

ДОНБАССКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

*Выпуск 18 (61) 2020*



СБОРНИК  
НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**Сборник  
научных трудов  
Донбасского государственного технического  
университета**

Сборник  
Выходит 1–4 раза в год  
Основан в июне 1999 г.  
Выпуск 18 (61) 2020

**Збірник наукових праць  
Донбаського державного технічного університету**

Збірник  
Виходить 1–4 рази на рік  
Заснований у червні 1999 р.  
Випуск 18 (61) 2020

**Collection of Scientific Papers of DonSTU**

Collection  
Publishing 1–4 times a year  
Founded in June 1999  
Issue 18 (61) 2020

Алчевск  
2020

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

**Сборник научных трудов  
Донбасского государственного  
технического университета**

**Сборник**

Выпуск 18 (61) 2020

**Основатель:  
Донбасский государственный технический  
университет**

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

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

*Приказом МОН ЛНР № 911-ОД от 10.10.2018  
сборник научных трудов ДонГТУ внесён в Перечень  
рецензируемых научных изданий, в которых  
должны быть опубликованы основные научные  
результаты диссертаций на соискание учёной  
степени кандидата наук, на соискание учёной  
степени доктора наук, утверждённый приказом  
Министерства образования и науки Луганской  
Народной Республики от 15 мая 2018 г. № 477-ОД*

*Рекомендовано учёным советом  
ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ»  
(Протокол № 8 от 27.03.2020)*

*Включён в наукометрическую базу данных РИНЦ*

Формат 60×84½  
Усл. печат. л. 18,5  
Заказ № 120  
Тираж 100 экз.

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

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

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

ИЗДАТЕЛЬСКО-ПОЛИГРАФИЧЕСКИЙ ЦЕНТР,  
ауд. 2113, т./факс 2-58-59  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя  
и распространителя средства массовой информации  
МИ-СГР ИД 000055 от 05.02.2016

**Главный редактор**

Зинченко А. М. — к.э.н., ректор

**Заместитель главного редактора**

Куберский С. В. — к.т.н., проф.

**Редакционная коллегия:**

Литвинский Г. Г. — д.т.н., проф.

Финкельштейн З. Л. — д.т.н., проф.

Корнеев С. В. — д.т.н., проф.

Леонов А. А. — к.т.н., доц.

Харламов Ю. А. — д.т.н., проф.

Ульяницкий В. Н. — к.т.н., проф.

Зелинский А. Н. — к.т.н., проф.

Должиков В. В. — к.т.н., доц.

Денищенко П. Н. — к.т.н., доц.

Андрійчук Н. Д. — д.т.н., проф.

Пилавов М. В. — д.т.н., проф.

Шолух Н. В. — д. арх., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомская С. А. — секретарь редакционной  
коллегии

Для научных сотрудников, аспирантов,  
студентов высших учебных заведений.

**Язык издания:**

русский, украинский и английский

Компьютерная вёрстка и корректура  
Исмаилова Л. М.

© ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020  
© Чернышова Н. В., художественное  
оформление обложки, 2020

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

---

---

**НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ**

---

---

**GEOSCIENCES**





УДК 622.831.5

д.т.н., проф. Литвинский Г. Г.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)

## ПАСПОРТ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ: СТАТИКА И КИНЕТИКА

Рассмотрена эволюция системы знаний в горной геомеханике от ползучего эмпиризма до современных математических моделей. Предложена последовательность решения геомеханических задач по прогнозу и обеспечению устойчивости горной выработки (ГВ). С общих позиций теории упругости изучена задача статика о напряжённо-деформированном состоянии (НДС) вокруг ГВ. Введён интегральный безразмерный параметр — локальный нормированный критерий разрушения (ЛНKR)  $\omega^*$ . Впервые установлено несколько принципиально различных механизмов разрушения в зависимости от ЛНKR. Дан алгоритм построения паспорта устойчивости ГВ. Впервые поставлена и сформулирована задача кинетики изменения устойчивости пород и параметров движения фронта хрупкого разрушения, что позволяет перейти к решению нового класса задач горной геомеханики.

**Ключевые слова:** горная выработка, устойчивость, горное давление, методы прогноза, напряжённо-деформированное состояние, критерий разрушения, механизмы разрушения, паспорт устойчивости, статика и кинетика разрушения.

### 1 Введение

Большие объёмы проведения подземных горных выработок (ГВ) вызваны необходимостью ускоренного освоения подземного пространства и добычи минеральных ресурсов во всё более сложных горно-геологических условиях. Крепление и поддержание ГВ превратилось в сложную научно-прикладную проблему [1–6 и др.].

Устойчивость породного контура ГВ зависит от многих факторов, главнейшими из которых являются физико-механические свойства и напряжённо-деформированное состояние (НДС) горных пород, в совокупности формирующие процессы проявлений горного давления (ПГД). В результате ПГД подземные ГВ могут интенсивно деформироваться и разрушаться (рис. 1).

Как правило, в рамках изучения ПГД горная геомеханика последовательно решает две основные задачи:

1) изучение закономерностей ПГД и прогнозирование устойчивости подземных ГВ;

2) разработка способов и средств управления ПГД с целью повышения устойчивости и обеспечения эксплуатационного состояния ГВ.



Рисунок 1 Пучение почвы в штреках шахты «Павлоградская» (1978 г.)

Способы прогнозирования ПГД прошли длительный и сложный путь развития от примитивных расчётов на основе использования методов сопротивления материалов [1–3 и др.] до современных подходов на базе методов механики сплошных сред (теорий упругости, пластичности и ползучести). В последнее время широко используются пакеты прикладных программ с применением сложных алгоритмов в виде разнообразных численных методов моделирования на ЭВМ [4–6 и др.].

Тем не менее, несмотря на несомненные теоретические и экспериментальные успе-

хи, достигнутые в горной геомеханике, многие аспекты изучения сложных процессов ПГД вокруг ГВ остаются недостаточно исследованными. Это подтверждается наличием многочисленных трактовок и подходов при прогнозировании деформаций и разрушения окружающих пород. В противовес с таким разнообразием методик и расчётов вне поля зрения исследователей остаётся факт многообразия форм ПГД, т. к. почти повсеместно прослеживается тенденция использования для описания всех видов ПГД лишь одного из возможных механизмов развития механических процессов при игнорировании остальных.

