomponent hetero-phase systems: Research report (final) / Donbass State Techn. University. — 173 GB; Number GR 0109U002510; Inv. № 0210U005439. — Alchevsk, 2010. — 254 p.

4. Stromberg A. G., Semchenko D. P. Physical Chemistry. — Moscow: Higher School, 2001.—527 p.

5. Bogoslovskiy S. V. Physical properties of gases and liquids: Teaching aid / SPbSUAI. St. Petersburg., 2001. — 73 p.

6. Chemical Encyclopedia: in 5 v: V. 5: Tryptophan - Yatrochemistry / Editorial Board: Jefirov N. S. (chief ed.) and others. — M. Great Russian Encyclopedia, 1998. — 783 p.

7. Salem R. R. Double layer theory. — M.: FIZMATLIT, 2003. — 104 p.

**Recommended to printing by Doctor of Engineering Science, Prof Novokhatskiy A.,
Doctor of Engineering Science, Prof. of NMA Ukraine Boitchenko B.**

Received on 18.06.14.

к.х.н. Смирнова И. В., Божанова Е. С. (ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОВОССТАНОВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ НА АМАЛЬГАМНЫХ ЭЛЕКТРОДАХ ОГРАНИЧЕННОГО ОБЪЕМА

Рассмотрена математическая модель электродных процессов в системах с амальгамными электродами ограниченного объема. Исследовано влияние величины концентрации раствора индифферентного электролита (фона) на высоту пика растворения. Предложен механизм влияния двойного электрического слоя на кинетику растворения металла из амальгамы. Полученные с помощью математической модели данные позволяют рассчитать основные характеристики амальгамного извлечения ценных металлов из металлосодержащих отходов.

Ключевые слова: математическая модель, амальгамные электроды ограниченного объема, двойной электрический слой, металлосодержащие отходы.

к.х.н. Смирнова І. В., Божанова О. С. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОВІДНОВЛЕННЯ МЕТАЛІВ НА АМАЛЬГАМНИХ ЕЛЕКТРОДАХ ОБМЕЖЕНОГО ОБ'ЄМУ

Розглянута математична модель електродних процесів в системах з амальгамними електродами обмеженого об'єму. Досліджено вплив величини концентрації розчину індиферентного електроліту (фону) на висоту піку розчинення. Запропонований механізм впливу подвійного електричного шару на кінетику розчинення металу з амальгами. Отримані за допомогою математичної моделі дані дозволяють розрахувати основні характеристики амальгамного вилучення цінних металів з металовмісних відходів.

Ключові слова: математична модель, амальгамні електроди обмеженого об'єму, подвійний електричний шар, металовмісні відходи.

УДК 902

к.и.н. Бровендер Ю. М., к.г.н. Шубин Ю. П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина, brovender@mail.ru)

ГОРНАЯ АРХЕОЛОГИЯ: К ВОПРОСУ О ПОНЯТИЙНОМ АППАРАТЕ

Рассматривается терминология нового в Украине междисциплинарного знания — горной археологии, получившего с начала нынешнего столетия, благодаря совместным усилиям археологов и специалистов различных естественнонаучных знаний, и прежде всего геологов, работающих в восточных областях Украины, активное развитие. Объектом исследования этого нового для украинской исторической науки знания является производственная деятельность массивов населения, функционирующих на территории богатой рудами различных металлов, а также иными минералами, разрабатываемой в древности. Предметом исследования горной археологии являются расположенные на этой территории памятники производственной деятельности — горные выработки, техногенные участки по обогащению руд, поселения горняков и горняков - металлургов. Комплексный анализ источников эпохи палеометалла, происходящих с рудной территории Донбасса и представляющих все циклы металлопроизводственной деятельности, а также материалов, связанных с бытовой и духовной составляющей эти памятники позволяет получить максимально полную информацию для воссоздания целостной картины древней металлопроизводственной деятельности в эпоху палеометалла.

Ключевые слова: горная археология, геоархеология, горно-металлургический центр, производственная деятельность, горное дело, обогащение, металлургия, металлообработка.

Новый этап в изучении металлопроизводства Донецкого горно-металлургического центра эпохи бронзы (ДГМЦ), как впрочем, и металлопроизводства эпохи бронзы восточноевропейской степи и лесостепи в целом, характеризуется активностью исследовательского поиска, базирующегося на взаимодействии с различными отраслями знаний (техническими, естественнонаучными).

В последнее время становится все более очевидным, что степень изученности металлопроизводства ДГМЦ в значительной степени предопределяет характер осмысления производственной деятельности населения эпохи бронзы всего восточноевропейского региона.

Проблема металлопроизводства всегда являлась одной из наиболее активно исследуемых тем в европейской, как, впрочем, и мировой археологии. Комплексные исследования по изучению древней производственной деятельности, результативность которых обеспечила решение ряда важных проблем, связанных с металлопроизводством, способствовали рождению

и активному развитию таких новых отраслей археологического знания как археометаллургия, геоархеология, горная археология.

Археологические раскопки древних горных выработок и масштабного техногенного участка по обогащению медной руды на Картамышском горно-металлургическом комплексе в Донбассе, фактически положили начало новому направлению в украинской археологии — горной археологии. Размах археологических полевых исследований на комплексе памятников Картамышского микрорайона, охвативших площадь около 1500 м² дали многочисленные свидетельства древней производственной деятельности, в т.ч. горного дела, металлургии и металлообработки. Следует отметить, что культурные напластования на таком памятнике Картамышского горно-металлургического комплекса как техногенный участок рудника Червонэ озеро-I превышают 2 м. Пред-

© Бровендер Ю. М., 2014

© Шубин Ю. П., 2014

ставление о масштабах производственной деятельности создают и впечатляющие размеры горных выработок на территории ДГМЦ, в т.ч. и на территории Картамышского археологического микрорайона памятников эпохи бронзы.

Осмысление источников и полученной информации стало возможным в рамках различных научных направлений, базирующихся на арсенале всевозможных естественнонаучных методов исследования. Не удивительно, что стремление к комплексному изучению древней металлопроизводственной деятельности, где каждый ее цикл является звеном сложного производственного процесса, требующего от непосредственных его участников не только значительных физических усилий, но и высокого уровня профессиональной подготовки, диктовало необходимость объединения всех знаний по поводу металлопроизводства в единую систему, которая могла бы стать теорией древнего металлопроизводства. Формирование этой отрасли археологического знания, названной А. Д. Пряхиным палеометалловедением, по праву принадлежит Е.Н. Черных [23]. Базовой же отраслью палеометалловедения как комплекса знаний о древнем металле является горная археология.

Горной археологией широко используются методы исследований различных междисциплинарных знаний, объектом исследования которых являются свидетельства древней производственной деятельности. Так, геолого-минералогические и минералого-геохимические методы, являющиеся основными методами геоархеологии, являются базовыми методами и горной археологии [14]. Изучение вещественного состава минерального сырья, промежуточных и конечных продуктов переработки и обработки лежат в основе реконструкций технологического процесса в области древнего горного дела и металлургии, то есть, в своей основе, горной археологии — отрасли археологии, решающей широкий круг вопросов производ-

ственной горно-металлургической деятельности в пределах территорий такой специализации. Последняя, базируется на методах не только геологии, но и горного дела, а также металлургии.

В последнее время все отчетливее становится понимание того, что изучение археологических материалов — свидетельств древней производственной деятельности (орудий труда, руд, металлов, шлаков, штейнов и т. д.) геологическими методами позволяет не только выполнять реконструкцию древнего производственного процесса, но и решать вопросы сугубо геологического характера, прежде всего — привязки вещественных свидетельств производственной деятельности к сырьевой базе [40].

Таким образом, горная археология, как и геоархеология — сформировавшиеся отрасли знания на основе применения методов геологии, горного дела и металлургии к археологическим объектам.

Результаты многолетних исследований памятников древней производственной деятельности в горнорудных областях Восточной Европы, среди которых значительное место занимают памятники ДГМЦ, начало изучению, которых, положили исследования С.И. Татаринова [27], стимулируют активность процесса становления в Украине этой новой отрасли археологии, а в широком смысле - исторического знания — горной археологии.

Становление любой отрасли научного знания невозможно вне разработки понятийного аппарата — одного из важнейших инструментов научного познания, как, впрочем, и одного из атрибутов научного знания. Руководствуясь этой методологической установкой, еще в 60-е годы XX века Е.Н. Черных предпринял попытку привести употребляемые археологами термины, касающиеся проблемы металлопроизводства в некую систему. Тогда же он попытался дать определение и наиболее часто употребляемым понятиям [30].

Фактически, публикация Е.Н. Черных 1967 года явилась единственным развернутым теоретическим исследованием, посвященным понятийному аппарату, связанному с проблемой древнего металлопроизводства. Небольшие комментарии отдельным понятиям: очаг, провинция, зона, а также ключевым понятиям горной археологии, в виде характеристики отдельных типов горнопроходческих работ и их следов — шахт, штолен, разносков, провалов даны Е.Н. Черных в нескольких последующих работах [31, с. 166-168; 32, с. 262-263; 35, с. 25-30].

Некоторые попытки создания теоретической базы для геоархеологии в виде определения базовых понятий, используемых при характеристике древнего металлопроизводства, предприняты коллективом российских исследователей под руководством В.В. Зайкова [14, с. 256-263].

В целом же, следует заметить, что теоретические основы палеометалловедения, заложенные Е.Н. Черным в 60-е годы ушедшего столетия, среди которых прослеживаются и базовые понятия горной археологии, к сожалению, не получили дальнейшего развития. Сложившаяся ситуация в определенной степени сдерживала развитие исследовательской мысли по ранним этапам металлопроизводства населения восточноевропейской степи и лесостепи, несмотря на имеющийся, а также постоянно увеличившийся арсенал источников.

Одним из наиболее общих и часто употребляемых понятий в оценке древней производственной деятельности является понятие «металлопроизводство». Под металлопроизводством (в узком смысле) авторы понимают совокупность последовательных, тесно связанных между собой технологических операций или производственных циклов, конечным результатом которых является получение продукта — металла. Такими технологическими операциями в производстве металла является добыча руды (горнодобывающий цикл), обогащение (гор-

нообогащительный цикл) и металлургия (металлургический цикл). Эта цепь производственных операций в системе металлопроизводства дополняется металлообработкой (металлообрабатывающий цикл). Таким образом, в широком смысле металлопроизводства, в нашем понимании, кроме добычи медной руды, ее обогащения, а также металлургии включает и обработку металла с целью получения готовых к использованию изделий [6, с. 77].

Горнодобывающий и горнообогащительный циклы производственной деятельности объединяются общим понятием горное дело (горнорудный этап металлопроизводства). Под горным циклом при разработке медных руд мы понимаем комплекс работ по извлечению полезных ископаемых из земных недр и их первичную переработку, а также мероприятия, связанные с горными технологиями

Горнодобывающий цикл является начальным в цепи горнорудного этапа металлопроизводства. Он представляет собой комплекс горнопроходческих мероприятий (вскрышных работ) по проведению, креплению и поддержанию горных выработок, направленных на выемку (добычу) полезных ископаемых на поверхность путем техногенного воздействия на земную кору. Работы, которые производятся при выемке полезного ископаемого или породы называются горными работами. В результате ведения горных работ в толщах земной коры образуются пустоты (полости), которые называют горными выработками.

Как свидетельствуют памятники горного дела эпохи бронзы, исследованные в различных горнорудных районах Восточной Европы горные выработки весьма разнообразны по своей форме, назначению и расположению. Различают выработки открытые, примыкающие к поверхности и имеющие незамкнутый контур поперечного сечения, и подземные — с замкнутым контуром поперечного сечения, расположенные на некоторой глубине от поверхности [15, с. 8]. Заметим, что горные выра-

ботки, проведенные в недрах, независимо от того, имеют они выход на поверхность или нет, называются подземными, а проведенные на поверхности — открытыми (карьерами). На территории ДГМЦ особой выразительностью и великолепной степенью сохранности отличаются горные выработки на Картамышском рудопроявлении.

Штрек, квершлаг, штольня — типы горизонтальных горных выработок.

Штрек — горизонтальная горная выработка, не имеющая непосредственного выхода на земную поверхность и проводимая по простиранию пласта или залежи полезного ископаемого. При горизонтальном залегании пласта или залежи штрек проводят в любом направлении, т.к. горизонтальные пласты не имеют ни простиранья, ни падения. Квершлаг — горизонтальная горная выработка, не имеющая непосредственного выхода на земную поверхность и проводимая по пустым породам вкрест простиранья или под углом к простиранию месторождения. Штольня — горизонтальная выработка, имеющая непосредственный выход на земную поверхность [15, с. 8-10].

Одним из базовых понятий в оценке производственной деятельности ДГМЦ, как и любого другого горно-металлургического центра, где горное дело является одним из его составляющих, есть понятие «рудник». Некорректное понимание данного термина, зачастую приводит исследователей к заблуждениям. Так, для некоторых исследователей «горная выработка» и «рудник» — слова-синонимы. Понятно, что в таком случае количество горных выработок совпадает с количеством рудников. Такие представления, в итоге, искажают видение масштабов, как впрочем, и характера производственной деятельности в древности.

В свете представлений современной горной науки под рудником (шахтоуправлением) понимают несколько шахт и поверхностных цехов, объединенных еди-

ным административно-хозяйственным управлением, имеющим общее централизованное хозяйство по переработке и отправке полезного ископаемого [15, с. 13]. Таким образом, под древним рудником следует понимать совокупность функционирующих в одно время на территории одного конкретного рудопроявления горных выработок или даже одного масштабного по площади карьера с поверхностными производственными (техногенными) участками по обогащению полезного ископаемого, представляющих собой единый производственный комплекс. Иными словами рудник — производственный комплекс одновременно функционирующих на одном рудопроявлении различных подземных и наземных объектов по проходке, добычи рудного тела, а также его обогащения.

В этой связи, становится очевидным, что количество рудников, определяемых исследователями в абсолютных величинах, относительно. Условными являются сами понятия «рудник» и «рудники» на территории одного рудопроявления, которые даются исследователями до масштабно проведенных работ на площади всего археологического микрорайона, составной частью которого они являются.

С учетом сказанного, при анализе производственной деятельности древнего населения в пределах конкретного рудопроявления корректнее говорить о количестве горных выработок, дифференцируя их по типам, оставляя на будущее решение вопроса о количестве функционировавших на территории рудопроявления рудников. Не удивительно, почему Е.Н. Черных при характеристике масштабов производственной деятельности на Каргалинском рудном поле оперирует понятием горная выработка. Понятие рудник в данном случае им не употребляется [35, с. 25–38]. С достаточной осторожностью к этому понятию относился один из ведущих специалистов по древнему горному делу и металлургии Центрального Казахстана А.Х.

Маргулан [17]. В отношении Картамышского археологического микрорайона, на территории которого проведены масштабные археологические раскопки, есть основания предполагать функционирование его памятников, по крайней мере, рудников Червонэ озеро-I, Червонэ озеро-III, Червонэ озеро-IV, техногенного участка рудника Червонэ озеро-I, а так же поселений Червонэ озеро-1 и Червонэ озеро-3 как единого производственно-бытового комплекса.

Целью горных работ, следы которых оставлены древними горняками на территории ДГМЦ являлась добыча медной руды и выдача ее на поверхность для дальнейшей переработки и ее использовании. Рудой называют природное минеральное образование, содержащее один или несколько металлов в концентрациях, при которых экономически целесообразно и технически возможно их извлечение. Руда образует сплошные рудные массы, вкрапленные и прожилковые тела, а также локальные скопления (псевдоморфозы и конкреции). На территории ДГМЦ в эпоху бронзы использовались как окисленные, так и сульфидные руды. Сырьем для металлургического производства являлись и смешанные руды [25, с. 268].

Горно-добывающий цикл в системе металлопроизводства дополняется комплексом технологических операций, связанных с обогащением полезного ископаемого (горно-обогащительный цикл). В совокупности они представляют горнорудный этап процесса производства металла. Под обогащением руд понимается стадия обработки руды, при которой отделяются ценные минералы, с использованием дробления и измельчения. На этой стадии природные минералы не претерпевают вещественных преобразований. Первоначально, путем дробления отделяются полезные минералы от пустой горной породы. Данная операция, как об этом свидетельствуют материалы исследований рудников на территории Бахмутской котловины, осуществлялась на участках, расположенных непо-

средственно у самих горных выработок (рудопроявление Картамыш). В результате обогащения руды получают концентраты и отходы — хвосты. Следует отметить, что сам процесс обогащения, как об этом свидетельствуют материалы Картамышского археологического микрорайона, осуществлялся в три этапа: 1) первичное отделение полезного минерала от пустой породы у самих горных выработок; 2) измельчение полезного минерала (руды) до фракции, пригодной для выплавки и 3) водное обогащение.

Первый этап обогащения, как об этом было сказано выше, осуществлялся у самих выработок (Червонэ озеро-IV), либо на породных отвалах древних карьеров (Червонэ озеро-I). Второй и третий этап обогащения производился на специализированных участках (техногенных), где имелся доступ к воде. В обоих случаях образовывались отходы. Если в первом случае отходы представляли собой преимущественно крупные обломки горной породы, то во втором и третьем — перетертый в песок медистый песчаник с характерной медной зеленью.

Третий (заключительный) этап обогащения медных руд базировался на знаниях древними рудокопами различных физических свойств полезного минерала и материала вмещающих пород. Проявлялись они в использовании гравитационного и флотационного способов водного обогащения руды.

Флотация — процесс разделения мелких частиц минералов, основанный на различии их смачиваемости водой. При флотации пузырьки газа прилипают к плохо смачиваемым водой частицам и поднимают их к поверхности. Гравитационный способ обогащения (отсадка) заключается в отделении тяжелой руды от легкой пустой породы.

Поскольку халькозин — минерал, является одним из самых устойчивых сульфидов в зоне окисления, разрабатываемые в

древности медные руды, содержали значительную долю сульфидных руд.

Заметим, что в процессе дробления (измельчения), халькозин, являясь мягким и хрупким минералом, в значительном количестве переходит в порошковидную массу. Обладая плохой смачиваемостью, в водной среде эта масса всплывает на поверхность (флотация), и такой пенный концентрат медных руд можно было снять костяными орудиями, массово представленными на техногенных участках (Картамыш). Его сбор осуществлялся в деревянных мисках, либо в керамических сосудах, найденных на техногенном участке рудника Червонэ озеро-I как внутри водосборной (технологической) канавы – ямы, так и возле нее [3; 5].

Оставшаяся более крупная фракция руд могла отделяться гравитационным способом, так как плотность медного минерала примерно в два раза превышает плотность породообразующих рудовмещающих минералов. При этом важную роль продолжали играть те же костяные орудия, которые были задействованы во флотационном способе обогащения руды. Здесь они выполняли уже функцию своеобразных «мешалок» во время сепарации смешанных объемов разнородных частиц твердых минералов и породообразующих рудовмещающих минералов в водной среде. Можно себе представить, что данная операция, как об этом свидетельствуют микроизнос рабочих поверхностей костяных орудий, осуществлялась в кожаных мешках [13].

Таким образом, конечным результатом осуществляемого на техногенных участках горно-обогатительного цикла, как об этом свидетельствуют материалы Картамышского археологического микрорайона, являлась подготовка рудного концентрата, готового для металлургической выплавки.

Значительное количество орудий для измельчения руды, осуществление комплекса трудоемких технологических операций, демонстрируют важность горно-обогатительного цикла древнего металло-

производства. Затраты на подготовительные процедуры, включая обогащение руды, в итоге компенсировались значительной экономией ресурсов, прежде всего топлива, при выплавке металла из руды, а также, что особенно важно, обеспечивало необходимое качество металла [41, р. 91].

Высококачественная обогащенная руда, полностью готовая для металлургического производства являлась продукцией всех производственных комплексов, образующих ДГМЦ. И в этом заключалась его предназначение.

Следующим за горно-обогатительным циклом, по сути являющимся кульминационным в цепи металлопроизводства - этапом рождения металла, а на территории ДГМЦ, значительно уступающий горнорудному циклу, является металлургический цикл производственной деятельности.

В технологическом отношении, без всякого сомнения, металлургический цикл является самым сложным среди остальных циклов в системе древнего металлопроизводства. Нет сомнения в том, что процесс получения металла путем осуществления целого ряда технологических операций требовал от его участников соответствующих знаний и высокого уровня профессиональной подготовки, тем более, что плавильный процесс мог осуществляться лишь при достижении высоких температур (1200⁰ и выше). Не лишним будет отметить, что древняя металлургия, как впрочем, и древнее горное дело являются еще очень слабо изученными археологической наукой проблемами [35], а потому их изучение, осуществляемое на базе значительно возросшей источниковой базы, особенно в последнее время в связи с исследованием Каргалинского, Картамышского и Михайло-овсянковского горно-металлургических комплексов эпохи бронзы, является весьма актуальным.

В настоящее время существуют десятки дефиниций понятия «металлургия». Однако, к сожалению, большинство из них не имеют четкости определения, способного

отличить металлургический цикл от других тесно связанных с ним циклов, особенно от металлообрабатывающего.

Выход из сложившейся ситуации, как нам представляется, лежит в четкости определений понятий, в т.ч. понятия «металлургия», «металлообработка», оперирование которыми позволяет исследователям четко дифференцировать свидетельства производственной деятельности, связывая их с конкретным циклом древнего металлопроизводства.

Обобщая существующие в металлургии как области науки и техники определения и предпринимая попытку дифференцировать достаточно близкие, но не тождественные понятия (технологические процессы) «металлургия» и «металлообработка», считаем целесообразным под металлургическим процессом в металлургии меди понимать все вещественные преобразования медных руд, связанные с их термической обработкой (предварительный окислительный обжиг и, собственно, металлургический передел) вплоть до получения слитка черновой, либо чистовой меди, либо бронзы.

К источникам металлургического цикла производственной деятельности следует относить остатки теплотехнических конструкций (в т.ч. ошлакованный камень), ошлакованную керамику (плавильные емкости), отходы металлургического производства (шлак, штейн), а также медные слитки. Заметим, что медные слитки должны сопровождаться иными находками, связанными с металлургическим циклом. Наличие слитков в культурном слое памятника при отсутствии иных свидетельств металлургического производства (например, ошлакованной керамики или шлака и т.д.) могут свидетельствовать не о металлургическом, а о металлообрабатывающем цикле металлопроизводства.

Одними из наиболее выразительных источников металлургического цикла древнего металлопроизводства являются шлак и штейн.

А.Д. Пряхин отмечает, что в настоящее время в археологии отсутствуют четкие критерии для определения объемов производственной деятельности в рамках отдельного специализированного на металлопроизводстве памятника [23, с. 77]. В значительной степени это объясняется определенными сложностями в визуальной дифференциации металлургического и металлообрабатывающего шлака. В выяснении этого вопроса авторы разделяют мнение С.А. Григорьева, обработавшего колоссальные коллекции древнего шлака с памятников Северной Евразии [11]. Согласно его наблюдениям лишь единичные образцы, причем фиксируемые лишь на внутренней поверхности плавильной чаши в виде легкой корки, могут быть связаны с металлообработкой [12, с. 123].

Серия проведенных экспериментальных плавов медных руд Картамышского рудопоявления дает основание считать шлак и штейн отходами металлургического производства в древности.

Древний шлак — легкий, многокомпонентный, силикатный (60-80% SiO_2) продукт металлургического передела медных руд, состоящий в основном из легкого стекловатого силикатного материала разной степени пористости, имеющего зеленоватую и буроватую окраску, имеет четко выраженную границу раздела с нижележащим штейном в своей основе неметаллический расплав.

Древний штейн — продукт металлургического передела медных руд, черного цвета, тяжелый, состоящий из окислов железа, титана, марганца и хрома. Непосредственно примыкающий к слитку меди штейн часто имеет форму медеплавильной емкости, обычно образует плитки (толщиной 3 – 10 мм) черного цвета и полуметаллическим блеском с четко очерченными поверхностями. Он содержит многочисленные вкрапления меди и переплавленных сульфидных руд (содержание SiO_2 40 – 45 %).

Завершающим этапом в цепи металлопроизводства (в широком смысле), являет-

ся металлообрабатывающий цикл. К металлообработке авторы относят все последующие технологические процессы на пути изготовления конкретных металлических изделий, в т.ч. придание металлу определенной формы путем применения литейных форм, а также последующих этапов термо-физической обработки (закалка, отжиг, проковка и т.д.), придающие изделию окончательную необходимую форму и прочностные характеристики. Среди источников металлообрабатывающего цикла выделяются литейные формы, льячки, наковальни, молоточки-чеканы, абразивы. Данная группа орудий на памятниках ДГМЦ не многочисленна и в количественном отношении она значительно уступает орудиям горнорудного цикла, особенно горно-обогатительного. Подобная ситуация, когда орудия горнорудного цикла являются доминирующими среди орудий представляющих иные циклы металлопроизводства, характерна и для поселения Горный Каргалинского ГМЦ, а также горно-металлургического комплекса Михайло-Овсянка. Однако в отличие от Картамыша и Михайло-Овсянка, где основная коллекция выявленных орудий связана с горно-обогатительным циклом, на Каргалах большинство их представляют горнодобывающий цикл [36, с. 100].

Таким образом, на Картамышском комплексе горно-металлургических памятников, как и на других памятниках ДГМЦ, расположенных в зоне медных рудопроявлений Бахмутской котловины Донбасса присутствуют свидетельства, представляющие все циклы древнего металлопроизводства: горный, горно-добывающий, металлургический и металлообрабатывающий. Наиболее многочисленными среди них являются свидетельства горного и горно-обогатительного цикла. Так, прослеженные на Картамыше масштабы добытой и обогащенной руды [9], как впрочем, и на других рудопроявлениях уже сейчас дают основание предполагать, функционирование памятников на рудной территории Донецкого

кряжа преимущественно в системе горнорудного дела. Аналогичная специализация наблюдается и на других горно-металлургических комплексах восточноевропейского региона — Михайло-Овсянка [18, с. 78] и Каргалы [35, с. 86].

Функционирование полного цикла древнего металлопроизводства и даже визуально фиксируемые значительные масштабы древних горных работ в зоне медных рудопроявлений Бахмутской котловины, дает основание утверждать о существовании в эпоху бронзы на севере Донецкого кряжа достаточно мощного горно-металлургического центра.

Понятие горно-металлургический центр широко используется исследователями, однако до настоящего времени его определение отсутствует. По сути открытым остается и содержание этого понятия. В итоге территория ДГМЦ на карте горно-металлургических областей и центров обозначается значком под названием «медистые песчаники на Донце» [30, с. 298 рис. 1], а территория ДГМЦ, по мнению некоторых исследователей охватывает пространства, далеко выходящие за рамки рудной базы

Так, Е.Н. Черных, вводя в научный оборот понятие горно-металлургический центр (ГМЦ), понимал рудную территорию, отделенную от других аналогичных территорий безрудными зонами. В совокупности, обширнейшие пространства в десятки и сотни тысяч квадратных километров, где рудные зоны чередуются с безрудными, были объединены Е.Н. Черных понятием горно-металлургическая область (ГМО). Отличия между ГМЦ и ГМО Е.Н. Черных видит лишь в их масштабности [30, с. 298-299].

К сожалению, сложно назвать содержательным определение понятия ГМЦ, данное С.И. Татариновым, являющийся автором выделения Донецкого горно-металлургического центра [26]. В своем диссертационном исследовании в словаре основных терминов С. И. Татаринов дает следующее определение Донецкого ГМЦ: «ДГМЦ в эпоху меди-бронзы объединял ме-

сторождения медных и полиметаллических руд, разработки-рудники, стоянки-мастерские горняков-металлургов с медноплавильными печами, кратковременными и долговременными жилищами, обычные и специализированные поселения» [28, с. 5].

Горно-металлургический центр — одно из ключевых понятий в изучении проблемы производственной деятельности. Представление о нем с позиций комплексной оценки в рамках Днепро-Донского региона определяет направление исследовательского поиска в решении проблемы древнего металлопроизводства.

В нашем понимании Донецкий горно-металлургический центр эпохи бронзы это комплекс специализированных на металлопроизводстве памятников бронзового века, расположенных в зоне доступных для разработки древним населением медных рудопроявлений Бахмутской котловины и функционирующих преимущественно в системе горного дела. Географически занимая центральное положение на территории Днепро-Донского региона — обширной производственной зоны в эпоху бронзы, Донецкий горно-металлургический центр обеспечивал медным концентратом в эпоху поздней бронзы — период наиболее активного развития производственной деятельности на громадных пространствах Евразии как специализированные поселения металлургов-литейщиков (типа Усова озера), расположенные в долинах крупных рек богатых лесом (топливом) и являющиеся главными потребителями продукции ДГМЦ, так и небольшие мастерские, работающие на поселениях в рамках мелкомасштабного производства (Ильичевка, Капитаново-I, Капитаново-II, Лиманское озеро-2 и др.). Основной продукцией ДГМЦ являлись не металлические изделия и даже не слитки, а обогащенная медная руда (концентрат) — сырье для металлургического производства. Есть основания предполагать, что переплавленная уже за пределами ДГМЦ руда в слитки, или готовые металлические изделия распространялись на территории Днепро-Донского ре-

гиона через поселки - фактории (типа Капитаново-1), расположенные вдоль торговых путей [4, с. 229]. Не удивительно, что на таких факториях встречаются материалы, типичные как для восточной окраины этой обширной производственной зоны (Подонье), так и западной ее окраины (Поднепровье). Потребителями донецкого металла являлись литейные мастерские — специализирующиеся на производстве металлических изделий, представляющие собой сферу деятельности как отдельных мастеров в рамках мелкомасштабного производства, так и производственную деятельность специализированных на металлообработке поселений в рамках крупномасштабного производства (типа Мосоловского поселения на р. Битюг). Наличие коллекции литейных форм и их заготовок на поселении Червонэ озеро-3 из хлорит-талковой породы, по результатам исследований И.С. Никитенко криворожского происхождения [19, с. 103]. В комплексе с керамикой воннигского типа на поселениях бережновско-маевской срубной культуры Донецкого края (памятники Картамышского, Клиновского рудопроявлений, Степановка) [7; 10; 27], также известной в Поднепровье [39, с. 18], они дают основание предполагать, что обогащенная медная руда с Картамышского рудопроявления, как впрочем, и с других рудопроявлений ДГМЦ, транспортировалась и в Поднепровье, где возможно также функционировали как специализированные поселки металлургов-литейщиков, в рамках крупномасштабного производства, так и поселки с литейными мастерскими, обсуживающими небольшие группы населения, проживающие как в самом поселке, так и на прилегающей округе. Заметим, что на поселении Усово озеро, которое, по мнению большинства исследователей, являлось основным потребителем Донецких медных руд, литейные формы из хлорит-талковой породы не известны [1]. Иная ситуация прослеживается на поселении покровско-мосоловской срубной культуры Капитаново-1, которое рассматривается нами как своеобразная фактория, специализирую-

щаяся на операциях с металлом. В отличие от Усово озеро на Капитаново-1 найдены изделия восточного (Подонье) и западного (Поднепровье) облика в рамках Днепро-Донского региона, в т.ч. и литейные формы из хлорит-талковой породы, а также аморфные обломки этой породы.

О территории распространения продукции ДГМЦ исследователи говорили неоднократно. При этом очерчивался регион, в котором основными потребителями являлось население, обитающее в Подонцовье, Приазовье, Поднепровье и Подонье [1, с. 72-74; 5; 29, с. 54; 27; 22; 23; 21]. Нет сомнения в том, что металлопродукция, изготовленная из руд Донбасса, имела распространение и за пределами Днепро-Донского региона. Так, В.В. Отрощенко проявления ДГМЦ в виде металлических изделий усматривает и в Западном Причерноморье [21, с. 218], на территории, расположенной за пределами Евразийской металлургической провинции. В отличие от ДГМЦ, где имел место полный цикл древнего металлопроизводства (горнорудный, металлургический и металлообрабатывающий), за его пределами в рамках Днепро-Донской производственной зоны, производственная деятельность фиксируется лишь свидетельствами металлургического и металлообрабатывающего циклов.

Концентрация памятников одного времени, одной культурной принадлежности с набором производственного инструментария на определенной территории, а также соответствующими свидетельствами производственной деятельности образуют очаги древней металлургии и металлообработки. Производственный инструментарий таких очагов типологически близок друг другу. Продукция из металла в рамках металлообрабатывающего очага типологически и морфологически едина. Различия между очагом металлургии и металлообработки заключается в наличии (отсутствии) металлургического цикла металлопроизводства — выплавки меди из руд [30, с. 299-300; 38, с. 37].

Каждый из очагов, своей продукцией удовлетворял потребности в металле родст-

венное население, проживающее на определенной территории.

Такие очаги в Днепро-Донском регионе особенно выразительно прослеживаются в эпоху средней бронзы. Не исключается и возможность функционирования в эпоху ранней бронзы явного очага металлопроизводства (северопричерноморского по Л.А. Черных) [37; 38, с. 43].

В эпоху поздней бронзы ситуация с источниками иная. Прижизненная производственная специализация погребенных материалами в это время не маркируется, а поселенческие памятники на территории Днепро-Донского региона изучены крайне неравномерно. В этой связи выявить очаги древней металлургии и металлообработки в исследуемом регионе достаточно сложно, особенно металлургические очаги [31, с. 172].

Если же говорить о металлообрабатывающем очаге не с позиций металлообработки той или иной культуры или ее хронологического (географического) варианта, а как о металлообрабатывающей деятельности группы (клана) мастеров [31, с. 149], отличающейся набором категорий и типов изделий, технологическими приемами производства, а также, в определенной степени и сочетанием химических и металлургических групп меди [31, с. 167], то на территории Днепро-Донского региона в эпоху поздней бронзы выделяется Лобойковский очаг металлообработки. Его выделение связано с именем Е.Н. Черных (первое название очага завадово-лобойковский) [31, с. 190-195].

Если же говорить вообще об очагах производственной деятельности в исследуемом регионе, то масштабным очагом металлопроизводства в эпоху поздней бронзы на территории Днепро-Донской производственной зоны являлся ДГМЦ. Что же касается очагов металлургии и металлообработки, то на территории Днепро-Донского региона в эпоху бронзы, как свидетельствует археологический материал, выразительно вырисовывается Северскодонецкий очаг, базирующийся на продукции ДГМЦ.

Результаты масштабных исследований археологических памятников восточноевропейской степи и лесостепи, в том числе и бытовых, имеющих ярко выраженную производственную направленность, включая: места древних рудоразработок и специализированные поселения металлургов-литейщиков за пределами рудников; скопление поселений вдоль торговых путей, образующих агломерации поселений, что может свидетельствовать о функционировании здесь своеобразных центров торгово-обменных операций; фиксируемое, преимущественно по материалам погребальных памятников, наличие социально-кастовой структуры общества, а также зачатки письменности и развитые мировоззренческие модели в эпоху поздней бронзы уже позволяют ставить вопрос о феномене «протоцивилизации бронзового века» на территории Восточной Европы [8, с. 44-45]. Не является в этой связи исключением Днепро-Донской регион, который наравне с другими — Северокавказским, Волго-Уральским, Карпато-Дунайским, Карпато-Днепровским и т.д., собственно территориями, имеющими меднорудную базу для развития производственной деятельности на протяжении всей палеометаллической эпохи являлись очага-

ми культуротворческих процессов — очагами культурогенеза [2, с. 24-27; 16; 20], а в эпоху поздней бронзы эти регионы иллюстрируют уже явления цивилизационного (постпервобытного) характера.

В целом же становится понятным, что от комплексного осмысления колоссальной источниковой базы по металлопроизводству эпохи бронзы зависит выход исследователей на качественно новый уровень изучения проблематики древних обществ евразийской степи и лесостепи II тыс. до н.э.

Таким образом, накопленный к настоящему времени значительный объем источниковой базы по металлопроизводству Днепро-Донского региона в эпоху бронзы, с учетом качественно нового круга источников, полученного в результате многолетних исследований комплекса горно-металлургических памятников Картамышского археологического микрорайона эпохи бронзы позволяет скорректировать ранее предложенный исследователями понятийный аппарат по проблеме металлопроизводства эпохи раннего металла, ввести в научный оборот новые понятия, используя их как инструмент для успешного изучения проблем горной археологии.

Бібліографічний список

1. Березанская С. С. Усово озеро / С. С. Березанская // *Поселение Усово озеро на Северском Донце*. — К.: Наук. думка, 1990. — 150 с.
2. Бочкарев В. С. Волго-Уральский очаг культурогенеза эпохи поздней бронзы / В. С. Бочкарев // *Социогенез и культурогенез в историческом аспекте*. — Спб., 1991. — С. 224–234.
3. Бровендер Ю. М. Техногенный участок рудника Червонэ озеро-I Картамышского археологического микрорайона (некоторые итоги исследований) / Ю. М. Бровендер // *Проблеми гірничої археології: Матеріали II-го міжнародного Картамышського польового семінару (с. Новозванівка, 15–16 липня 2006 р.)*. — Алчевськ : ДонДТУ, 2007. — С. 33–68.
4. Бровендер Ю. М. Находки деталей конской упряжи в контексте Донецького горно-металлургического центра эпохи бронзы / Ю. М. Бровендер // *Матеріали та дослідження з археології Східної України*. — Луганськ, 2007. — № 7. — С. 224–234.
5. Бровендер Ю. М. Итоги раскопок техногенного участка на Картамышском рудопроявлении / Ю. М. Бровендер // *Древности 2006 — 2008*. — Харьков, 2008. — С. 184–203.
6. Бровендер Ю. М. Мідні руди України як сировина для виробничої діяльності за доби палеометалу / Ю. М. Бровендер // *Проблеми гірничої археології: матеріали VII-го Міжнародного Картамышського польового археологічного семінару*. — Алчевск, 2009. — С. 77–81.
7. Бровендер Ю. М. Степановское поселение срубной общности на Донецком кряже / Ю. М. Бровендер. — Алчевск, 2012. — 234 с.