На самом деле в зависимости от горно-геологических условий вокруг выработок может быть несколько возможных вариантов проявлений деформирования и разрушения пород. Формы ПГД существенно, вплоть до противоположных закономерностей, варьируются в зависимости от сочетания напряжений и деформаций растяжения и сжатия на разных участках выработки. На это впервые было указано в работах [7, 8 и др.], в частности в новой классификации ПГД, где в основу положены условия исходного НДС горного массива на условно «малых» и «больших» глубинах разработки.

Поэтому столь ненадёжны существующие методы расчёта ПГД, а в нормативных документах по прогнозу ПГД и выбору параметров крепи преобладают эмпирические рекомендации. Накопленный производственный опыт ремонтов и переукреплений подземных ГВ только подтверждает недостаточную достоверность существующих представлений о ПГД и свидетельствует о сохраняющейся актуальности разработок этой проблемы.

**Целью** исследования является разработка и обоснование паспорта устойчивости ГВ, позволяющего систематизированно, с единых методических позиций оценить возможность разрушения пород контура ГВ и предсказать степень её устойчивости.

**Идея** работы состоит в использовании для построения паспорта устойчивости ГВ

интегрального безразмерного параметра — локального нормированного критерия разрушения — как основы для прогноза ПГД.

**Объектом** исследования являются напряжённо-деформированное состояние (НДС) и прочность пород в каждой характерной точке породного контура ГВ, а **предметом** — условия разрушения или сохранения устойчивости окружающих выработку пород.

Для этого следует рассмотреть такие **задачи исследования**:

- 1) дать краткий анализ существующих методов прогноза устойчивости ГВ;
- 2) оценить концентрацию напряжений на породном контуре ГВ в заданном поле исходных напряжений массива горных пород;
- 3) обосновать базовый параметр потери устойчивости ГВ в виде локального нормированного критерия разрушения (ЛНКР);
- 4) предложить идею и разработать методику построения паспорта устойчивости ГВ для определения устойчивых, предельных и разрушенных участков породного контура.

## 2 Методы прогноза устойчивости ГВ

Существующие методы прогноза ПГД сводятся к расчёту смещений породного контура ГВ и рекомендаций по выбору требуемых геомеханических параметров крепи (податливости, несущей способности, жёсткости и др.) для обеспечения его устойчивости. Однако достоверность такого прогноза невысока, поскольку коэффициент вариации расчётных показателей колеблется в пределах 30...50 % и более, чего явно недостаточно для практических целей.

Хотя этому можно посвятить отдельное исследование, кратко перечислим основные источники и причины такого низкого уровня достоверности методов прогноза ПГД:

– недостаточный существующий теоретический уровень знаний и изученности закономерностей ПГД, что проявляется, например, в стремлении охватить всё многообразие форм ПГД в одной расчётной модели, что невозможно;

– используемые расчётные модели и методы прогноза неизбежно содержат не вполне оправданные исходные гипотезы, идеализации и упрощения расчётных схем (такие как однородность, изотропность, осесимметричность, сплошность, стационарность и пр.), что приводит к значительным и неконтролируемым ошибкам прогноза;

– сами по себе исходные для расчётных схем прогноза данные, которые необходимо использовать, часто определяются весьма неточно, а их надёжность невозможно проследить и проконтролировать (НДС породного массива, локальные неоднородности геологического строения в виде пликтивных и дизъюнктивных дислокаций, масштабный эффект, анизотропия физико-механических свойств трещиноватых и слоистых горных пород и др.).

Поэтому аналитические исследования, направленные на теоретическое прогнозирование ПГД, в настоящее время оказываются почти неприменимы и, как правило, они либо слишком схематичны, либо фрагментарно отражают лишь некоторые особенности ПГД.

Основную роль при прогнозе ПГД до сих пор играют эмпирические и аналоговые подходы, которые опираются главным образом на экспериментальные данные об особенностях ПГД в конкретных горно-геологических условиях данного горного предприятия или региона.

Однако эмпирические методы прогноза ПГД, несмотря на присущую им несколько большую надёжность благодаря привязке к условиям, где выполнялись экспериментальные замеры, обладают существенными недостатками:

– сами по себе экспериментальные данные во многом привязаны к конкретным горно-геологическим условиям: даже незначительное отклонение от них создаёт риск получения искажённых или даже неверных оценок, что может быть причиной серьёзных просчётов и аварий;

– концептуально ошибки заложены в сущности эмпирических методов: даже при

удовлетворительном решении первой задачи горной геомеханики (получении прогноза ПГД) остаются весьма сложными обоснование геомеханических параметров и оценка эффективности новых способов и средств предотвращения негативных последствий ПГД и целесообразности их применения. А это делает недостижимым решение второй задачи геомеханики — разработку способов предотвращения ПГД.

Именно таким сочетанием возможностей и недостатков теоретического и эмпирического методов при изучении ПГД и был обусловлен переход к их симбиозу — аналитико-экспериментальному методу исследований, который в настоящее время стал доминировать в горной геомеханике. При этом стала явно прослеживаться тенденция постепенного и неуклонного замещения в нём эмпирической компоненты всё большей долей теоретической составляющей. В свою очередь, развитие теоретических исследований вызывает всё новые требования к эксперименту и увеличивает число необходимых эмпирических данных и показателей о свойствах и состоянии массива горных пород. В этом и проявляется диалектическое противопоставление и единство этих подходов.

Можно утверждать, что решение геомеханических задач по прогнозу и обеспечению устойчивости ГВ следует выполнять в такой последовательности:

1) определить физико-механические свойства и начальное напряжённо-деформированное состояние (НДС) массива горных пород;

2) оценить концентрацию напряжений вокруг ГВ в заданном поле исходных напряжений;

3) рассчитать и построить паспорт прочности породного контура ГВ, т. е. найти участки контура выработки с устойчивыми, предельным и неустойчивым (за пределом прочности) состоянием;

4) дать прогноз последовательности и интенсивности деформирования и разрушения пород вокруг выработки;

5) разработать геомеханические и технологические параметры способов и средств обеспечения эксплуатационного состояния подземных выработок.

Первые два этапа в основном зависят от экспериментально-изыскательских работ по определению исходных данных и требуются для прогноза ПГД и ведения проектных работ. А третий этап решения задачи во многом зависит от принятых критериев разрушения горных пород, т. е. от выбранной концепции прочности.

Ранее описание прочности сводилось к использованию коэффициента крепости  $f_{\Pi}$  профессора М. М. Протодяконова, и если ныне общепринятым критерием разрушения пород служит теория прочности Кулона — Мора, то ей на смену приходит аналитическая теория прочности [9].

При этом исходные данные о физико-механических свойствах горных пород, которые берут проектировщики из данных геологических изысканий, явно недостаточны для оценки устойчивости ГВ. Они исчерпываются в основном только прочностью на сжатие и растяжение перпендикулярно слоистости. На самом деле даже в образце, без учёта масштабного эффекта, прочность и деформируемость породы могут варьироваться, в зависимости от направления нагружения относительно слоистости, в разы. Следовательно, уже на этом предварительном этапе проектирования ГВ допускаются неприемлемые, а часто просто неверные исходные данные, что во многом обесценивает эффективность проектных работ. Поэтому без получения достоверных и представительных данных о свойствах ГП и исходном напряжённом состоянии породного массива прогноз ПГД невозможен.

### 3 Напряжённое состояние пород вокруг горной выработки

На втором этапе прогноза устойчивости ГВ следует оценить напряжённое состояние массива горных пород. Это, в свою очередь, требует знания исходного напря-

жённо-деформированного состояния нетронутого (до ведения горных работ) массива пород. Исходя из достигнутого уровня знаний о напряжениях в массиве, расчётную схему можно обобщённо представить, как показано на рисунке 2.

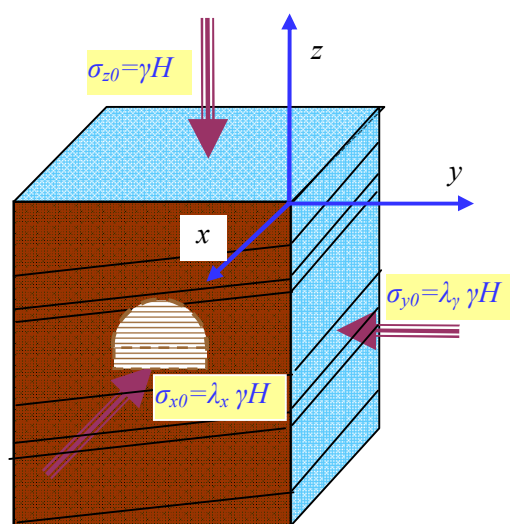


Рисунок 2 Обобщённая расчётная схема напряжённого состояния массива пород

В достаточно общем случае нетронутый массив горных пород находится в исходном поле напряжений, тензор которого  $\|\sigma_0\|$  в координатах  $(x, y, z)$  равен

$$\|\sigma_0\| = \begin{vmatrix} \sigma_{x0} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y0} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{z0} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{x0}, \sigma_{y0}, \sigma_{z0}$  — компоненты исходного поля напряжений горного массива, Па.

Обычно горизонтальные напряжения  $\sigma_{x0}, \sigma_{y0}$  выражают через коэффициенты бокового распора  $\lambda_x, \lambda_y$  и вертикальную компоненту тензора  $\sigma_{z0}$  в виде

$$\|\sigma_0\| = \begin{vmatrix} \sigma_{x0} = \lambda_x \sigma_{z0} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y0} = \lambda_y \sigma_{z0} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{z0} \end{vmatrix}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{z0}$  — вертикальная компонента тензора напряжений (по оси  $z$ ), Па;

$\lambda_x, \lambda_y$  — коэффициенты бокового распора соответственно по осям ( $x, y$ ), в общем случае  $\lambda_x \neq \lambda_y$ .

В случае если начальное напряжённое состояние однородного массива горных пород создано силами гравитационного и тектонического происхождения, эти коэффициенты удобно представлять в виде суммы гравитационной ( $G$ ) и тектонической ( $T$ ) составляющих тензора  $\|\sigma_0\|$  из (2):

$$\lambda_x = \lambda_{xG} + \lambda_{xT}; \quad \lambda_y = \lambda_{yG} + \lambda_{yT}. \quad (3)$$

В горно-геологических условиях старых орогенических систем (типа Донбасса), как правило, вертикальная компонента формируется силами гравитации, поэтому её часто принимают равной

$$\sigma_{z0} = \gamma H, \quad (4)$$

где  $\gamma$  — средний объёмный вес пород, Н/м<sup>3</sup>;

$H$  — проектная глубина, м.

Кроме того, если тектонические напряжения невелики (Донбасс), то ими можно пренебречь, т. е.  $\lambda_{xT} \approx \lambda_{yT} \approx 0$ . Поэтому тензор напряжений  $\|\sigma_0\|$  принимает более простой вид:

$$\|\sigma_0\| = \begin{pmatrix} \lambda_{xG}\gamma H & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{yG}\gamma H & 0 \\ 0 & 0 & \gamma H \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Для однородного упругого изотропного массива горных пород при их горизонтальном залегании коэффициенты бокового распора можно получить из обобщённого закона Гука для упругого тела:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \begin{pmatrix} \sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z) \\ \sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x) \\ \sigma_z - \nu(\sigma_y + \sigma_x) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где  $E$  — продольный модуль упругости (модуль Юнга) пород на контуре ГВ, Па;

$\nu$  — коэффициент Пуассона пород.

Для нетронутого горного массива в силу симметричности и изотропности выполняются в любой его точке следующие условия для тензора деформаций:

$$\|\varepsilon\| = \begin{pmatrix} \varepsilon_x = 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_y = 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \neq 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Из (6) и (7) следует:

$$\sigma_{x0} = \sigma_{y0} = \lambda \gamma H; \quad \lambda = \frac{\nu}{1 - \nu}, \quad (8)$$

где  $\lambda$  — коэффициент бокового распора массива горных пород.