8. Украинско-российская экспедиция по изучению древних памятников горного дела Донбасса (итоги полевого сезона 2001 года и перспективы исследований) / Ю. М. Бровендер, А. Ф. Горовой, В. Н. Дорофеев [и др.]. — К.: Воронеж, 2002. — 76 с.
9. Бровендер Ю. М. Определение объемов горных работ и оценка добычи медных руд на древних разработках Картамышского рудопроявления в Донбассе / Ю. М. Бровендер, Г. И. Гайко, Ю. П. Шубин // Матеріали та дослідження з археології Східної України. — Луганськ: СНУ. — 2010. — Вип. 10. — С. 83–87.
10. Бровендер Ю. М. Картамышский комплекс гірничо-металургійних пам'яток бронзового віку в Центральному Донбасі / Ю. М. Бровендер, В. В. Отрощенко, А. Д. Пряхін // Археологія. — 2010. — №2. — С. 87–101.
11. Григорьев С. А. Металлургическое производство на Южном Урале в эпоху средней бронзы / С. А. Григорьев // Древняя история Южного Зауралья. — Челябинск: Рифей, 2000. — С. 444–531.
12. Григорьев С. А. Минералогия шлака Мосоловского поселения / С. А. Григорьев // Археология восточноевропейской лесостепи: Доно-Донецкий регион в эпоху бронзы. — Воронеж, 2003. — Вып. 17. — С. 123–134.
13. Загородня О. М. Знаряддя метало виробництва бережнівсько-маївської зрубної культури (за матеріалами Картамышського археологічного мікрорайону): автореф. дис. на здобуття канд. іст. наук / О. М. Загородня. — К., 2014. — 13 с.
14. Основы геоархеологии: учебн. пособ. / [В. В. Зайков, А. М. Юминов, Е. В. Зайкова, А. Д. Таиров; под. ред. проф. В. В. Масленникова]. — Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. — 263 с.
15. Киячков А. П. Технология горного производства / А. П. Киячков. — М.: Недра, 1971. — 285 с.
16. Клочко В. И. Карпато-Дніпровський центр культурогенеза / В. И. Клочко // Северо-Восточное Приазовье в системе евразийских древностей (энеолит — бронзовый век). — Донецк, 1996. — Ч. 1. — С. 54–56.
17. Маргулан А. Х. Сарыарка. Горное дело и металлургия в эпоху бронзы. Джезказган — древний и средневековый металлургический центр (городище Милыкудук). Т. 2. / В. И. Маргулан. — Алматы: Дайк-Пресс, 2001. — 144 с.
18. Матвеева Г. И. Горно-металлургический комплекс бронзового века у с. Михайлово-Овсянка на юге Самарской области (первые результаты исследования) / Г. И. Матвеева, Ю. И. Колев, А. И. Королев // Вопросы археологии Урала и Поволжья. — Самара, 2004. — №2. — С. 69–88.
19. Нікітенко І. С. Про матеріал кам'яних знарядь Картамышського археологічного мікрорайону, виготовлених з привізної сировини / І. С. Нікітенко // Проблеми гірничої археології: матеріали VIII-го Міжнародного Картамышського польового археологічного семінару. — Алчевск, 2011. — С. 100–111.
20. Отрощенко В. В. Южноуральский очаг культурогенеза на оси пассионарных толчков / В. В. Отрощенко // Доно-Донецкий регион в системе древностей эпохи бронзы восточноевропейской Степи и Лесостепи. — Воронеж, 1996. — Вып. 2. — С. 32–34.
21. Отрощенко В. В. Тенденції розвитку господарчих систем доби пізньої бронзи на теренах України / В. В. Отрощенко // Nomadizm a pastoralizm w miedzyrzeczu Wisły i Dniepru (neolit, eneolit, epoka brązu) — Poznań, 2004. — S. 215–221.
22. Пряхин А. Д. Доно-Донецкая степи и лесостепь в эпоху бронзы (некоторые итоги и перспективы исследований) / А. Д. Пряхин // Эпоха бронзы Доно-Донецкого региона: Материалы укр.-рос. полевого археологич. семинара. — Луганск, 1995. — С. 6–10.
23. Пряхин А. Д. Мосоловское поселение металлургов-литейщиков эпохи поздней бронзы. — Кн. 2./ А. Д. Пряхин. — Воронеж: ВГУ, 1996. — 176 с.
24. Пряхин А. Д. К изучению металла и производственной деятельности в эпоху бронзы на пространствах Евразийской лесостепи и смежных территорий степной зоны на современном этапе археологии / А. Д. Пряхин // Проблеми гірничої археології: матеріали VI-го Міжнародного Картамышського польового археологічного семінару. — Алчевск, 2007. — С. 12–18.

25. Исследование химического и фазового состава медной руды и медесодержащих шлаков эпохи бронзы из района Восточной Украины / А. С. Саврасов, В. М. Кашикар, Г. О. Владимиров, В. А. Терехов, Н. А. Румянцева // Проблемы гірничої археології: матеріали II-го Міжнародного Картамиського польового археологічного семінару. — Алчевск, 2005. — С. 268–271.
26. Татаринов С. И. К вопросу о существовании в Северном Причерноморье горно-металлургического центра во II-I тыс. до н.э. / С. И. Татаринов // 150 лет Одесскому государственному археологическому музею. — Тез. докл. — К., 1975. — С. 64–65.
27. Татаринов С. И. Древний металл Восточной Украины. Очерки истории горного дела, металлургии и металлообработки эпохи бронзы. — Артемовск, 1993. — 153 с.
28. Татаринов С. Й. Історія гірничої справи, металургії та металлообробки доби бронзи Східної України : автореф. дис. на здобуття канд. іст. наук : спец. 07.00.01 історія України / С. И. Татаринов. — Донецьк, 2006. — 20 с.
29. Срубная культура / С. С. Березанская, В. В. Отроценко, Н. Н. Чередниченко, И. Н. Шарафутдинова // Культуры эпохи бронзы на территории Украины. — К., 1986. — С. 150–172.
30. Черных Е. Н. О терминах «металлургический центр», «очаг металлургии» и других / Е. Н. Черных // СА. — М, 1967. — №1. — С. 295–301.
31. Черных Е. Н. Древняя металлообработка на Юго-Западе СССР / Е. Н. Черных. — М.: Наука, 1976. — 302 с.
32. Черных Е. Н. Металлургические провинции и периодизация эпохи раннего металла на территории СССР / Черных Е. Н. // СА. — 1978. — №4. — С. 53–82.
33. Черных Е. Н. Горное дело и металлургия в древнейшей Болгарии / Е. Н. Черных. — София: Изд-во Болгарской Академии наук, 1978. — 386 с.
34. Черных Е. Н. О терминах «металлургический центр», «очаг металлургии» и других / Е. Н. Черных // СА. — М, 1967. — №1. — С. 295–301.
35. Каргалы. т. I / Е. Н. Черных, Е. Ю. Лебедева, С. В. Кузьминых [и др.]. — М.: Языки славянской культуры, 2002. — 112 с.
36. Черных Е. Н. Каргалы. т. III / Е. Н. Черных, Е. Ю. Лебедева, И. В. Журбин [и др.]. — М.: Языки славянской культуры, 2004. — 320 с.
37. Черных Л. А. К вопросу о типах втульчатых топоров Украины, отливавшихся в открытые с брюшка литейные формы / Л. А. Черных // Доба бронзи Доно-Донецького регіону: Матеріали 5-го укр.- рос. польового археолог. семінару (с. Капітанове, 26 липня 1999р.). — Київ-Вороніж, 2001. — С. 114–118.
38. Черных Л. А. К вопросу о выделении очагов металлопроизводства энеолита-ранней бронзы в Северном Причерноморье / Л. А. Черных, А. В. Николова // Проблемы гірничої археології: Матеріали I-го Картамиського польового археологічного семінару (с. Новозванівка, 7–8 серпня 2002 р.). — Алчевськ: ДГМІ, 2003. — С. 37–43.
39. Шарафутдинова И. Н. Степное Поднепровье в эпоху поздней бронзы / И. Н. Шарафутдинова. — К.: Наук. думка, 1982. — 160 с.
40. Шубин Ю. П. Увязка продуктов древнего металлургического производства с рудной базой / Ю. П. Шубин // Наук. праці Укр НДМІ НАН України. — Донецьк, Укр НДМІ НАН України. — 2010. — Вип. 2. — С. 192–202.
41. Ottaway B. S. Innovation, production and specialization in early prehistoric copper metallurgy / B. S. Ottaway // European journal of Archaeology, 2001. — 4(1). — 234.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Новохатским А. М.,
д.и.н., проф. ДНУ им. О.Гончара Ромашко В. А.**

Статья поступила в редакцию 17.06.14.

**к.і.н. Бровендер Ю. М., к.г.н. Шубін Ю. П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна, brovender@mail.ru)
ГІРНИЧА АРХЕОЛОГІЯ: ДО ПИТАННЯ ПРО ПОНЯТІЙНИЙ АПАРАТ**

Розглядається термінологія нового в Україні міждисциплінарного знання — гірничої археології, який отримав з початку цього сторіччя, завдяки сумісним зусиллям археологів і спеціалістів різних природно наукових знань, і насамперед геологів, які працюють у східних областях України, активний розвиток. Об'єктом досліджень цього нового для української історичної науки знань є виробнича діяльність масивів населення, які функціонують на території багатій рудами різних металів, а також іншими мінералами, які розроблялись в давнину. Предметом дослідження гірничої археології є розташовані на цій території пам'ятники виробничої діяльності — гірничі виробки, техногенні ділянки по збагаченню руд, поселення гірників і гірників - металургів. Комплексний аналіз джерел епохи палеометалу, які виникли з рудної території Донбасу і які являють собою усі цикли металовиробничої діяльності, а також матеріалів, пов'язаних з побутовою і духовною складовою ці пам'ятники дозволяє отримати максимально повну інформацію для створення цілісної картини давньої металовиробничої діяльності в епоху палеометала.

Ключові слова: *горна археологія, геоархеологія, горно-металургійний центр, виробнича діяльність, гірничі справи, збагачення, металургія, металообробка.*

Brovender Y. M. Candidate of Historical Sciences, Shubin Y. P. Candidate of Geological Sciences
(DonSTU, Alchevsk, Ukraine, brovender@mail.ru)

MINING ARCHAEOLOGY: REVISITING THE FRAMEWORK OF CONCEPTS

New terminology of original for Ukraine interdisciplinary knowledge - mining archaeology is considered, which has been intensively developed since the beginning of this century, owing to the joint efforts of archaeologists and specialists in various scientific knowledge, and above all to geologists, working in the eastern regions of Ukraine. The object of study of this new Ukrainian historical science is production activities of the population arrays operating on the territory rich in ores of various metals and other minerals developed in ancient world. The subject of the study of mining archaeology is the sites of industrial activity — mining developments, man-made sites of ore dressing, settlements of miners and miners-metallurgists — which are located on the territory. Comprehensive analysis of the sources of the paleometal era, originating from ore territory of Donbass and representing all cycles of metal production activities as well as materials related to the life and spiritual component of these sites enables to get as much information as possible to recreate holistic picture of the ancient metal production activities in the paleometal era.

Key words: *Mining archaeology geoarchaeology, mining and metallurgical center, industrial activity, mining, dressing, metallurgy, metalworking.*

БУДІВНИЦТВО

СТРОИТЕЛЬСТВО

CONSTRUCTION

УДК 624.131.543

д.т.н. Должиков П. М.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна),
д.т.н. Кіпко О. Е.
(СНУ ім. В. Даля, м. Антрацит, Україна),
к.т.н. Кіріак К. К.
(ЦНТП «Інжзахист», м. Ялта, АР Крим)

ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРНИХ І ЗСУВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТІВ, ЯКІ ЗАКРІПЛЕНІ МЕТОДОМ НАПІРНОЇ ЦЕМЕНТАЦІЇ

В основу статті покладено комплексне дослідження зсувних ґрунтів, яке включає в себе аналітичні, лабораторні та натурні дослідження, виконані з метою визначення ефективності ін'єкційного закріплення зсувонебезпечних ґрунтових структур.

Ключові слова: зсувний схил, метод напірної цементациї, закріплення масив, зсувні параметри, фільтраційна консолідація, одноплосинне зрушення.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.

Велика частина території України знає дії екзогенних геологічних процесів, що зумовлено її геологічною будовою та геоморфологічними умовами. Широке розповсюдження серед зазначених небезпечних геологічних процесів мають зсувні процеси, розвиток і поширення цих явищ обумовлено впливом ендегенних, екзогенних та техногенних чинників, особливо на південному березі Криму (ПБК). Поширення зсувних процесів на ПБК пов'язано з сукупністю природно історичних факторів і останнім часом переважно з діяльністю людини, зокрема з нераціональною забудовою, часткового або повним переплануванням схилів і будівництвом на них різних об'єктів господарювання. В даний час в Криму настає пік регіональної активізації зсувних процесів, який прогнозувався на 2012–2014 роки [1], тому вивчення впливу ін'єкції на зсувні ґрунти, при стабілізації зсувонебезпечних процесів методом напірної цементациї, є актуальним науково-технічним завданням.

Вивченням посилення зсувних ґрунтів різними методами виконувалися деякими вченими. У роботі І.І. Ларцевої представлені дослідження з визначення характеристик міцності ґрунтів, закріплених вертикальними ґрунтоцементними елементами за допомогою бурозмішувальної техноло-

гії [2]. Скінчено-елементний аналіз напружено-деформованого стану зсувного схилу після ін'єкційного закріплення виконувався у роботі [3]. Основні аспекти формування зсувних відкладів вивчалися та розглядалися Л.А. Аносовою [4]. Значний інтерес представляють роботи з обґрунтування параметрів способу підвищення стійкості зсувонебезпечних схилів за допомогою струминної технології закріплення ґрунтів [5].

Для більш глибокого вивчення впливу напірної цементациї на зміну фізико-механічних і деформаційних властивостей зсувних ґрунтів необхідно визначити вплив вологості зразків ґрунту на зміну об'ємної маси скелету зсувних суглинків в залежності від тиску нагнітання ін'єкційного розчину.

Мета роботи — визначення впливу напірної цементациї на зміну зсувних та структурних параметрів зсувних ґрунтів. Для її виконання поставлені такі завдання:

1. Визначити закономірність ущільнення глинистого ґрунту в залежності від вологості;
2. Виконати дослідження зсувних ґрунтів при їх ін'єкційній стабілізації.

© Должиков П. М., 2014

© Кіпко О. Е., 2014

© Кіріак К. К., 2014

Викладання матеріалу та його результати. Для оцінки ущільнення ґрунтів в лабораторних умовах зазвичай застосовується метод стандартного ущільнення. Він полягає у визначенні величин об'ємної маси скелету ґрунту з різною вологістю, що досягається в результаті ущільнення ударами падаючого грузу. За отриманими даними будують криву стандартного ущільнення, тобто графік залежності об'ємної маси скелету ґрунту від вологості $\gamma_{ск} = f(W)$. Тому основне завдання лабораторних дослідів полягало у вивченні ущільнення глинистого ґрунту при його різних вологості, що значно перевищує оптимальну і змінюється в межах від 0,2 до 0,3, тобто при ступені вологості $G = 0,7 - 1,0$.

Дослідження ущільнення водонасичених глинистих ґрунтів виконувалися в модернізованому приладі стандартного ущільнення та проводилися на зразках суглинку з об'ємною масою скелета ґрунту в природному стані $\gamma_{ск} = 1,55 - 2,0 \text{ г/см}^3$, вологістю на межі розкочування $W_p = 0,14 - 0,22$, вологістю на межі плинності $W_l = 0,26 - 0,34$.

Роз'ємний циліндр заповнювали ґрунтом непорушеної структури шляхом врізання його в моноліт ґрунту. Ґрунт в кільці зволожували розрахунковою кількістю води до ступеня вологості $G > 0,7$, далі витримували в ексикаторі не менше доби, а потім ущільнювали 30 ударами грузу, який падає з висоти 30 см. Після ущільнення верхнє і нижнє кільця роз'ємного циліндра знімали, а ґрунт, що залишився, ретельно підрізали в рівень з краями робочого кільця. Одночасно відбирали проби з верхньої та нижньої частини для визначення вологості ґрунту. Потім кільце з ущільненим ґрунтом зважували і визначали об'ємну масу скелета ґрунту. Після ущільнення робочі кільця з ґрунтом поміщали в компресійні або зрізні прилади для визначення деформаційних і міцнісних характеристик. Паралельно проводилося визначення стис-

ливості і міцності ґрунту непорушеної структури.

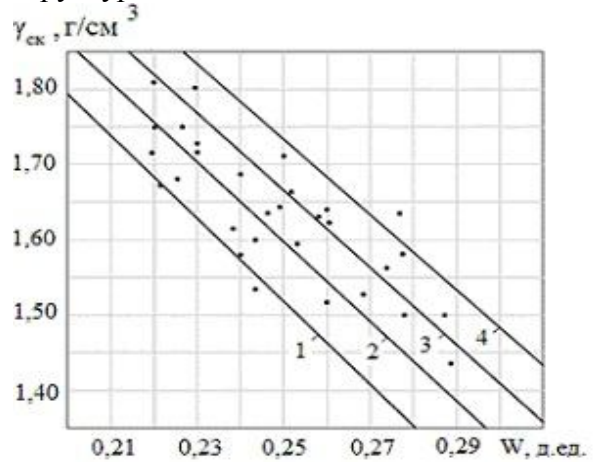


Рисунок 1 — Зміна об'ємної маси скелету ґрунту після ущільнення в залежності від вологості: 1–4 — при ступені вологості відповідно 0,85; 0,9; 0,95; 1,00

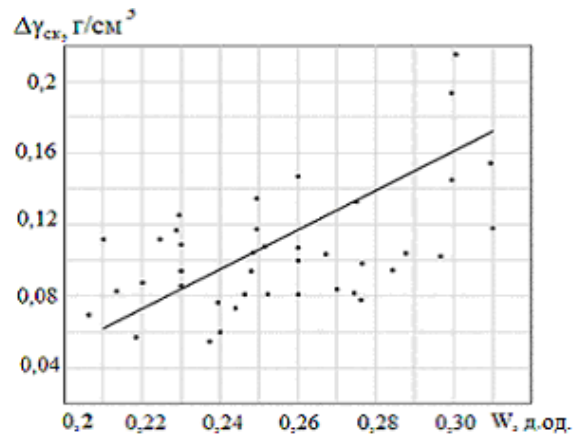


Рисунок 2 — Зміна приросту об'ємної маси скелету ґрунту в залежності від вологості

На рисунку 1 наведена сукупність експериментальних точок, що характеризують зміну об'ємної маси скелету $\gamma_{ск}$ зразків ґрунту в залежності від їх вагової вологості W і ступеня вологості G до ущільнення, причому більшість точок відноситься до зразків ґрунту з $G > 0,85$. Отримані значення в даному випадку можуть бути віднесені до правих низхідних гілок кривих стандартного ущільнення.

Дані наведені на рисунку 1, при їх розгляді спільно з рисунком 2, на якому відображена зміна збільшень об'ємної маси

скелету $\Delta\gamma_{ск}$ зразків ґрунту після ущільнення залежно від вологості, показують, що значення об'ємної маси скелету ґрунту в результаті ущільнення суттєво збільшилося — в більшості випадків на $0,05-0,1 \text{ г/см}^3$. У той же час, для цих ґрунтів з вологістю близькою до оптимальної, значення $\Delta\gamma_{ск}$ при ущільненні зростають на $0,15-0,2 \text{ г/см}^3$. Однак, суворої закономірності у підвищенні об'ємної маси скелету ґрунту, при ущільненні залежно від вологості за наведеним на рисунку 2, не спостерігається. Більш детальний аналіз величини приросту об'ємної маси скелету ґрунту при ущільненні вказує на зростання її при зменшенні вихідних значень $\gamma_{ск}$. Так, наприклад, для зразків ґрунту з $\gamma_{ск} = 1,5-1,8 \text{ г/см}^3$ $\Delta\gamma_{ск}$ становить $0,18-0,16 \text{ г/см}^3$, а при $\gamma_{ск} = 1,9 \text{ г/см}^3$ значення $\Delta\gamma_{ск} = 0,05-0,08$, тобто ступінь підвищення ущільнення більш щільного ґрунту знижується.

Нескладно отримати, що зміна об'ємної маси скелету ґрунту за рахунок зміни ступеня вологості ΔG і вагової вологості ΔW дорівнює:

$$\Delta\gamma'_{ск} = \frac{W\gamma_s^2\Delta G}{\Delta G\gamma_w(G\gamma_w + \gamma_s W) + G^2\gamma_w^2 + W\gamma_s^2}, \quad (1)$$

$$\Delta\gamma''_{ск} = \frac{\gamma_s\gamma_w\Delta W}{\gamma_s^2 W(W - \Delta W) + \gamma_s\gamma_w(2W - \Delta W) + \gamma_w^2}, \quad (2)$$

де $\Delta\gamma''_{ск}$ — зміна об'ємної маси скелету ґрунту за рахунок ущільнення частинок ґрунту; $\Delta\gamma'_{ск}$ — зміна об'ємної маси скелету ґрунту за рахунок збільшення ступеня вологості, причому, як було сказано вище

$$\Delta\gamma_{ск} = \Delta\gamma'_{ск} + \Delta\gamma''_{ск}. \quad (3)$$

Також виконувались випробування з визначення опору ґрунту зсуву, які проводились в зрізних приладах за схемою повільного зсуву в умовах завершеної консолідації з попереднім ущільненням ґрунтів, яке здійснювалося тиском $0,1, 0,2, 0,3 \text{ МПа}$ при повному водонасиченні зразків. Згідно

з отриманими даними зчеплення с ущільненого водонасиченого глинистого ґрунту збільшилося в $1,45-2,0$ рази, кут внутрішнього тертя φ — на $2-3^\circ$. Наприклад, для зразків ґрунту з вологістю $W = 0,2$ і вихідною величиною $\gamma_{ск} = 1,55 \text{ г/см}^3$ значення c зросло з $0,0275 \text{ МПа}$ до $0,0325 \text{ МПа}$, а величина φ з $26,5^\circ$ до $29,90^\circ$ (рис. 3).

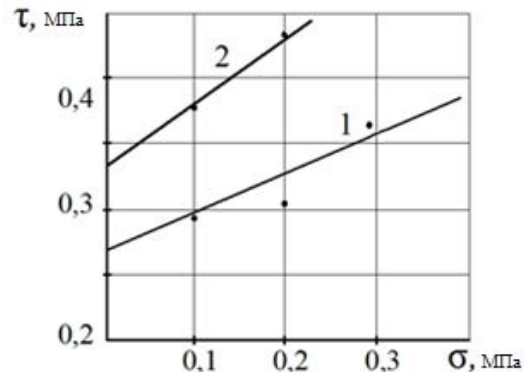


Рисунок 3 — Зміна зсувних властивостей ґрунту: 1 — до закріплення; 2 — після закріплення

Дослідження зсувних ґрунтів при їх ін'єкційній стабілізації проводилися на спеціальному експериментальному стенді. Експериментальний стенд призначений для вивчення основних властивостей дисперсних порід при їх консолідації цементним розчином. Такі дослідження були проведені на зразках світло-бурого та сірого суглинку. Результати експериментальних досліджень на зразках суглинку у вигляді графічних залежностей представлені на рисунках 4–6. При цьому на кожному рисунку окремі криві відповідають різним початковим об'ємним масам скелету: $\gamma_{ск} = 1,5; 1,65; 2,0 \text{ кг/см}^2$ (при $P = 0 \text{ МПа}$).

Знайдені експериментально залежності коефіцієнта консолідації (рис. 6), зчеплення (рис. 4) та кута внутрішнього тертя (рис. 5) від тиску нагнітання цементного розчину показані штриховою лінією. За результатами досліджень проводився кореляційно-регресійний аналіз дослідних даних за допомогою ПЕОМ. Відповідні їм регресійні криві показані на рисунках суцільною лінією.

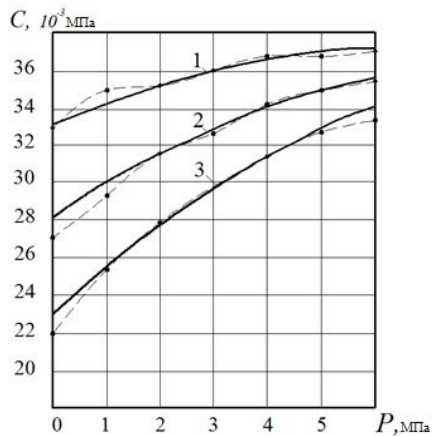


Рисунок 4 — Залежність зчеплення суглинка від тиску нагнітання розчину при початковій об'ємній масі скелету: 1 — 2,0 г/см³; 2 — 1,65 г/см³; 3 — 1,5 г/см³

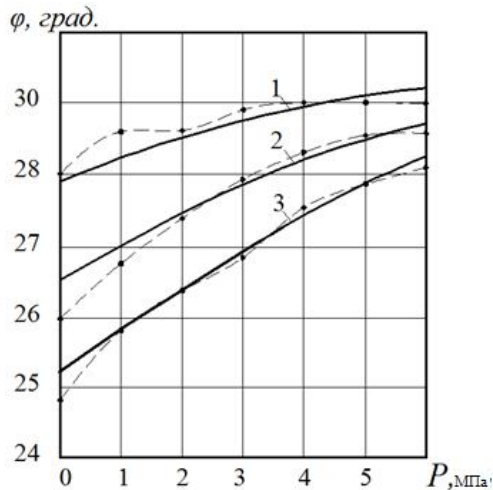


Рисунок 5 — Залежність кута внутрішнього тертя суглинка від тиску нагнітання розчину при початковій об'ємній масі скелету: 1 — 2,0 г/см³; 2 — 1,65 г/см³; 3 — 1,5 г/см³

Математична обробка результатів експериментів виконувалася за допомогою регресійного аналізу з використанням програмних комплексів для персональних комп'ютерів Microsoft® Excel та Mathcad® 14, у результаті чого були отримані емпіричні параметри (табл. 1). На підставі отриманих результатів було доведено поліпшення властивостей ґрунту при напірній цементації, а саме — зчеплення, кута внутрішнього тертя і коефіцієнта консолідації, отримані емпіричні залежності (4–6).

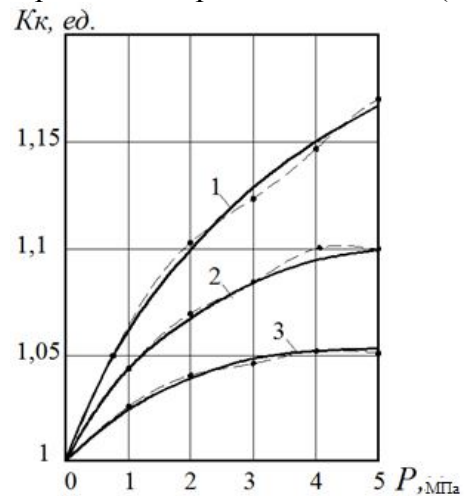


Рисунок 6 — Залежність коефіцієнта консолідації суглинка від тиску нагнітання розчину при початковій об'ємній масі скелету: 1 — 2,0 г/см³; 2 — 1,65 г/см³; 3 — 1,5 г/см³

$$c_2 = \alpha_2 P^2 + \beta_2 P + \gamma_2, \quad (4)$$

$$\varphi_2 = \alpha_3 P^2 + \beta_3 P + \gamma_3, \quad (5)$$

$$K_k = aP^3 + c. \quad (6)$$

Таблиця 1 — Емпіричні параметри щодо визначення зчеплення, кута внутрішнього тертя та коефіцієнта консолідації ущільнених ґрунтів

Початкова об'ємна маса скелету (суглинок), г/см³	Емпіричні параметри			
	$\alpha_2, 10^{-3} \text{ МПа}^{-1};$ $\alpha_3, \text{ град/МПа}^2;$ $a, \text{ м/добу}$	$\beta_2, 10^{-3} \text{ МПа}^{-1};$ $\beta_3, \text{ град/МПа}^2;$ $b, \text{ м/добу}$	$\gamma_2, 10^{-3};$ $\gamma_3, \text{ град/МПа}^2;$ $c, \text{ м/добу}$	Коефіцієнти кореляції, $r_1; r_2; r_3$
1,5	-0,08; -0,02; 0,06	1,15; 0,33; 0,60	33,25; 27,91; 0,99	0,88; 0,93; 0,88
1,65	-0,12; -0,07; 0,04	1,98; 0,86; 0,59	28,18; 25,99; 0,99	0,85; 0,88; 0,92
2,0	-0,22; -0,05; 0,03	3,22; 0,85; 0,43	22,10; 24,84; 0,99	0,83; 0,92; 0,93

Таким чином, лабораторними методами доведена зміна прирощення об'ємної маси скелету $\Delta\gamma_{ск}$ зразків ґрунту при фільтраційній консолідації в залежності від вологості. Встановлено, що значення об'ємної маси скелету зсувних ґрунтів у результаті ущільнення при оптимальній вологості збільшуються на 0,15–0,20 г/см³. Доведена зміна зсувних характеристик обводнених ґрунтів посиленних методом напірної цементації: зчеплення ущільненого водонасиченого глинистого ґрунту збільшилося у 1,45–2,0 рази, кут внутрішнього тертя на 2–3°, модуль деформації збільшується в 1,3–1,8 рази. Встановлені емпіріо-аналітичні залежності дозволяють визначити зміну фізико-механічних характерис-

тик і коефіцієнта консолідації ґрунту в залежності від тиску нагнітання розчину.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Метод напірної цементації показав, що при закріпленні зсувних суглинків за рахунок збільшення об'ємної маси скелету ґрунту при фільтраційній консолідації в залежності від вологості досягається його ущільнення. Зсувні параметри ґрунту змінюються залежно від тиску нагнітання ін'єкційного розчину і початкової об'ємної маси зразків ґрунту. Отже, при збільшенні коефіцієнта консолідації ґрунту за рахунок ін'єкції досягається його стабілізація. Таким чином, застосування методу напірної цементації для стабілізації зсувонебезпечних та зсувних схилів показує значну ефективність.

Бібліографічний список

1. Рудько Г. И. Оползни и другие геодинамические процессы горноскладчатых областей Украины (Крым, Карпаты) : монография / Г. И. Рудько, И. Ф. Ерыш. — К.: Задруга, 2006. — 624 с.
2. Ларцева І. І. Визначення характеристик міцності ґрунтів, закріплених вертикальними ґрунтоцементними елементами / І. І. Ларцева // Світ ГЕОТЕХНІКИ. — 2012. — № 5. — С. 21–26.
3. Кирияк К. К. Моделирование оползневого склона методом конечных элементов / К. К. Кирияк // Сб. науч. тр. ДонГТУ. — Алчевск: ДонГТУ, 2011. — Вып. 35. — С. 257–266.
4. Аносова Л. А. Закономерности формирования оползневых отложений / Л. А. Аносова, И. Г. Коробанова, А. К. Копылова. — М.: Изд-во «Наука», 1996. — Т.1. — 184 с.
5. Максимова-Гуляева Н. А. Обґрунтування параметрів способу підвищення стійкості зсувонебезпечних схилів за допомогою струминної технології закріплення ґрунтів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.15.09 «Геотехнічна і гірнична механіка» / Н. А. Максимова-Гуляева. — Дніпропетровськ: Нац. гірн. ун-т., 2006. — 22 с.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. ДонДТУ Антощенко М. І.,
д.т.н., проф. НГУ Шащенко О. М.

Стаття надійшла до редакції 10.06.14.

д.т.н. Должиков П. Н. (ДонГТУ, г. Алчевск, Украина), д.т.н. Кипко А. Э (ВНУ им. В. Даля, г. Антрацит, Украина), к.т.н. Кирияк К. К. (ЦНТУ «Инжзащита», г. Ялта, АР Крым)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРНЫХ И СДВИГОВЫХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ЗАКРЕПЛЕННЫХ МЕТОДОМ НАПОРНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ

В основу статьи положены комплексное исследование оползневых грунтов, которое включает в себя аналитические, лабораторные и натурные исследования, выполненные с целью определения эффективности инъекционного закрепления оползневых грунтовых структур.

Ключевые слова: оползневой склон, метод напорной цементации, закрепленный массив, сдвиговые параметры, фильтрационная консолидация, плоскости сдвига.

Dolzhikov P. N. Doctor of Engineering Sciences (DonSTU, Alchevsk, Ukraine), Kipko A. E. Doctor of Engineering Sciences (Dal ENU, Antratsit, Ukraine), Kiriya K. K. Candidate of Engineering Sciences (CSTS "Inzhzashchita", Yalta, Crimea)

THE DEFINITION OF STRUCTURAL AND SHIFTING PROPERTIES OF SOILS STEADY BY TECHNIQUE OF PRESSURE-PROOF CEMENTATION

A complex investigation of sliding soils, including analytical, laboratory and natural investigations, completed with the aim of defining the efficiency of injection ground stabilization of sliding soil structures is put down in the article.

Key words: sliding slope, pressure-proof cementation technique, ground stabilization massif shifting soil parameters, filtration consolidation, flat surface shift.

УДК 69:624.131.43

Ивлиева Е. О.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГИДРОАКТИВИЗИРОВАННЫХ ГРУНТОВ

Статья посвящена исследованию закономерностей деформирования грунтов. Приведены результаты исследований физико-механических свойств супеси. По результатам лабораторных исследований получена зависимость абсолютной величины деформирования супеси от сжимаемой нагрузки для типовых инженерно-геологических разрезов характерных для условий Донбасса.

Ключевые слова: исследования, моделирование, грунт, деформирование, компрессионные испытания.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Полное затопление выработанного пространства стало причиной изменения физико-механических свойств грунтов, что привело к ослаблению и неравномерным деформациям основания. С целью стабилизации деформационных процессов в грунтовом массиве и защиты от недопустимых осадков выполняют укрепление основания. Одним из средств улучшения инженерно-геологических условий строительства является создание надежного искусственного основания. Для обоснования эффективности применения такого основания использовался метод физического моделирования, позволяющий определять деформационные характеристики и проводить исследования консолидации искусственного основания с соблюдением основных принципов подобия процессов в грунтовом массиве [1, 2].

Постановка задачи. Целью данной работы является исследование закономерностей деформирования деконсолидированных обводненных грунтов основания фундаментов.

Изложение материала и его результаты. Процесс деформирования искусственного основания является весьма сложным, зависящим от целого ряда факторов, полное соблюдение которых при лабораторных испытаниях невозможно. Поэтому при моделировании учитывались основ-

ные характеристики и параметры, от которых зависит исследуемый процесс. В качестве исходных характеристик выбираем нагрузку на основание и величину сжимаемой толщи. Исходя из того, что процесс деформирования грунтового массива представляет собой изменение сжимающих напряжений в зависимости от прочностных характеристик грунтового массива и размеров фундаментов. Функция зависимости величины осадки грунтового массива от основных параметров имеет вид:

$$\Delta h = f(\sigma, E, b, P, h), \quad (1)$$

где σ — прочность основания, кг/м²; E — модуль деформации основания, кг/м²; b — ширина фундамента, м; P — нагрузка на основание, кг; h — глубина сжимаемой толщи, м.

На основе анализа уравнения размерностей и условия независимости переменных были получены критерии подобия процесса консолидации грунта, которые имеют вид [2]:

$$\pi_1 = \frac{\Delta h}{b}; \pi_2 = \frac{P}{E \cdot \Delta h^2}; \pi_3 = \frac{P}{\sigma \cdot \Delta h^2}; \pi_4 = \frac{\Delta h}{h}.$$

Одним из основных условий физического моделирования является соблюдение геометрического подобия системы. На практике тело затампонированного грун-

тового массива, устроенное на контакте покровных и коренных пород, представляет собой неправильную форму близкую к эллиптическому сечению. Равенство для модели и оригинала критериев π_1 и π_4 позволяет определить линейные размеры модели. Выражая критерии подобия как отношение соответствующих величин в натуре и на модели, получим:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta h_n}{b_n} &= \frac{\Delta h_m}{b_m} \rightarrow \Delta h_m = \frac{\Delta h_n \cdot b_m}{b_n}; \\ \frac{\Delta h_n}{h_n} &= \frac{\Delta h_m}{h_m} \rightarrow \Delta h_m = \frac{\Delta h_n \cdot h_m}{h_n}; \\ \frac{\Delta h_n \cdot b_m}{b_n} &= \frac{\Delta h_n \cdot h_m}{h_n} \rightarrow \frac{b_m}{b_n} = \frac{h_m}{h_n}.\end{aligned}\quad (2)$$

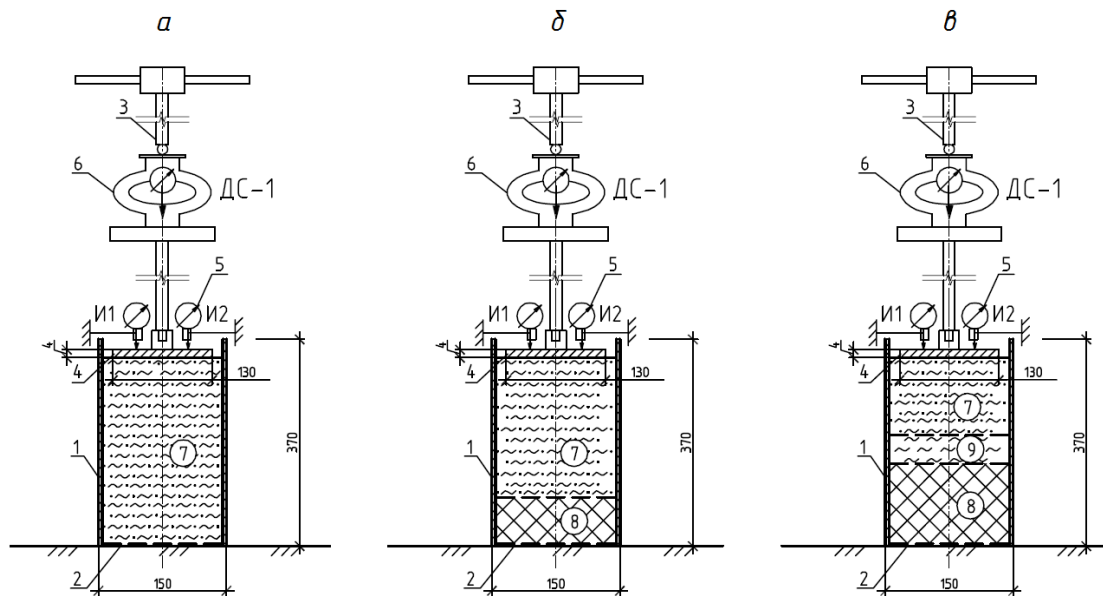
Используя в расчетах фактические размеры ширины фундамента здания ($b_n = 1,2$ м) и величину сжимаемой толщи ($h_n = 7,8$ м), получили коэффициент геометрической пропорциональности, который равен $C_L = 16$.

В основе физического моделирования деформирования обводненных и разуплотненных грунтов лежит способность уплотнения грунта в условиях одноосного сжатия без возможности бокового расширения образца при его нагружении вертикальной нагрузкой. Исходя из того, что основные процессы деформации грунтов в основании зависят от нагрузки по подошве фундамента, исследование деформационных характеристик грунта выполняются при штамповых испытаниях.

С целью определения нагрузки действующей на модель воспользуемся критерием подобия π_2 выражающим отношение соответствующей величины в натуре и на модели:

$$P_m = P_n \cdot \left(\frac{b_m}{b_n} \right)^2 \approx 0,004 \cdot P_n. \quad (3)$$

Для проведения экспериментального исследования процесса консолидации грунта была разработана конструкция стенда, приведенная на рисунке 1.



1 — рабочий цилиндр с перфорированным дном; 2 — поддон с емкостью для воды; 3 — механизм для вертикального нагружения образца грунта; 4 — штамп; 5 — часовой индикатор; 6 — динамометр; 7 — супесь; 8 — щебенка; 9 — глиноцементный раствор

Рисунок 1 — Схема экспериментального стенда для моделирования процесса консолидации грунта: а — покровной зоны из супеси; б — супеси и трещиноватой зоны; в — глиноцементной подушки на контакте покровных и коренных пород

Стенд изготовлен в виде цилиндра из металлической трубы диаметром 150 мм и высотой 370 мм, сверху оснащенного перфорированными штампом диаметром 130 мм и расположенного между прижимными плитами стационарного прессы.

Для измерения вертикальных деформаций образца на верхнем штампе по центру устанавливают индикаторы часового типа. Между перфорированными штампами в металлической трубе, уплотняя слоями, укладывают грунт объемом 3,7 л. Фраг-

мент экспериментального исследования моделирования процесса консолидации грунта представлен на рисунке 2.

Испытания проводятся с образцами грунта нарушенной структурой, обладающими искусственно приданными им свойствами и состоянием. Образцы супеси отобраны на территории Стахановского региона Луганской области. Результаты исследований инженерно-геологических характеристик отобранного грунта приведены в таблице 1.

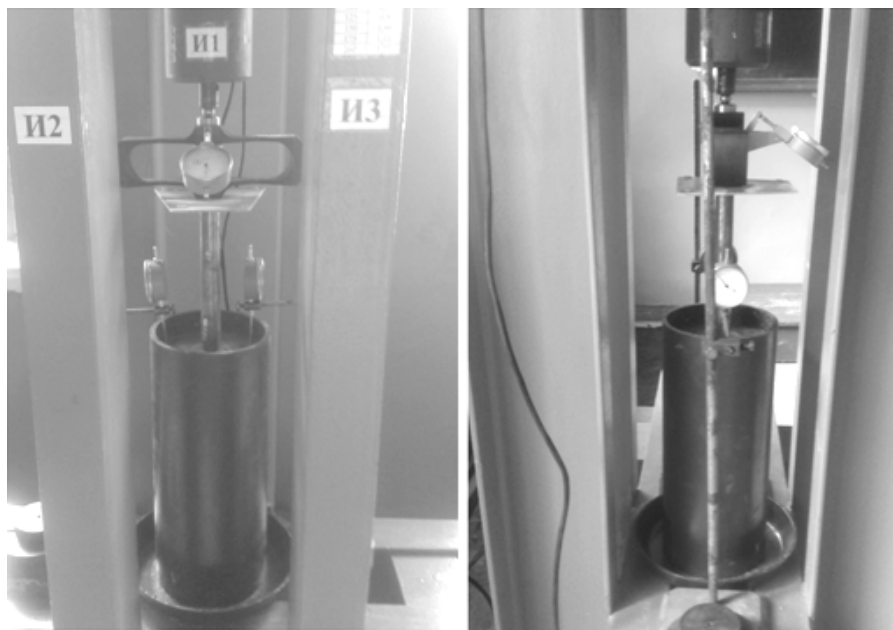


Рисунок 2 — Фрагменты экспериментальных исследований моделирования процесса консолидации грунта

Таблица 1 — Физико-механические свойства супеси

№ п/п	Наименование свойств	Един. измер.	Величина
1.	Удельный вес грунта	г/см ³	2,31
2.	Объемная плотность	г/см ³	1,91
3.	Объемный вес скелета грунта	г/см ³	1,62
4.	Весовая влажность	%	18,1
5.	Коэффициент пористости	д. ед.	0,43
6.	Сцепление	кПа	23
7.	Угол внутреннего трения	град.	31

В соответствии с существующими типами геологических разрезов для условий Донбасса [3] была разработана методика проведения экспериментального исследования, включающая в себя три этапа. На первом этапе моделировали покровные зоны из супеси, на втором этапе моделировали сжатие супеси и трещиноватой зоны из эквивалентного материала, а на третьем этапе — глиноцементную подушку на контакте покровных и трещиноватых пород (рис. 1). Глиноцементный раствор, плотностью $1,26 \text{ г/см}^3$, состоит из глины,

портландцемента М500 и воды в соотношении 3,5:1:6,5 соответственно.

Для эксперимента были подготовлены образцы с различной степенью влажности. В процессе исследования консолидации грунта фиксировались абсолютные величины деформирования грунта.

По результатам лабораторных исследований установлена зависимость абсолютной деформации супеси для трех вариантов моделей от сжимающих нагрузок, которая представлена на рисунке 3. Обработка результатов исследований показала, что погрешность не превышает 10%.

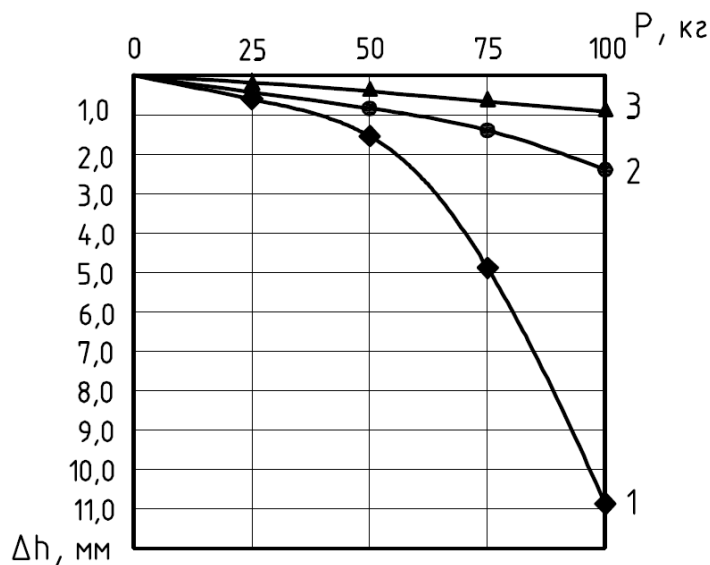


Рисунок 3 — Зависимость осадок образцов грунта от сжимающей нагрузки:
1 — модель покровной зоны из супеси; 2 — модель супеси и трещиноватой зоны;
3 — модель глиноцементной подушки на контакте покровных и трещиноватых пород

Анализ результатов исследований приведенных на рисунке 3 позволяет сделать вывод о том, что влияние глиноцементной подушки на деформационный процесс выражается в уменьшении осадки в 9–10 раз и позволяет достичь стабилизации деформационного процесса.

Выводы и направление дальнейших исследований.

1. В результате выполненных исследований получены основные критерии подобия для физического моделирования обводненных и разуплотненных грунтов, позволяющие увязать между собой величи-

ны, полученные при экспериментальном исследовании на модели и соответствующие им величины в натуре.

2. Разработана конструкция экспериментального стенда для моделирования процесса консолидации обводненного грунта.

3. Доказано, что формирование глиноцементной подушки на контакте коренных и покровных отложений, что приводит к уменьшению осадки основания в 9–10 раз и позволяет достигать стабилизации деформационного процесса.

Бибблиографический список

1. П'ятницька-Позднякова І. С. Основи наукових досліджень у вищій школі: навч. посіб. [для студ. вищ. навч. закл.] / І. С. П'ятницька-Позднякова. — К.: Центр навчальної літератури, 2003. — 116 с.
2. Ивлиева Е. О. Обоснование критериев подобия для физического моделирования деформирования обводненных и разуплотненных грунтов: м-лы VIII междунар. начн.-практ. конфер. молодых ученых, аспирантов и студентов / Е. О. Ивлиева // Перспективы развития строительных технологий. — Днепропетровск: НГУ, 2014. — С. 100–103.
3. Фурдей П. Г. Формирование искусственного основания фундаментов на подработанных территориях: м-лы VII междунар. начн.-практ. конфер. молодых ученых, аспирантов и студентов / П. Г. Фурдей, Е. О. Ивлиева // Перспективы развития строительных технологий. — Днепропетровск: НГУ, 2013. — С. 34–37.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Голодновым А. И., к.т.н., гл.инж. ЧП «Центр проектирования и инженерии» Антошиной Т. В.

Статья поступила в редакцию 17.06.14.

Івлієва Є. О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМУВАННЯ ГІДРОАКТИВІЗОВАНИХ ҐРУНТІВ

Стаття присвячена дослідженню закономірностей деформування ґрунтів. Наведено результати досліджень фізико-механічних властивостей сугісків. За результатами лабораторних досліджень отримано залежність абсолютної величини деформування сугісків від стискаючого навантаження для типових інженерно-геологічних розрізів характерних для умов Донбасу.

Ключові слова: дослідження, моделювання, ґрунт, деформування, компресійні випробування.

Ivlieva E. O. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

PHYSICAL MODELING OF HYDROACTIVATED SOIL DEFORMATION

The article is devoted to investigation of deformation soils regulations. The results of physical mechanical sandy clay properties investigations are given. In the results of laboratory investigations the dependence of sandy clay deformation absolute value from compressed loading for typical engineering and geological cuttings features for Donbas conditions is obtained.

Key words: investigations, modeling, soil, deformation, compression tests.

УДК69.059.25:624.15:624.154.51

Абед С. Ф.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

ОБОСНОВАНИЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ФУНДАМЕНТА С ПОМОЩЬЮ ГРУНТОГЛИНОЦЕМЕНТНЫХ СВАЙ В ПРОСАДОЧНЫХ СУГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

В работе приведены результаты математического моделирования (МКЭ) осадок и просадок фундаментов в природном, водонасыщенном состоянии, и после реконструкции с помощью грунтоглиноцементной сваи (технология струйной цементации) в суглинистых грунтах.

Ключевые слова: грунт, фундамент, моделирование, реконструкция, суглинок, сваи.

Актуальность проблемы. Как известно, к просадочным относят грунты, которые, находясь под нагрузкой от собственного веса и внешнего давления, дают при замачивании дополнительные большие осадки, вызванные нарушениями их структурных связей [1]. Определение неравномерных осадок фундамента одного и того же здания или сооружения называется разностью абсолютных осадок этих фундаментов, поскольку они имеют разные размеры, форму, глубину заложения, нагрузки и пригрузки; влиянием напряжений грунта в основании соседних фундаментов, а также разной по величине и времени протекания сжимаемости (неоднородности) грунта под ними. Причиной неравномерной осадки (крен, перекося, изгиб и т. д.) отдельного фундамента может быть как внецентренная нагрузка, так и различие в сжимаемости грунта основания в пределах контура подошвы здания и сооружения. Деформации оснований зданий и сооружений на просадочных грунтах определяются суммированием осадок и просадок [2]. Принимается, что неравномерные деформации грунтов в основании происходят только при местном их замачивании вследствие просадки в пределах деформируемой зоны в зависимости от нагрузки фундаментов и частично собственного веса грунта [4].

Одним из инженерных решений, обеспечивающих устойчивость и эксплуатационную надежность проектируемых соору-

жений, является технология струйной цементации. Технология струйной цементации грунтов получила широкое распространение при решении сложных задач в области подземного строительства [5].

Цель работы. Обоснование реконструкции фундамента с помощью грунтоглиноцементной сваи в просадочных суглинистых грунтах

Изложение основного материала. Для реконструкции фундамента в просадочных суглинистых грунтах с помощью технологии струйной цементации предусматривается и рассматривается задача работы при трех вариантах состояния грунта:

1. Моделирование грунтового основания в природном состоянии.
2. Моделирование грунтового основания в водонасыщенном состоянии.
3. Моделирование грунтового основания при усилении сваями с помощью технологии струйной цементации грунта.

Решение поставленных задач выполнялось на примере ленточных фундаментов мелкого заложения малоэтажных зданий с бескаркасной конструктивной схемой.

Краткое описание зданий: высота этажа не более 3 м; фундаменты ленточные из бутовой кладки с монолитной плитной частью, глубина заложения 1 м; стены из кирпичной кладки, пролет не более 6 м; перекрытия и покрытие из пустотных плит; кровля рулонная совмещенная.

БУДІВНИЦТВО

Нагрузки: характеристическое значение нагрузки от собственного веса перекрытия не более 5 кПа, от веса покрытия не более 8 кПа; характеристическое значение полезной нагрузки на перекрытие не более 2 кПа; характеристическое значение снеговой нагрузки не более 1,6 кПа.

В зависимости от этажности зданий приняты следующие варианты погонной нагрузки на подошву фундамента: 100; 200; 300; 400 кН/м.

Для первого варианта основания в природном состоянии в качестве грунта принят суглинок просадочный с характеристиками, приведенными в таблице 1.

Таблица 1 — Характеристики суглинка

Наименование характеристик	Ед. изм.	Показатель
Влажность на границе текучести	доли ед.	0,35
Влажность на границе пластичности	доли ед.	0,21
Число пластичности		0,15
Влажность природная	доли ед.	0,19
Влажность водонасыщения	доли ед.	0,25
Показатель текучести		0,14
Показатель текучести в водонасыщенном грунте		0,30
Удельный вес частиц грунта	кН/м ³	26,39
Удельный вес грунта	кН/м ³	18,26
Удельный вес сухого грунта	кН/м ³	15,34
Удельный вес в водонасыщенном грунте	кН/м ³	19,14
Удельный вес взвешенного в воде грунта	кН/м ³	9,63
Пористость	доли ед.	0,42
Коэффициент пористости природного слож.	доли ед.	0,72
Степень влажности в природном состоянии		0,70
Степень влажности в водонасыщенном состоянии		0,92
Недостаток водонасыщения	доли ед.	0,06
Полная влагоемкость		0,26
Относительная просадочность грунта при уплотняющем напряжении (МПа)		
P = 0,050		0,0057
P = 0,100		0,0082
P = 0,150		0,0096
P = 0,200		0,0114
P = 0,250		0,0123
P = 0,300		0,0129
Начальное просадочное давление	МПа	0,1603
Модуль деформации грунта в природном состоянии.	МПа	11,7
Модуль деформации грунта в заданном состоянии	МПа	5,9
Степень изменчивости сжимаемости по модулю деформации.		1,98
Угол внутреннего трения в заданном состоянии	град.	23
Удельное сцепление грунта в заданном состоянии	МПа	0,021

Для упрощения задачи принимается, что подошва фундамента расположена на уровне планировочной отметки, напряжения от собственного веса грунта, расположенного выше подошвы фундамента, отсутствуют, расчетные сопротивления грунта принимаются условно по таблице Е.4 [6]: для просадочного грунта в сухом

состоянии $R_0 = 400$ кПа, для водонасыщенного – 200 кПа. Первоначально основание рассчитывалось по второй группе предельных состояний в соответствии с требованиями [6]: определялась осадка с использованием расчетной схемы в виде линейно-деформируемого пространства, и мощность сжимаемой толщи. Исходные

данные: планировочная отметка земли 0м; отметка подошвы фундамента -1м; ширина подошвы фундамента -1,2 м; мощность слоя грунта ниже подошвы фундамента 8 м; высота расчетного слоя - 0,5 м.

На следующем этапе выполнялось непосредственно моделирование грунтового основания. Расчет выполнялся методом конечных элементов (МКЭ) с использованием ПК ЛИРА.

Грунтовое основание аппроксимировалось конечными элементами типа КЭ281 – физически нелинейный прямоугольный элемент плоской задачи (грунт).

Габариты грунтового основания в расчетной схеме задавались с таким расчетом, чтобы убрать влияние краевого эффекта от наложенных связей закрепления, приблизительно на 7 м больше ширины подошвы – фундамента в каждую сторону и ниже границы сжимаемой толщи на 12 м. Шаг триангуляции принимался 0,3 м – 1 м.

Рассматривались два нагружения: первое — собственный вес грунта с коэффициентом 0,2; второе — давление под подошвой фундамента.

Результаты расчетов в линейной постановке задачи приведены на рисунках 1 и 2.

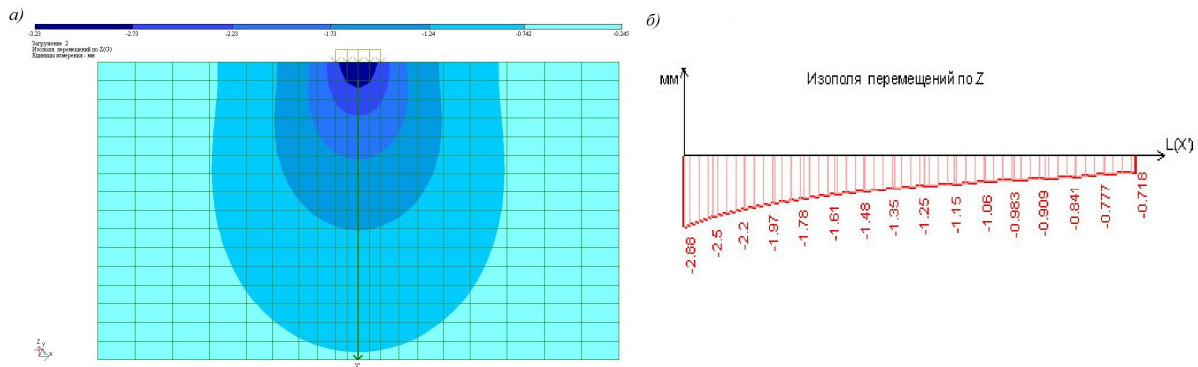


Рисунок 1 — Перемещения по Z ,мм (а) и эпюра по сечению X' для 2 нагружения (б)

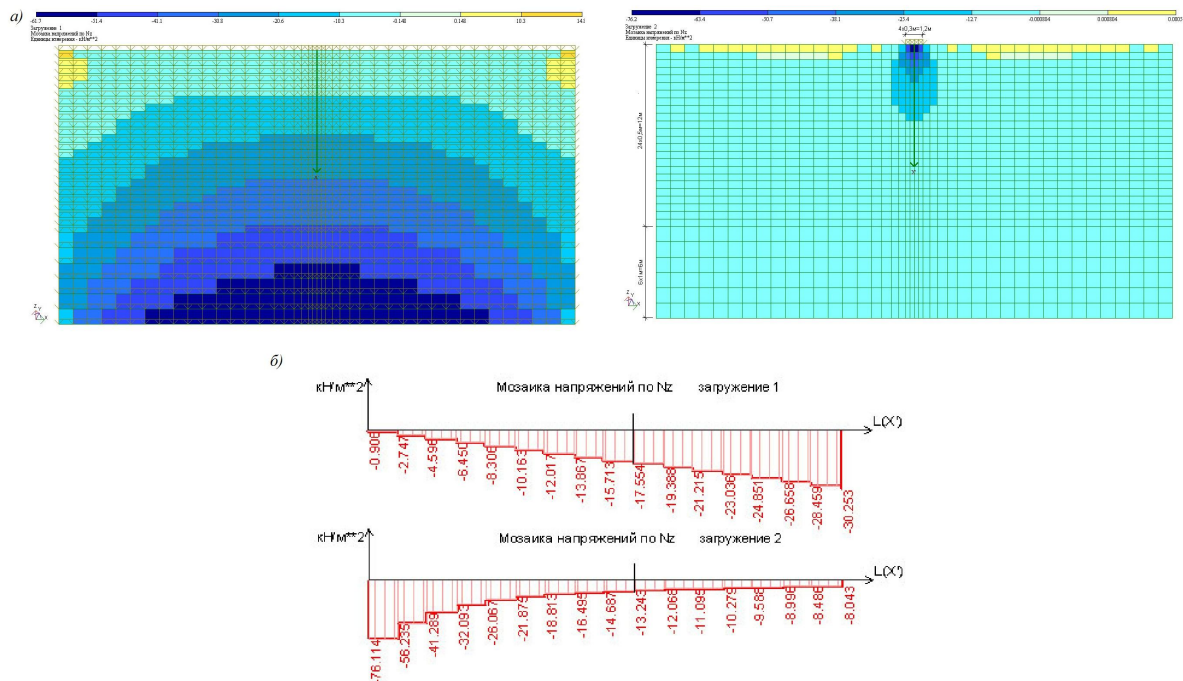


Рисунок 2 — Напряжения N_z кПа (а) и эпюры по сечению X' для 1 и 2 нагружений (б)

Сравнение результатов расчетов основания по [6] и методом конечных элементов при погонной нагрузке на подошву фундамента 100; 200; 300; 400 кН/м приведены на рисунках 3, 4.

Как видно из рисунка 3, характер распределения напряжений в грунтовой тол-

ще по разным методикам расчета одинаков. Величина напряжений в локальной зоне концентрации под подошвой фундамента по МКЭ незначительно меньше в сравнении с расчетом по [6], погрешность составляет не более 2,5%.

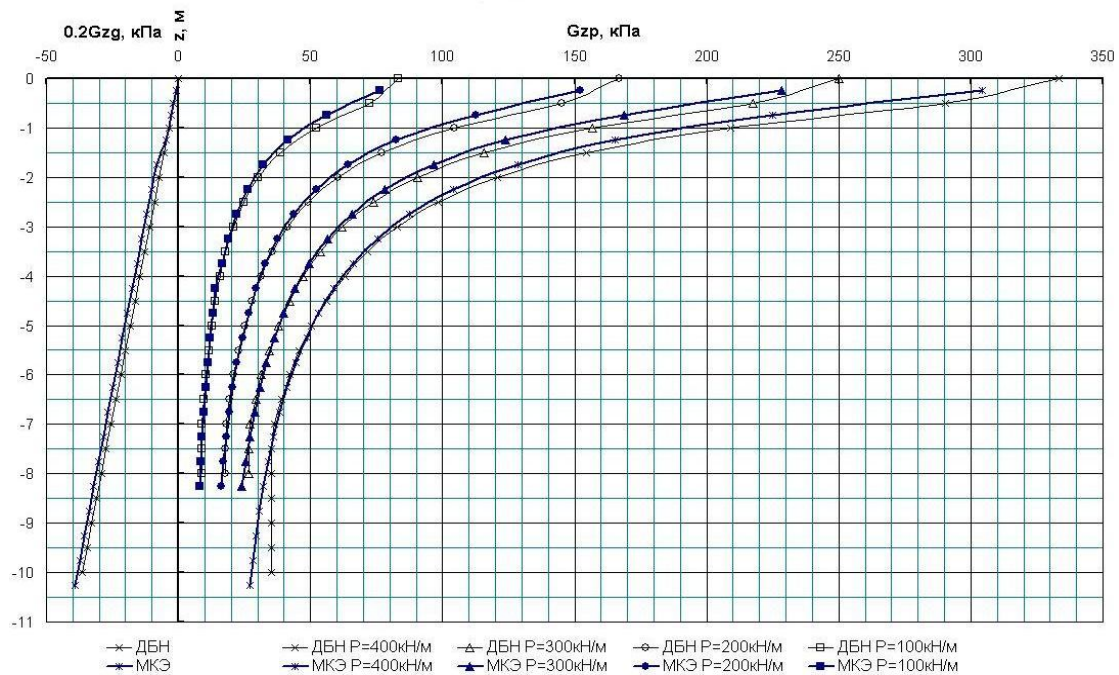


Рисунок 3 — График сравнения результатов расчета основания по напряжениям в природном состоянии

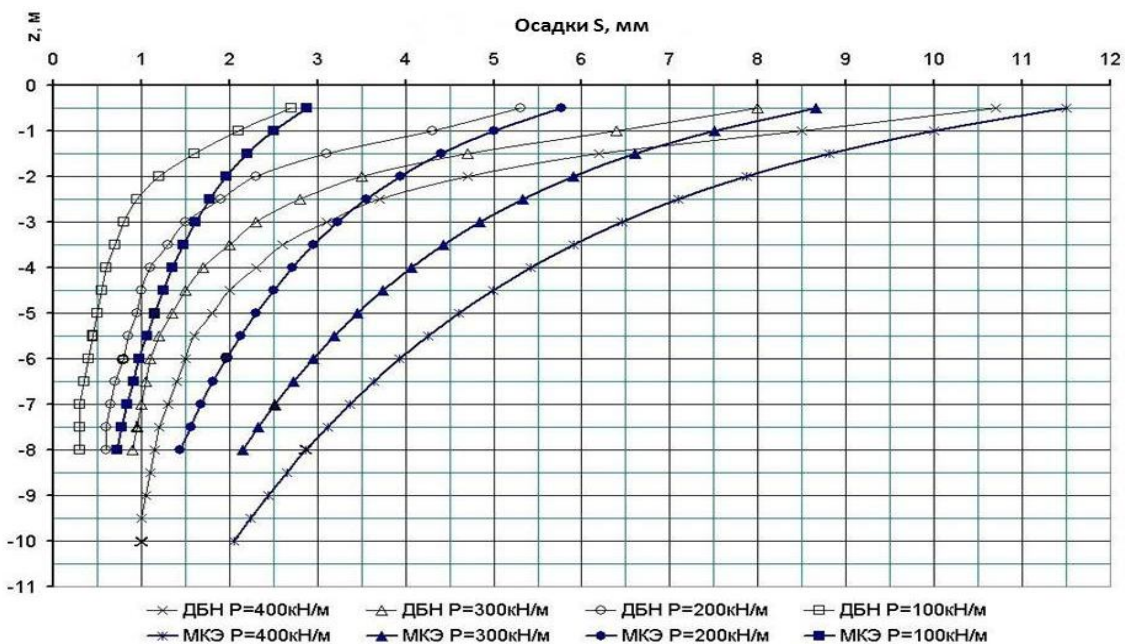


Рисунок 4 — График сравнения результатов расчета основания по осадкам в природном состоянии

В соответствии с рисунком 4 характер распределения осадок элементарных слоев по [6] и перемещений узлов по МКЭ значительно отличается. Величины осадок и перемещений в зоне под подошвой фундамента приблизительно одинаковые, с увеличением глубины определения осадок и полученных в результате расчета перемещений наблюдается увеличение значений вертикальных перемещений приблизительно в 2 раза. После прохождения границы сжимаемой толщи осадки и перемещения в виду своей малости отличаются незначительно.

Для второго варианта основания в водонасыщенном состоянии с характеристиками, приведенными выше, рассматривались следующие исходные данные: планировочная отметка земли 0 м; отметка подошвы фундамента —1 м; ширина подошвы фундамента 1,2 м; мощность слоя грунта ниже подошвы фундамента 10 м; высота расчетного слоя 0,5 м; грунты просадочные с начальным просадочным давлением 160 кПа. Погонные нагрузки на подошву фундамента 200; 300; 400 кН/м.

Основание рассчитывалось по второй группе предельных состояний в соответ-

вии с требованиями [6]: определялась осадка с использованием расчетной схемы в виде линейно-деформируемого пространства, S ; просадка слоев верхней зоны от действия суммарных напряжений собственного веса грунта и дополнительных напряжений от фундамента при полном водонасыщении, S_{sl} . При этом уровень грунтовых вод принимался на отметке подошвы фундамента; суммарная осадка, $S+S_{sl}$.

Рассматривались три загрузки: первое — собственный вес водонасыщенного грунта с коэффициентом 1; второе — давление под подошвой фундамента; третье — для учета сжимаемости водонасыщенного грунта от действия суммарной нагрузки в виде дополнительного давления под подошвой фундамента. Для анализа результатов задавались следующие сочетания нагрузок: 1 — загрузка №2 для определения осадок, S ; 2 — загрузка №2 + загрузка №3 — для определения суммарных осадок, $S+S_{sl}$; 3 — загрузка №1 + загрузка №2 для определения суммарных напряжений под подошвой фундамента. Сравнительная характеристика результатов расчетов основания по [6] и МКЭ приведена на рисунках 5,6.

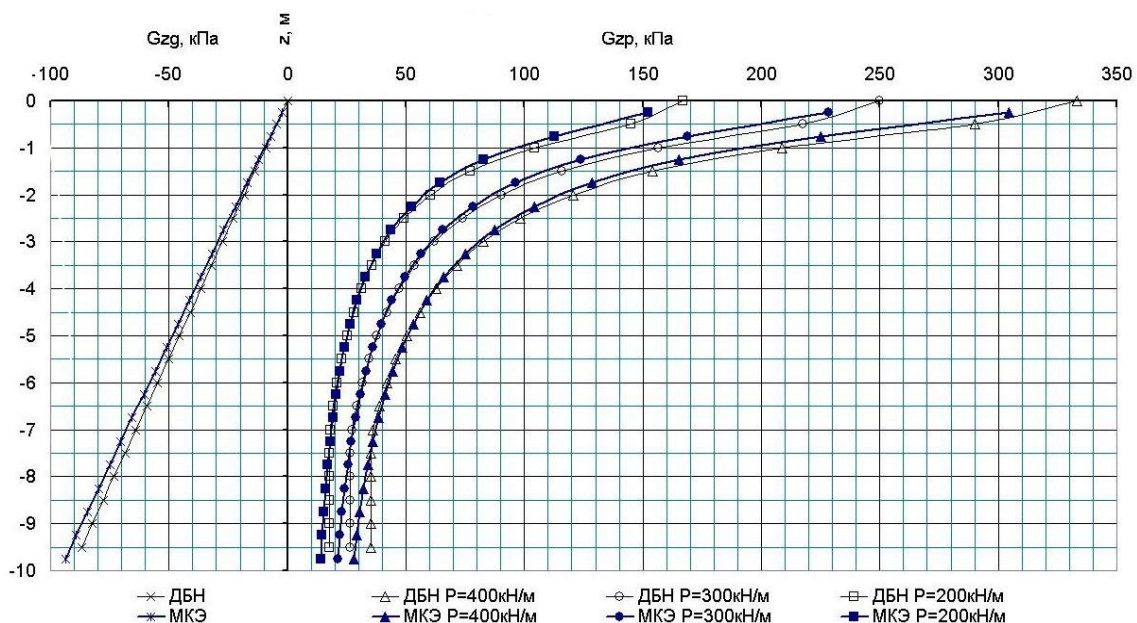


Рисунок 5 — График сравнения результатов расчета основания по напряжениям в водонасыщенном состоянии

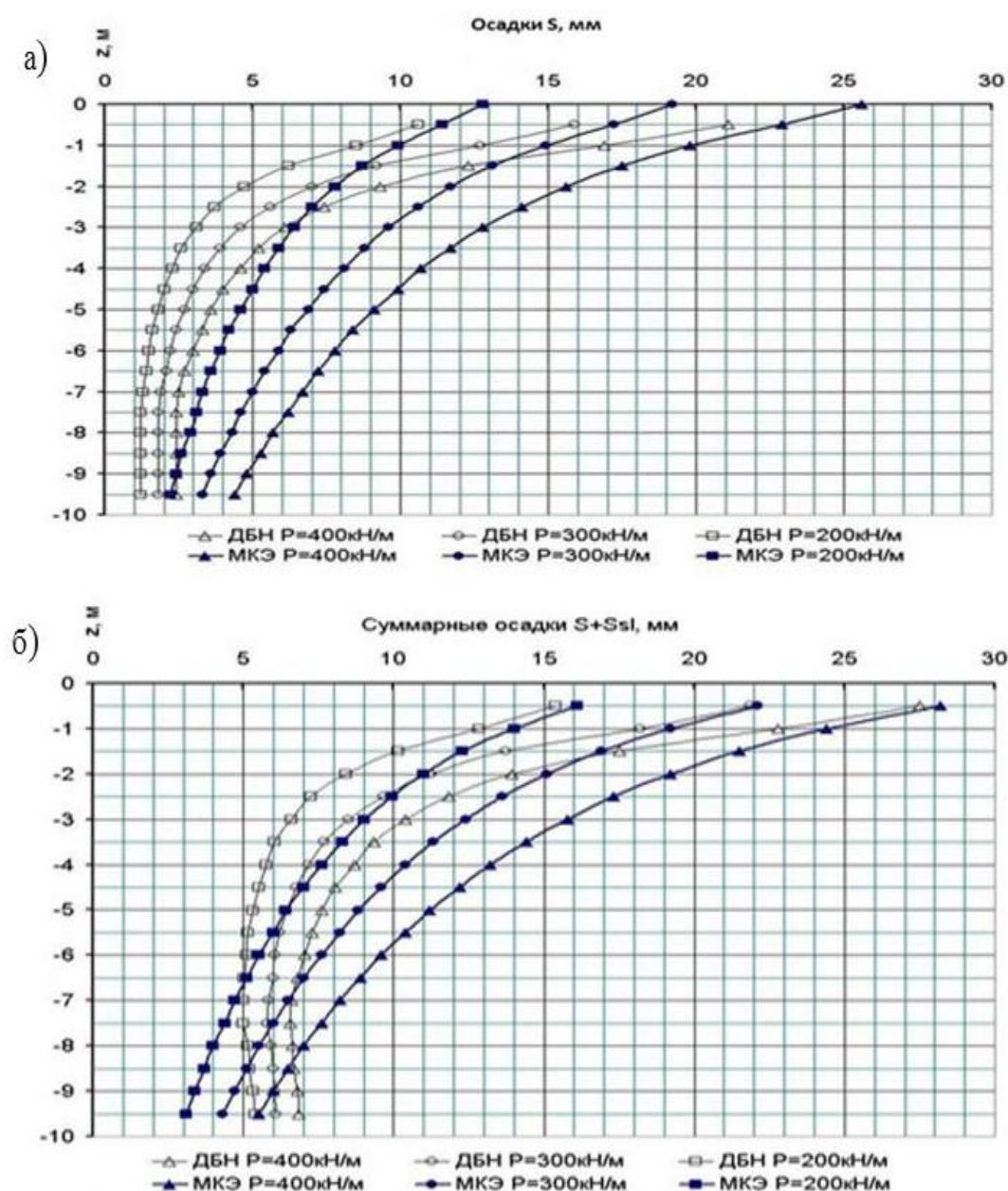


Рисунок 6 — График сравнения результатов расчета основания по деформации
а) осадки, мм, (б) суммарные осадки, мм в водонасыщенном состоянии

Для третьего варианта водонасыщенного просадочного грунта, усиленного взаимносекущимися грунтоцементными сваями, с помощью технологии струйной цементации, расположенными возле ленточного фундамента с шириной основания $b = 1,2$ м (рис. 7).

В расчетной схеме задачи принимались следующие допущения:

– физико-механические характеристики грунтоцементной свай приняты одинаковыми по всему объему;

– к расчету принимается поперечное сечение 1 п.м. «стены в грунте» шириной b_1 и высотой h_1 , образованное из взаимносекущихся грунтоцементных свай;

– расчетная ширина сечения $b_1 \approx d_1 = k \cdot D$, где k — коэффициент, определяющий степень взаимного пересечения свай.

Характеристики суглинка принимались по таблице 1.

Исходные данные для расчета: ширина подошвы фундамента 1,2 м; мощность слоя грунта ниже подошвы фундамента 12 м; высота расчетного слоя 0,5 м; грунты

просадочные с начальным просадочным давлением 160 кПа. Погонные нагрузки на подошву фундамента 200; 300; 400 кН/м.

Характеристики грунтоцементной сваи приведены в таблице 2.

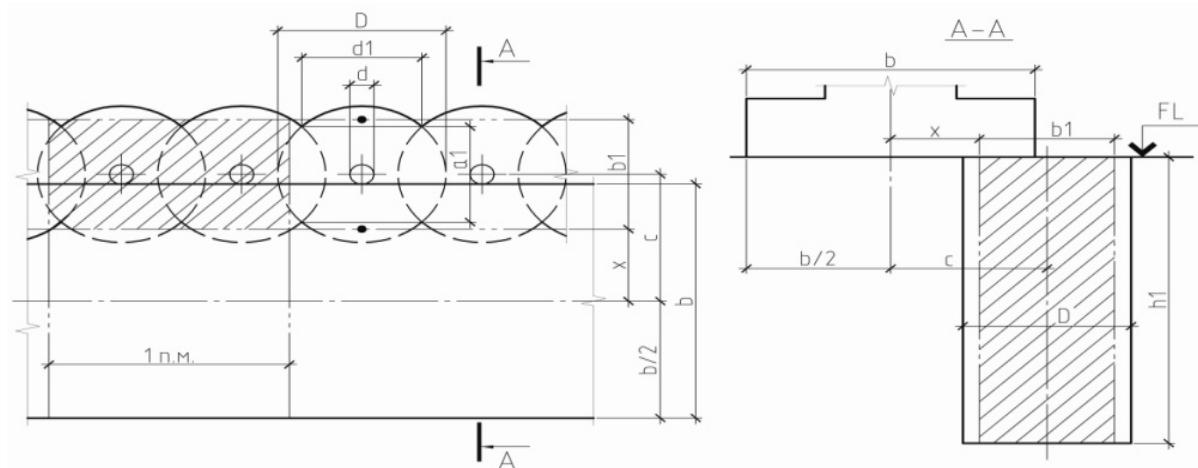


Рисунок 7 — Схема расположения грунтоцементных свай

Таблица 2 — Характеристики грунтоглиноцементной сваи в суглинистых грунтах

№	Добавки от массы цемента, %	Модуль деформации, Е, МПа	Прочность на сжатие, R, МПа	Кoeff. Пуассона, μ	Диаметр, D, мм	Предельная глубина бурения скважины, h_{lmax} , м
1	2	930	9,81	0,25	700	7,5

Рассматривались три загрузки: первое — собственный вес водонасыщенного грунта с коэффициентом 1; второе — давление под подошвой фундамента; третье — для учета сжимаемости водонасыщенного грунта от действия суммарной нагрузки в виде дополнительного давления под подошвой фундамента.

Для анализа результатов задавались следующие сочетания нагрузок: 1 — загрузка №2 для определения осадок, S; 2 — загрузка №2 + загрузка №3 — для определения суммарных осадок, $S+S_{sl}$; 3 — загрузка №1 + загрузка №2 для определения суммарных напряжений под подошвой фундамента.