В результате длительных процессов релаксации, происходящих в массиве за время его существования, коэффициент  $\lambda$  постепенно стремится к своему асимптотическому пределу, равному 1. Поэтому коэффициент бокового распора для Донбасса колеблется в диапазоне 0,5...0,8 и весьма редко опускается до своего самого нижнего предела (8).

Перейдём к рассмотрению напряжённого состояния пород вокруг горной выработки и оценке устойчивости её породного контура. Вокруг выработки после её сооружения образуются сложные поля упругих напряжений и деформаций (рис. 3).

В окружающем породном массиве возникают, как видно из рисунка 3, области растягивающих и сжимающих напряжений с максимальной их концентрацией на контуре. Расшифровка таких полей напряжений представляет собой довольно непростую задачу. К тому же при этом надо учесть изменчивость этих полей при возникновении даже начальных признаков трещинообразования и разрушения. С целью упрощения задачи целесообразно оценку устойчивости ГВ начинать с рассмотрения напряжений на породном контуре ГВ, где концентрация напряжений максимальна и откуда начинается его разрушение.

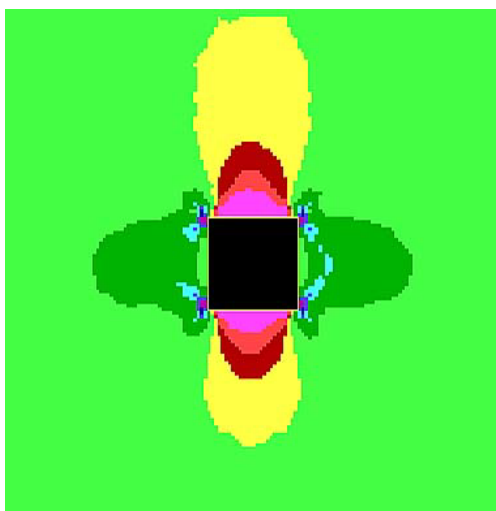


Рисунок 3 Поле напряжений вокруг квадратной ГВ при вертикальном сжатии массива

Выразим общие соотношения для определения деформаций с учётом плоского деформированного состояния породного контура ГВ. Воспользуемся граничными условиями на контуре ГВ, приняв во внимание, что при плоском деформированном состоянии тензор деформаций  $\|\varepsilon\|$  в дополнительном поле напряжений с использованием осей  $n, t, x$  на контуре ГВ согласно рисунку 4 будет иметь вид

$$\|\varepsilon\| = \begin{vmatrix} \varepsilon_n \neq 0 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_t \neq 0 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_x = 0 \end{vmatrix}, \quad (9)$$

где  $\varepsilon_n, \varepsilon_t, \varepsilon_x$  — компоненты тензора деформаций  $\|\varepsilon\|$  на главных площадках в осях  $n, t, x$  породного контура выработки, когда ось  $x$  направлена вдоль оси ГВ (рис. 4).

Нормальное к контуру ГВ напряжение равно нулю  $\sigma_n = 0$  по определению, если пренебречь отпором крепи ввиду его пренебрежимо малого значения по сравнению с упругими напряжениями. Напряжение  $\sigma_x$ , направленное вдоль оси выработки, можно найти, воспользовавшись обобщённым законом Гука в координатах  $n, t, x$ :

$$\begin{vmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_t \\ \varepsilon_x \end{vmatrix} = \frac{1}{E} \begin{vmatrix} \sigma_n - \nu(\sigma_t + \sigma_x) \\ \sigma_t - \nu(\sigma_x + \sigma_n) \\ \sigma_x - \nu(\sigma_n + \sigma_t) \end{vmatrix}, \quad (10)$$

где  $\sigma_n, \sigma_t, \sigma_x$  — соответственно нормальное, окружное (тангенциальное) и продольное напряжения на породном контуре.

Из условия плоского деформированного состояния пород вдоль оси ГВ (9), т. е. равенства нулю деформаций  $\varepsilon_x = 0$ , можно найти из (10) значение напряжений вдоль оси ГВ с учётом  $\sigma_n = 0$ :

$$\sigma_x = \nu(\sigma_n + \sigma_t) + \sigma_{x0} = \nu\sigma_t + \sigma_{x0}, \quad (11)$$

где  $\sigma_{x0}$  — направленная согласно (1) вдоль оси ГВ компонента исходного поля  $\|\sigma_0\|$  напряжений массива горных пород.

При этом в (11) учтена осевая компонента  $\sigma_{x0}$  исходного поля напряжений, полученная из условия равенства нулю деформаций  $\varepsilon_x = 0$ , что даёт  $\sigma_z = \nu \cdot \sigma_t$ . Отсюда получаем тензор напряжений на контуре ГВ в координатах  $n, t, x$  (рис. 4):

$$\|\sigma\| = \begin{vmatrix} \sigma_n = 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_t \neq 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_x = \nu \cdot \sigma_t + \sigma_{x0} \end{vmatrix}. \quad (12)$$

Следовательно, чтобы получить всю информацию о напряженном состоянии контура, необходимо определить лишь одно тангенциальное (окружное) напряжение  $\sigma_t$  на контуре ГВ.

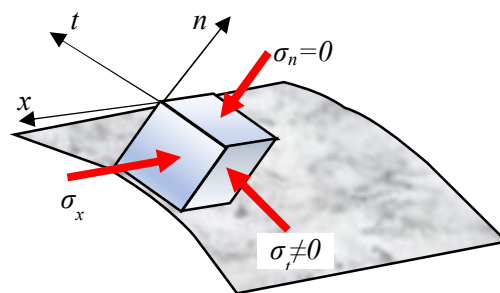


Рисунок 4 Главные напряжения в произвольной точке контура ГВ



#### 4 Локальный нормированный критерий разрушения (ЛНКР)

О возможности разрушения можно судить, сопоставляя действующие на контуре напряжения (12) с соответствующей прочностью в каждой точке контура ГВ. Для построения эпюры прочности на контуре ГВ необходимо знать только показатели пределов прочности на одноосные растяжение  $[\sigma_p]$  и сжатие  $[\sigma_c]$  для пород, выходящих на контур ГВ. Удобно наглядно представить сравнение прочности и напряжений в виде наложения соответствующих эпюр прочности  $[\sigma_s]$  и тангенциальных напряжений  $\sigma_t$  на контуре горной выработки. В качестве примера на рисунке 5 показаны построенные на породном контуре эпюры прочности (1) породы на одноосные растяжение  $[\sigma_p]$  и сжатие  $[\sigma_c]$ , наложенные на эпюру тангенциальных напряжений  $\sigma_t$  (2).

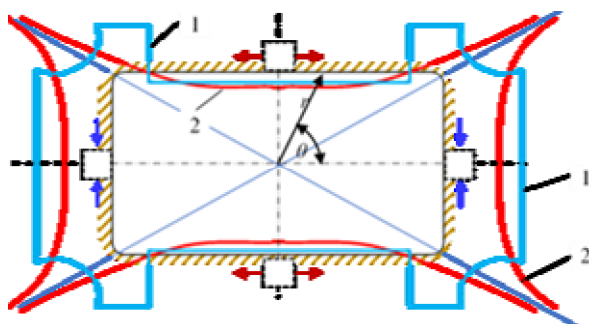


Рисунок 5 Эпюры прочности (1) и напряжений (2) на контуре прямоугольной ГВ

На первый взгляд, построенные эпюры представляют собой запутанное переплетение линий, из которых, по сути, необходимо определить, будет ли возникать разрушение на контуре, каков его тип, т. е. где и какие образуются трещины и как они будут распространяться вглубь массива пород.

Для адекватного описания разрушения пород вокруг выработки нами [5] предложен удобный безразмерный параметр — ло-

кальный нормированный критерий разрушения (ЛНКР)  $\omega^*$  в виде соотношения

$$\omega^* = \frac{f(\sigma_{ij})}{\phi(\sigma_{ij}; s_{ij})}, \quad (13)$$

где  $f(\sigma_{ij})$  — функция действующего тензора напряжений  $\sigma_{ij}$  в данной точке массива, Па;

$\phi(\sigma_{ij}; s_{ij})$  — функция, которая зависит от тензора действующих напряжений  $\sigma_{ij}$  и параметров прочности  $s_{ij}$  породы в данной точке. В частности, для аналитической теории прочности [9] необходимо знать три параметра прочности: когезию отрыва  $\sigma_0$ , когезию сдвига  $\tau_0$  и коэффициент хрупкости  $\alpha$ .

Для породного контура критерий ЛНКР (13) существенно упрощается и принимает вид

$$\omega^* = \frac{\sigma_t}{[\sigma_s]}, \quad (14)$$

где  $[\sigma_s]$  — прочность пород на одноосное сжатие  $[\sigma_c]$  или растяжение  $[\sigma_p]$  в соответствии со знаком действующего в данной точке контура тангенциального напряжения  $\sigma_t$  (сжатие — плюс, растяжение — минус).

Решение задачи усложняется тем, что предел прочности на растяжение значительно меньше предела прочности на сжатие  $[\sigma_p] \ll [\sigma_c]$ , а если порода слоистая (а это, как правило, практически всегда), то ей присуща прочностная анизотропия, т. е. все её физико-механические, в том числе и прочностные, показатели зависят от направления действующих напряжений относительно слоистости.

ЛНКР  $\omega^*$  (14) позволяет удобно описать характерные особенности разрушения породы при действии на неё напряжений различных знаков. Оказывается, возможны несколько механизмов разрушения в зави-



симости от знака напряжений и их соотношения с прочностью пород:

1)  $-1 < \omega^* < 1$  — разрушение отсутствует, контур устойчив;

2)  $1 < \omega^*$  — породный контур разрушается от сжатия по двум возможным механизмам, а именно:

2.1) разрушение путём образования и роста трещин сдвига (они первичны) с последующим развитием трещин отрыва, параллельных главному напряжению  $\sigma_t$ ;

2.2) первичны трещины отрыва вдоль направления главного сжимающего напряжения  $\sigma_t$  с образованием расслоения пород вдоль контура и их разрушением в результате потери устойчивости (продольно-поперечный изгиб) слоёв;

3)  $\omega^* < -1$  — разрушение происходит по двум иным механизмам:

3.1) разрушение бегущими трещинами разрыва перпендикулярно направлению растягивающих напряжений при условии  $\sigma_t < \sigma_p < 0$ ;

3.2) образование трещин разрыва от действия растягивающего напряжения  $\sigma_z = \nu \cdot \sigma_t < \sigma_p < 0$  по нормали к нему, что формирует раскол породы двумя взаимно перпендикулярными системами разрывных трещин.

Таким образом, при разрушении пород вокруг ГВ неизбежно будут реализоваться различные механизмы развития ПГД, а их описание и прогноз устойчивости будут существенно отличаться.

Механизмы разрушения породного контура показывают, от каких именно напряжений, с какой интенсивностью происходит разрушение и какого вида трещины будут при этом преобладать в начальный и последующие моменты времени.

Конечно, предложенная выше классификация механизмов разрушения должна быть продолжена, поскольку для корректного решения задачи следует рассматривать сочетание двух ЛНКР  $\omega_t^*$  и  $\omega_x^*$  для

окружного  $\sigma_t$  и продольного  $\sigma_x$  напряжений, что будет отражено в последующей публикации.

### **5 Паспорт устойчивости породного контура ГВ**

Чтобы определить, на каком участке контура и по какому механизму начнёт развиваться разрушение пород, необходимо построить паспорт устойчивости породного контура ГВ на его развёртке по тангенциальному углу  $\theta$  в координатах  $\theta, \omega^*$ .

**Паспорт устойчивости ГВ** учитывает соотношение напряжений и прочности в каждой точке породного контура и показывает изменение критерия разрушения  $\omega^*$  на развёртке контура ГВ по текущей координате (аффиксу)  $\theta$ . По сути, это графическое представление зависимости

$$\omega^* = f(\theta), \quad (0 \leq \theta \leq 2\pi). \quad (15)$$

На рисунке 6 представлен паспорт устойчивости ГВ на развёртке контура в координатах  $\theta, \omega^*$ .