Свая рассматривалась как физически нелинейный прямоугольный элемент плоской задачи (балка-стенка). Объемный вес грунтоглиноцемента принимался равным 20 кН/м³, расчетная ширина сечения сваи — $b_1=0,715D \approx 500$ мм, расчетная высота сваи — $h_1=7$ м. Изополя напряжений при погонной нагрузке на фундамент 400 кН/м приведены на рисунке 8. Сравнительная характеристика результатов расчета основания по перемещениям для свай и по напряжениям с добавками 2% (поз.1 табл. 2) приведена на рисунках 9, 10. Здесь же показаны результаты расчета основания фундамента без усиления.

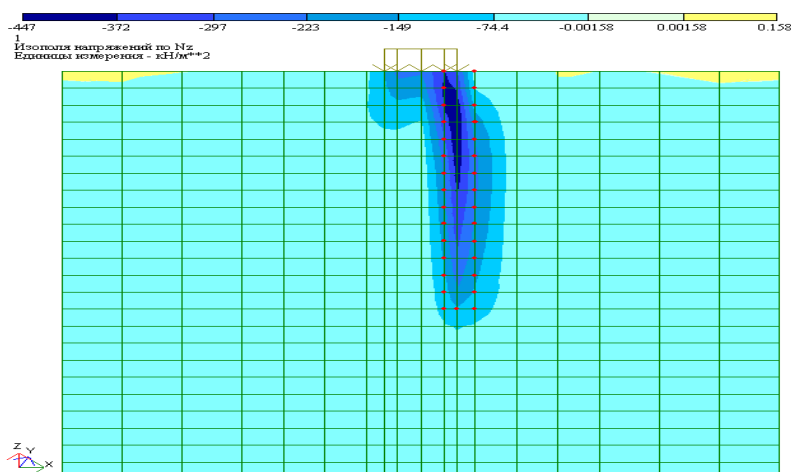
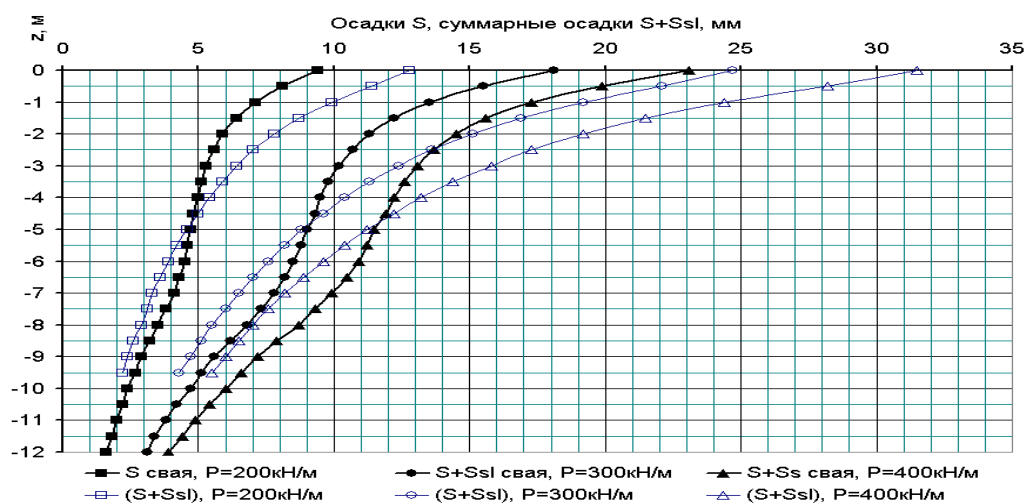
Рисунок 8 — Изополя напряжений N_{zp} , $P=400$ кПа

Рисунок 9 — График сравнения результатов расчета основания по перемещениям

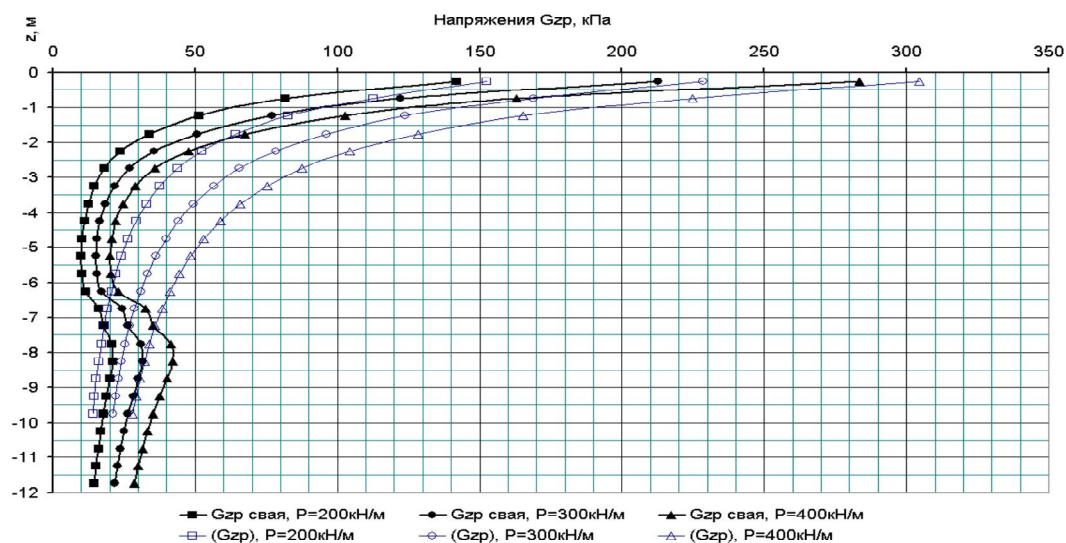


Рисунок 10 — График сравнения результатов расчета основания по напряжениям

Как видно из рисунка 9 при усилении основания, сложенного суглинистыми просадочными грунтами, грунтоглиноцементными сваями при малых нагрузках на подошву ленточного фундамента (до 200 кН/м) просадки основания не происходит.

Напряжения под подошвой фундамента от внешней нагрузки при усилении основания сваями меньше, по сравнению с водонасыщенным основанием без усиления

вследствие восприятия частичной нагрузки самими сваями (рис. 10).

Выводы. По сравнительным характеристикам результатов расчета основания по перемещениям в водонасыщенном состоянии и после усиления видно, что реконструкция фундамента с помощью грунтоглиноцементных свай (технологии струйной цементации) даёт максимальные показатели при нагрузках до 200 кН/м в суглинистых грунтах.

Бібліографічний список

1. ДБН В.1.1-5-2000. Будинки і споруди на підроблюваних територіях і просідаючих грунтах.
2. Силкин А. М. Основания и фундаменты: учебн. и учебн. пособ. [для студ. высш. учебн. заведений] / А. М. Силкин, Н. Н. Фролов. — М.: Агропромиздат, 1987. — 288 с.
3. Основания и фундаменты / Г. И. Швецов, И. В. Носков, А. Д. Слободян, Г. С. Коськова. — М.: Высш. шк, 1991. — 383 с.
4. Инструкция по проектированию бескаркасных жилых домов, строящихся на просадочных грунтах с применением комплекса мероприятий. РСН 297-78. — Киев: НИИСП, 1978. — 106 с.
5. Малинин А. Г. Струйная цементация грунтов. — М.: ОАО изд. Стройиздат, 2010. — 226 с.
6. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування. — К.: Мінрегіонбуд Укр., 2009.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Голодновым А. И.,
к.т.н., с.н.с. ЛФ НИИСК Куркин Н. П.*

Статья поступила в редакцию 06.06.14.

Абед. С. Ф. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

ОБҐРУНТУВАННЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ ФУНДАМЕНТУ ЗА ДОПОМОГОЮ ГРУНТОГЛИНОЦЕМЕНТНИХ ПАЛЬ У ПРОСАДНИХ СУГЛИНИСТИХ ҐРУНТАХ

У роботі наведені результати математичного моделювання (МКЕ) осідання і просідань фундаментів у природному, водонасиченому стані і після реконструкції за допомогою грунтоглиноцементної палі (технологія струминної цементації) в суглинистих Ґрунтах.

Ключові слова: ґрунт, фундамент, моделювання, реконструкція, суглинок, палі.

Abed S. F. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

SUBSTANTIATION OF FOUNDATION RECONSTRUCTION WITH GROUND CLAY-CEMENT PILES IN COLLAPSING LOAMY SOILS

The results of mathematic simulation (FEM), foundation settlement and subsidence in natural water-saturated condition, and after reconstruction using ground clay-cement piles (cement grout jetting technology) in loamy soils are introduced.

Key words: soil, foundation, simulation, reconstruction, sandy clay, piles.

**ЕЛЕКТРОТЕХНІКА.
РАДІОТЕХНІКА**

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА.
РАДИОТЕХНИКА**

**ELECTRICAL ENGINEERING.
RADIOTECHNICS**

UDC.62-83:612.313

*Candidate of Engineering Sciences Dryuchin V.G.,
Candidate of Engineering Sciences Samcheliev Yu.P.,
Belokha G.S.,
Bakaev O.V.
(DonSTU, Alchevsk, Ukraine)*

POWER SUPPLY WITH DISCRETE ELECTRICITY CONSUMPTION

We propose a discrete power supply with power consumption and relay—controlled electromagnetically compatible with the circuit, which is invariant to the action of the perturbation and reduced losses in the power supply line. The analytical expressions to calculate the frequency relay modes, power losses and simulation results are given.

Key words: electromagnetic compatibility, relay control, invariance, power loss, power supply

At the present time the solution of electromagnetic compatibility and energy saving problem is at the first place during the development of any converters of electric energy parameters. The most effective means of integrated solutions of this problem (inactive component of the total compensation of power and the power distortion) are the power active filters (PAF) with Pulse Width or vector control. Algorithms implementing these controls are based on a large amount of measurement, conversion and computing operations, which lead to complication control system and deterrence of their introduction [1].

Another way to solve the EMC problem is proposed in this article: using tracker system with forced formation circuit consumed currents close to sinusoidal shape in the absence of a phase shift between voltage and current (the problem of EMC is solved) and relay control (the problem of speed, accuracy, low sensitivity of the perturbation to the action is solved). Such a solution can dramatically simplify both power section and control system [2].

At the expense of power factor close to unit, a reduction of the quantity current consumed by the circuit and hence reduction of the power loss in the supply lines is reached.

The proposed control power supply algorithm allows additionally reducing the power

loss in the line due to the discrete electricity consumption of the circuit.

Figure 1 shows a functional block diagram of the power supply, made on the basis of a single-phase module (SPM).

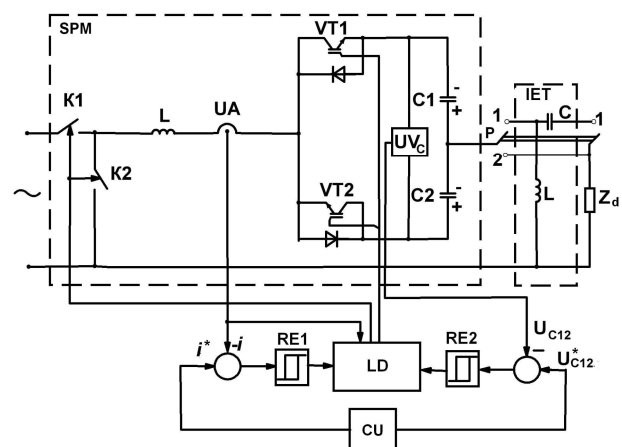


Figure 1 — Functional diagram of the power supply

The module consists of two keys K1 and K2 with bilateral conductive, input throttle L , current sensor UA, two IGBT transistors shunted by bypass diodes, two capacitors C1 and C2 and the voltage sensor UVc on the capacitors.

The control system consists of coefficient unit (CU) of capacitor voltages U_{C12}^* and current consumption of the circuit $i = I_m \sin \omega t$, two adders, two relay elements RE1 and RE2

and logic device (LD) providing work of the keys K1, K2 and transistors VT1, VT2.

Before working it is necessary the capacitors C1 and C2 to be charged to a voltage exceeding the peak value of the phase voltage (it is a necessary condition of the module efficiency) $U_{C1} = U_{C2} > U_m$. When applied to a summing input of the first adder the signal $i = I_m \sin \omega t$, and the countdown input from the UA voltage output sensor, the unit impulse or zero signal, depending on the sign of the error $\Delta i = i^* - i$ unit appears on the output element of the relay RE1.

The transistors VT1 and VT2 are connected to the capacitors C1 and C2 according to the phase voltage or counter, keeping current in the current corridor, which is set by the width of the hysteresis loop relay element RE1.

The equations describing the behavior of the current in the load, depending on the magnitude and sign of the error is of the form (we neglect throttle active resistance)

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} + u_d &= U_m \sin \omega t + U_{C1} \\ -a \leq \Delta i \leq a, \frac{di}{dt} &> 0 \\ L \frac{di}{dt} + u_d &= U_m \sin \omega t - U_{C2} \\ -a \leq \Delta i \leq a, \frac{di}{dt} &< 0, \end{aligned} \quad (1)$$

where $U_m \sin \omega t$ is the instantaneous voltage circuit, i is the instantaneous current in the load, L is throttle inductivity, $2a$ is hysteresis width relay element RE1, u_d — the instantaneous load voltage.

The current fragment formation consumed by the circuit is shown in Figure 2, according to which the expressions describing the behavior of the current have the form

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin \omega t + \frac{2a}{\tau_1} t \quad -a \leq \Delta i \leq a, \frac{di}{dt} > 0 \\ i &= I_m \sin \omega t + \frac{2a}{\tau_2} t \quad -a \leq \Delta i \leq a, \frac{di}{dt} < 0, \end{aligned} \quad (2)$$

where τ_1 is the current increase time from $(i^* - a)$ to $(i^* + a)$, τ_2 is current reduction time from $(i^* + a)$ to $(i^* - a)$.

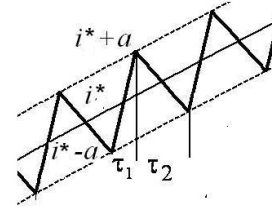


Figure 2 — Determination of the time τ_1 and τ_2

In general, the active load comprises an active resistance R_d , inductivity L_d and capacitance C_d . Then the voltage on the load will be

$$u_d = u_R + u_L + u_C, \quad (3)$$

where u_R is the voltage on R_d , u_L is the voltage on L_d , u_C is the voltage on C_d .

Taking into consideration (2) the voltage

$$u_R = I_m^* R_d \sin \omega t \quad (4)$$

is determined

$$\text{By } -a \leq \Delta i \leq a, \frac{di}{dt} > 0$$

$$u_L = \omega L_d I_m^* \cos \omega t + \frac{2a L_d}{\tau_1}; \quad (5)$$

$$u_C = -\frac{1}{\omega C_d} I_m^* \cos \omega t + \frac{1}{C} \int \frac{2a}{\tau_1} t dt + A; \quad (6)$$

$$\text{By } -a \leq \Delta i \leq a, \frac{di}{dt} < 0$$

$$u_L = \omega L_d I_m^* \cos \omega t - \frac{2a L_d}{\tau_2}; \quad (7)$$

$$u_C = -\frac{1}{\omega C_d} I_m^* \cos \omega t - \frac{1}{C} \int \frac{2a}{\tau_2} t dt + A; \quad (8)$$

$$\frac{1}{C_d} \int \frac{2a}{\tau_1} t dt \approx 0, \quad \frac{1}{C_d} \int \frac{2a}{\tau_2} t dt \approx 0. \quad (9)$$

Since switching keys K1 and K2 is carried out by $\omega t = 0$ and $\omega t = \pi$, so from (6) and (8) with (9), the constant of integration is

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{\omega C_d} I_m^* \quad \text{npu } \omega t = 0 \\ A &= -\frac{1}{\omega C_H} I_m^* \quad \text{npu } \omega t = \pi \end{aligned} \quad (10)$$

Solving (1), subject to (2-10) with respect to τ_1 and τ_2 , we obtain

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{2a(L + L_d)}{U_1 - U_2 + U_{C1} \pm \frac{1}{\omega C_H} I_m^*} \\ \tau_2 &= \frac{2a(L + L_d)}{-(U_1 - U_2) + U_{C2} \pm \frac{1}{\omega C_d} I_m^*}, \end{aligned} \quad (11)$$

where $U_1 = (U_m - I_m^* R_d) \sin \omega t$

$$U_2 = \left[\omega(L + L_d) - \frac{1}{\omega C_d} \right] I_m^* \cos \omega t$$

Then the frequency of the relay mode in the formation of the current i^*

$$\nu_1 = \frac{U_C^2 + (U_1 - U_2)^2 \pm \frac{1}{\omega C_d} I_m^*}{4a(L + L_d)}. \quad (12)$$

The stable operation of the source will be subject to the power balance, i.e. equality of power consumption of the network and load power. Control of the balance of power conservation is carried out by controlling the keys K1 and K2.

If the power consumed from the circuit $P_c = \frac{U_m I_m^*}{2}$ (the key K1 is closed) is more than the power of the load, the capacitors C1 and C2 are charged from the voltage $(U_{C12}^* - b)$ to $(U_{C12}^* + b)$ (Fig. 3). Upon reaching the voltage values $(U_{C12}^* + b)$ key K1 opens and K2 closes and capacitors start

discharging from the voltage $(U_{C12}^* + b)$ to $(U_{C12}^* - b)$, then processes are repeated.

When the capacitors are being charged the energy balance equation has the form

$$\begin{aligned} & \left(\frac{U_m I_m^*}{2} - \frac{I_m^{*2} R_d}{2} \right) t_1 = \\ & = \frac{C_{12}}{2} ((U_{C12}^* + b)^2 - (U_{C12}^* - b)^2), \end{aligned} \quad (13)$$

where t_1 is time to increase the voltage on the capacitors, $C_{12} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$, $2b$ - hysteresis width relay element PE2, $U_{C12}^* = U_{C1} + U_{C2}$.

We determine the time from (13)

$$t_1 = \frac{4b C_{12} U_{C12}^*}{U_m I_m^* - I_m^{*2} R_d} = \frac{2b C_{12} U_{C12}^*}{P - P_d}. \quad (14)$$

The energy balance equation at the capacitor voltage reduction stage will be

$$\begin{aligned} & -\frac{I_m^{*2} R_d}{2} t_2 = \frac{C_{12}}{2} ((U_{C12}^* - b)^2 - \\ & - (U_{C12}^* + b)^2), \end{aligned} \quad (15)$$

where t_2 voltage reducing time.

We determine t_2 from (15)

$$t_2 = \frac{4b C_{12} U_{C12}^*}{I_m^{*2} R_d} = \frac{2b C_{12} U_{C12}^*}{P_d}. \quad (16)$$

We determine the frequency shift keys K1 and K2 as

$$\nu_2 = \frac{1}{t_1 + t_2} = \frac{P_d(P - P_d)}{2b C_{12} U_{C12}^* P}. \quad (17)$$

Relative duration of the power source is in the circuit will be

$$\gamma = \frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{I_m^{*2} R_d}{U_m I_m^*} = \frac{P_d}{P}. \quad (18)$$

The expression (18) allows to determine the range of current control at a given rated

load resistance and the range of variation of the load resistance at a given current.

$$\begin{aligned} 0 \leq I_m^* \leq \frac{U_m}{R_H}, \quad R_d = \text{const} \\ 0 \leq R_d \leq \frac{U_m}{I_m^*}, \quad I_m^* = \text{const} \end{aligned} \quad (19)$$

The control algorithm keys K1 and K2 allows to reduce power loss input line in accordance to

$$\Delta P = \frac{\gamma^2 I_m^{*2} R_l}{2}. \quad (20)$$

Figure 3 shows the processes in the power source in the current source. Figure 3a shows the response of the source to the reduction of the current task. Sinusoidal current and cur-

rent coincidences in the phase with the circuit voltage are saved and electromagnetic compatibility is not broken. Figure 3b shows the response of the source to the reduction of the supply voltage. The load current is not changed, i.e. source is not sensitive to the effects of such perturbations, sinusoidal current and $\cos\varphi = 1$ are saved.

Figure 4 shows the process when the load is fed through inductive capacitive transducer (P switch in position 2). Figure 4a – shows the response source to the reduction to the voltage, figure 4b shows the response to the reduction in the supply voltage. As in the case of a current source, electromagnetic compatibility is not broken, the source is not sensitive to changes in voltage.

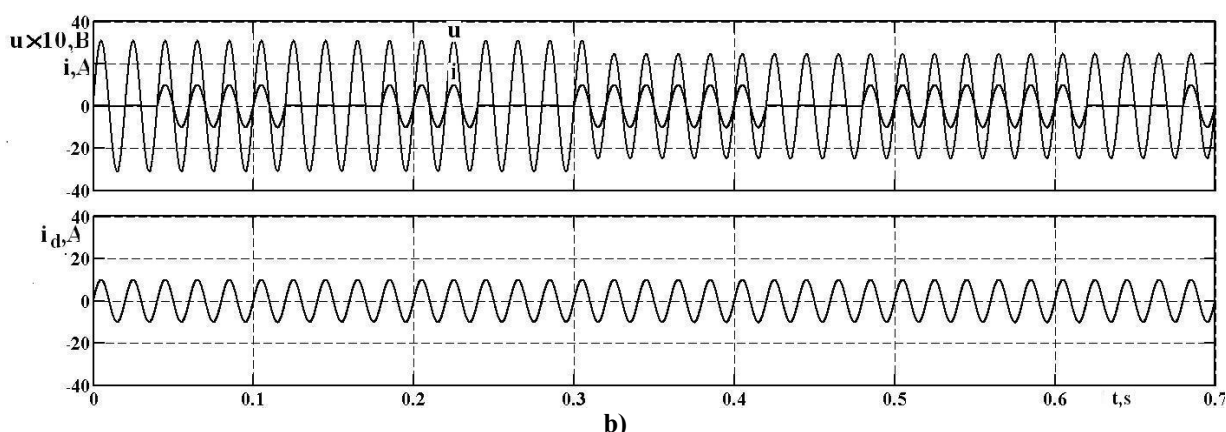
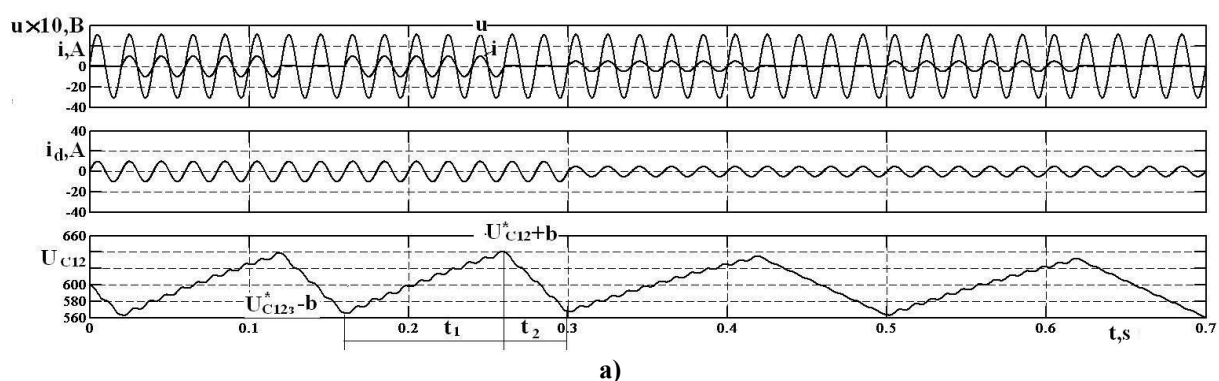


Figure 3 shows the processes in the power supply in the current source
a) reaction to the change in the current job, b) response to changes in voltage

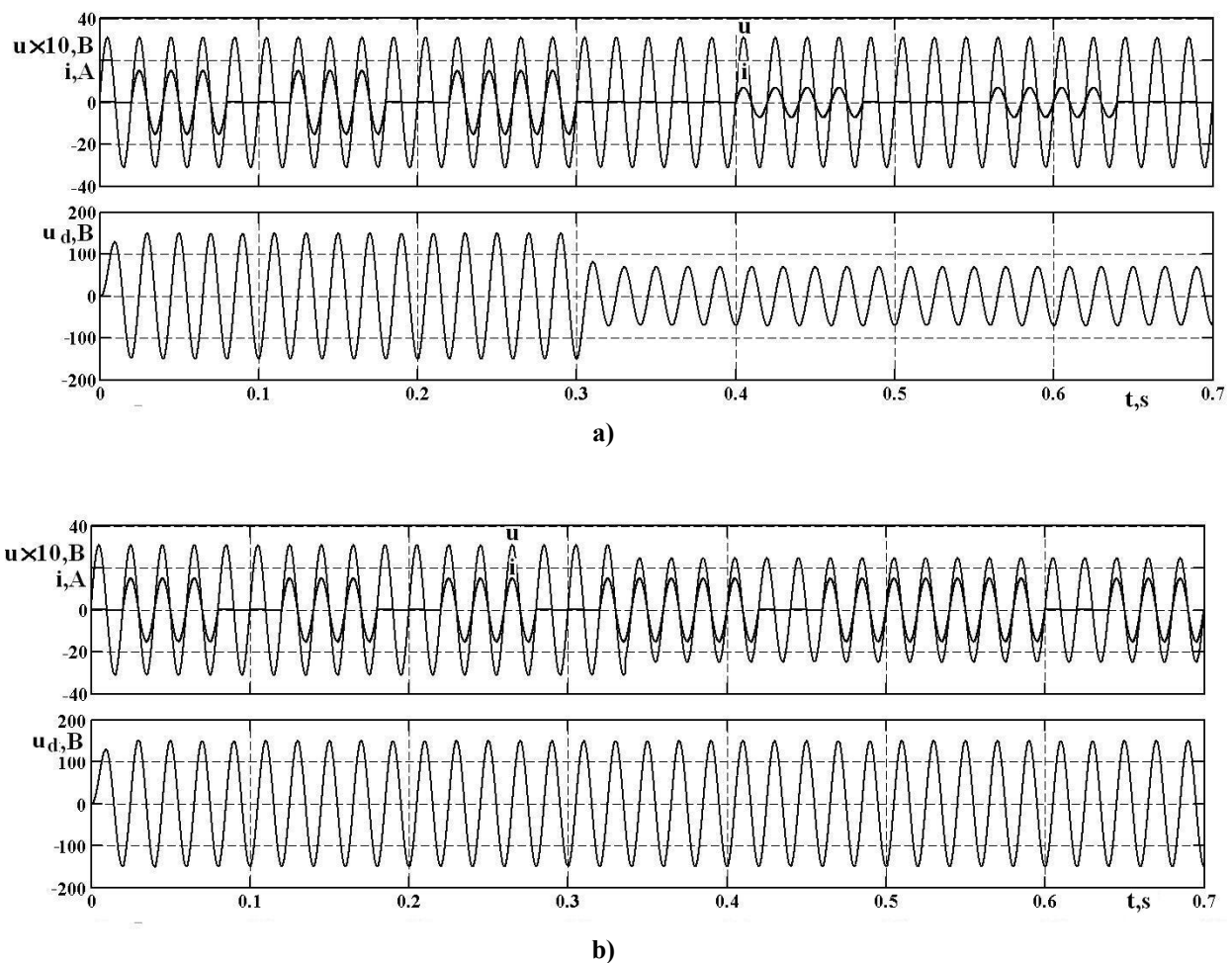


Figure 4 shows the processes in the power source voltage source mode
 a) response to changes in voltage reference, b) response to changes in circuit voltage

Thus, the proposed source of supply is the electromagnetic compatibility with the network, an invariant to the action on it of disturbances at power loss reduction in the supply line.

Bibliography

1. Rozanov Yu. K. *Modern methods of control power quality by means of power electronics* / Yu. K. Rozanov, M.V. Pyabchitsky, A.A. Kvasnyuk // *Electrical Engineering*. 1999. — N 4. — P. 36–38.
2. Patent 63521, MPK N02M 7/12. *Single-phase current source* / Samcheliy Yu. P., Dryuchin V.G., Shevchenko I.S., Belokha G.S.; applicant and the patentee Donbas State Technical University. — N 201103401; is applied 22.03.2011; published 10.10.2011, bulletin N 19.

*Recommendet to printing by Candidate of Engineering Sciences DonSTU Paaerand YU. E.,
 Doctor of Engineering Sciences DSTU Sadovoy A. V.*

Received on 16.06.14.

к.т.н. Дрючин В. Г., Самчелев Ю. П., Белоха Г. С., Бакаев О. В.
 (ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ С ДИСКРЕТНЫМ ПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Предложен источник питания с дискретным потреблением электроэнергии и релейным

управлением, электромагнитно совместимый с сетью, инвариантный к действию возмущений и с уменьшенными потерями мощности в подводящей линии. Приведены аналитические выражения для расчета частот релейных режимов, потерь мощности и результаты моделирования.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, релейное управление, инвариантность, потери мощности, источник питания.

к.т.н. Дрючин В. Г., Самчелєєв Ю. П., Бєлоха Г. С., Бакаєв О. В.

(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ З ДИСКРЕТНИМ СПОЖИВАННЯМ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Запропоновано джерело живлення з дискретним споживанням електроенергії та релейним керуванням, електромагнітно сумісне з мережею, інваріантне до дії збурень і з зменшеними втратами потужності в лінії підведення. Наведено аналітичні висловлювання для розрахунку частот релейних режимів і втрат потужності та результати моделювання.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, релейне керування, інваріантність, втрати потужності, джерело живлення.

УДК 66. 042.886

к.т.н., доц. Алексеев В. П.,
Канчукова М. В.
(ДонГТУ, Алчевск, Украина)

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОМ АККУМУЛЯТОРЕ С ОГНЕУПОРНОЙ НАСАДКОЙ ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ И ОХЛАЖДЕНИИ

Приведены результаты исследования нестационарного теплообмена в тепловом аккумуляторе с огнеупорной насадкой, реализуемого в системе использования тепла конвертерных газов, с учетом переменных граничных условий и теплофизических характеристик теплоносителей и массы насадки, а также предложена уточненная формула для определения коэффициента теплопередачи теплового аккумулятора.

Ключевые слова: нестационарный теплообмен, тепловой аккумулятор, огнеупорная насадка, теплофизические характеристики, коэффициент теплопередачи.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Регенеративные теплообменные аппараты периодического действия, выполненные в виде огнеупорных насадок различных конструкций, нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, в частности в черной металлургии (доменные воздухонагреватели, регенераторы плавильных и нагревательных печей). В этих аппаратах осуществляется высокотемпературный нагрев компонентов горения, например, воздуха до 1200 °С и более.

Сложность процессов теплообмена в регенеративных теплообменниках определяется тем, что процессы нагрева и охлаждения происходят периодически, температуры газовых теплоносителей (продуктов сгорания или воздуха) и массы насадки изменяются непрерывно во времени. В реальных условиях работы некоторых регенеративных аппаратов имеет место также переменный расход и температура греющего теплоносителя во времени, которые определяются режимом работы теплотехнологического агрегата. В связи с этим теоретическое исследование теплообмена в регенеративных теплообменниках представляет большие математические трудности.

Анализ исследований и публикаций.

Исследованием процесса теплообмена таких аппаратов и разработкой методов теплового расчета занимались многие исследователи. Известные методы расчета нестационарного теплообмена основаны на ряде допущений и позволяют определить коэффициент теплообмена лишь приближенно. Одним из первых теоретически обоснованных методов расчета регенеративных теплообменников предложил Хейлигенштедт, далее теория регенеративного теплообмена была развита в работах Шумахера, Шака и др. Методике расчета регенеративных теплообменников посвящены также работы И.Д. Семикина и Э.М. Гольдфарба (ДМетИ), В.Н. Тимофеева (ВНИИМТ). Наиболее близка к реальным условиям методика, разработанная ВНИИМТом [1]. При этом в основу положено решение дифференциальных уравнений, описывающих процесс регенеративного теплообмена с учетом изменения температуры газов и воздуха по высоте насадки. Разработаны графики для определения коэффициентов использования поверхности нагрева и теплопередачи. При этом был принят ряд допущений: постоян-

© Алексеев В. П., 2014

© Канчукова М. В., 2014

ство расхода и температур теплоносителей на входе в регенеративный теплообменник во времени, постоянство теплофизических характеристик теплоносителей и массы насадки в течение всего цикла, применяемых при средних их температурах.

Постановка задачи. Все существующие методики решений нестационарного теплообмена в регенеративных теплообменниках не отражает в полном объеме реальные условия их работы и разработаны применительно к доменным воздушнонагревателям и регенераторам промышленных печей. Изменение теплофизических характеристик теплоносителей и массы насадки может оказать существенное влияние на динамику изменения температур теплоносителей, особенно при интенсификации теплообмена и значительного сокращения длительности периода нагрева относительно периода охлаждения, что имеет место в тепловом аккумуляторе системы использования тепла конвертерных газов (СИТКГ) [2–3]. Знание динамики изменения температур теплоносителей с учетом реальных условий работы особо необходимо, когда регенеративный теплообменник используется для нагрева газов или воздуха, которые являются теплоносителями для теплоиспользующей установки. Режим работы теплоиспользующей установки в этом случае будет зависеть от динамики работы регенеративного теплообменника. В частности, режим работы котлоагрегата СИТКГ определяется динамикой работы теплового аккумулятора, который работает при переменных расходах и температурах продуктов сгорания. Следовательно, в этом случае от динамики работы теплового аккумулятора зависит режим работы теплоиспользующей установки в целом. Поэтому необходимо провести исследования нестационарного теплообмена теплового аккумулятора при указанных выше реальных условиях его работы.

Необходимость исследования нестационарного теплообмена в тепловом аккумуляторе

определяется также тем, что в отличие от доменного воздушнонагревателя и регенераторов промышленных печей (в которых $\tau_{\text{нагр}} > \tau_{\text{охл}}$ или $\tau_{\text{нагр}} \approx \tau_{\text{охл}}$) в тепловых аккумуляторах продолжительность периода нагрева намного меньше, чем период охлаждения ($\tau_{\text{нагр}} < \tau_{\text{охл}}$).

Изложение материала и его результаты. Нестационарный теплообмен в тепловом аккумуляторе описывается системой дифференциальных уравнений с условиями однозначности. При постановке задачи рассмотрены огнеупорные насадки, выложенные из огнеупорного кирпича с прямоугольными каналами и стенка каналов рассматривается в виде плоской плиты неограниченной длины. Рассматривается одномерная задача, т.е. принято, что проникновение тепла внутрь массы насадки происходит только в направлении, перпендикулярном к поверхности стенки (по толщине кирпича). Принято также, что распределение температур массы насадки в начале периода нагрева равно распределению температур в конце периода охлаждения, а в конце периода нагрева — в начале периода охлаждения.

Задача сформулирована в граничных условиях третьего рода. При указанных условиях теплообмен в насадках теплового аккумулятора описывается следующей системой дифференциальных уравнений.

Уравнение распределения тепла внутри массы насадки (в общем случае с учетом зависимости теплофизических характеристик массы насадки от искомой температуры)

$$\rho_H \cdot c_H(t_{1H}) \frac{\partial t_{1H}}{\tau_1} = \lambda_H \cdot (t_{1H}) \cdot \frac{\partial^2 t_{1H}}{\partial x^2}. \quad (1)$$

$$\rho_H \cdot c_H(t_{2H}) \frac{\partial t_{2H}}{\tau_2} = \lambda_H \cdot (t_{2H}) \cdot \frac{\partial^2 t_{2H}}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Уравнение теплообмена на внешней поверхности насадки, соприкасающейся с газом

$$d^2 Q_1 = \lambda_n(t_{1n}) \cdot \left(\frac{\partial t_{1n}}{\partial n} \right)_{nn} d\tau_1 \cdot dH_o. \quad (3)$$

$$d^2 Q_2 = \lambda_n(t_{2n}) \cdot \left(\frac{\partial t_{2n}}{\partial n} \right)_{nn} \cdot d\tau_2 \cdot H_o. \quad (4)$$

Уравнение теплоотдачи от движущейся среды

$$d^2 Q_1 = -(\omega_1 \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{\partial T}{\partial \tau_1}) x \quad (5)$$

$$x c_1(T) \cdot \rho_1 \cdot F_{\text{ж}} \cdot d\tau_1 \cdot \frac{dH_o}{p}.$$

$$d^2 Q_2 = (\omega_2 \frac{\partial t}{\partial z} + \frac{\partial t}{\partial \tau_2}) x \quad (6)$$

$$x c_2(t) \cdot \rho_2 \cdot F_{\text{ж}} \cdot d\tau_2 \cdot \frac{dH_o}{p}.$$

Уравнение теплообмена на границе соприкосновения газового потока и насадки при условии преобладания теплоотдачи конвекцией

$$d^2 Q_1 = \alpha_1 (T - t_{1nn}) \cdot d\tau_1 \cdot dH_o. \quad (7)$$

$$d^2 Q_2 = \alpha_2 (t - t_{2nn}) \cdot d\tau_2 \cdot dH_o. \quad (8)$$

Температура газов является функцией от времени нагрева, а в период охлаждения температура газов (воздуха) постоянна.

$$T|_{z=0} = T_o(\tau_1) \neq const. \quad (9)$$

$$t|_{z=L} = t_o = const. \quad (10)$$

Условие периодичности процессов нагрева и охлаждения

$$t_{1n}(\tau_1 = 0) = t_{2n}(\tau = \tau_2). \quad (11)$$

$$t_{2n}(\tau_2 = 0) = t_{1n}(\tau = \tau_1). \quad (12)$$

Условие изменения геометрических размеров насадки

$$0 \leq x \leq R; \quad 0 \leq z \leq L.$$

Стенка канала рассматривается в виде эквивалентной плоской плиты с двухсто-

ронным симметричным нагревом и начало координат находится в плоскости симметрии. При учете зависимости теплофизических характеристик теплоносителей и массы насадки от температуры должна быть задана функциональная зависимость их от температур: $C_1 = f(T)$; $C_2 = f(t_2)$; $C_n = f(t_{1n})$; $C_2 = f(t_{2n})$; $\lambda_n = f(t_{1n})$; $\lambda_n = f(t_{2n})$. После перехода к безразмерным переменным система уравнений регенеративного теплообмена имеет вид:

— для периода нагрева

$$\frac{\partial t_{1n}}{\partial Fo_1} = \frac{\partial^2 t_{1n}}{\partial X^2}. \quad (13)$$

Уравнение теплообмена на границе газ — поверхность нагрева (граничные условия)

$$\frac{\partial t_{1nn}}{\partial X} \Big|_{x=1} = Bi_1 (T - t_{1nn}); \quad \frac{\partial t_{1n}}{\partial X} \Big|_{x=0} = 0 \quad (14)$$

Уравнение теплообмена между газом и насадкой (балансовое уравнение)

$$-\frac{\partial T}{\partial N_1} = T - t_{1nn}. \quad (15)$$

Условие на входе в насадку (начальное условие)

$$T|_{N_1=0} = T_o \neq const. \quad (16)$$

Условие периодичности процесса

$$t_{1n}(Fo_1 = 0) = t_{2n}(Fo = Fo_2). \quad (17)$$

Аналогично для периода охлаждения имеем

$$\frac{\partial t_{2n}}{\partial Fo_2} = \frac{\partial^2 t_{2n}}{\partial X^2}. \quad (18)$$

$$\frac{\partial t_{2nn}}{\partial X} \Big|_{x=1} = Bi_2 (t - t_{2nn}); \quad \frac{\partial t_{2n}}{\partial X} \Big|_{x=0} = 0. \quad (19)$$

$$\frac{\partial t}{\partial N_2} = t - t_{2nn}. \quad (20)$$

$$t|_{N_2=0} = t_o = const. \quad (21)$$

$$t_{2n}(Fo_2 = 0) = t_{1n}(Fo = Fo_1), \quad (22)$$

где индекс 1 относится к периоду нагрева, а индекс 2 — к периоду охлаждения; t_n — температура насадки, °C; T и t — температура газов и воздуха (теплоносителей), °C; $X = x/R$ — безразмерная координата; x — текущая координата, м; R — полутолщина кирпича насадки, м.

Числа Фурье, Био и “N” соответственно равны:

$$Fo_1 = \frac{a_n \cdot \tau_1}{R_3^2}; \quad Fo_2 = \frac{a_n \cdot \tau_2}{R_3^2}; \quad Bi_1 = \frac{\alpha_1 \cdot R_3}{\lambda_n};$$

$$Bi_2 = \frac{\alpha_2 \cdot R_3}{\lambda_n}; \quad N_1 = \frac{\alpha_1 \cdot H_o}{w_1}; \quad N_2 = \frac{\alpha_2 \cdot H_o}{w_2}.$$

Здесь $R_3 = v_k / H_k$ — эквивалентная полутолщина кирпича, м; v_k — объем кирпича в 1 м³ насадки, м³/м³; H_k — поверхность нагрева насадки, м²/м³;

$a_n = \frac{\lambda_n}{c_n \cdot \rho_n}$ — коэффициент температуропроводности материала насадки, м²/с; λ_n — коэффициент теплопроводности материала насадки, Вт/(м·К); c_n — удельная массовая теплоемкость материала насадки, Дж/(кг·К); ρ_n — плотность материала насадки, кг/м³; τ_1 и τ_2 — продолжительность периодов нагрева и охлаждения, с; α_1 и α_2 — коэффициенты теплоотдачи в периоды нагрева и охлаждения, Вт/(м²·К);

$$\alpha_1 = \alpha_{1к} + \alpha_{1л}; \quad \alpha_2 = \alpha_{2к};$$

α_k и α_l — коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением, Вт/(м²·К); H_o — поверхность нагрева насадки, м²; w_1 и w_2 — скорости теплоносителей, м/с; ρ_1 и ρ_2 — плотности теплоносителей, кг/м³; w_1 и w_2 — водяные эквиваленты теплоносителей, Вт/К; $F_{ж}$ — живое сечение насадки, м²; c_1 и c_2 — удельные теплоемкости теплоносителей, Дж/(м³·К); z — координата в направлении движения газа (воздуха), м.

Решение приведенных выше уравнений с помощью ЦВП выполнено с учетом переменных граничных условий на входе и по высоте насадки, а также с учетом изменения теплофизических характеристик те-

плоносителей и материала насадки. В результате расчета определена динамика изменения температур теплоносителей и материала различных типов насадок теплового аккумулятора при двух режимах работы кислородного конвертера: 1) длительность продувки кислородом $\tau_{пр} = 10$ мин, межпродувочный период $\tau_{мпр} = 20$ мин, цикл $\tau_{ц} = 30$ мин; 2) $\tau_{пр} = 18$ мин, $\tau_{мпр} = 27$ мин, $\tau_{ц} = 45$ мин. С учетом активного выхода оксида углерода “CO” при расчете длительности нагрева и охлаждения соответственно приняты: 1) $\tau_n = 6$ мин, $\tau_o = 24$ мин, $\tau_{ц} = 30$ мин; 2) $\tau_n = 15$ мин, $\tau_o = 30$ мин, $\tau_{ц} = 45$ мин, т.е. 1) $\tau_n / \tau_o = 0,25$; 2) $\tau_n / \tau_o = 0,5$.

Основные характеристики для различных типов насадок теплового аккумулятора: коэффициент аккумуляции массы насадки η_s , коэффициент гистерезиса температур ζ и коэффициент использования поверхности нагрева $\eta_{ин}$, полученные в результате расчета, приведены в таблице 1. При этом коэффициенты η_s , ζ , $\eta_{ин}$ определены из выражений:

$$\eta_s = \frac{t_{mn}^{\tau=\tau_n} - t_{mn}^{\tau=0}}{t_{nn}^{\tau=\tau_n} - t_{nn}^{\tau=0}}; \quad \zeta = \frac{t_{nn}^{\tau=\tau_n} - t_{nn}^{\tau=0}}{t_{nn}^n - t_{nn}^0};$$

$$\eta_{ин} = 1 - \frac{t_{nn}^n - t_{nn}^0}{T_{cp} - t_{cp}},$$

где $t_{mn}^{\tau=0}$, $t_{nn}^{\tau=0}$, $t_{mn}^{\tau=\tau_n}$, $t_{nn}^{\tau=\tau_n}$ — усредненные температуры массы и поверхности насадки в начале и конце периода нагрева, °C; t_{nn}^n , t_{nn}^0 , T_{cp} , t_{cp} — усредненные температуры поверхности насадки и теплоносителей в период нагрева и охлаждения, °C.

Исследования показали, что величина “ ζ ” для насадок теплового аккумулятора СИТКГ в среднем составляет $\sim 5,0$ и воспользовавшись выражением для коэффициента аккумуляции [4]: $\eta_s = 1/(1 + S^2 / 3 a_n \cdot \tau_{ц})$ получим следующее выражение для определения коэффициента теплопередачи

$$k_p = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot \tau_1} + \frac{0,4}{S_9 \cdot \rho_n \cdot C_n} + \frac{0,133 S_9}{\lambda_n \cdot \tau_u} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot \tau_2}}, \quad (23)$$

где $\tau_{\text{ц}} = \tau_1 + \tau_2$ — продолжительность цикла, с.

Выводы и направление дальнейших исследований.

В результате исследования определены коэффициент теплопередачи и средний температурный напор для различных ти-

пов насадок и режима работы теплового аккумулятора по формуле (23) и методике ВНИИМТ [1]. Сравнительная оценка показала, что расхождение составляет до 9%.

Определены также поверхность нагрева и объем теплового аккумулятора при различных конструктивных характеристиках насадки и режимах продувки. На основе анализа расчетных данных для СИТКГ можно рекомендовать насадку каупера размером ячеек 60 x 60 мм, толщиной $b = 50$ мм или 90 x 90 мм, $b = 50$ мм.

Таблица 1 — Значения коэффициентов аккумуляции, гистерезиса температуры и использование поверхности нагрева различных типов регенеративных насадок

τ_n / τ_0	0,25					
Типы насадок	Кауперная 120x120 мм	Кауперная 90x90 мм	Кауперная 60x60 мм	Сименса коридорная 120x120 мм	Сименса коридорная 50x50 мм	Сименса шахматная 120x120 мм
Значения коэффициентов						
η_s	0,502	0,62	0,615	0,623	0,666	0,643
ζ	4,37	5,0	7,0	5,72	5,32	5,9
$\eta_{\text{ип}}$	0,95	0,956	0,972	0,94	0,915	0,93
τ_n / τ_0	0,5					
Типы насадок	Кауперная 120x120 мм	Кауперная 90x90 мм	Кауперная 60x60 мм	Сименса коридорная 120x120 мм	Сименса коридорная 50x50 мм	Сименса шахматная 120x120 мм
Значения коэффициентов						
η_s	0,454	0,642	0,67	0,736	0,7	0,745
ζ	3,75	7,02	4,5	4,37	3,5	4,1
$\eta_{\text{ип}}$	0,93	0,96	0,93	0,887	0,827	0,855

Библиографический список

1. Тимофеев В. Н. Теория расчета регенеративных теплообменников / В. Н. Тимофеев, В. М. Малкин, Ф. Р. Шкляр. — Свердловск.: Сборник научных трудов ВНИИМТ 1962. — № 8. — С. 16–32.
2. Алексеев В. П. Установка для использования тепла конвертерных газов с тепловым аккумулятором / В. П. Алексеев, М. В. Алексеева. — С-Пб.: Вестник МАНЭБ, 2004. — Т. 9, № 7(79). — С. 82–85.
3. Алексеев В. П. Анализ энергетической эффективности систем использования тепла конвертерных газов за кислородными конвертерами / В. П. Алексеев, М. В. Алексеева. — Алчевск: Сб. науч. тр. ДонГТУ, 2007. — Вып. 24. — С. 218–228.
4. Лемлех И. М. Высокотемпературный нагрев воздуха в черной металлургии / И. М. Лемлех, В. А. Гордин. — М.: ГНТИ литературы по черной и цветной металлургии, 1963. — 352 с.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. ДонГТУ Ульяницким В. Н.,
д.т.н., проф. ВНУ им. Даля Дзюбой В. Л.*

Статья поступила в редакцию 16.06.14.

к.т.н., доц. Алексеев В. П., Канчукова М. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

**ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕПЛООБМІНУ В ТЕПЛОВОМУ
АКУМУЛЯТОРІ З ВОГНЕТРИВКОЮ НАСАДКОЮ ПРИ ПЕРІОДИЧНОМУ НАГРІВІ ТА
ОХОЛОДЖЕННІ**

Наведені результати дослідження нестационарного теплообміну в тепловому акумуляторі з вогнетривкою насадкою, тепла конвертерних газів, що реалізовується в системі використання, з врахуванням змінних граничних умов і теплофізичних характеристик теплоносіїв і маси насадки, а також запропонована уточнена формула для визначення коефіцієнта теплопередачі теплового акумулятора.

Ключові слова: нестационарний теплообмін, тепловий акумулятор, вогнетривка насадка, теплофізичні характеристики, коефіцієнт теплопередачі.

Alekseyev V. P. Candidate of Engineering Sciences, Kanchukova M. V. (DonDTU, Alchevsk, Ukraine)

**THE STUDY OF UNSTEADY HEAT EXCHANGE IN THE HEAT ACCUMULATOR WITH
REFRACTORY NOOZLE UNDER PERIODIC HEATING AND COOLING**

The results of the study of unsteady heat transfer in the heat accumulator with refractory nozzle implemented in the heat converter gas using system, with variable boundary conditions and thermalphysical characteristics of heat transfer agents and mass of the nozzle are given, as well as a refined formula is offered to determine the heat transfer coefficient of the heat accumulator.

Key words: transient heat transfer, heat storage, fire nozzle, thermalphysical characteristics, the heat transfer coefficient.

УДК 621.316.91: 621.316.573

к.т.н. Серєда О. Г.
(НТУ «ХПІ», м. Харків, Україна, e-mail: lexis_suba@mail.ru)

ЗАХИСТ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ВІД СТРУМІВ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯ З БЕЗПОСЕРЕДНІМ КОНТРОЛЕМ ТЕМПЕРАТУРИ ОБМОТКИ В МОМЕНТ ПУСКУ

Доведена необхідність безпосереднього контролю температури обмотки асинхронних електродвигунів. Шляхом аналізу екстремальних значень миттєвої потужності що споживається електродвигуном в початковий момент часу після пуску, здійснюється контроль над температурним режимом електродвигунів, що працюють в повторно-короткочасному режимі. Надано теоретичне обґрунтування можливості отримання інформації про параметри електричного кола в перехідному режимі зміни струму збурення, зокрема визначення температури асинхронних електродвигунів шляхом контролю за зміною активного опору обмотки. Розроблено алгоритм функціонування мікропроцесорного пристрою захисту асинхронних електродвигунів, що працюють в повторно-короткочасному режимі, від неприпустимого перегріву обмоток.

Ключові слова: асинхронний електродвигун, мікропроцесорний пристрій захисту.

Постановка проблеми. Системи електропостачання підземних гірничих машин будуються за принципом передачі електроенергії по кабелях від вибухозахищених комплектних розподільчих пристроїв (КРП) центральної підземної підстанції до комплектних трансформаторних підстанцій (КТП), що перетворюють напругу 6 (10) кВ в напругу 380, 660 або 1140 В з подальшим розподілом електроенергії через апарати керування й захисту на електродвигуни (ЕД) гірничих машин. При цьому допускається підключення до одного КРП не більше трьох технологічно зв'язаних пересувних підстанцій або трансформаторів однакової потужності за умови забезпечення високої чутливості максимального струмового захисту, що надзвичайно ускладнює систему підземного електропостачання шахт [1]. Одним з напрямів вдосконалення вибухозахищених КТП є підвищення їх функціональних можливостей в частині систем захисту на стороні низької напруги. Це вимагає створення конструкцій, що містять в собі пристрої захисту приєднань для живлення й керування роботою ЕД гірничих машин [2].

При змінному тривалому режимі роботи деякі робочі органи та механізми створю-

ють навантаження, що змінюється у великих межах, наприклад, в машинах для дроблення. Періодичні перевантаження ЕД супроводжуються недовантаженнями аж до холостого ходу. Окреме короткочасне збільшення струму не призводить до небезпечного зростання температури. Проте, якщо надструми повторюються, дія підвищеної температури на ізоляцію ЕД швидко накопичується. Процес нагрівання ЕД при змінному навантаженні відрізняється від процесу нагрівання при постійному або слабо вираженому змінному навантаженні. При коливаннях навантаження ЕД постійно перебуває в перехідному процесі. Протікання перехідних теплових процесів при змінному навантаженні — явище складне й не завжди піддається розрахунку. Тому температуру обмоток ЕД не можливо оцінити за струмом, що протікає в даний момент часу. З огляду на те, що окремі частини ЕД нагріваються по-різному, всередині ЕД відбувається передача теплоти з однієї частини в інші. Після відключення ЕД температура обмоток статора може зростати за рахунок теплоти, що надходить від ротора. Таким чином, величина

струму не відображає ступінь нагріву ізоляції. Слід врахувати, що в деяких режимах ротор буде нагріватися більш інтенсивно, а охолоджуватися менш інтенсивно, ніж статор. Складність процесів теплообміну ускладнює контроль нагріву ЕД. Повторно-короткочасний режим роботи є найбільш несприятливим з точки зору дії захисту. Періодичне вмикання в роботу передбачає короткочасне перевантаження ЕД. При цьому величина перевантаження повинна бути обмежена за умови нагріву обмоток не вище допустимого значення. Захист, що стежить за температурою нагріву обмотки, повинен отримувати відповідний сигнал. Оскільки в перехідних режимах струм і температура можуть не відповідати один одному, то захист, дія якого базується на вимірюванні струму, не може виконувати свої функції належним чином.

Періодичний перегрів обмотки скорочує термін служби ізоляції. Саме від величини перевищення температури ізоляції обмоток залежить термін служби ізоляції та ЕД в цілому. Перегрів на кожні $8\div 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ понад допустимого скорочує термін служби ізоляції в 2 рази (правило «восьми градусів» Монтзігера) [3]. Згідно з останніми дослідженнями, тривала робота двигуна зі струмовим перевантаженням всього на 5% від номінального скорочує термін його служби в 10 разів [4]. Таким чином, контроль температури обмотки є важливим засобом забезпечення тривалого терміну служби електродвигунів.

Аналіз досліджень і публікацій. Відомі способи захисту асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження I_L , в яких захисна часо-струмова характеристика формується з використанням так званої «інтегральної» уставки Q_L :

$$Q_L = I_{ph}^2 t_L, \quad (1)$$

де I_{ph} — середньоквадратичне (діюче) значення фазного струму, t_L — час спрацьовування захисту при струмі перевантаження.

При струмі перевантаження інтегральна уставка забезпечує зворотну залежність $t_L = f(I_{ph}^2)$ часу t_L від квадрата величини фазного струму I_{ph}^2 . Якщо термічне навантаження на ЕД, що захищається, перевищить Q_L і відбудеться спрацьовування захисту, то алгоритм роботи захисного пристрою передбачає витримку часу повторного вмикання t_r . Величина t_r вибирається за умови охолодження ЕД до регламентованої [5] температури. Це дозволяє здійснювати хоча б непрямий контроль над температурним режимом ЕД, що є незаперечною перевагою застосування інтегральної захисної характеристики з уставкою Q_L . Водночас, зазначені властивості захисної характеристики негативно впливають на ефективність роботи технологічного обладнання, що працює в повторно-короткочасному режимі. Інтегральна уставка ЕД, що працює в складі вказаного обладнання, уповільнює роботу останнього і знижує його продуктивність. Тому, в захисних пристроях від струмів перевантаження ЕД, призначених для роботи в повторно-короткочасному режимі, передові електротехнічні компанії виключають інтегральні уставки, замінюючи їх часовими. Часова уставка знижує час існування перевантаження, й тим самим дозволяє швидше провести повторне вмикання ЕД.

Прикладом захисного пристрою ЕД від струмів перевантаження є реле TeSys LR97D і LT47 фірми «Schneider electric» [6]. Ці реле розроблені для забезпечення захисту саме в повторно-короткочасному режимі роботи ЕД з підвищеним моментом навантаження при блокуванні ротора або зникненні фази, при затяжному пуску зі зростаючим моментом або частих вмиканнях механізмів, що мають велику інерцію та високу ймовірність заклинювання в сталому режимі, таких механізмів як конвеєри, дробарки та змішувачі, вентилятори, насоси та компресори, центрифуги й сушарки, преси, підйомники, оброблювальні верстати тощо. Серед захисних функ-

цій реле LR97D і LT47 відзначають швидке виявлення перевантаження в порівнянні з пристроями теплового захисту на основі інтегральної уставки Q_L .

Поряд з перевагами способу захисту від перевантажень ЕД без використання інерційних інтегральних уставок, слід відзначити і недоліки. Основним недоліком є відсутність контролю рівня термічного навантаження, якого зазнають ЕД не оснащені термісторами. У випадку агресивного режиму частих пусків без зниження навантаження на технологічне обладнання нагрів обмотки ЕД може перевищити допустимий рівень. Нагадаємо, що в повторно-короткочасному режимі значному нагріванню піддається не весь ЕД в цілому, а лише його обмотки, зокрема, їх ізоляція.

Існує декілька технічних рішень опосередкованого контролю за температурою обмотки ЕД.

Електронні реле E16DU-E1250DU перевантаження фірми «ABB» [7] моделюють термічні характеристики поведінки ЕД. При частих пусках вирішальне значення має не номінальний, а більш високий пусковий струм ЕД, а також пускова частота — час пуску й вимикання. При кожному пуску відбувається надзвичайно сильне нагрівання ЕД, але за короткий час. При цьому температура може перевищити допустиму межу. Щоб уникнути виведення двигуна з експлуатації його слід зупинити. Спрацьовування реле перевантаження відбувається, якщо температура перевищить максимально допустиме значення. Алгоритм спрацьовування реле визначає допустиму тривалість пуску ЕД, коли в результаті тривалого пуску або частих пусків середнє ефективне значення струму досягає значення номінального. Термісторні реле типу CM-MSE, CM-MSS і CM-MSN фірми «ABB» контролюють температурний режим ЕД, оснащених температурним датчиком з позитивним температурним коефіцієнтом опору (термістором). Вбудовані в обмотки ЕД термістори вимірюють ступінь нагрівання двигуна, що дозволяє кон-

тролювати різні експлуатаційні умови: перегрів внаслідок недостатнього охолодження, важкий пуск, часті вмикання та вимикання, однофазний режим роботи, гальмування, асиметрію фаз. При нагріванні навіть одного термістора понад встановлену межу вихідне реле відключає ЕД від мережі.

Система захисту Moeller ZEV [8] та електронні реле перевантаження Siemens Sirius 3RB20/21 [9] підходять для найбільш важких умов пуску ЕД. Клас спрацьовування налаштовується й дозволяє надійно захистити двигун з часом розгону до 40 секунд. Наростання струму реєструється вбудованим трансформатором струму й обробляється відповідною електронікою, яка потім видає імпульс на допоміжні вимикачі. Замикання на землю виявляється завдяки зовнішнім трансформаторам виток. Можливість об'єднання термісторних датчиків в єдину систему дозволяє забезпечити повний захист двигуна. Термісторні реле захисту Moeller EMT6 та Siemens Sirius 3RB22/23 мають необхідні характеристики для взаємодії з термісторами при затяжних пусках або зупинках ЕД.

Спільним недоліком перерахованих технічних рішень теплового захисту ЕД є обмеженість їх застосування. Реле перевантаження з контролем температури за допомогою термісторів можуть застосовуватися тільки для захисту ЕД, в обмотки яких вбудовані термістори. Більш універсальним буде безпосередній контроль за перевищенням температури обмотки ЕД при перевантаженні не за допомогою вимірювання опору термісторів [10, 11], які ще потрібно вмонтувати в обмотку, а за допомогою вимірювання ступеня збільшення активного опору R_m самої обмотки ЕД. Тобто коли в якості датчика температури використовується сама обмотка ЕД.

В технічному рішенні [12] вимірювання опору R_m з метою визначення температури обмотки ЕД здійснюється спеціальним пристроєм, який підключається до обмотки перед її вмиканням. Для підключення вузла вимірювання R_m та його відключен-

ня перед пуском ЕД, використовується проміжне реле, контакти якого з'єднують цей вузол з колом живлення ЕД. Такий спосіб вимірювання опору R_m , який вимагає введення додаткового обладнання з проміжним реле, обумовлює підвищені габарити й вартість захисного пристрою та знижує надійність його роботи. Крім того, при використанні описаного способу вимірювання R_m при захисті ЕД, що працюють в повторно-короткочасному режимі, знижується динамічність роботи технологічного обладнання. Перед черговим пуском ЕД необхідно здійснювати всі описані вище операції підключення, вимірювання та відключення вузла виміру R_m .

З урахуванням викладеного, уявляється доцільним розробити таке технічне рішення визначення R_m з метою контролю температури обмотки ЕД, в якому розрахунок R_m проводиться без додаткових вузлів виміру, а тільки за рахунок аналізу співвідношення активної та реактивної потужностей, що споживаються ЕД при пуску. Контроль температури обмотки ЕД шляхом аналізу екстремальних значень миттєвої потужності дозволяє спростити функціональний склад пристрою захисту тим самим знизивши фінансові витрати на його виготовлення, тому що не потрібні додаткові вузли вимірювання R_m й пристрої керування ними, а також забезпечити динамічність роботи як самих ЕД, так і технологічного устаткування, що працюють в умовах повторно-короткочасного режиму, за рахунок того, що вимір температури обмотки ЕД здійснюється дуже швидко, за час, що не перевищує 10 мс.

Формулювання мети. Теоретичне обґрунтування, розробка та реалізації у вигляді алгоритму функціонування мікропроцесорного пристрою способу захисту асинхронних ЕД від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки в момент пуску, в якому визначення активного опору й подальшого розрахунку температури обмотки ЕД здійснюється при кожному пуску.

Матеріали дослідження. Контроль над температурним режимом обмоток ЕД пропонується проводити в перехідному режимі збурення електричного кола (пуск ЕД) за дискретними значеннями фазних струмів i_{ja}, i_{jb}, i_{jc} ($i_{j(a,b,c)}$) та напруг u_{ja}, u_{jb}, u_{jc} ($u_{j(a,b,c)}$). Можливість такого контролю заснована на аналізі характеру зміни в часі миттєвих значень сумарних активної $p_{\Sigma}(t)$ та реактивної $q_{\Sigma}(t)$ потужностей трифазного кола в перший період T_1 виникнення збурення, а саме за співвідношенням екстремальних значень p_{\max} залежності $p_{\Sigma}(t)$ та q_{\max} залежності $q_{\Sigma}(t)$ в перехідному режимі зміни пускового струму. Аналізу, по суті, піддається залежність суми добутків дискретних значень фазних струму $i_{j(a,b,c)}$ на дискретні значення фазних напруг $u_{j(a,b,c)}$, відповідно.

Досліджувалась поведінка в часі миттєвих значень p_{ja}, p_{jb}, p_{jc} ($p_{j(a,b,c)}$) активної та q_{ja}, q_{jb}, q_{jc} ($q_{j(a,b,c)}$) реактивної потужностей в перехідному режимі пуску ЕД при різних значеннях електромагнітної постійної часу τ електричного кола. За допомогою математичного моделювання процесу пуску ЕД отримані часові залежності миттєвих активної $p_{\Sigma}(t)$ та реактивної $q_{\Sigma}(t)$ потужностей всіх трьох фаз:

$$p_{\Sigma}(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t), \quad (2)$$

$$q_{\Sigma}(t) = q_a(t) + q_b(t) + q_c(t), \quad (3)$$

де $p_a(t) = i_a(t)u_a(t)$; $p_b(t) = i_b(t)u_b(t)$; $p_c(t) = i_c(t)u_c(t)$ — миттєві значення активних потужностей, що споживаються ЕД в фазах a, b, c , відповідно;

$$q_a(t) = i_a(t)u_a(t - T/4);$$

$$q_b(t) = i_b(t)u_b(t - T/4);$$

$q_c(t) = i_c(t)u_c(t - T/4)$ — миттєві значення реактивних потужностей, що споживаються ЕД в фазах a, b, c , відповідно; T — період зміни напруги мережі живлення.

Відомі аналітичні вирази для зміни в часі струмів в перехідному режимі в симетричній трифазній системі:

$$i_a(t) = \sqrt{2}I_{ph} [\sin(\omega t + \psi - \varphi + 2\pi/3) - \sin(\psi - \varphi + 2\pi/3) \cdot e^{-t/\tau}] ; \quad (4)$$

$$i_b(t) = \sqrt{2}I_{ph} [\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-t/\tau}] ; \quad (5)$$

$$i_c(t) = \sqrt{2}I_{ph} [\sin(\omega t + \psi - \varphi - 2\pi/3) - \sin(\psi - \varphi - 2\pi/3) \cdot e^{-t/\tau}] , \quad (6)$$

де I_{ph} — середньоквадратичне (діюче) значення періодичної складової фазного струму; $\varphi = \arctg(\omega L/R)$ — кут зрушення, на який періодична складова фазного струму відстає від фазної електрорушійної сили (ЕРС); L, R — індуктивність і активний опір фази; $\tau = \frac{L}{R} = \frac{\sin \varphi}{\omega \cos \varphi}$ — постійна часу електричного кола; $\omega = 2\pi f$ — кутова частота мережі; f — робоча частота мережі; ψ — момент виникнення струму збурення.

Вирази для зміни в часі фазних ЕРС:

$$u_a(t) = \sqrt{2}U_{ph} \sin(\omega t + \psi + 2\pi/3); \quad (7)$$

$$u_b(t) = \sqrt{2}U_{ph} \sin(\omega t + \psi); \quad (8)$$

$$u_c(t) = \sqrt{2}U_{ph} \sin(\omega t + \psi - 2\pi/3), \quad (9)$$

де U_{ph} — середньоквадратичне (діюче) значення фазної ЕРС; ψ — початковий кут ЕРС у фазі b (момент виникнення збурення).

Як впливає з виразів (7)–(9) напруги в фазах, на відміну від струмів, не мають аперіодичної складової.

Після підстановки рівнянь (4)–(9) в (2) і в (3) та відповідних перетворень і спрощень, отримаємо аналітичний опис зміни миттєвої потужності що споживається ЕД в початковий момент пуску:

$$p_{\Sigma}(t) = 3I_{ph}U_{ph} [\cos \varphi - \cos(\omega t + \varphi) \cdot e^{-t/\tau}] . \quad (10)$$

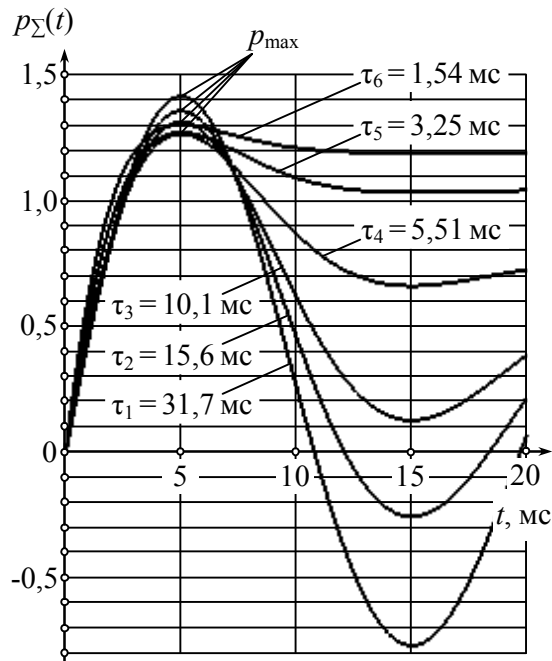
$$q_{\Sigma}(t) = 3I_{ph}U_{ph} [\sin \varphi - \sin(\omega t + \varphi) \cdot e^{-t/\tau}] . \quad (11)$$

Аналіз виразів (10) і (11) показав, що характер залежностей $p_{\Sigma}(t)$ і $q_{\Sigma}(t)$ в перехідному режимі зміни струму не залежить від ψ . Це означає, що характер зміни функцій $p_{\Sigma}(t)$ і $q_{\Sigma}(t)$, зокрема їх екстремальні значення p_{\max} і q_{\max} залежать тільки від постійної часу електричного кола τ .

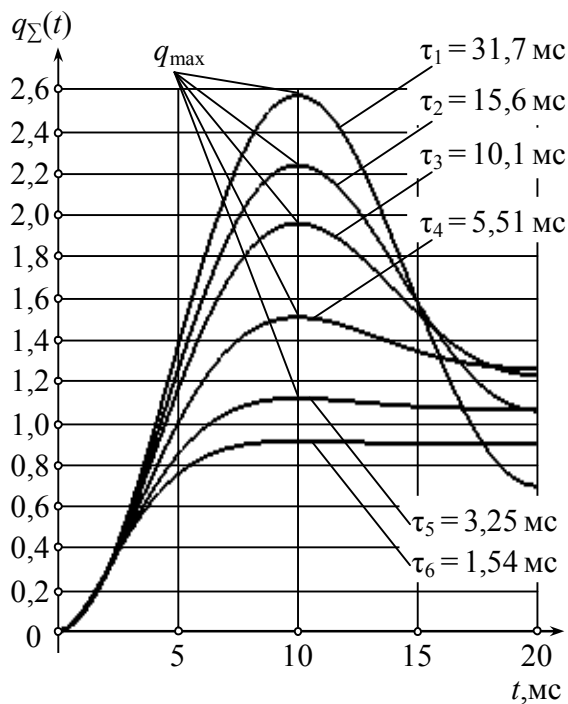
На рисунку 1 наведені залежності $p_{\Sigma}(t)$ і $q_{\Sigma}(t)$ для різних випадків постійної часу τ (відповідно $\cos \varphi$), побудовані за умови, що діючі значення струмів і напруг при визначенні миттєвих значень p_j і q_j , а відповідно і при розрахунку значень p_{Σ} і q_{Σ} , дорівнюють одиниці. Наведені залежності ілюструють необхідні властивості функцій $p_{\Sigma}(t)$ і $q_{\Sigma}(t)$ в перехідному режимі. Вочевидь, що значення p_{\max} і q_{\max} відрізняються один від одного тим сильніше, чим менша постійна часу τ . Тому за співвідношенням значень p_{\max} і q_{\max} в перші 10 мс після пуску ЕД, можливо оцінити величину τ обмотки ЕД, визначити опір R_m , а відтак і температуру обмотки ЕД.

Аналіз зміни в часі значень p_{Σ} і q_{Σ} актуальний протягом першого періоду $T_1 = 20$ мс зміни пускового струму. Такий малий інтервал часу необхідний для того, щоб виключити вплив початку обертання двигуна на величину постійної часу τ обмотки. Відомо, що значення коефіцієнта потужності $\cos \varphi$ обмотки ЕД змінюється від величини $0,2 \div 0,3$ на початку пуску до значення $0,9$ при виході в режим холостого ходу. При збільшенні швидкості обертання ЕД, відповідно, змінюється і значення постійної часу τ . Тому, щоб визначити вплив на τ саме нагріву обмотки ЕД, необхідно

визначати величину τ якнайшвидше, до того, як ротор ЕД почне обертання.



а



б

Рисунок 1 — Зміна в часі миттєвої потужності, що споживається електродвигуном в перехідному режимі пуску: а — зміна активної потужності; б — зміна реактивної потужності

Використовувати різницю $q_j - p_j$ реактивної та активної потужностей, зокрема $q_{\max} - p_{\max}$, як критерій оцінки зміни постійної часу τ обмотки ЕД при її нагріві, в загальному випадку, коли величина струму і напруги не дорівнюють одиниці, не можна. Різниця $q_{\max} - p_{\max}$ буде залежати від величини пускового струму ЕД. Щоб критерій зміни τ не залежав від струму і напруги, він повинен бути виражений у відносних одиницях.

Визначимо робочий інтервал зміни величини τ при визначенні опору R_m обмотки ЕД при її нагріві. Прийнемо, що в момент пуску ЕД $\cos \varphi = 0,2$ при навколишній температурі $T_{\text{нс}} = 25^\circ\text{C}$. Такий $\cos \varphi$ відповідає постійній часу $\tau_{25} = 15,6 \text{ мс}$ ($f = 50 \text{ Гц}$). Допустимою температурою обмотки для ізоляції класу «В», при якій зберігається регламентований термін служби цієї ізоляції, є температура $T_B = 155^\circ\text{C}$ [5]. Опір мідного дроту при нагріванні на $\Delta T = 130^\circ\text{C}$ зростає в 1,55 рази: $R_{155} = 1,55 \cdot R_{25}$. Відповідно, постійна τ нагрітої до $T_B = 155^\circ\text{C}$ обмотки знизиться до $\tau_{155} = 0,645 \tau_{25} = 10,06 \text{ мс}$. Таким чином, інтервал $\tau = (10 \div 16) \text{ мс}$ є робочим. Відношення $K = p_{\max} / q_{\max}$ або $K = q_{\max} / p_{\max}$ використовувати незручно внаслідок низької чутливості характеристики $\tau = f(K)$ в робочому інтервалі зміни τ .

Більш значущим коефіцієнтом ступеня нерівномірності екстремальних значень p_{\max} и q_{\max} при зміні τ , є співвідношення активної W_P та реактивної W_Q енергій:

$$K_W = \frac{W_Q - W_P}{W_P}, \quad (12)$$

де

$$W_P = \sum_0^{t=T_1/2} p_{\Sigma j} \Delta t =$$

$$= \sum_0^{t=T_1/2} (u_{ja}i_{ja} + u_{jb}i_{jb} + u_{jc}i_{jc}) \Delta t; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} W_Q &= \sum_0^{t=T_1/2} q_{\Sigma j} \Delta t = \\ &= \sum_0^{t=T_1/2} (u_{ja-T/4}i_{ja} + u_{jb-T/4}i_{jb} + \\ &\quad + u_{jc-T/4}i_{jc}) \Delta t; \end{aligned} \quad (14)$$

Δt — інтервал дискретизації залежностей $p_{\Sigma}(t)$ і $q_{\Sigma}(t)$; $j-T/4$ — номер дискретного значення напруги, зрушеного на чверть періоду відносно дискретного значення струму.

На рисунку 2 наведена залежність величини коефіцієнта K_W від постійної часу τ .

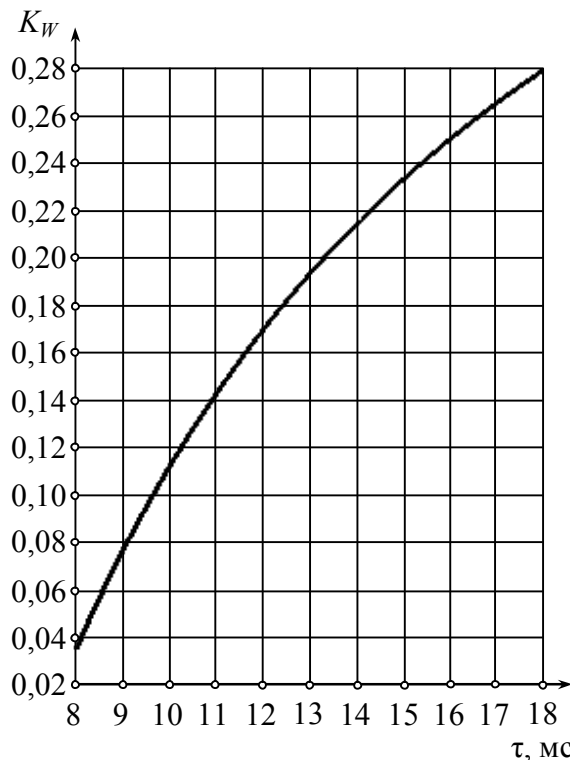


Рисунок 2 — Зміна коефіцієнта K_W в функції постійної часу τ

Як видно з наведеної залежності, при зміні постійної часу τ від 10,06 мс ($\cos \varphi = 0,3$) до 15,6 мс ($\cos \varphi = 0,2$), тобто

в 1,54 рази, значення коефіцієнта K_W змінюється від величини 0,113 до значення 0,243, тобто майже в 2,16 рази. Відтак, коефіцієнт K_W є досить значущим параметром оцінки зміни постійної часу обмотки ЕД при її нагріві, а, в кінцевому рахунку, і для визначення температури обмотки ЕД.

Таким чином, контролювати збільшення опору нагрітої обмотки, а отже і температуру ЕД перед кожним пуском можливо виходячи з аналізу залежності $\tau = f(K_W)$

постійної часу τ від коефіцієнта K_W співвідношення активної і реактивної енергій без додаткових вузлів вимірювання опору обмотки і пристроїв керування ними. Відтак, спрощується конструкція пристрою захисту і знижуються фінансові витрати на його виготовлення. А за рахунок того, що аналіз співвідношення K_W проводиться дуже швидко, за час 10 мс, забезпечується динамічність роботи як самих ЕД, так і технологічного устаткування, що працюють в повторно-короткочасному режимі.