Поскольку исходное поле напряжений вокруг прямоугольной формы ГВ обладает, как видно из рисунков 3 и 5, двумя осями симметрии, а породный массив однороден, то паспорт устойчивости построен только для первого квадранта развёртки  $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ , а остальные три квадранта будут такими же. Из графика видно, что вся область, в соответствии с критерием разрушения  $\omega^*$ , разделена на три зоны:

- 1) устойчивости ( $-1 < \omega^* < 1$ );
- 2) разрушения от сжатия ( $1 < \omega^*$ );
- 3) разрушения от растяжения ( $\omega^* < -1$ ).

Участки разрушения породного контура от сжатия сосредоточены возле углов ГВ  $30 \leq \theta \leq 40^\circ$ . Разрушение от растяжения следует ожидать на горизонтальных участках породного контура (кровля и почвы ГВ) в пределах  $50 \leq \theta \leq 130^\circ$  и  $230 \leq \theta \leq 310^\circ$ . Остальные участки контура, главным образом бока ГВ, сохраняют устойчивость.

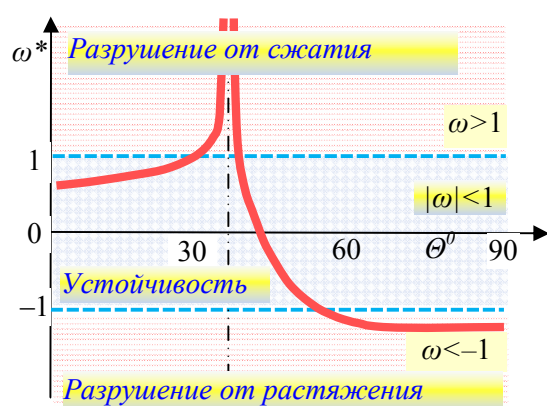


Рисунок 6 Паспорт устойчивости ГВ с прямоугольным контуром

Отметим, что в более общем случае, когда не выдержаны принятые ограничительные идеализации (изотропность, однородность и пр.), паспорт устойчивости усложняется. В частности, нарушается симметричность поля напряжений вокруг ГВ, причём анизотропия прочности пород эту несимметричность усугубляет. Поэтому паспорт прочности для большинства горных выработок необходимо строить на развёртке всего контура ГВ, т. е. с учётом всех четырёх квадрантов  $0 \leq \theta \leq 360^\circ$ .

### 6 Кинетика изменения устойчивости пород и фронта хрупкого разрушения

Поскольку разрушение породного контура происходит на разных участках выработки при различных значениях критерия разрушения и видах напряжённого состояния пород на контуре, последовательность и механизмы развития трещин вглубь массива пород будут значительно отличаться. Во-первых, это происходит из-за разных механизмов разрушения пород от растяжения и сжатия. Во-вторых, исходя из физического смысла ЛНКР  $\omega^*$ , следует ожидать существенную разницу в моментах начала и скоростях зарождения, развития и распространения трещин растяжения и сжатия. На тех участках породного контура, где ЛНКР  $\omega^*$  выше, время начала разрушения будет меньше, а скорости потери сплошности породы — выше, и эта

зависимость будет в общем случае нелинейной во времени и пространстве, т. е. с ускорением или замедлением.

В частности, исходя из физико-механической трактовки разрушения, можно достаточно обоснованно предположить, что время начала  $t^*$  и скорость  $V^*$  движения фронта хрупкого разрушения (ФХР) породы в данной локальной точке контура будут зависеть от критерия ЛНКР  $\omega^*$  и его производных по

времени  $\dot{\omega}^* = d\omega^*/dt$ ,  $\ddot{\omega}^* = d^2\omega^*/dt^2$  и т. д. Искомые параметры движения ФХР подчиняются интегро-дифференциальным, скорее всего неявного вида, функциональным зависимостям:

$$t^* = F_t \left[ (|\omega^*|, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*, R_t) \right],$$

$$(|\omega^*| < 1 \Rightarrow t^* \rightarrow \infty),$$

$$V^* = F_V \left[ (|\omega^*|, \dot{\omega}^*, \ddot{\omega}^*, R_V) \right],$$

$$(|\omega^*| < 1 \Rightarrow V^* = 0),$$
(16)

где  $R_t, R_V$  — набор размерных реономных параметров и показателей, определяемых экспериментально и характеризующих реологические свойства и поведение материала в изменчивых неравновесных полях НДС.

В выражении (16) заложено условие, что разрушение начинается при  $|\omega^*| \leq 1 \Rightarrow t^* \rightarrow \infty$  и  $V^* = 0$  и только когда критерий ЛНКР станет больше 1. При этом оказывается, что в каждой точке контура выработки время начала  $t^*$  и скорость  $V^*$  движения фронта хрупкого разрушения будет разной, что ведёт к образованию далеко не очевидных форм областей разрушения вокруг ГВ. К сожалению, данная сторона развития процессов ПГД во времени и пространстве выпала из поля зрения большинства исследователей и поэтому нуждается в глубоком изучении.

Опираясь на решение уравнений (16), можно дополнить паспорт устойчивости, который представляет устойчивость ГВ в статике, более глубокими и информативно важными для практических целей сведениями о кинетике развития разрушения окружающего массива пород. Для этого следует, придерживаясь предложенной методики, построить графики начала разрушения и скорости движения ФХР в координатах  $(t^*, \theta)$ ,  $(t^*, \omega^*)$ ,  $(V^*, \theta)$ ,  $(V^*, \omega^*)$ .

Задача о движении ФХР в окрестности ГВ принадлежит к новому классу нелинейных задач кинетики ПГД с неголономными краевыми условиями. Такие задачи горной геомеханики в кинетической постановке и даже в физике твёрдого тела до сих пор не рассматривались. Существующие компьютерные программы непригодны для решения таких задач. Это обусловлено тем, что даже при начальном зарождении трещин, предшествующих развитию разрушения, физико-механические показатели пород (прочностные, упругие, реологические и др.) претерпевают изменение, что, в свою очередь, вызывает ответное изменение НДС пород, окружающих выработку.

Согласно принципу Ле Шателье — Брауна, если на систему, находящуюся в устойчивом равновесии, воздействовать извне, изменяя какое-либо из условий равновесия, то в ней усиливаются процессы, направленные в сторону противодействия изменению и стремления к равновесию. Именно так и реагирует породный массив как механическая система вокруг ГВ, когда возникает концентрация напряжений, приводящая к развитию и накоплению дефектов и трещин при разрушении.