Алгоритм побудови захисту ЕД від струмів перевантаження з контролем температури обмотки шляхом аналізу співвідношення активної W_P та реактивної W_Q енергій в перші 10 мс зміни пускового струму, полягає в наступному. При кожному пуску ЕД визначається коефіцієнт K_W співвідношення W_P та W_Q . За величиною K_W визначають електромагнітну постійну часу τ_{Θ} електричного кола, яка відповідає нагріву обмотки ЕД до температури T_{Θ} в момент чергового пуску. Величини τ і K_W пов'язані залежністю рисунок 2. Порівняння величини τ_{Θ} , що відповідає нагрітому стану обмотки ЕД, з заданим (відомим) значенням $\tau_{T_{kn}}$ при заданій температурі T_{kn} і визначення коефіцієнта зниження постійної часу нагрітої обмотки

$$K_{\tau} = \frac{\tau_{T_{kn}} - \tau_{\Theta}}{\tau_{\Theta}} \quad (15)$$

дозволяє легко визначити відповідне збільшення активного опору нагрітої обмотки, а відтак і температуру обмотки T_{Θ} в момент чергового пуску:

$$T_{\Theta} = \frac{K_{\tau}}{\alpha_{\text{cu}}} + T_{\text{kn}}, \quad (16)$$

де α_{cu} — температурний коефіцієнт опору міді.

На рисунку 3 наведена схема, що ілюструє роботу мікропроцесорного пристрою при реалізації запропонованого способу захисту ЕД від струмів перевантаження.

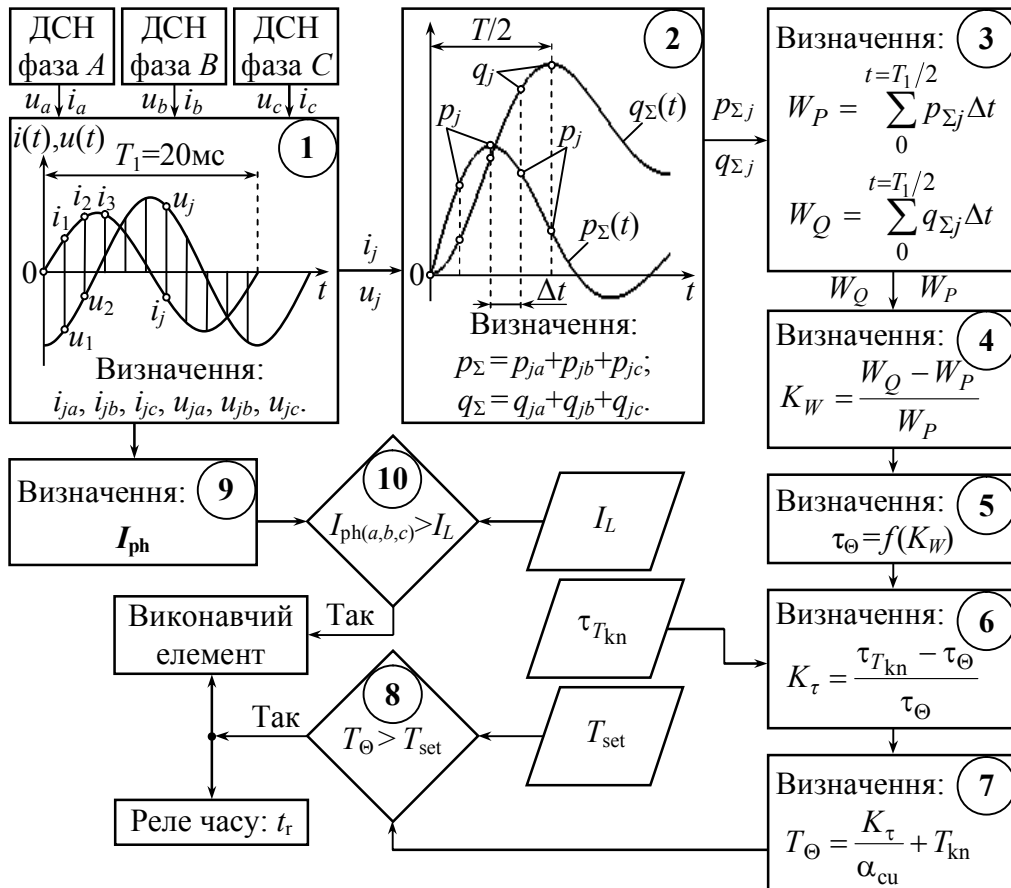


Рисунок 3 — Алгоритмічна схема спрацьовування мікропроцесорного пристрою захисту асинхронних електродвигунів від неприпустимого перегріву обмоток

Окремі обчислювальні та логічні операції, які виробляє мікропроцесор умовно подані як модулі. Фізично зазначених модулів не існує, їх використання необхідно для зручності викладу функціонування мікропроцесорного пристрою при реалізації запропонованого способу захисту.

Функціонує мікропроцесорний пристрій у такий спосіб.

В кожній фазі a, b, c обмотки ЕД здійснюють безперервний вимір фазних стру-

мів, їх аналого-цифрове перетворення в дискретні значення $i_{j(a,b,c)}$ та методом інтегрування квадратів знайдених дискретних значень $i_{ja}^2, i_{jb}^2, i_{jc}^2$ визначають діючі значення фазних струмів I_a, I_b, I_c . Якщо величина I_a, I_b або I_c виявляється більшою значення уставки струму перевантаження I_L , виробляють керуючий сигнал на спрацьовування захисту із заданою витримкою

часу t_L . Додатково, при кожному повторному пуску ЕД, здійснюють вимір лінійних напруг u_{jab} , u_{jbc} , u_{jac} у разі вимірювання потужності за схемою з двома ватметри або фазних напруг $u_{j(a,b,c)}$ у разі вимірювання потужності за схемою з одним ватметром і штучної нейтральною точкою. Шляхом множення дискретних значень струму $i_{j(a,b,c)}$ на відповідні дискретні значення напруги визначають залежності в часі t миттєвих потужностей $p_\Sigma(t)$ і $q_\Sigma(t)$, що споживаються ЕД при пуску. Значення активної W_P та реактивної W_Q енергій визначають за відрізок часу, що дорівнює половині першого періоду T_1 зміни пускового струму. За співвідношенням активної W_P та реактивної W_Q енергій визначають температуру T_Θ нагрітої обмотки ЕД.

1. У модулі 1 (рисунк 3) аналогові сигнали від датчиків струму і напруги ДСН у фазах a , b , c перетворюються в дискретні значення $i_{j(a,b,c)}$ та $u_{j(a,b,c)}$.

2. У модулі 2 визначають залежності в функції часу миттєвих значень потужностей $p_\Sigma(t)$ з рівняння (2) та $q_\Sigma(t)$ з рівняння (3), що споживаються ЕД при пуску.

3. У модулі 3 визначають значення активної W_P за формулою (13) та реактивної W_Q за формулою (14) електричних енергій, що споживаються ЕД при пуску.

4. У модулі 4 визначають коефіцієнт K_W з виразу (12).

5. У модулі 5 в момент пуску ЕД з залежності $\tau = f(K_W)$ за величиною K_W визначають постійну часу τ_Θ нагрітої обмотки.

6. У модулі 6 за рівнянням (15) визначають коефіцієнт K_τ , що характеризує зменшення постійної часу τ_Θ нагрітої обмотки в порівнянні з заданим значенням $\tau_{T_{kn}}$, яке відповідає температурі обмотки,

при якій термін служби ізоляції відповідає нормованому терміну служби ЕД.

7. У модулі 7 визначають температуру T_Θ нагрітої обмотки ЕД за виразом (16).

8. У модулі 8 знайдене значення T_Θ порівнюють з температурною уставкою T_{set} і у випадку, якщо $T_\Theta \geq T_{set}$, виробляють керуючі сигнали на спрацьовування захисту і на формування часу блокування повторного вмикання t_r .

9. У модулі 9 визначають діючі значення фазних струмів I_a , I_b , I_c .

10. У модулі 10 виконують порівняння значень I_a , I_b , I_c з величиною максимальної струмової уставки I_L . Якщо величина струму в одній з фаз виявиться більшою за I_L , виробляють керуючий сигнал «Так» на виконавчий елемент захисту (незалежний розчіплювач автоматичного вимикача).

Мікропроцесорний захисний пристрій при роботі за наведеним алгоритмом формує нову, більш досконалу, в порівнянні з існуючими, захисну характеристику від струмів перевантажень ЕД, що працюють в повторно-короткочасному режимі. При цьому передбачений контроль над температурним режимом обмоток ЕД, не оснащених термісторами. У порівнянні з аналогічними захистами відсутні додаткових вузлів вимірювання опору для контролю температури нагрітої обмотки ЕД.

Висновки.

Розроблено та теоретично обґрунтовано метод визначення параметрів електричного кола, який полягає в аналізі нерівномірності екстремальних значень миттєвої потужності, що споживається в перехідному режимі виникнення струму збурення.

Розроблений спосіб теплового захисту електродвигунів, що працюють в повторно-короткочасному режимі, від неприпустимого перевищення температури обмоток при струмах перевантаження за рахунок безпосереднього контролю температури обмотки статора шляхом розрахунку збільшення її активного опору.

Швидке, в перші 10 мс після виникнення пускового струму, обчислення в реальному часі активного опору обмоток статора в гарячому стані та його порівняння з відомим значенням холодного стану без додаткових вузлів вимірювання опору й

пристроїв їхнього керування, дозволяє істотно покращити захисні властивості апаратів захисту електродвигунів, значно спростити конструкцію захисного пристрою та зменшити фінансові витрати на його виготовлення.

Бібліографічний список

1. Новое направление в создании рудничных взрывозащищенных трансформаторных подстанций на низшее напряжение до 3300 В / Н. М. Басов, В. С. Дзюбан, В. В. Кардаш, В. Е. Кошкин, Т. В. Швецова // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. научных трудов. — Донецк : ООО «АИР», 2010. — С. 61–71.
2. Анализ технико-эксплуатационных показателей современных зарубежных взрывозащищенных трансформаторных подстанций / И. Я. Чернов, В. В. Шилов, В. Е. Налбатов, Н. А. Волков, В. Л. Кузнецов // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. — Донецк : ООО «Юго-Восток, Лтд», 2006. — С. 74–89.
3. Закладной А. Н. Методы оценки срока службы асинхронных электродвигателей / А. Н. Закладной, О. А. Закладной // Энергетика та електрифікація. — 2010. — №4. — С. 63–67.
4. Данилов И. А. Общая электротехника с основами электроники / И. А. Данилов, П. М. Иванов — М.: Высшая школа, 2005. — 745 с.
5. Электрическая изоляция. Классификация и обозначение по термическим свойствам : ГОСТ Р МЭК 60085-2011. — [Введ. 2012-06-01]. — М.: Стандартинформ, 2012. — III, 8 с.
6. Пускорегулирующая аппаратура TeSys : каталог Schneider Electric. — 2007. — 567 с.
7. Низковольтное оборудование ABB. Контакторы, реле управления, аппараты защиты электродвигателей / Технический каталог ABB. — 2010. — 366 с.
8. Пуск и защита электродвигателей : каталог продукции Moeller. — 2009. — 176 с.
9. Низковольтные аппараты управления и распределения Siemens. SIRIUS — SENTRON — SIVACON : каталог LV1 Siemens. — 2007. — 1270 с.
10. Сивокобыленко В. Ф. Способы реализации тепловой защиты асинхронных электродвигателей, основанной на измерении входных сопротивлений / В. Ф. Сивокобыленко, С. Н. Ткаченко // Збірник наукових праць ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». Серія «Електротехніка і енергетика». — Донецьк, 2008. — Вип. 8 (140). — С. 13–18.
11. Сивокобыленко В. Ф. Тепловая защита асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при несимметрии питающего напряжения / В. Ф. Сивокобыленко, С. Н. Ткаченко // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. — Кременчук: КДПУ, 2009. — Вип. 3(56). Част. 2. — С. 74–78.
12. Пат. № 2227354 Российской Федерации МПК H02H5/04, H02H7/06 Способ тепловой защиты двигателя и устройство для его осуществления / Г. А. Бугаев, Е. Ю. Ерохин, А. Н. Леонтьев, М. А. Шамис. — № 2002108251/092002108251/09; заявл. 01.04.2002; опубл. 20.04.2004.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. ДонДТУ Заблодським М.М., д.т.н., проф. НТУ "ХПІ" Болюхом В.Ф.

Стаття надійшла до редакції 10.06.14.

к.т.н. Серeda А. Г. (НТУ «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина, e-mail: lexis_suba@mail.ru)

ЗАЩИТА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ТОКОВ ПЕРЕГРУЗКИ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ КОНТРОЛЕМ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБМОТКИ В МОМЕНТ ПУСКА

Доказана необходимость непосредственного контроля температуры обмотки асинхронных электродвигателей. Путем анализа экстремальных значений мгновенной мощности потреб-

ляемой электродвигателем в начальный момент времени после пуска, осуществляется контроль над температурным режимом электродвигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме. Дано теоретическое обоснование возможности получения информации о параметрах электрической цепи в переходном режиме изменения тока возмущения, в частности определения температуры асинхронных электродвигателей путем контроля за изменением активного сопротивления обмотки. Разработан алгоритм функционирования микропроцессорного устройства защиты асинхронных электродвигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме, от недопустимого перегрева обмоток.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель, микропроцессорное устройство защиты.

Sereda O. G. Candidate of Technical Sciences (National Technical University «Kharkiv Polytechnical Institute», Kharkiv, Ukraine, e-mail: lexus_suba@mail.ru)

PROTECTION OF ASYNCHRONOUS MOTORS FROM OVERLOAD CURRENTS WITH DIRECT CONTROL OF THE WINDING TEMPERATURE AT THE TIME OF START

The necessity of direct winding temperature monitoring of induction motors is proved. The control of the motor temperature, working in intermittent mode is done by the analysis of extreme values of the motor instantaneous power consumption at the initial time after start-up. The theoretical justification for the possibility of obtaining information about the parameters of the electrical circuit in the transient regime change current perturbations, in particular determining the temperature of induction motors by monitoring the change in active resistance of the winding is given. The algorithm of functioning of induction motors microprocessor protection operating in intermittent mode, against impermissible winding heating is developed.

Key words: induction motor; microprocessor-based protection device.

МАТЕРІАЛИ КОНФЕРЕНЦІЇ
«Відкриті університетські фізичні читання»

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ
«Открытые университетские физические
чтения»

Proceedings of Open University Physics
Readings Conference

УДК 621.373.8

д.т.н., проф. Мочалін Є. В.,
Браженко В. М.
(ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ PIV

В роботі наведені результати теоретичних досліджень пов'язаних з методикою розрахунку енергетичних параметрів лазерного випромінювання, які потрібні для реалізації методу цифрової трасерної візуалізації. Розглянуто основні фактори, що впливають на ці параметри: характеристики приймача випромінювання, розмір і коефіцієнт відбиття трасуючих частинок, формування лазерної площини. Наведено експериментальні результати реалізації PIV.

Ключові слова: цифрова трасерна візуалізація, світловий потік, характеристики ПЗЗ, теорія Мі, лазерний ніж.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами.

Сьогодні все більше застосування знаходять чисельні методи моделювання турбулентності, засновані на перших принципах динаміки рідини і газу. Однак, через велику обчислювальну трудомісткість цих методів їх широке застосування, при вирішенні складних завдань, може початися ближче до кінця нинішнього століття.

Специфіка ситуації полягає в тому, що для опису турбулентних течій, згідно з сучасними уявленнями, достатньо класичних рівнянь Нав'є-Стокса, і в цьому сенсі проблема може вважатися давно вирішеною. Але незважаючи на експоненційне зростання потужності обчислювальної техніки, що спостерігається в останні десятиліття, її можливості все ще недостатні для вирішення цих рівнянь при високих числах Рейнольдса, які мають практичний інтерес [1].

Найбільшого поширення отримав метод тісно пов'язаний з фотографуванням частинок-трасерів, які переносяться потоком в середовищі. Прикладами таких методів є метод цифрової трасерної візуалізації, або ж у іноземних джерелах Particle Image Velocimetry (PIV), який відноситься до класу безконтактних методів вимірювання швидкості в потоках. Серед низки інших інструментів для дослідження структури

течій він займає особливе місце завдяки можливості реєструвати миттєві просторові розподіли швидкості. Дана перевага є особливо важливою при вивченні потоків, що містять великомасштабні вихрові структури [2].

Мета роботи. Робота присвячена розрахунку оптимальних енергетичних параметрів лазерного випромінювання, які необхідні для дослідження потоків рідини та газу в обраному перерізі методом цифрової трасерної візуалізації. Розглядається також визначення оптимальних параметрів приймача випромінювання, що використовується у методі, та обґрунтування рекомендацій з підбору параметрів експериментальної установки для отримання мінімальних помилок вимірювань.

Викладення основного матеріалу. Спочатку потрібно розглянути загальні характеристики фото-приймача оптичного випромінювання — ПЗЗ-матриці.

Першим критерієм є тип матриці. При порівнянні ПЗЗ з покадровим і рядковим перенесенням сигналу перевага віддається першому типу, оскільки в ПЗЗ з покадровим перенесенням повністю використовується вся поверхня світлочутливої секції. У тих ПЗЗ, де застосовується механізм

рядкового перенесення, частина світлочутливої секції закрита непрозорими плівками (приблизно до 30% площі секції). Відповідно втрачається частина світлового потоку.

Одним з важливих параметрів є розмір ПЗЗ структури. Розмір матриці описується параметром із назвою формат. Формат — це розмір діагоналі матриці, що приблизно дорівнює діаметру мішені відповідного видикона. Він вимірюється у дюймах і приймає значення: 1", 2/3", 1/2", 1/3", 1/4" і т.ін. Найчастіше в реалізації методу PIV використовують матриці з великим значенням формату (цей критерій визначається просторовими розмірами досліджуваної області).

Інший важливий параметр ПЗЗ матриці — квантова ефективність. Під квантовою ефективністю розуміється відношення числа зареєстрованих зарядів до кількості тих, що потрапили на кристал фотонів. У ПЗЗ цей параметр може приймати значення від 4% (низькоякісні ПЗЗ, що використовуються, як правило, в недорогих відеокамерах) до 50% в хороших камерах і навіть вище — аж до 95%.

Важливою характеристикою цифрової відеокамери є бітність процесора дискретизації.

У сучасних моделях цифрових відеокамер використовуються 8-, 10-, 12- або 14-бітові процесори. Чим більше кількість біт, з допомогою яких описується піксель, тим вище точність вибірки. Цифрові процесори сигналів на одному біті можуть описувати піксель тільки однією або двома величинами, а 12-бітний цифровий процесор дозволяє отримувати приголомшуючу кількість значень — 4096.

Далі слід розглянути інтегральну чутливість та порогову чутливість ПЗЗ. Інтегральна чутливість дозволяє розрахувати вихідний сигнал ПЗЗ при заданому світловому потоці (у ватах на квадратний метр). Однак реалізоване при цьому відношення сигнал/шум залишається невідомим. З цієї точки зору істотно більш корисним виявляється поняття порогової чутливості, яке

визначається пороговим світловим потоком Φ на заданій довжині хвилі λ_0 , що створює на виході ПЗЗ сигнал з заданим відношенням сигнал/шум. Для розрахунку цього відношення необхідно проаналізувати основні складові шумів ПЗЗ.

Всі складові шумів ПЗЗ породжені різними фізичними процесами і, в силу цього, некорельовані та незалежні. З урахуванням цього середньоквадратичне значення шумів на виході ПЗЗ може бути знайдене як

$$\overline{n_{CCD}} = \sqrt{\overline{n_e^2} + \overline{n_z^2} + \overline{n_d^2} + \overline{n_t^2} + \overline{n_{out}^2} + \overline{n_{vt}^2}}, \quad (1)$$

де $\overline{n_e^2}$ — фотонний шум; $\overline{n_z^2}$ — заряд непорожнього нуля; $\overline{n_d^2}$ — дробові шуми; $\overline{n_t^2}$ — шуми перенесення; $\overline{n_{out}^2}$ — шум установки потенціалу вузла детектування заряду; $\overline{n_{vt}^2}$ — шум вихідного гальванометричного транзистора.

Відношення сигнал/шум розраховується

$$\psi = \frac{S(\lambda_0) A T_i \Phi}{n_{CCD}}, \quad (2)$$

звідки гранична чутливість

$$\Phi = \frac{\psi n_{CCD}}{S(\lambda_0) A T_i}. \quad (3)$$

Тоді величина максимального світового потоку на піксель, який і буде максимумом динамічного діапазону приймача світового потоку, визначається наступним чином:

$$F_{\max} = \frac{n \cdot P_{phe}}{A \cdot T_i \cdot \theta}, \quad (4)$$

де T_i — час накопичення, $A = \Delta x \cdot \Delta y$ — площа світлочутливого елемента, P_{phe} — енергія одного кванту випромінювання на даній довжині хвилі, θ — квантовий вихід, n — кількість фотоелектронів генерованих в матриці. Величина $S(\lambda_0) = \frac{\lambda_0}{hc} \theta(\lambda_0)$ трактується як значення

спектральної чутливості ПЗЗ $S(\lambda_0)$ на довжині хвилі λ_0 [3].

Знаючи світловий потік, який падає на матрицю, можемо розглянути світловий потік розсіяний часткою. Для цього скористаємося теорією Мі [4].

Рівняння, яке є зручним для практичного вжитку, при розсіюванні на одній частинці, має вигляд:

$$I = \frac{I_0(i_1 + i_2)}{2k^2 r^2}, \quad (5)$$

де $k = 2\pi/\lambda$ — хвильове число, r — відстань від центра частинки до поверхні матриці фотоприймача, I_0 — падаюче випромінювання, I — розсіяне випромінювання, i_1 і i_2 позначають інтенсивності світла, площина коливань якого перпендикулярна і паралельна площині спостереження відповідно.

У самому загальному випадку обчислення, що виконуються в задачі Мі, зводяться до визначення величин:

$$i_1 = |S_1(\theta)|^2, \quad i_2 = |S_2(\theta)|^2, \quad (6)$$

де $S_1(\theta)$, $S_2(\theta)$ — амплітудні функції розсіювання, що визначаються формулами (6), (7).

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)), \quad (7)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n \pi_n(\cos \theta) + a_n \tau_n(\cos \theta)), \quad (8)$$

де a_n , b_n — комплексні функції, які визначаються значеннями функцій Рікатті — Бесселя, аргументи яких виражаються через параметри частинки m — коефіцієнт заломлення, $x = ka = \frac{2\pi a}{\lambda}$ — ефективний радіус, a — геометричний радіус частинки, λ — довжина хвилі випромінювання і

не залежать від кута розсіювання θ . Значення комплексних функцій розраховано у таблицях розсіювання Лоусона, Керра, Гампрехта та ін. Кількість членів, які потрібно взяти, дорівнює $n_x = 7 + 1.2x$. Функції кута розсіювання π_n , τ_n , які залежать тільки від θ і виражаються через перші і другі похідні поліномів Лежандра n -го порядку з аргументом $\cos \theta$:

$$\pi_n(\cos \theta) = \frac{1}{\sin \theta} \cdot P_n^l(\cos \theta), \quad (9)$$

$$\tau_n(\cos \theta) = \frac{d}{d\theta} \cdot P_n^l(\cos \theta). \quad (10)$$

Наступним кроком є визначення параметрів лазерної площини (ЛП), яка становить одну із головних елементів. За її допомогою відбувається освітлення частинок. Оптична система формування ЛП полягає, в простому випадку, з однієї циліндричної лінзи (рис. 1) та із системи лінз у більш складних реалізаціях.

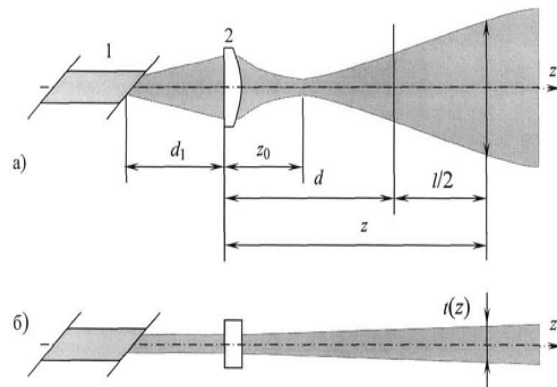


Рисунок 1 — Однолінзова оптична схема у виглядах збоку (а) та зверху (б): h — висота площини, t — товщина площини, d_1 — відстань від лазера до лінзи, z_0 — розташування перетяжки перетвореного пучка, d — відстань від лінзи до площини, l — довжина зондувальної області.

Вибір оптичної системи визначається окремо для кожної конкретної задачі, виходячи із заданих умов.

Нас цікавить зміна щільності потужності уздовж осі розповсюдження гауссового пучка в заданій оптичній системі (рис 2). Щільність потужності обчислюється за формулою:

$$F_e = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot E \cdot E, \quad (11)$$

де

$$E(x, y, z) = A_0 \cdot \frac{w_0}{w(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{w^2(z)}} e^{j(k \cdot z + 2\frac{k^2(x^2+y^2)}{2 \cdot R} + \varphi)}; \quad (12)$$

$$w(z) = w_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{z}{R_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (13)$$

$$R(z) = z \cdot \left[1 + \left(\frac{R_0}{z} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}; \quad (14)$$

$$Q = \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\mu \cdot \mu_0}}, \quad (15)$$

де A_0 — амплітуда поля в центрі пучка; w — радіус пучка, тобто відстань, протягом якої амплітуда зменшується в w разів; w_0 — радіус пучка в перетяжці; R — радіус кривизни хвильового фронту; φ — зсув фази по вісі z .

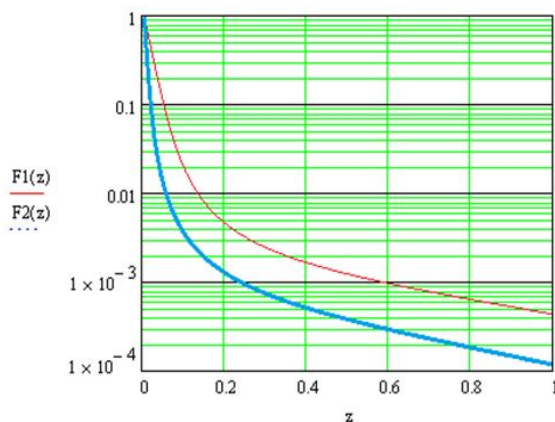
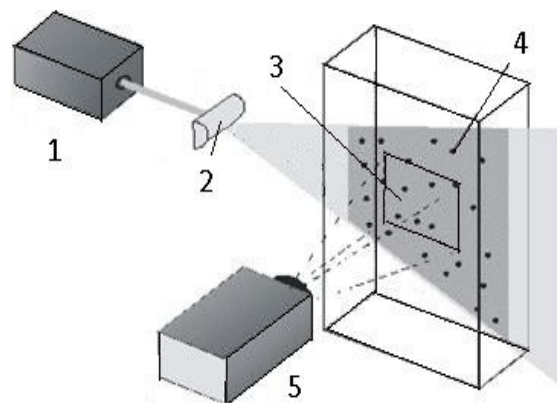


Рисунок 2 — Залежність щільності потужності F_e уздовж осі z при різних значеннях f : $F1(z)$ — 10 мм, $F2(z)$ — 5 мм.

Характеристика експерименту. Стенд (рис. 3), розроблений спеціально для вирішення даної задачі, включає в себе безперервний гелій-неоновий лазер, який генерує випромінювання з довжиною хвилі 0,6320 мкм і потужністю 30 мВт. Лазерний пучок формується за допомогою оптичної системи (циліндрична лінза) і потрапляє в ємність з водою, де знаходяться частинки сріблянки (Al_2O_3) розміром приблизно 0,02-0,04 мм. Полупрофесійний фотоапарат фіксує зображення в області лазерної площини зі швидкістю 10 кадрів в секунду. Значення ISO дорівнює 100, діафрагма $f/5.6$.

Отримані зображення та результати їх обробки у вигляді векторного поля швидкостей в досліджуваній області подані на рис. 4, 5. Обробка трасерних кадрів здійснювалась за допомогою програми PIVlab.

Висновки. У роботі представлена методика розрахунку енергетичних характеристик лазерного випромінювання, що є необхідними для реалізації цифрової трасерної візуалізації при експериментальному визначенні полів швидкості у потоках рідин та газів.



1 — безперервний гелій-неоновий лазер;
2 — оптична система; 3 — ємність з водою;
4 — частинки сріблянки; 5 — полупрофесійний фотоапарат

Рисунок 3 — Схема експериментального стенду

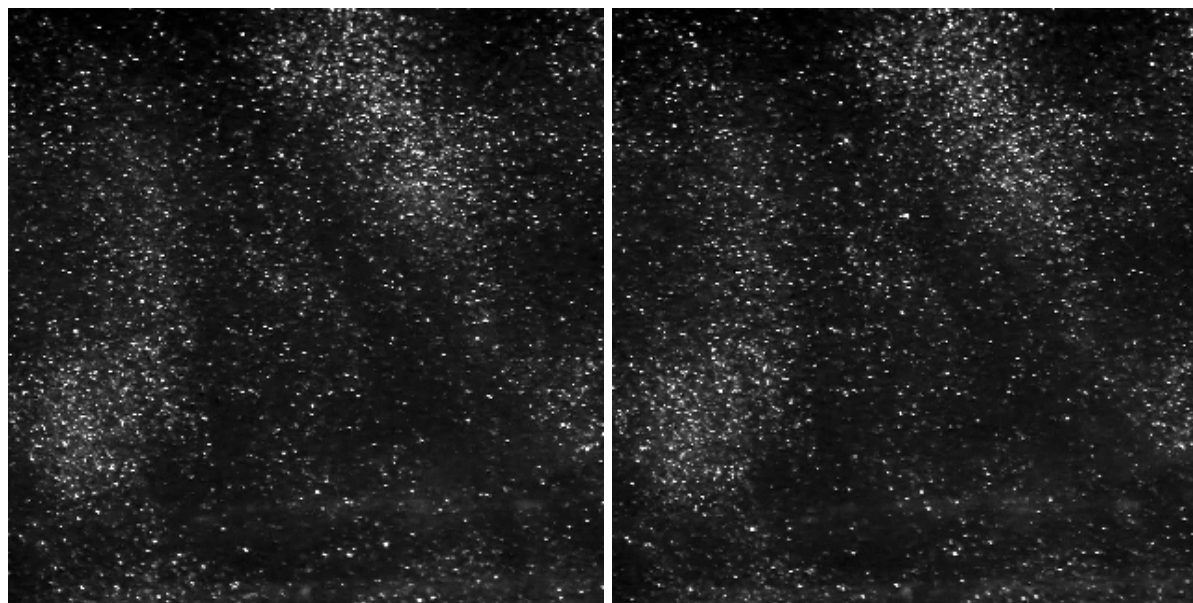


Рисунок 4 — Кадри, отримані з витримкою камери 1/250 с. (інтервал між кадрами 0.2 секунди).

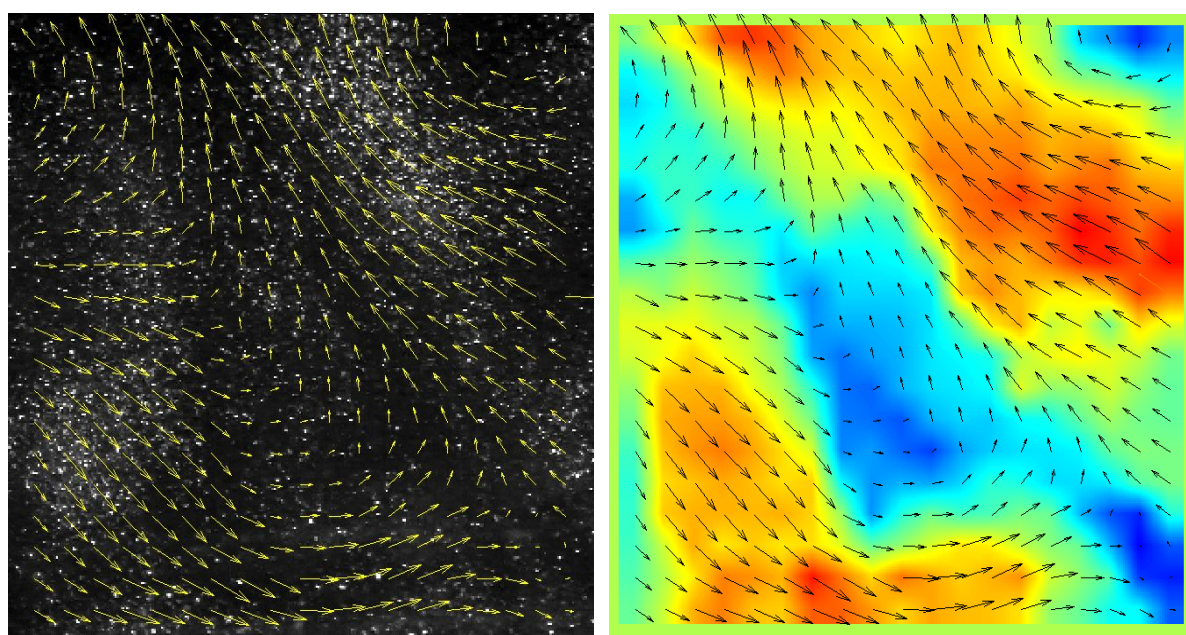


Рисунок 5 — Розподіл швидкостей в досліджуваній області (кольором позначена величина завихреності), розрахований с допомогою PIVlab

Досліджено базові характеристики приймача випромінювання, необхідні для отримання якісних цифрових зображень і їх подальшої програмної обробки за допомогою кросскореляційного алгоритму. Розглянуто розсіювання випромінювання на частці-трасері в потоці рідини (теорія Мі) та вплив цього явища на розрахунок

енергії на виході лазерної апертури. Проведено теоретичний аналіз вимог системи формування лазерної площини, а саме циліндричної короткофокусної лінзи. На основі наведеної методики одержані результати експериментального дослідження, які пов'язані з отриманням миттєвого поля швидкості в рідинному потоці.

Бібліографічний список

1. Spalart P. R. "Strategies for turbulence modeling and simulations" / P. R. Spalart // *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2000, v. 21, pp. 252–263.
2. Raffel M., Willert C., Wereley S., Kompenhans J. In: *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. - Springer-Verlag., Berlin Heidelberg New York, 2007. — 253 p.
3. Цифровое преобразование изображений / Под ред. проф. Быкова Р. Е. — М.: Телеком. 2003. — 233 с.
4. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсионными частицами / Д. Дейрменджан // Пер. с англ.; под ред. К. Я. Кондратьева. — М.: Мир, 1971. — 165 с.

**Рекомендовано до друку к.т.н., проф. ДонДТУ Паерандом Ю. Е.,
д.т.н., проф. СХУ ім. В. Даля Корсуновим К. А.**

Стаття надійшла до редакції 19.06.14.

д.т.н. Мочалин Е. В., Браженко В. Н. (ДонГТУ, г. Алчевск, Україна)

**РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ
РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА PIV**

В работе приведены результаты теоретических исследований связанных с методикой расчета энергетических параметров лазерного излучения, необходимых для реализации метода цифровой трассерной визуализации. Рассмотрены основные факторы, влияющие на эти параметры: характеристики приемника излучения, размер и коэффициент отражения трассирующих частиц, формирование лазерной плоскости. Приведены экспериментальные результаты реализации PIV.

Ключевые слова: цифровая трассерная визуализация, световой поток, характеристики ПЗС, теория Ми, лазерный нож.

Mochalin Y. V. Doctor of Engineering Science, Brazhenko V. N. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

**CALCULATION OF ENERGY PARAMETERS OF LASER RADIATION IMPLEMENTING
THE PIV METHOD**

The results of theoretical research, concerned with the method of calculating energy parameters of laser radiation, which are necessary for the implementation of digital tracer visualization method, are presented. Basic factors which affect those parameters are considered, such as characteristics of the radiation receiver, size and coefficient of tracer particles reflection, laser plane formation. Experimental results of PIV method implementing are given.

Key words: Particle Image Velocimetry, optical path, characteristics of the CCD, Mie's theory, laser knife.

УДК 669: 621.03.539

к.т.н. Мурга В. В.,
к.т.н. Антропов И. И.,
Гамазин Д. К.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

ОБРАБОТКА СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМОЙ В ВОДНОЙ СРЕДЕ

Описан метод улучшения характеристик изделий из стали при использовании неравновесной плазмы. Показано, что разряд между металлическим анодом и электролитическим катодом приводит к экстремальным условиям нагрева путем создания мощного кратковременного теплового потока в изделие, с последующим быстрым охлаждением. В результате такого воздействия происходят фазовые изменения в поверхностном слое стали, приводящие к изменению её механических или химических свойств.

Ключевые слова: неравновесная плазма, плазмотрон с жидким электродом, изменение фазовой структуры стали при экстремальном нагреве.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Использование плазмотронов с жидким электродом обусловлено высокой эффективностью поверхностной обработки и простотой реализации этого метода. Подобный вариант плазмотрона рассматривается как генератор неравновесной плазмы с большим отрывом электронной температуры от ионной температуры. Газоразрядная плазма с такими свойствами даёт возможность получать недостижимые другими путями технологические эффекты, к числу которых относятся: поверхностная термическая обработка с экстремальной скоростью нагрева и охлаждения, полировка металлических поверхностей с одновременным уменьшением параметра шероховатости R_a от 0,40 до 0,20 мкм и менее и др. Перспективность использования генераторов неравновесной газоразрядной плазмы с жидкими электродами в этих целях подтверждается результатами многих экспериментальных исследований.

Однако возможности технологических применений генераторов неравновесной газоразрядной плазмы с жидкими электродами ещё мало изучены и все выводы и технологические режимы основаны на результатах экспериментальных исследова-

ний. Актуальность исследований в этом направлении обуславливается целым рядом причин: высокой энергетической эффективностью, достаточно низкой стоимостью оборудования, высокой степенью экологической чистоты технологических процессов с применением неравновесной плазмы газового разряда с жидкими электродами.

Существует несколько методов обработки материалов с экстремальным нагревом. Это лазерная обработка, воздействие равновесной плазмы и электроннолучевая обработка. Большинство подобных методов связаны с использованием сложного и дорогостоящего оборудования. Доступной альтернативой в таком случае может стать использование искрового разряда для обработки. Такой метод позволяет организовать значительный тепловой поток от искры в изделие, и затем быстрое охлаждение за счёт теплопроводности среды и стали.

К числу проблемных вопросов, связанных с промышленным использованием плазмотронов относится эрозия электро-

© Мурга В. В., 2014

© Антропов И. И., 2014

© Гамазин Д. К., 2014

дов. Эрозия ограничивает продолжительность непрерывной работы плазматронов и возможность использования в качестве плазмообразующих химически активных газов, которые интенсифицируют процесс эрозии. Например, водяной пар является привлекательным с технологической точки зрения плазмообразующим газом, но его использование существенно сокращает срок службы электродов. Поэтому, несмотря на определенные успехи в создании плазматронов работающих на паре, низкий ресурс непрерывной работы таких плазматронов и ограничение по мощности препятствуют их широкому использованию. Радикальным решением проблемы ресурса работы плазматрона является разряд между жидкими электродами.

Самостоятельный разряд между жидкими электродами, устойчиво горящий на постоянном токе в воздухе при атмосферном давлении в диффузном (объемном) виде, является весьма интересным физическим объектом. В качестве электродов обычно используются электролиты, водные растворы, просто водопроводная вода, а также жидкий металл. Хотя разряд между жидкими электродами известен около ста лет, физические процессы, состав и свойства разрядной плазмы изучены мало.

Постановка задачи.

Задачей данной работы является исследование плазматрона с жидким электродом и анализ физических и механических свойств поверхности металлов после их обработки в плазматроне с жидким электродом.

Изложение материала и его результаты.

Для исследования была собрана установка, состоящая из источника напряжения, ёмкости с водой, на дне которой располагался катод. Анодом служил угольный стержень. В разрядную цепь включалось сопротивление 150 Ом. При обработке изделия (из стали 45) помещалось на донный электрод, ёмкость заполнялась слабым раствором солей в дистиллированной воде

выше уровня обрабатываемой поверхности. Между электродами прилагалось напряжение 800 вольт. После этого угольный стержень опускался до момента пробоя в жидкости. Затем устанавливался режим повторяющихся разрядов. Так проводилась обработка в течении 30 секунд.

В условиях кратковременного действия интенсивного поверхностного теплового источника, что соответствует методике поверхностной обработки неравновесной плазмой [1], возможно использование однородного линейного уравнения теплопроводности для полуограниченного тела:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} - \vec{\nabla}(\lambda \vec{\nabla} T) = 0, \quad (1)$$

где c_p — теплоемкость, ρ — плотность, λ — теплопроводность материала.

Граничные условия для процесса нагрева образца можно представить как:

Тогда для боковой поверхности образца квадратного сечения со стороной a граничные условия примут вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} T \Big|_{x=\pm \frac{a}{2}} &= -h \left(T \Big|_{x=\pm \frac{a}{2}} - T_0 \right) - \sigma T^4 \Big|_{x=\pm \frac{a}{2}}, \\ \frac{\partial}{\partial x} T \Big|_{y=\pm \frac{a}{2}} &= -h \left(T \Big|_{y=\pm \frac{a}{2}} - T_0 \right) - \sigma T^4 \Big|_{y=\pm \frac{a}{2}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где T_0 — температура окружающей среды.

Использование дистиллированной воды в качестве среды обработки позволяет достичь сразу нескольких положительных эффектов. Во первых – благодаря высокой плотности воды, в момент пробоя она замедляет поперечный рост канала разряда, что увеличивает плотность тока и температуру плазмы, и как следствие – тепловой поток. С другой стороны – высокая теплоёмкость и теплопроводность воды позволяет быстро отвести тепло от нагретого участка после завершения разряда. Это создаёт резкий перепад температур в поверхностном слое, и как следствие – фазовые преобразования [2].

Процесс обработки металлов в неравновесной плазме достаточно экономичен. При плотности тока 1 А/см^2 расход электроэнергии составляет порядка $0,05 \text{ кВт/час}$ на 1 см^2 . На рисунках 1, 2 показаны электрические характеристики разряда. Разряд достаточно стабилен и от концентрации зависит в малой степени.

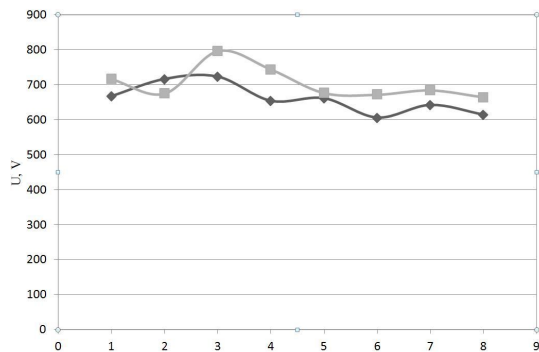


Рисунок 1 — Зависимость напряжения зажигания разряда от концентрации

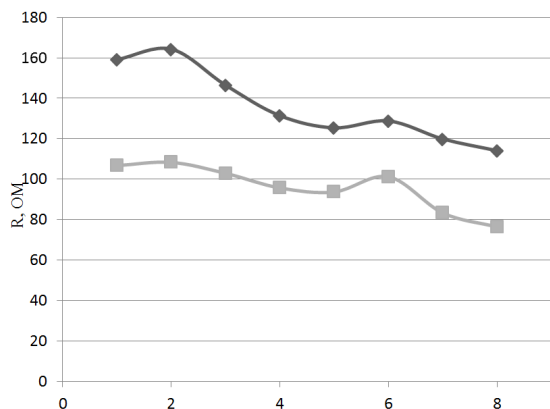


Рисунок 2 — Зависимость дифференциального сопротивления разряда от концентрации

Микроструктура обработанной поверхности анализировали путём изучения протравленного микрошлифа поверхности при помощи металлографического микроскопа.

Анализируя микроструктуру обработанной поверхности стали, которая представлена на рисунке 3, можно выделить следующие особенности:

Размер и форма зёрен не претерпели изменений.

В необработанной зоне можно чётко выделить 2 фазы — слабо травящийся феррит и тёмные протравленные зёрна перлита.

В областях подвергшихся обработке зёрна практически не травятся.

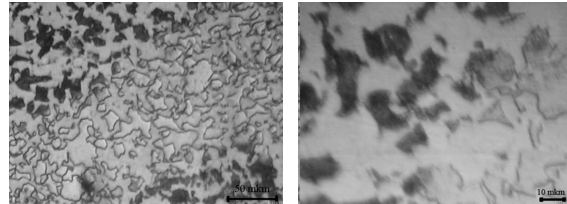


Рисунок 3 — Микроструктура поверхности обработанной стали

Из внешнего вида границы, а также на основе визуального анализа при шлифовке можно заметить некий перепад уровней между фоновой фазой (предположительно феррит) и преобразованной фазой (видимо зёрна перлита, преобразованные в мартенсит).

Граница раздела обработанной и необработанной поверхности может проходить даже по самому зерну.

Исследование твердости показало значительные изменения. Эта информация представлена на рисунке 4.

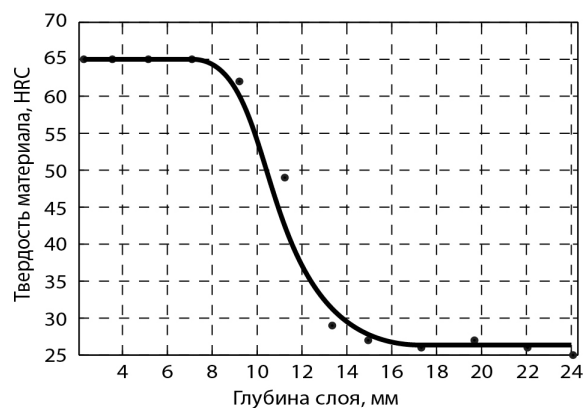


Рисунок 4 — Твёрдость обработанного образца

Значение твердости в данном случае превышает показатели при традиционной термической обработке, плазменно-дуговой и лазерной обработке, причем время обработки, включая предварительную подго-

товку, значительно уменьшается по сравнению с другими видами обработки.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Предложенный способ обработки поверхности металлов обладает высокой энергетической эффективностью. Результаты проведенных экспериментальных исследований показывают возможность получения высоких эксплуатационных характеристик деталей с нагруженной поверхностью.

Благодаря высокой скорости изменения температуры не успевает пройти диффузия углерода между фазами. Изменениям подверглись только перлитные зёрна.

Зёрна перлита, очевидно, при нагревании преобразовались в аустенит, который

благодаря быстрому охлаждению преобразовался в мартенсит.

Эти фазовые изменения значительно повысили твёрдость обработанной поверхности.

Таким образом, представленный метод позволяет обеспечить высокую твёрдость изделий из углеродистых сталей. Простота конструкции и доступность компонентов делает такой подход экономически выгодным.

Применение водной среды в качестве среды обработки, и ограничение разрядного тока обеспечивает преобразование фазового состава стали.

После обработки поверхность не требует финишной доводки поверхности.

Бібліографічний список

1. Мурга В. В. Использование плазматрона с жидким катодом для упрочнения поверхности материалов / В. В. Мурга, Дж. Омеман, И. И. Антропов. — Алчевск : ДонДТУ. — 2008. — 6с.
2. Антропов И. И. Моделирование процесса нагрева стальных изделий в электролите / И. И. Антропов, Дж. Омеман, Д. К. Гамазин, А. В. Жданович. — Всеукраїнська конференція «Відкриті фізичні читання» (11 травня, м. Алчевськ) : Збірник тез доповідей. — Алчевськ : ДонДТУ, 2012. — 12 с.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонДТУ Мочалиным Е. В., д.т.н., проф. ВНУ им. В. Даля Корсуновым К. А.

Статья поступила в редакцию 23.06.14.

к.т.н. Мурга В. В., к.т.н. Антропов І. І., Гамазін Д. К. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна) ОБРОБКА СТАЛЕВИХ ВИРОБІВ НЕРІВНОВАЖНОЮ ПЛАЗМОЮ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Описано метод поліпшення характеристик виробів із сталі при використанні нерівноважної плазми. Показано, що розряд між металевим анодом і електролітичним катодом призводить до екстремальних умов нагріву шляхом створення потужного короткочасного теплового потоку у виріб, з наступним швидким охолодженням. У результаті такого впливу відбуваються фазові зміни в поверхневому шарі сталі, що призводять до зміни її механічних або хімічних властивостей.

Ключові слова: *нерівноважна плазма, плазматрон з рідким електродом, зміна фазової структури сталі при екстремальному нагріванні.*

Murга V. V. Candidate of Engineering Sciences, Antropov S. S. Candidate of Engineering Sciences, Gamasin D. K. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine) STEEL PRODUCTS TREATMENT BY NONEQUILIBRIUM PLASMA IN WATER ENVIRONMENT

Improvement technique of steel products characteristic in usage nonequilibrium plasma is described. The discharge between metal anode and electrolytic cathode leads to extreme heating conditions by creation of powerful short period thermal flow in the product with the following quick cooling is shown in the article. Phase changes in the results of such influence which lead to change of its mechanical or chemical properties.

Key words: *nonequilibrium plasma, plasmatron with liquid electrode, change of phase steel structure in extreme heating.*

УДК 536.252:532.527.2

д.т.н. Мочалин Е. В.,
Юрьев С. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Украина)

РАСЧЕТНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В КОЛЬЦЕВОМ ЗАЗОРЕ МЕЖДУ ВРАЩАЮЩИМИСЯ ЦИЛИНДРАМИ

Рассмотрены основные подходы к численному моделированию турбулентных течений в кольцевой области между вращающимися цилиндрами (течения Куэтта-Тейлора). Получены расчётные результаты, коррелирующие с известными экспериментальными результатами. На основе сравнительного анализа предложена наиболее подходящая дифференциальная модель турбулентности для расчёта сопряженных задач гидродинамики и теплообмена в потоке Куэтта-Тейлора.

Ключевые слова: численное моделирование, модели турбулентности, течение Куэтта-Тейлора.

Введение. В настоящее время наиболее действенным подходом к изучению турбулентности является аналитический, основанный на исходной посылке о том, что для математического описания турбулентных течений приемлемой является система уравнений Навье – Стокса, описывающая характеристики мгновенного течения жидкости. Основными инструментами для расчета турбулентных течений являются численные методы, широкое использование которых стало возможным благодаря быстрому совершенствованию вычислительной техники. Однако, несмотря на пристальный интерес, до настоящего времени не существует универсального подхода к расчету турбулентных течений, позволяющего адекватно отражать некоторые аспекты этих течений, проявляющиеся в разнообразных частных случаях.

Самым доступным остается использование различных моделей турбулентности в сочетании с осредненными по Рейнольдсу уравнениями Навье-Стокса (Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations – RANS). Этот подход к численному моделированию менее требователен к вычислительным ресурсам и поэтому более доступен, а также не имеет выраженного ограничения по степени турбулентности рассматриваемых течений. Однако его применение тре-

бует особого внимания к верификации полученного решения. Все модели турбулентности, применяемые в рамках использования RANS уравнений, содержат эмпирические зависимости и коэффициенты, калиброванные на определенного рода течениях. Поэтому ни одна из таких моделей не обеспечивает наиболее адекватные результаты во всех случаях. Более того, известно [1], что простые алгебраические модели в рамках своей применимости могут обеспечивать результаты не худшие, чем более сложные дифференциальные модели. Кроме этого, следует иметь в виду, что та или иная модель турбулентности может адекватно отражать одни особенности или закономерности рассматриваемого турбулентного потока, и не отражать или искажать другие. В этом случае успех расчета зависит от того, какие физические особенности являются в данном конкретном случае преобладающими и в какой степени.

При описании течения Куэтта-Тейлора также наиболее приемлемым в настоящее время является использование RANS уравнений вместе с подходящей дифференциальной моделью турбулентности.

© Мочалин Е.В., 2014

© Юрьев С.А., 2014

Подходящей в данном случае следует считать модель, приспособленную для расчета пристенных течений и течений с кривизной линий тока. Кроме этого, использование так называемых пристеночных функций [2] в процедуре учета граничных условий для характеристик турбулентности вблизи твердых стенок не является оправданным, так как аппарат пристеночных функций разработан для условий локального равновесия, когда генерация турбулентной энергии и скорость ее диссипации приравниваются друг другу. Такие условия не имеют места, в частности, при отсосе (вдуве) среды через проникаемую поверхность. В последнем случае необходимо подробное разрешение ламинарного подслоя, что носит название «низкорейнольдсовой» формулировки. Подробные сведения о разнообразных аспектах применения различных дифференциальных моделей турбулентности можно найти, например, в работах [2,3].

Целью настоящей работы является сравнительное тестирование наиболее перспективных для исследования потока снаружи вращающегося проникаемого цилиндра дифференциальных моделей турбулентности и сопоставление результатов расчета с известными экспериментальными данными. Исследования такого рода необходимы для верификации расчетного подхода к изучению сопряженных гидродинамических и тепловых процессов во вращающихся системах, которые широко распространены в технике.

Постановка задачи. Если говорить о потоках между соосными вращающимися цилиндрами, то наиболее достоверные экспериментальные данные по гидродинамике и теплообмену в области турбулентных режимов течения получены для классического случая потока между неподвижным внешним и вращающимся внутренним непроницаемыми цилиндрами [4-7]. Поэтому в качестве тестовой для сравнительного анализа расчетных подходов мы будем использовать именно эту задачу.

Область течения в классической задаче Куэтта-Тейлора характеризуется очень простой геометрией и обладает осевой симметрией. Соответствующая расчетная схема представлена на рисунке 1. Рассматривается движение жидкости (газа) в кольцевой области между наружной поверхностью внутреннего цилиндра с радиусом R_1 и внутренней поверхностью внешнего цилиндра с радиусом R_2 . Внешний цилиндр неподвижен, а внутренний вращается с угловой скоростью Ω .

Будем рассматривать неизотермическое течение Куэтта-Тейлора между непроницаемыми цилиндрами в осесимметричной формулировке по схеме на рисунке 1. Нас интересует диапазон больших значений вращательного числа Рейнольдса $Re_h = 8000 - 1 \cdot 10^5$, определяемого соотношением

$$Re_h = \frac{WR_1 h}{\nu}, \quad (1)$$

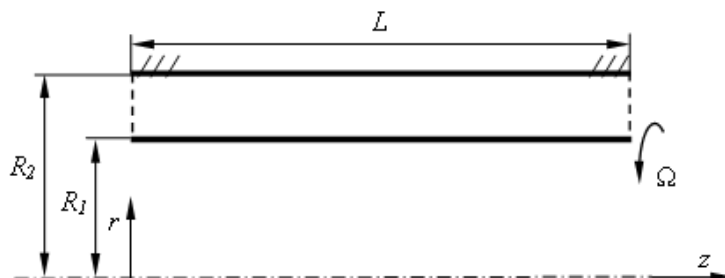


Рисунок 1 — Расчетная схема области течения в задаче Куэтта-Тейлора.

где $W = \Omega R_1$ — характерная окружная скорость, ν — кинематическая вязкость, $h = R_2 - R_1$ — ширина кольцевого зазора. Для данного диапазона в современной литературе недостаточно расчётных данных.

Для всех расчетных уравнений на границах $z = 0, z = L$ используются условия периодичности в осевом направлении, что чаще всего применяется в известных работах, посвященных расчету турбулентных течений Куэтта-Тэйлора. При этом длина расчетной области должна быть выбрана близкой к осевому размеру пары турбулентных вихрей Тэйлора (длине волны).

На поверхностях цилиндров для скорости используется условие «прилипания». На поверхности неподвижного цилиндра задается постоянная температура T_2 , а на поверхности внутреннего цилиндра — постоянный тепловой поток q_1 .

Для размеров области принято: $\tilde{h} = h/R_1 = 0,462$, $L/h = 2,4$.

В качестве одной из рассматриваемых альтернатив использования RANS моделей турбулентности выберем SST $k - \omega$ модель Ментера, которая в рамках применения гипотезы Буссинеска о скалярном коэффициенте турбулентной вязкости сочетает в себе лучшие свойства $k - \omega$ модели в пристенной области и преимущества $k - \varepsilon$ модели вдали от стенок. Как конкурирующую будем рассматривать модель переноса напряжений Рейнольдса (RSM). Эта модель предусматривает решение дифференциальных уравнений переноса всех компонент турбулентных напряжений и изначально свободна от ограничения в виде гипотезы Буссинеска о скалярном коэффициенте турбулентной вязкости. Описание этой модели можно найти, например в [8].

Для численного решения всех дифференциальных уравнений переноса импульса, тепла и характеристик турбулентности используется метод конечных объемов. В [3] дана подробная характеристика всех основных аспектов применения данного

метода к общему уравнению переноса скалярной величины, а также описание используемой численной процедуры совместного решения уравнений переноса компонент импульса и неразрывности. Там же изложены и особенности выбранного подхода к решению систем линейных уравнений, контроля и управления сходимостью итерационной процедуры. Поэтому перечислим только основные подходы к аппроксимации и схемные решения.

Для аппроксимации конвективных слагаемых в уравнениях переноса используется противопоточная схема QUICK, которая обеспечивает 3-й порядок точности на структурированных слабоискривленных сетках.

Для представления диффузионных членов принята центрально-разностная схема второго порядка, предложенная в работе [9] и рассмотренная в [10].

Нестационарные члены аппроксимируются на основе полностью неявной схемы второго порядка точности.

На основе дискретизированного уравнения неразрывности формулируются соотношения для коррекции значений давления. При этом используется усовершенствованная процедура SIMPLEC [11], демонстрирующая ускоренную сходимость по сравнению с базовым алгоритмом SIMPLE [12].

Дискретные значения компонент скорости и давления определяются и хранятся для центров расчетных ячеек, что соответствует центрированному несмещенному разностному шаблону. Для предотвращения нефизических осцилляций, которые могут иметь место в такой ситуации [12], используется коррекция Рхи-Чоу [13].

Высокая эффективность решения систем линейных уравнений обеспечена использованием итерационной процедуры Гаусса-Зейделя в сочетании с методом алгебраического многосеточного ускорителя (Algebraic Multigrid — AMG) в интерпретации, изложенной в работе [3].

Для контролю над сходимостью численного решения используется техника нижней релаксации, которая основана на введении релаксационных коэффициентов, корректирующих новые значения зависимых величин при переходе к следующей итерации.

Результаты. Чтобы определить наиболее подходящую модель турбулентности, которая максимально подходит для расчета течений в кольцевой области, сравним

результаты численного решения тестовой задачи, полученные с применением двух моделей турбулентности с экспериментальными данными [14] по двум критериям: безразмерной окружной скорости U_φ/W и безразмерной температуре $\Theta(r) = \frac{T(r) - T}{T_2 - T}$. Эти результаты представлены на рисунке 2.

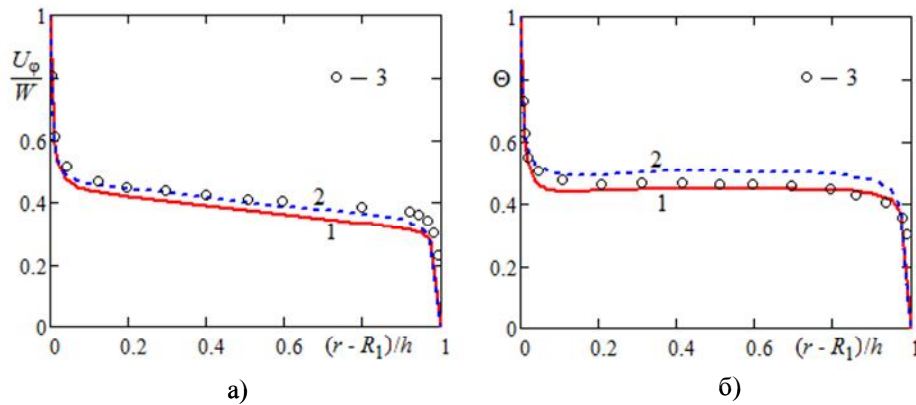


Рисунок 2 — Распределение безразмерной окружной скорости (а) и безразмерной температуры (б) по сечению кольцевой области ($Re_h = 1 \cdot 10^5$, $\tilde{h} = 0.462$): 1 — расчет, модель RSM; 2 — расчет, модель SST $k-\omega$; 3 — эксперимент [14]

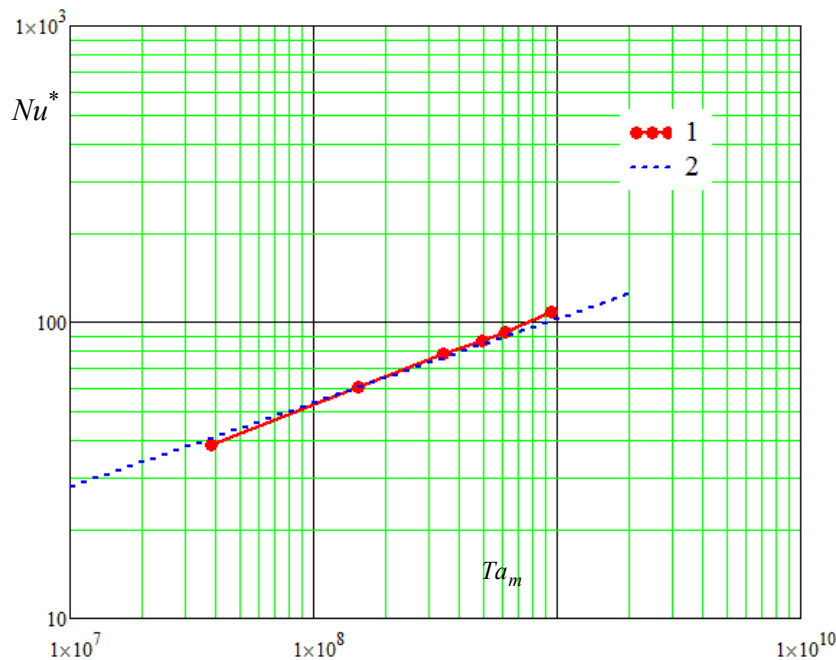


Рисунок 3 — Сравнение расчетных и экспериментальных данных по коэффициенту теплоотдачи от вращающегося цилиндра: 1 — расчете с использованием модели RSM; 2 — аппроксимирующая экспериментальная зависимость [14]

Рассматриваются усредненные в окружном и осевом пространственных направлениях, а также во времени, величины.

Из полученных результатов видно, что две используемые модели турбулентности в целом достаточно хорошо соотносятся с экспериментом. Однако модель RSM оказывается точнее вблизи стенки, что позволяет предположить преимущество её использования в дальнейших расчётах. Но прежде необходимо сопоставить с известными экспериментальными данными результаты, полученные с применением этой модели, по расчёту такой важной интегральной характеристики, как коэффициент теплоотдачи — число Нуссельта Nu^* . Такой анализ представлен на рисунке 3. Число Нуссельта и модифицированное число Тейлора определяются следующим образом:

$$Nu^* = \frac{q^* 2h}{\lambda(T_2 - T_1)}, \quad (2)$$

$$Ta_m = \frac{2\Omega^2 R_1^2 h^3}{\nu^2 (R_1 + R_2)} \left(\frac{1697}{\pi^4} C \right), \quad (3)$$

$$C = 0.0571 \left(1 - 0.652 \frac{h}{R_1} \right) + 0.00056 \left(1 - 0.652 \frac{h}{R_1} \right)^{-1}$$

где q^* — удельный тепловой поток через среднелогарифмическую поверхность цилиндров, R_1 — радиус которой

$R^* = \frac{R_2 - R_1}{\ln(R_2/R_1)}$, λ — коэффициент теплопроводности, T_1, T_2 — температуры поверхностей внутреннего и внешнего цилиндров.

Вывод. Приведенные результаты показывают, что обе сравниваемые модели турбулентности обеспечивают удовлетворительные результаты в широком диапазоне чисел Re_h : от начала области турбулентного макровихревого движения до границы различимости крупномасштабных вторичных течений. Тем не менее, модель переноса напряжений Рейнольдса (RSM) демонстрирует несколько лучшие результаты в окрестности стенок, а также при расчёте полей температуры, несмотря на немного большие вычислительные затраты.

Таким образом, можно сказать, при моделировании течения Куэтта-Тейлора наиболее подходящей является RSM модель турбулентности. Особенно уместна эта модель в том случае, когда добавляется вынужденное радиальное течение среды через проницаемые поверхности цилиндров. В этом случае возрастают градиенты скорости и температуры вблизи поверхности вращающегося цилиндра.

Бібліографічний список

1. Лойцянский Л. Г. *Механика жидкости и газа* / Л. Г. Лойцянский. — М.: Наука, 1987. — 840 с.
2. Белов И. А. *Моделирование турбулентных течений : учебн. пособ.* / И. А. Белов, С. А. Исаев. — СПб.: Балт. гос. тех. университет, 2001. — 108 с.
3. Мочалин Е. В. *Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил* / Е. В. Мочалин, А. А. Халатов. — Киев : Ин-т техн. теплофизики НАН Украины. — Т. 8 : *Гидродинамика закрученного потока в ротационных фильтрах*. — 2010. — 428 с.
4. Koschmieder E. L. *Turbulent Taylor vortex flow* / E. L. Koschmieder // *J. Fluid Mech.* — 1979. — Vol. 93. — P. 515–527.
5. Smith J. P. *Turbulent Couette flow between concentric cylinders at large Taylor numbers* / J. P. Smith, A. A. Townsend // *J. Fluid Mech.* — 1982. — Vol. 123. — P. 187–217.

6. Becker K. M. Measurement of diabatic flow in an annulus with inner rotating cylinder / K. M. Becker, J. Kaye // *Trans. of the ASME, Journ. of Heat Transfer*. — 1962. — Vol. 84. — P. 97–105.
7. Bjorclund I. S. Heat transfer between concentric rotating cylinders / I. S. Bjorclund, W. M. Kays // *Trans. of the ASME, Journ. of Heat Transfer*. — 1959. — Vol. 81. — P. 175–186.
8. Wilcox D. C. Turbulence modeling for CFD / D. C. Wilcox. — La Canada, California: DCW Industries, Inc., 1998. — 537 p.
9. Ferziger J. H. Computational methods for fluid dynamics / J. H. Ferziger, M. Peric. — Berlin, Heidelberg, 1999. — 389 p.
10. Численное моделирование вихревой интенсификации теплообмена в пакетах труб / Ю. А. Быстров, С. А. Исаев, Н. А. Кудрявцев, А. И. Леонтьев. — СПб.: Судостроение, 2005. — 392 с.
11. Van Doormaal J. R. Enhancement of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flow / J. R. Van Doormaal, G. D. Raithby // *Numer. Heat Transfer*. — 1984. — V.7, No. 2. — P. 147–163.
12. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 152 с.
13. Рхи С. М. Численный расчет турбулентного обтекания профиля с отрывом у задней кромки / С. М. Рхи, У. Л. Чоу // *Аэрокосмическая техника*. — 1984. — Т.2, №7. — С. 33–43.
14. Устименко Б. П. Процессы турбулентного переноса во вращающихся течениях / Б. П. Устименко. — Алма-Ата: Наука, 1977. — 228 с.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. Бабиюком Г. В.,
д.т.н. ИГТМ НАН Украины Семененко Е. В.**

Статья поступила в редакцию 17.06.14.

д.т.н. Мочалін Є. В., Юр'єв С. О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

РОЗРАХУНКОВИЙ ПІДХІД ДО МОДЕЛЮВАННЯ ТУРБУЛЕНТНОЇ ТЕЧІЇ В КІЛЬЦЕВОМУ ЗАОРІ МІЖ ОБЕРТОВИМИ ЦІЛІНДРАМИ

Розглянуто основні підходи до чисельного моделювання турбулентних течій в кільцевій області між обертовими циліндрами (течії Куетта-Тейлора). Отримано розрахункові результати, що корелюють з відомими експериментальними результатами. На основі порівняльного аналізу запропоновано найбільш підходяща диференціальна модель турбулентності для розрахунку сполучених завдань гідродинаміки і теплообміну в потоці Куетта-Тейлора.

Ключові слова: чисельне моделювання, моделі турбулентності, течія Куетта-Тейлора.

Mochalin Ye. V. Doctor of Engineering Sciences, Yuryev S. A. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

COMPUTATIONAL APPROACH TO THE MODELING OF TURBULENT FLOW IN THE ANNULAR REGION BETWEEN ROTATING CYLINDERS

The main approaches to the numerical simulation of turbulent flows in the annular region between rotating cylinders (Taylor-Couette flow) are considered. The calculated results correlating with the current in use experimental results. The most suitable differential turbulence model for calculating conjugate hydrodynamics and heat transfer tasks in Couette flow based on the comparative analysis is offered.

Key words: numerical simulation, turbulence models, Couette-Taylor flow.

УДК 621.378.325

к.т.н. Мурга В. В.,
Мурга Е. В.
(ДонГТУ, г. Алчевск, Україна)

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КОЛЛЕКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассматриваются условия формирования коллективного излучения в активной среде твердотельного лазера. Показано, что способ создания неравновесного состояния активной среды может стимулировать коллективное взаимодействие активных центров, которое влияет на свойства выходного излучения. Приведены результаты экспериментальных исследований, которые подтверждают возможность формирования коллективного излучения в протяженных средах.

Ключевые слова: твердотельный лазер, накачка, коллективное излучение, модуляция добротности.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Лазерное излучение представляет собой процесс стимулированного излучения с линейной зависимостью излучения от числа возбужденных частиц над порогом. Детальное рассмотрение процессов возбуждения активной среды позволяет сделать вывод, что усиление люминесценции происходит при превышении порога. И, если при малом усилении активной среды эти потери хоть и небольшие, но существуют, то при большом усилении люминесценция претерпевает усиление в 10^3 и даже большее число раз [1].

Таким образом, при большом превышении порога доминирующим фактором, который определяет потери, принималась усиленная люминесценция. Тем не менее, усиленная люминесценция при определенных условиях приобретает характер коллективного процесса, который можно использовать для увеличения интенсивности генерируемого излучения лазера.

На основании теории Дирака Дике показал [2], что для системы, состоящей из двух атомов, расстояние между которыми меньше длины волны излучения, вероятность спонтанного излучения в два раза больше чем для одного атома, это означает, что время спонтанного распада умень-

шится в два раза по сравнению с обычным случаем.

Это как раз и есть кооперативный эффект в спонтанном излучении, который получил название сверхизлучения (SR). Он усиливается при увеличении числа атомов в системе. Для подобной системы из N возбужденных атомов происходит сокращение спонтанного распада в N раз, то есть время сверхизлучения (SR имеет порядок величины $(N)-1$). Для наблюдения сверхизлучения необязательно, чтобы все атомы находились в возбужденном состоянии, но число атомов в возбужденном состоянии должно превышать число атомов в основном состоянии. То есть система должна быть инвертированной.

Постановка задачи.

Задачей данной работы является исследование процесса формирования коллективного излучения и анализ факторов, которые определяют возможность установления корреляции диполей излучающих активных центров.

Изложение материала и его результаты.

Оценка условий развития генерации показала, что порог для усиленной люминесценции, строго говоря, не существует. Од-

нако, в инвертированной среде усиленная люминесценция становится преобладающим механизмом релаксации для активной среды. Мощность усиленной люминесценции быстро увеличивается с инверсией населенностей приблизительно как

$$P = P_0 \frac{[\exp(\sigma_0 N_2 l)]}{(\sigma_0 N_2 l)}, \quad (1)$$

где σ_0 — сечение поглощения активного центра; N_2 — разность населенностей лазерных уровней, l — длина активной среды.

Под действием внешнего поля накачки активная среда приобретает поляризацию объема

$$PV = \frac{3}{4\pi} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} E_{\text{внеш}} V. \quad (2)$$

При этом диэлектрическая проницаемость среды зависит от соотношения собственных частот колебаний отдельных диполей и частоты внешнего поля $E_{\text{внеш}}$:

$$\varepsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_c^2}{\omega^2 - \omega_0^2}, \quad (3)$$

$$\omega_c^2 = - \frac{8\pi d^2 \omega_0 \Delta N}{\hbar}, \quad (4)$$

где ω_c — кооперативная частота; ω_0 — частота перехода; ΔN — разность населенностей уровней; d — дипольный момент отдельного атома.

При приближении внешней частоты поля к резонансной частоте ω_0

$$\omega_{\text{рез}} \approx \omega_0 \left(1 + \frac{\omega_c^2}{6\omega_0^2} \right) \quad (5)$$

становятся возможными собственные колебания поляризации в шарике, которые могут существовать даже при отсутствии внешнего электрического поля. В этом случае плотность электромагнитной энергии в образце:

$$W = \frac{E_0^2}{16\pi} \frac{d(\omega\varepsilon)}{d\omega} + \frac{H_0^2}{16\pi} \approx \frac{E_0^2}{8\pi} \frac{9\omega_0^2}{\omega_c^2}. \quad (6)$$

Таким образом основная часть энергии сосредоточена в колебаниях поляризации образца, а не в электрическом поле $|W| \gg E_0^2 / (8\pi)$. Длительность импульса

$$\tau = \frac{1}{2\gamma_0}, \quad \text{где } \gamma_0 \text{ — инкремент, соответствующий инверсии } \Delta N_0 \text{ в начальный момент времени } t = 0.$$

Время задержки $t_3 = \tau \ln(4Q_{\text{max}} / Q_0)$, где Q_0 — начальная, а

$$Q_{\text{max}} = \frac{\hbar\omega_0}{4T_1} (V\Delta N)^2 \text{ — максимальная мощность излучения. Если мощность } Q_0 \text{ равна мощности некогерентного спонтанного излучения } \frac{\hbar\omega_0 V\Delta N_0}{T_1}, \text{ то задержки составят } t_3 = \tau \ln(V\Delta N_0).$$

Поэтому основной интерес представляют, конечно, образцы больших размеров $L \gg \lambda$, что представляет практический интерес. В образцах больших размеров могут распространяться электромагнитные волны, которые в инвертированной двухуровневой среде обладают специфическими свойствами. Если плотность инвертированных атомов относительно невелика, то эти свойства отчетливо не проявляются и в таком образце реализуется режим, характерный для импульсных лазеров и мазеров. Однако при высокой плотности ΔN в условиях, когда реализуется неравенство $\gamma T_2 \gg 1$, наряду с обычными электромагнитными волнами в безграничной среде распространяются так называемые волны поляризации, обладающие энергией, которая сосредоточена в колебаниях поляризации (а не электрического поля, энергия которого относительно мала. Как показано в [3], в инвертированных образцах с отражающими стенками эти волны образуют поляритонные моды, локализованные внутри образца. И наконец, если стенки образца имеют коэффициент отражения

$R < 1$, то поляритонные моды выходят за его границы, но уже в виде электромагнитной волны.

Одним из вопросов, который остается в состоянии изучения, является возбуждение поляризационных колебаний и сохранение их достаточно длительное время. В работе [4] показано, что частота поляризационных колебаний существенно отличается от частоты рабочего лазерного перехода. Это позволяет сделать предположение о длительном поддержании поляризационных колебаний и сохранении коррелированного состояния излучающих диполей за счет спин-решеточного взаимодействия. Данное предположение позволило сформулировать требования к возбуждающему импульсу накачки, который позволил бы обеспечить поляризационные колебания с высокой добротностью.

В эксперименте использовалась импульсно-периодический режим возбуждения, форма которого представлена на рисунке 1.

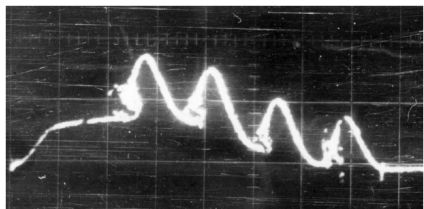


Рисунок 1 — Осциллограмма токового импульса накачки. Цена деления по горизонтали — 20 мкс.

Исследование релаксационных свойств возбужденной системы проводилось путем включения добротности с различной задержкой после достижения максимума инверсии активной среды. Выходная энергия генерации отображает величину превышения инверсии над порогом. На рисунке 2 показана зависимость энергии генерации от задержки включения добротности резонатора. Скорость падения энергии генерации позволяет оценить релаксационные характеристики возбужденной активной среды.

Как видно из рисунка 2 наиболее рациональным режимом с точки зрения эффективности преобразования энергии является включение добротности резонатора в максимуме инверсии [5, 6].

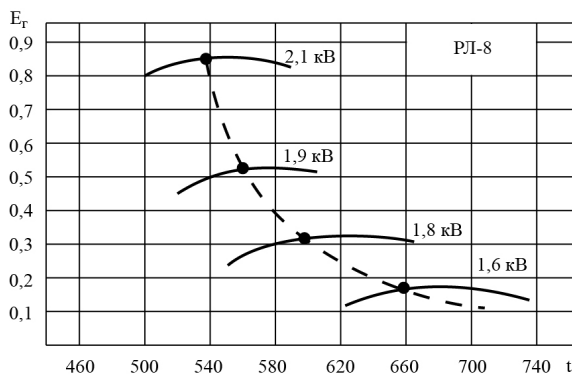


Рисунок 2 — Экспериментальные зависимости величины выходной энергии моноимпульса от времени задержки включения затвора для кристалла рубина РЛ 8.