Рассмотрим эти процессы с позиций реологической микромеханики деформирования и разрушения пород [9]. В начальный период образования полости в породах (например, при взрывной проходке ГВ) возникают упругие поля концентрации напряжений и деформаций. Немедленно в породах идёт стохастический процесс зарождения и роста микродефектов, что со-

провождается излучением волн различной природы (электромагнитных, ультразвуковых, акустических и др.) и интенсивности. Возникают макроэффекты в виде деформации ползучести, снижения модулей упругости и повышения коэффициента Пуассона, которые можно измерить экспериментально. Процессы появления и роста микродефектов в породе можно с полным правом рассматривать как начальные стадии её разрушения в виде снижения показателей её прочности.

Снижение модулей деформации вокруг выработки за счёт микротрещиноватости происходит тем быстрее, чем большая концентрация напряжений возникает по радиусу и окружающему направлению. В свою очередь, снижение деформационных модулей влечёт за собой уменьшение концентрации напряжений вокруг ГВ, что приводит к двум важным последствиям:

- вдоль породного контура происходит выравнивание (сглаживание) неравномерности напряжений: их максимальные пики уменьшаются, а на участках, где напряжения были незначительны, происходит их постепенное увеличение;

- аналогичные процессы происходят по радиальному направлению: по мере удаления вглубь массива концентрация напряжений и прочностные свойства уменьшаются с затухающей скоростью.

В отличие от хрупкого разрушения в неизменном автомодельном поле напряжений, здесь мы будем наблюдать быстро затухающие и взаимно замедляющие друг друга процессы снижения механических свойств (деформационных и прочностных) и концентрации напряжений. Общая картина будет отражать стремление системы выровнять неравномерности распределения напряжений и скоростей движения ФХР. Даже вокруг квадратной выработки со значительной концентрацией напряжений в углах (рис. 3) очертание зоны предельного деформирования пород по мере её удаления от контура будет стремиться к округлой форме.

Следовательно, получают объяснение те особенности ПГД в ГВ, которые связаны с меньшим, чем предсказывает линейная теория, влиянием неравномерностей свойств, состояний и структуры горных пород. Становится объяснимой большая длительность деформационных процессов вокруг выработки и неравновесное во времени состояние зоны запредельных деформаций с радиально неравномерной прочностью разрушенных пород.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что попытки прогнозирования процессов ПГД вокруг выработки, основанные на использовании единообразного подхода и универсального математического алгоритма для описания столь сложных и разнонаправленных процессов, заранее обречены на неудачу и должны быть отвергнуты.

Паспорт устойчивости ГВ позволяет судить об ожидаемом поведении породного контура, выделить на нём устойчивые, предельные и неустойчивые участки и даже оценить по уровню ЛНКР сравнительную скорость движения фронта хрупкого разрушения вглубь массива пород.

Однако для получения практических выводов об устойчивости ГВ на стадиях её проектирования, сооружения и эксплуатации необходимо получить достаточно достоверную совокупность начальных данных об исходном поле напряжений и прочностных свойств пород. К сожалению, исследовательские и изыскательские работы по получению исходных данных в настоящее время проводятся в крайне ограниченных объёмах, а подземные работы оказались без научного сопровождения, как в средние века.

Во многом, как и ранее, ориентирами при ведении горных работ остаются интуиция и производственный опыт, отражённые в многочисленных нормативных документах, основанных на эмпирическом подходе, достоверность которых оставляет желать лучшего. Ползучий эмпиризм, ещё довлеющий до сих пор в горной геомеханике, оказывается непригодным при изменении горнотехнических и горно-

геологических условий, что становится источником неверных инженерных решений, аварий и несчастных случаев.

Значит, назревшей проблемой для горной промышленности является нормативный запрет ведения горных работ без их научного обоснования, сопровождения и контроля компетентными исследовательскими и экспертными организациями.

### **Выводы**

Проведённые исследования позволили получить следующие результаты:

1. Уровень обоснованности и надёжности существующих методов прогнозирования ПГД недостаточен и нуждается в развитии в направлении учёта многообразия форм ПГД в условиях существенной физической и геометрической нелинейности расчётных схем.

2. Предложена обобщённая расчётная схема плоского напряжённого и плоского деформированного состояния массива горных пород на породном контуре горной выработки.

3. Получен тензор напряжений на контуре горной выработки и показано, что главной неизвестной является окружная компонента тензора напряжений.

4. Доказана необходимость использования локального нормированного критерия разрушения (ЛНКР), с его помощью впервые установлены все возможные принципиально различные механизмы разрушения пород на контуре ГВ.

5. Обоснована целесообразность и практическая важность построения паспорта устойчивости горных выработок для определения наиболее опасных участков породного контура по разрушению.

6. Впервые поставлена и сформулирована задача кинетики изменения устойчивости пород и параметров движения фронта хрупкого разрушения вокруг горной выработки.

7. Сформулирован новый класс задач горной геомеханики о движении ФХР с учётом физической нелинейности, обусловлен-

ной влиянием снижения деформационно-прочностных свойств горных пород на их напряжённо-деформированное состояние.

Задачи дальнейших исследований состоят в повышении достоверности и информативности исходных данных о свой-

ствах горных пород и их НДС, решении нового класса задач статике и кинетике фронта хрупкого разрушения и образования зоны запредельных деформаций при сооружении горных выработок различного назначения.