Для снижения потерь на усиленную люминесценцию необходимо сократить время, в течение которого активная среда пребывала бы в состоянии с максимальным коэффициентом усиления. В данном случае для снижения потерь на усиленную люминесценцию и использовался импульс накачки с протяженным подготовительным воздействием, которое обеспечивает возбуждение до порога и далее интенсивное периодическое воздействие, как показано на рисунке 1.

На фоне представленных данных интересным эффектом сопровождается возбуждение активной среды сложным импульсом накачки, когда на подготовительный протяженный импульс накладывается серия коротких интенсивных пиков. В данном случае наблюдается увеличение интенсивности генерируемого излучения при определенной частоте повторения интенсивных пиков (рис. 3).

Отмечено возрастание выходной интенсивности при совпадении периода следования интенсивных пиков и периода поляризационных колебаний возбужденных

диполей. При этом инверсия активной среды заметно снижается.

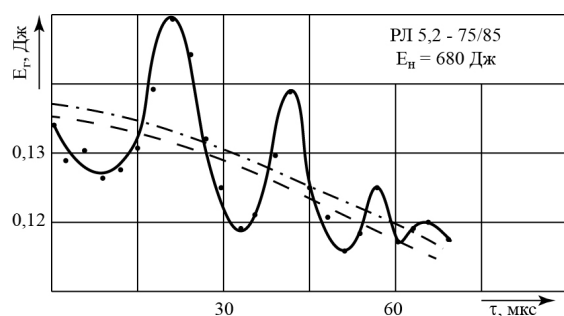


Рисунок 3 — Зависимость выходной энергии моноимпульса от времени задержки включения добротности при различных режимах возбуждения (нижняя гладкая кривая — «гладкий» импульс накачки, периодическое изменение интенсивности моноимпульса соответствует сложной накачке)

Полученный результат подтверждает то, что интенсивное периодическое воздействие на инвертированную систему может приводить к изменению характеристик фазовой релаксации активных цен-

тров в присутствии резонансного поля возбуждения.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Предложенный способ возбуждения активной среды обеспечивает увеличение интенсивности генерируемого излучения при инверсии ниже, чем с традиционной «гладкой» накачкой. Это подтверждает наличие коллективного излучения в системе.

Этот эффект очень важен для электроники больших мощностей, где в ряде прикладных задач основные усилия направлены на получение мощных и коротких импульсов (например, для радиолокации). Эти режимы исследовались экспериментально и теоретически, но, как правило, в условиях, аналогичных мазерным режимам в квантовой электронике. Однако режим сверхизлучения позволяет в принципе получить более короткие и мощные импульсы. Это и объясняет привлекательность идеи поиска коллективного излучения в классической электронике.

Бibliографический список

1. Звелто О. Принципы лазеров: Пер. с англ. — 3-е перераб. и доп. изд. — Москва: Мир, 1990. — 560 с.
2. Dicke R. H. // *Phys. Rev.* 1954. — V. 93. — P. 99.
3. Железняков В. В., Кочаровский В. В., Кочаровский В. В. // *ЖЭТФ*. — 1984. — Т. 87. — С. 1565.
4. Мурга В. В. Формирование макродиполя в активной среде твердотельных лазеров / В. В. Мурга., Е. В. Мурга // *Вісник Східноукраїнського Національного університету ім. В.Даля*. — Луганськ. — 2011. — № 8 (162) Ч. 2. — С.146–149.
5. Yu. A. Anan'ev. Amplification of light by four-level quantum systems // *SOVIET PHYSICS JETP*, 1965. — VOLUME 21, NUMBER 1 JULY. — P.4–8.
6. Денищик Ю. С. Учет взаимного влияния инверсной заселенности и плотности люминесценции при оценке энергетической эффективности накачки трехуровневой среды в нестационарном режиме / Ю. С. Денищик // *Журнал прикладной спектроскопии*. — 1988. — Т. 51. — № 5. — С. 777–781.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонДТУ Мочалиным Е. В.,
д.т.н., проф. ВНУ им. Даля Корсуновым К. А.

Статья поступила в редакцию 23.06.14.

к.т.н. Мурга В. В., Мурга О. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)
УМОВИ ФОРМУВАННЯ КОЛЕКТИВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Розглядаються умови формування колективного випромінювання в активному середовищі твердотілого лазера. Показано, що спосіб створення нерівноважного стану активного середовища може стимулювати колективну взаємодію активних центрів, що впливає на властивості вихідного випромінювання. Наведено результати експериментальних досліджень, які підтверджують можливість формування колективного випромінювання в протяжних середовищах.

Ключові слова: *твердотілий лазер, накачування, колективне випромінювання, модуляція добротності.*

Murga V. V. Candidate of Engineering Sciences, Murga E. V. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

CONDITIONS OF COLLECTIVE RADIATED EMISSION FORMATION

Conditions of collective radiated emission formation in active environment of solid laser are considered. The way of nonequilibrium of active environment can stimulate collective interaction of active centres that influence on the output emission properties shown in the article. The results of the experimental investigation that confirm the possibility of collective radiated emission formation in extended environment are given.

Key words: *solid lasers, complex impulse, collective radiated emission, Q modulation.*

УДК 372.853

Буслаєва Е.В.
(ДонГТУ, г.Алчевск, Україна)

ЛИЧНОСТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД В ПРЕПОДАВАНИИ ФИЗИКИ В ВУЗЕ

В статье рассмотрен личностно-ориентированный подход в преподавании физики в вузе, дана краткая сравнительная характеристика традиционного и личностно-ориентированного подхода в обучении. Рассмотрены пути реализации личностно-ориентированного подхода в условиях современной высшей школы.

Ключевые слова: личность, личностно-ориентированный подход, педагогические технологии, качественные задачи, дифференцированный подход.

Существуют два понятия - обученность и образованность, которые являются, по сути, разными понятиями. Обучить можно всему и каждого, а вот учиться, чтобы стать образованным, каждый должен сам путем организации собственной деятельности на основе личных потребностей, интересов, устремлений. Каким должен быть выпускник вуза, чтобы чувствовать себя комфортно в век быстроразвивающихся высоких технологий? Профессионалом, инициативным, быстро адаптирующимся в меняющихся жизненных ситуациях, самостоятельным, способным к дальнейшему самообучению и саморазвитию. На формирование именно такой личности направлено личностно-ориентированное обучение.

При традиционном обучении содержание образования определяется как совокупность систематизированных знаний, умений и навыков, взглядов и убеждений, а также определенный уровень развития познавательных сил и практической подготовки, достигнутый в результате учебно-воспитательной работы. При таком подходе знания выступают как абсолютная ценность и заслоняют собой самого человека.

При инновационном, личностно-ориентированном подходе абсолютной ценностью являются не отчужденные от личности знания, а сам человек. Личность студента в процессе обучения становится не средством, а главной целью. А педагог

является не сколько «источником знаний» и «контролером», сколько диагностом, помощником в развитии и становлении личности студента. Такой подход обеспечивает свободу выбора содержания образования с целью удовлетворения образовательных, духовных, культурных и жизненных потребностей личности; гуманное отношение к развивающейся личности, становлению ее индивидуальности; создает возможность для самореализации личности в культурно-образовательном пространстве [1,2]

Личность уникальна! Но, к сожалению, то что дается легко одним, слишком трудно достижимо для других. Причиной могут быть, например, такие аспекты: психофизиологический (темперамент и характер личности); физиологический (плохое самочувствие, а это разумеется влияет на IQ деятельность); психологический, к которому относится эмоциональная сфера (эмоциональность — как черта личности, общая и ситуативная тревожность, страх неудачи, страх оценки, отсутствие мотивации) и влияние внешних факторов, когда на первом месте другая деятельность, не учебная (сложная семейная ситуация, конфликты, политическая обстановка...). В нашем вузе обучаются студенты-выпускники сельских и городских школ. К сожалению, уровень подготовки выпуск-

ников школ по физике различный и не всегда достаточно высок. Все это можно учесть при личностно-ориентированном подходе в обучении. Задача преподавателя физики вуза не искать «виноватых», не делить студентов на «умных и неумных», на «хороших и плохих», а используя личностно-ориентированный подход к каждому студенту учесть это и относиться к каждому студенту как к уникальной индивидуальности. При этом, главное не воспроизведение знаний и понятий, а освоение фундаментальных понятий, принципов и законов (например, таких как энергия, закон сохранения энергии в реальных процессах и т.д.). Повышать интеллектуальные умения студента. Студент должен проводить логические мыслительные операции и устанавливать причинно-следственную связь при решении повседневных задач, уметь применять полученные знания на других спецкурсах.

При изучении физики широко используются различные методики и педагогические технологии с учетом содержания учебного курса и индивидуальных особенностей учащихся в рамках концепции личностно-ориентированного обучения.

Одним из инновационных нетрадиционных подходов является использование широкого спектра качественных практических задач по физике, к сожалению, в последнее время им мало уделялось внимания.

Качественный характер предлагаемых студентам задач предполагает, что для их решения не требуется проведения сложных расчетов, но требуется четкое понимание основных физических закономерностей. Прикладной характер предлагаемых задач предполагает использование не безликих идеализированных предметов, таких как брусок, гладкая поверхность, материальная точка, абсолютно твердое тело, невесомая и нерастяжимая нить и т.п., а реально существующих в природе, быту и технике объектов, таких как автомобиль, холодильник, пушка, кинокамера, зажи-

галка, часы, парашютист, каратист, фигурист, гроза, организм и т.д. Решение подобных задач не должно сводиться к «угадыванию» ответа, а должно сопровождаться подробным обоснованием результата на основе физических законов и теорий. Регулярное использование такого типа задач дает возможность не подменять, а дополнять традиционные методики представления материала и проверки знаний, тем более, что в связи с отсутствием сложных расчетов решение подобных задач не требует слишком больших затрат времени [3].

Качественные задачи по физике способствуют углублению и закреплению знаний студентов. Их хорошо использовать для проверки знаний и навыков студентов. Также качественные задачи намного повышают интерес студентов к физике и поддерживают активное восприятие ими материала в течении занятия [4].

Решение именно качественных задач развивает логическое мышление, творческую фантазию, учит анализировать физические явления, позволяет применять теоретические знания для объяснения явлений природы, быта, техники, подготавливает к практической деятельности.

Благодаря ассоциативному мышлению использование в учебном процессе актуальных для студента прикладных задач, приводит к тому, что эти задачи являются для него эмоционально окрашенными и запоминаются намного лучше. При этом по ассоциации запоминаются намного лучше не только сами задачи, но и те физические модели и закономерности, которые необходимы для их решения [3].

Пример самой простой качественной задачи: «Я очень тороплюсь, но перед уходом из дома хочу выпить кружку кофе со сливками. Как поступить, чтобы скорее остудить горячий кофе: сразу долить в него холодные сливки, а затем выждать 5 минут или вначале подождать 5 минут, а после добавить сливки».

Кроме этого, реализация личностно-ориентированного подхода на нашей ка-

федре осуществляется следующим образом. В распоряжении студентов есть полный комплект методического обеспечения (электронные учебники, конспекты лекций, задания на практические занятия, методические указания к курсовым, лабораторным, самостоятельным работам и т.д.). Учебный материал четко структурирован в рамках учебной дисциплины; материал разбит на равномерные порции — содержательные модули, которые студент должен усвоить за определенное время или определенное количество занятий.

Используя интернет-ресурсы, студенты могут осуществлять самостоятельный поиск литературы по данному предмету, использовать электронные книги. При чем самостоятельный поиск информации активизирует познавательную и умственную деятельность студентов. Т.к. студенты имеют электронный вариант конспекта лекций, то это позволяет им подготовиться к прослушиванию лекции, и если возникают вопросы либо самостоятельно найти ответ в имеющихся источниках, либо, задать его преподавателю, если преподаватель не успеет ответить на него в течении занятия. Конечно же, электронный конспект лекций, который студенты получают в начале семестра, не должен дублировать преподавателя на занятии. Иначе студенту станет не интересно посещать лекции. «А зачем? Ведь у меня есть конспект, и я сам могу его прочитать!» Конспект лекций должен содержать основные моменты, а на лекции дополняться какими-то интересными фактами. Либо, опять-таки, чтобы активизировать познавательный процесс, в электронном конспекте лекций, например, дается рисунок, но не дается его объяснение, либо дается формула, а какие-то константы или ее пояснение — нет. Это преподаватель озвучивает на занятии. Таким образом, передача информации от преподавателя к студенту происходит сразу по нескольким каналам — аудиальному и визуальному, что существенно увеличивает объем запоминаемой информации. А так-

же позволяет студенту выбрать наиболее продуктивный способ запоминания информации (чтение/восприятие на слух), что характерно для личностно-ориентированного подхода в обучении.

Для лучшего усвоения и осознания учебного материала, в качестве индивидуального задания, студентам дается задание составить конспект лекций в виде блок-схем или таблиц, составить сравнительную таблицу каких-нибудь процессов или явлений. Также дается задание составить тест с вариантами ответов по данной теме, или кроссворд. Все это позволяет систематизировать записи лекции, выделить основные категории информации, основные закономерности по разделам, помогает в подготовке к практическим занятиям и сдаче коллоквиумов.

Например, студентам предлагается задание составить кроссворд из приведенных слов (раздел электричество и магнетизм): заряд, электрон, сила, напряженность, суперпозиция, Гаусс, диполь, циркуляция, потенциал, поляризованность, электроемкость, ток, Ампер, Вольт, Кулон, Джоуль, Кирхгоф, индукция, Лоренц и т.д. При этом студенты самостоятельно подбирают и составляют вопросы к кроссворду. Это не только способствует лучшему запоминанию основных понятий и законов, но и развитию мыслительной деятельности, что является одной из целей в личностно-ориентированном обучении.

Преподавателями кафедры подготовлены самостоятельные работы для студентов, дидактические материалы, предназначенные для организации дифференцированной самостоятельной работы на занятиях. Они составлены в нескольких вариантах, отличающихся по уровню сложности заданий. Учитывая неоднородность и индивидуальные способности студентов, преподаватель может давать эти задания выборочно.

С учетом познавательных способностей студента устанавливается объем знаний для каждого и подбирается соответствующий

щий учебный материал. При этом и сложность учебного материала также выбирается студентом, но варьируется преподавателем.

Проверка знаний и умений студентов осуществляется различными способами – это и тесты, и решение задач, и сдача коллоквиума (либо устно, либо письменно), при чем, учитывая индивидуальные особенности студента, коллоквиум преподаватель может разрешить сдавать частями.

Значительно расширить возможности личностно-ориентированного обучения позволяет использование информационно-коммуникационных технологий. На нашей кафедре данные технологии применяются в различных формах: работа с программами, моделирующими физические явления; проведение виртуальных лабораторных работ; использование сети Интернет; подготовка и использование мультимедийных презентаций; использование программ для контроля и самоконтроля; дистанционное обучение.

Такая разнообразная подача, конструирование и организация учебного материала, предоставляющего студенту возможность выбирать его содержание, вид и форму при усвоении новых знаний, выполнении заданий и решении задач и явля-

ется внедрением в процесс преподавания личностно-ориентированного подхода.

Таким образом, личностно-ориентированное обучение предусматривает дифференцированный подход к обучению с учетом уровня интеллектуального развития студента, его начальной подготовки по физике, его способностей и задатков. Краткая сравнительная характеристика традиционного метода обучения и инновационного приведена в таблице 1, которая еще раз подчеркивает, что способности к самообразованию, самоопределению, самостоятельности и реализации себя как личности студенту возможно используя личностно-ориентированное обучение. В целом личностно-ориентированный подход в обучении позволяет решить основную задачу образования. За личностно — ориентированным подходом в обучении большое будущее, потому что он преобразует как студента, так и преподавателя, формируя их творческое лицо. Процесс овладения теорией и технологиями личностно — ориентированного обучения для преподавателя — это один из путей открытия самого себя, необходимое условие самореализации и профессионального самосовершенствования.

Таблица 1 — Сравнительная характеристика традиционного и личностно-ориентированного подхода в обучении.

Подход в обучении	Традиционный	Личностно-ориентированный
Цель	Уровень знания, умения, навыки	Развитие личности
Задания	Репродуктивные (сделай по аналогии)	Творческие (каждая личность уникальна, сам пытается увидеть и описать)
Роль преподавателя	Информационно-контролирующая	Организационная, личностно-ориентирующая, участие
Отношение между студентами	Соперничество	Сотрудничество

Библиографический список

1. Новые педагогические и информационные технологии в системе образования : учеб. пособ. [для студ. пед. вузов и системы повыш. квалиф. пед. кадров] : Под. ред. Е. С. Полат. — М.: «Академия», 2011. — 272 с.
2. Хуторской А. В. Методика личностно-ориентированного обучения: пособ. для учителя. — М.: Изд-во ВЛАДОС-ПРЕСС, 2005. — 383 с. — (Педагогическая мастерская).

3. Штейн Б. М. Использование качественных прикладных задач при изучении физики в вузе. Материалы I городской конференции «Инновационные образовательные технологии» (СПбГУ-КиТ, 19-20 марта 2009г.). — СПб.: изд. СПбГУКиТ, 2010. — 179 с.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. ДонГТУ Мочалиным Е. В.,
д.т.н., проф. ВНУ им. В. Даля Корсуновым К. А.*

Статья поступила в редакцию 17.06.14.

Буслаєва О. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, Україна)

ОСОБИСТИСНО-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД У ВИКЛАДАННІ ФІЗИКИ В ВУЗІ

У статті розглянуто особистісно-орієнтований підхід у викладанні фізики в вузі, дана коротка порівняльна характеристика традиційного та особистісно-орієнтованого підходу в навчанні. Розглянуто шляхи реалізації особистісно-орієнтованого підходу в умовах сучасної вищої школи.

Ключові слова: *особистість, особистісно-орієнтований підхід, педагогічні технології, якісні завдання, диференційований підхід.*

Buslaeva E. V. (DonSTU, Alchevsk, Ukraine)

PERSONAL ORIENTED APPROACH IN PHYSICS TEACHING AT HIGH SCHOOL

Personal oriented approach in physics teaching at High School is considered in the article. Short comparative characteristics of traditional and personal oriented approach in teaching is given in the article. Ways of realization of personal oriented approach in modern High School conditions are considered in the article.

Key words: *personality, personal oriented approach, pedagogical technologies, qualitative tasks, differential approach.*

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Текст рукописи статьи от 5 до 10 страниц **в книжной ориентации**, на белой бумаге формата А4 (210x297 мм), с полями: верхнее, нижнее — 27 мм; левое — 23 мм, правое — 25 мм. Страницы не нумеруются. Рукопись статьи оформляется с применением редактора MS Word (не ниже версии 6.0 и не старше версии 11(2003)) шрифтом Times New Roman, размером 12 пт, одинарным интервалом, выравниванием по ширине, абзацным отступом 0,5 см. **Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть активирована.** Весь материал подается в черно-белом оформлении (без градиентов серого или цветовой палитры). Не допускается использование списков (маркированных и нумерованных) и элементов «Надпись».

Оформление статей

Статья подается отдельным файлом «Статья.doc».

УДК проставляется вверху, выравнивание по левому краю, шрифт полужирный, без абзацного отступа.

Через один интервал — ученая степень, фамилия, инициалы разделенные пробелом. С новой строки в круглых скобках — название организации, название города, страны, e-mail автора, через запятую. Шрифт полужирный, курсив, выравнивание по правому краю, без абзацного отступа.

С новой строки — название статьи, выравнивание по центру, шрифт Ariel, полужирный, видоизменение: все прописными, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца — 12 пт, **с запретом автоматического переноса слов в абзаце.** Не допускается набор всего названия заглавными буквами.

С новой строки — краткая аннотация на языке публикации, курсивом, размером 11 пт.

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, интервал между колонками 0.5 см.

Слова рисунок и таблица в упоминаниях по тексту пишется полностью (Пример: «... на рисунке 2 ...»), а в ссылках в конце предложения пишется сокращенно 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 ДСТУ ГОСТ 7.1:2006 «*Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання*», размером 11 пт, курсивом и должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки. Рекомендованное количество ссылок — не более восьми источников с датой их издания не ранее чем 20 лет назад.

Через один интервал — ученая степень, фамилия, инициалы, полное название организации, название статьи, аннотации и ключевые слова приводятся на оставшемся языке из двух (русский, украинский), размером шрифта 11 пт.

Ученая степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. В круглых скобках, курсивом – название организации, название города, страны, e-mail автора, через запятую.

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.

Ученая степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. В круглых скобках, курсивом — название организации, название города, страны, e-mail автора, через запятую.

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 рефератов отдельным файлом

Реферат подаётся на двух языках (русский, украинский) отдельным файлом «*Реферат.doc*», размером шрифта 11 пт, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. **Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть выключена.**

Фамилия, имя, отчество оформляются полужирным шрифтом.

С новой строки — ученая степень, должность.

С новой строки — название подразделения.

С новой строки — название организации, название города, страны, e-mail автора, через запятую.

Через интервал повторить данные для каждого автора.

Через интервал — название статьи (полужирным начертанием).

Через интервал — реферат. Реферат объемом 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.

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.

Рисунки, выполненные в программах Corel, CAD, Word и др., переводятся в один из описанных выше форматов, предпочтительно векторные.

Графический материал следует располагать непосредственно после текста, в котором он упоминается впервые 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 страницы). 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 подпись в формате «Рисунок № — Название» с выравниванием по центру без абзацного отступа, интервалом перед и после абзаца — (Авто), размером 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.

Формулы

Абзац содержащий формулы должен иметь следующие параметры: выравнивание по левому краю, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца 6 пт, позиции табуляции — 3,75 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 формул и размещение формул в табличном формате. В одном блоке формулы, попадающему на границу колонок, допускается только одна строка (многострочные формулы разбиваются на блоки). Упоминание элементов формул по тексту статьи также выполняется в редакторе формул.

Таблицы

Все таблицы располагаются после упоминания в тексте и должны иметь название и порядковый номер. Название располагается над таблицей, размер шрифта 11 пт, без абзацного отступа, интервал перед абзацем — 12 пт, после абзаца — 6 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце.

Таблица выравнивается по центру контейнера, в книжной ориентации, шириной в 1 колонку (большие таблицы располагаются на ширину страницы, вверху или внизу страницы). Текст в таблице оформляется размером шрифта 11 пт или 12 пт, без абзацного отступа. Не допускается заливка ячеек таблицы цветом. После таблицы отступается один интервал.

ЗМІСТ

РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Філатьєв М. В., Антощенко М. І., Крижановський Ю. Ю. Теоретичні і практичні положення прогнозу динаміки газовиділення з вугільних пластів, що підробляються, та вміщуючих порід	4
Мнухін А. Г., Кобилянський Б. Б. Планування роботи вугільної промисловості при дослідженні залежностей між соціальними і технічними чинниками	12
Антощенко М. І., Філатьєв М. В., Гасюк Р. Л. Про ефективність схем провітрювання виїмкових ділянок вугільних шахт при активізації зрушення підроблених порід	17
Степанов Є. І., Авершин А. О. Побудування системи індикації прояву гірничого тиску в лаві	26
Пижов С. В., Антощенко М. І., Філатьєв М. В. Теоретичне обґрунтування параметрів мінімальноможливого ступеня підробки земної поверхні при виїманні вугільних пластів.....	30

МЕТАЛУРГІЯ

Боровік П. В. Аналіз процесу розділення металу в холодному стані на ножицях з паралельними ножами	36
Кузнецов Д. Ю. Відновлення кремнію в системі метал-шлак під час позапічної обробки малокременистої сталі в АКП	43
Смирнова І. В., Божанова О. С. Математична модель електровідновлення металів на амальгамних електродах обмеженого об'єму	48
Бровендер Ю. М., Шубін Ю. П. Гірнича археологія: до питання про понятійний апарат	53

БУДІВНИЦТВО

Должиков П. М., Кіпко О. Е., Кіріяк К. К. Визначення структурних і зсувних властивостей ґрунтів, які закріплені методом напірної цементації	68
Івлієва Є. О. Фізичне моделювання деформування гідроактивізованих ґрунтів	73
Абед. С. Ф. Обґрунтування реконструкції фундаменту за допомогою ґрунтоглиноцементних паль у просадних суглинистих ґрунтах	78

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА. РАДІОТЕХНІКА

Дрючин В. Г., Самчелєєв Ю. П., Бєлоха Г. С., Бакаєв О. В. Джерело живлення з дискретним споживанням електроенергії	88
Алексєєв В. П., Канчукова М. В. Дослідження нестационарного теплообміну в тепловому акумуляторі з вогнетривкою насадкою при періодичному нагріві та охолодженні	94

Середа О. Г.

Захист асинхронних електродвигунів від струмів перевантаження з безпосереднім контролем температури обмотки в момент пуску 100

МАТЕРІАЛИ КОНФЕРЕНЦІЇ

«ВІДКРИТІ УНІВЕРСИТЕТСЬКІ ФІЗИЧНІ ЧИТАННЯ»

Мочалін Є. В., Браженко В. М.

Розрахунок енергетичних параметрів лазерного випромінювання для реалізації методу PIV 112

Мурга В. В., Антропов І. І., Гамазін Д. К.

Обробка сталевих виробів нерівноважною плазмою у водному середовищі 118

Мочалін Є. В., Юр'єв С. О.

Розрахунковий підхід до моделювання турбулентної течії в кільцевому зазорі між обертовими циліндрами 122

Мурга В. В., Мурга О. В.

Умови формування колективного випромінювання 128

Буслаєва О. В.

Особистісно-орієнтований підхід у викладанні фізики в ВУЗІ 133

Вимоги до рукописів наукових статей у збірник наукових праць ДонДТУ 138

СОДЕРЖАНИЕ

РАЗРАБОТКА ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Филатьев М. В., Антощенко Н. И., Крыжановский Ю. Ю. Теоретические и практические положения прогноза динамики газовыделения из подрабатываемых угольных пластов и вмещающих пород	4
Мнухин А. Г., Кобылянский Б. Б. Планирование работы угольной промышленности при исследовании зависимостей между социальными и техническими факторами	12
Антощенко Н. И., Филатьев М. В., Гасюк Р. Л. Об эффективности схем проветривания выемочных участков угольных шахт при активизации сдвижения подработанных пород	17
Степанов Е. И., Авершин А. А. Построение системы индикации проявлений горного давления в лаве	26
Пыжов С. В., Антощенко Н. И., Филатьев М. В. Теоретическое обоснование параметров минимальновозможной степени подработанности земной поверхности при выемке угольных пластов	30

МЕТАЛЛУРГИЯ

Боровик П. В. Анализ процесса разделения металла в холодном состоянии на ножницах с параллельными ножами	36
Кузнецов Д. Ю. Восстановление кремния в системе металл-шлак при внепечной обработке малокремнистой стали в АКП	43
Смирнова И. В., Божанова Е. С. Математическая модель электровосстановления металлов на амальгамных электродах ограниченного объема	48
Бровендер Ю. М., Шубин Ю. П. Горная археология: к вопросу о понятийном аппарате	53

СТРОИТЕЛЬСТВО

Должиков П. Н., Кипко А. Э., Кирияк К. К. Определение структурных и сдвиговых свойств грунтов закрепленных методом напорной цементации	68
Ивлиева Е. О. Физическое моделирование деформирования гидроактивизированных грунтов	73
Абед С. Ф. Обоснование реконструкции фундамента с помощью грунтоглиноцементных свай в просадочных суглинистых грунтах	78

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Дрючин В. Г., Самчелев Ю. П., Белоха Г. С., Бакаев О. В. Источник питания с дискретным потреблением электроэнергии	88
Алексеев В. П., Канчукова М. В. Исследование нестационарного теплообмена в тепловом аккумуляторе с огнеупорной насадкой при периодическом нагреве и охлаждении	94

Середа А. Г.

Защита асинхронных электродвигателей от токов перегрузки с непосредственным контролем температуры обмотки в момент пуска 100

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

«ОТКРЫТЫЕ УНИВЕРСИТЕТСКИЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ЧТЕНИЯ»

Мочалин Е. В., Браженко В. Н.

Расчет энергетических параметров лазерного излучения для реализации метода PIV 112

Мурга В. В., Антропов И. И., Гамазин Д. К.

Обработка стальных изделий неравновесной плазмой в водной среде 118

Мочалин Е. В., Юрьев С. А.

Расчетный подход к моделированию турбулентного течения в кольцевом зазоре между вращающимися цилиндрами 122

Мурга В. В., Мурга Е. В.

Условия формирования коллективного излучения 128

Буслаева Е. В.

Личностно-ориентированный подход в преподавании физики в ВУЗе 133

Требования к рукописям научных статей в сборник научных трудов ДонГТУ 138

CONTENT

DEVELOPMENT OF MINERALS

Filatyeu M. V., Antoshchenko N. I., Kryzhanovsky Yu. Yu. Theoretical and practical indications of dynamic forecast of gas emission from undermine coal beds and adjacent strata	4
Mnuhin A. G., Kobilyansky B. B. Work planning of coal mining in dependence research between social and technical factors	12
Antoshchenko N. I., Filatyeu M. V., Gasyuk R. L. About efficiency of ventilation schemes of coal mines excavation sites in activation shift of underworked rocks	17
Stepanov E. I., Avershin A. A. Indication of rock pressure manifestation in face system integration	26
Pyzhov S. V., Antoshchenko N. I., Philatiev M. V. Theoretical substantiation of parameters of irreducible degree of earth surface underworking at coal-seam excavation	30

METALLURGY

Borovik P. V. Metal division in cold condition on cutters with parallel blades process analysis	36
Kuznetsov D. Y. Silicon reconditioning in metal-slag system under secondary refining of low-silica steel in ladle furnace	43
Smirnova I. V., Bozhanova E. S. Mathematical model of electroreduction of metals on amalgam electrodes of limited volume	48
Brovender Y. M., Shubin Y. P. Mining archaeology: revisiting the framework of concepts	53

CONSTRUCTION

Dolzhikov P. N., Kipko A. E., Kiriya K. K. The definition of structural and shifting properties of soils steady by technique of pressure-proof cementation	68
Ivlieva E. O. Physical modeling of hydroactivated soil deformation	73
Abed S. F. Substantiation of foundation reconstruction with ground clay-cement piles in collapsing loamy soils	78

ELECTRICAL ENGINEERING. RADIOTECHNICS

Dryuchin V.G., Samcheliev Yu.P., Belokha G.S., Bakaev O.V. Power supply with discrete electricity consumption	88
Alekseyev V. P., Kanchukova M. V. The study of unsteady heat exchange in the heat accumulator with refractory nozzle under periodic heating and cooling	94
Sereda O. G. Protection of asynchronous motors from overload currents with direct control of the winding temperature at the time of start	100

PROCEEDINGS OF OPEN UNIVERSITY PHYSICS READINGS CONFERENCE

Mochalin Y. V., Brazhenko V. N.	
Calculation of energy parameters of laser radiation implementinc the PIV method	112
Murga V. V., Antropov S. S., Gamasin D. K.	
Steel products treatment by nonequilibrium plasma in water environment	118
Mochalin Ye. V., Yuryev S. A.	
Computational approach to the modeling of turbulent flow in the annular region between rotating cylinders	122
Murga V. V., Murga E. V	
Conditions of collective radiated emission formation	128
Buslaeva E. V.	
Personal oriented approach in physics teaching at high school	133
Requirements to scientific articles in Collection of Scientific Papers of DonSTU	138

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

**Сборник научных трудов
Донбасского государственного
технического университета**

ISSN 2077-1738

Сборник

Выпуск 2 (43) 2014

**Основатель:
Донбасский государственный
технический университет**

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

*Свидетельство Госкомтелерадио Украины
о регистрации серия KB № 10807 от 27.12.2005*

*Постановлением президиума ВАК Украины
от 14 октября 2009 г. № 1-05/4
сборник прошел перерегистрацию*

*Свидетельство Государственной
регистрационной службы Украины
о государственной регистрации печатного
средства массовой информации
серия KB № 20710-10510ПР от 30.04.2014*

*Рекомендован ученым советом ДонГТУ
(Протокол № 7 от 01.07.2014)*

*Включен в наукометрическую базу данных
РИНЦ*

Формат 60×84¹/₈.
Усл. печ. л. 16,97.
Заказ № 666.
Тираж 100 экз.

Издательство не несёт ответственность
за содержание материалов, поданных автором в печать.

Адрес редакции, издателя и изготовителя:
Донбасский государственный технический университет
пр. Ленина, 16, г. Алчевск, Луганская обл., 94204.
E-mail: info@dmmti.edu.ua,
Web-site: www.dmmi.edu.ua
(Издательство «ЛАДО», ауд. 2113,
т./факс: (06442) 2-58-59)
E-mail: info.lado@mail.ru,
Web-site: www.testlado.com.ua

Свидетельство субъекта издательского дела
ДК № 2010 от 12.11.2004

Главный редактор

Антощенко Н. И. — д.т.н.

Редакционная коллегия:

Н. Н. Заблудский — д.т.н.,
С. Н. Петрушов — д.т.н.,
А. Н. Смирнов — д.т.н.,
А. М. Новохатский — д.т.н.,
Г. Г. Литвинский — д.т.н.,
Тадеуш Майхерчик — проф. (Польша),
А. Г. Протосеня — д.т.н. (Россия),
Р. А. Фрумкин — д.т.н.,
Г. В. Бабиюк — д.т.н.,
В. Н. Окалелов — д.т.н.,
Н. К. Клишин — д.т.н.,
А. Ф. Борzych — д.т.н.,
П. Н. Должиков — д.т.н.,
З. Л. Финкельштейн — д.т.н.,
В. Д. Лушик — д.т.н.,
С. В. Корнеев — д.т.н.,
В. А. Ульшин — д.т.н.,
Хельмут Вайс — проф. (Австрия),
А. И. Голоднов — д.т.н.,
А. Ю. Прокопов — д.т.н. (Россия),
Г. Я. Дрозд — д.т.н.,
В. Н. Ульяницкий — проф., к.т.н.,
Ю. Э. Паэранд — проф., к.т.н.,
С. В. Семирягин — к.т.н., заместитель главного редактора,
С. А. Скомская — секретарь редакционной коллегии.

В сборнике публикуются статьи, которые описывают современные
тенденции в металлургии, строительстве, областях электротехники и ра-
диотехники и во время разработки полезных ископаемых.

Для научных сотрудников, аспирантов, студентов высших учебных за-
ведений.

Язык издания:

украинский, русский и английский

Ответственный за выпуск С. А. Скомская

Компьютерная верстка Н. В. Пупкова

© ДонГТУ, 2014

© Косик И. Н., художественное
оформление обложки, 2013

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

**Collection of Scientific Papers of
DonSTU**

ISSN 2077-1738

Збірник

Issue 2 (43) 2014

**Issuer – Donbas State Technical
University**

*By decision of the Presidium of the Higher
Attestation Commission of Ukraine from
June 9, 1999 № 1-05/7 collection of scientific
papers is included in the list number 1 of academic
editions of Ukraine in technical sciences*

*Certificate of State Committee of Ukraine on
registration HF series
number 10807 of 27.12.2005*

*By decision of the Presidium of the Higher
Attestation Commission of Ukraine October 14,
2009 № 1-05/4*

*Collection passed re-registration
Certificate of State Registration Service of Ukraine
on State registration of the print media
HF series number 20710 - 10510PR on 30.04.2014*

*Recommended by the Academic Council of
DonSTU (Protocol № 7 from 01.07.2014)*

Included to Scientometrics database RYNTS

Format 60×84¹/₈ Cond. print. pg. 16,97.

Order № 666. Invoice 100.

publishing office is not responsible for the content of
materials provided by the author of publication.

Address of editorial, publisher and manufacturer: Donbass
State Technical University, Lenin Av., 16, Alchevsk,
Luhansk region., 94204.

E-mail: info@dmml.edu.ua,

Web-site: [http // www.dmml.edu.ua](http://www.dmml.edu.ua)

(Publishing House "Lado" room. 2113,

tel / fax: (06442) 2-58-59) E-mail: [info.lado @ mail.ru](mailto:info.lado@mail.ru),

Web-site: [http // www.testlado.com.ua](http://www.testlado.com.ua)

Certificate of publishing subject facility DK Publishing
№ 2010 from 12.11.2004

Chief editor

Antoshchenko N. I. — Dr.tech.sci.

Editorial board:

Zablodskii N. N. — Dr.tech.sci.,

Petrushov S. M. — Dr.tech.sci.,

Smirnov A. N. — Dr.tech.sci.,

Novokhatskii A. M. — Dr.tech.sci.,

Litvinskiy G. G. — Dr.tech.sci.,

Tadeusz Majcherczyk — professor. (Poland),

Protosenya A. G. — Dr.tech.sci.. (Russia),

Frumkin R. A. — Dr.tech.sci.,

Babiyuk G. V. — Dr.tech.sci.,

Okalelov V. N. — Dr.tech.sci.,

Klishin N. K. — Dr.tech.sci.,

Borzykh A. P. — Dr.tech.sci.,

Dolzhiykov P. N. — Dr.tech.sci.,

Finkelshteyn Z. L. — Dr.tech.sci.,

Lushchik V. D. — Dr.tech.sci.,

Korneyev S. V. — Dr.tech.sci.,

Ulshin V. A. — Dr.tech.sci.,

Khelmut Vais — professor (Austria),

Golodnov A. I. — Dr.tech.sci.,

Prokopov A. Y. — Dr.tech.sci. (Russia),

Drozd G. Y. — Dr.tech.sci.,

Ulianitskii V. N. — professor, candidate of technical sciences,

Paerand Y. E. — professor, candidate of technical sciences,

Semiryagin S. V. — Vice-editor, candidate of technical sciences,

Skomskaya S. A. — Secretary of the editorial board.

The articles, which deal with modern trends in metallurgy, civil engineering,
branches of electrical engineering and radio technologies and mineral resources
development are published in the Collection.

For scientific researchers, post-graduate students and students of higher edu-
cational establishments

The languages of the articles are:

Ukrainian, Russian and English

Releaser: Skomskaya S. A.

Desktop publishing by Pupkova N. V.

© DonSTU, 2014

© Kosyk I. M., cover design, 2013