### Библиографический список

1. Протодяконов, М. М. Давление горных пород и рудничное крепление [Текст] / М. М. Протодяконов. — [2 изд.]. — М.-Л. : Госнаучтехиздат, 1931. — Ч. 1. — 104 с.
2. Цимбаревич, П. М. Механика горных пород [Текст] / П. М. Цимбаревич. — М. : Углетехиздат, 1948. — 184 с.
3. Слесарев, В. Д. Механика горных пород и рудничное крепление [Текст] / В. Д. Слесарев. — М. : Углетехиздат, 1948. — 303 с.
4. Вопросы теории горного давления [Текст] : сб. науч. переводов / под ред. А. А. Борисова. — М. : Госгортехиздат, 1961. — 229 с.
5. Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике [Текст] / А. Б. Фадеев. — М. : Недра, 1987. — 221 с.
6. Численные методы расчётов в практической геотехнике [Текст] : Сб. статей межд. научно-технич. конф. / СПбГАСУ. — СПб, 2012. — 398 с.
7. Литвинский, Г. Г. Закономерности влияния неосесимметричных факторов на формирование зоны неупругих деформаций в горных выработках [Текст] / Г. Г. Литвинский // Горное давление в капитальных и подготовительных выработках : сб. науч. тр. — Новосибирск : ИГД СО АН СССР, 1979. — С. 22–27.
8. Литвинский, Г. Г. Горное давление на малых и больших глубинах разработки [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — № 37. — С. 5–19.
9. Литвинский, Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов [Текст] : монография / Г. Г. Литвинский. — Донецк : Норд-Пресс, 2008. — 207 с.

© Литвинский Г. Г.

**Рекомендована к печати зам. директора по научной работе  
РАНИМИ МОН ДНР, д.т.н., проф. Дрибаном В. А.,  
д.т.н., проф., зав. каф. РМПИ ДонНТУ Петренко Ю. А.**

Статья поступила в редакцию 25.02.20.

**д.т.н., проф. Литвинский Г. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)**

### ПАСПОРТ СТІЙКОСТІ ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ: СТАТИКА І КІНЕТИКА

Розглянуто еволюцію системи знань у гірській геомеханіці від повзучого емпіризму до сучасних математичних моделей. Запропоновано послідовність вирішення геомеханічних завдань щодо прогнозу та забезпечення стійкості гірничої виробки (ГВ). Із загальних позицій теорії пружності вивчено задачу статике про напружено-деформований стан (НДС) навколо ГВ. Введено інтегральний безрозмірний параметр — локальний нормований критерій руйнування  $\omega^*$  (ЛНКР). Вперше встановлено кілька принципово різних механізмів руйнування порід в залежності від ЛНКР. Дано алгоритм побудови паспорта стійкості ГВ. Вперше поставлено і сформульовано проблему кинетике зміни стійкості порід і параметрів руху фронту крихкого руйнування, що дозволяє перейти до вирішення нового класу завдань гірської геомеханіки.

**Ключові слова:** гірнича виробка, стійкість, гірничий тиск, методи прогнозу, напружено-деформований стан, критерій руйнування, механізми руйнування, паспорт стійкості, статика і кинетика руйнування.

**Doctor of Technical Sciences, Prof. Litvinsky G. G. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**

**PASSPORT OF THE STABILITY OF MINE WORKING: STATICS AND KINETICS**

*The evolution of knowledge system in rock geomechanics from creeping empiricism to the modern mathematical models is studied. The sequence of solving the geomechanical problems offers on prediction and providing the stability of mine working (MW). From general positions of the elasticity theory, the task of statics about the stress-strain state (SSS) around MW is studied. An integral dimensionless parameter — local rationed criterion of destruction  $\omega^*$  (LRCD) is introduced. For the first time some fundamentally different mechanisms of destruction of rock contour MW depending on LRCD were set. The algorithm to construct the passport of MW stability is given. There have been newly set and defined the problem of kinetics of changing the stability of rocks and parameters of motion of the front of fragile destruction, which allows passing to the decision of a new class of tasks of mining geomechanics.*

**Key words:** mine working, stability, rock pressure, prediction methods, stress-strain state, fracture criterion, fracture mechanisms, stability passport, static and fracture kinetics.

УДК 622.767

д.т.н. Зубков В. Е., к.т.н. Кизияров О. Л.,  
к.т.н. Левченко Э. П., к.т.н. Псюк В. В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛОВ В БЛОКИРОВАННОМ ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

*Работа посвящена определению физических основ сепарации по плотности минеральных смесей в новой сепарирующей системе — блокированном псевдоожигенном слое. Представлено разделение по плотности компонентов в интервале размеров от 30 до 70 мм.*

**Ключевые слова:** обогащение, сырьё, блокированный псевдоожигенный слой, крупность компонентов.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Снижение качества сырья требует поиска новых способов его обогащения. В качестве традиционных технологий обогащения применяются отсадка и тяжелосредная сепарация. В последнее время появились технологии обогащения в воздушном потоке. Так, на установке СЕПАИР-1-0,5, в которой для обогащения используется воздушный поток, были получены высокие показатели эффективности сепарации угля, в частности крупной фракции +25–50 мм [1, 2]. Разрабатываются также способы радиометрической сепарации сырья [3].

В любом случае для разделения каменного угля и породы, а также обогащения других минеральных смесей используются различия в плотности разделяемых компонентов. Так, средняя плотность каменного угля составляет примерно  $1,3 \text{ г/см}^3$ , а средняя плотность сопутствующей породы —  $2,6 \text{ г/см}^3$ .

Одним из эффективных и не требующих высоких затрат энергии и воды способов является сепарация угля в псевдоожигенном слое мелкозернистого материала промежуточной плотности между плотностями разделяемых компонентов угля и породы [4, 5]. Однако его применение сдерживается из-за нарушения состава и расхода твёрдой фазы слоя.

**Объектом исследования** является новая сепарирующая система — блокированный псевдоожигенный слой (БПС).

**Предмет исследования** — свойства БПС как среды для разделения компонентов, различающихся по плотности.

**Задачи исследования** — аналитическое и экспериментальное определение возможности сепарации в БПС компонентов по плотности.

**Методика исследований.** Аналитическим путём установить физические основы разделения в БПС компонентов по плотности. Путём взвешивания в БПС моделей разделяемых компонентов определить его «эффективную плотность», промежуточную между плотностями разделяемых компонентов.

**Изложение материала и его результаты.** Блокированный псевдоожигенный слой включает гибкие нити переменного сечения (гирлянды), которые крепятся одним концом к воздухораспределительной решётке.

Воздушный поток, подаваемый вентилятором, проходя через воздухораспределительную решётку, поднимает гирлянды. За счёт торможения части потока в занятом гирляндами объёме возникает перепад статического давления, что и обуславливает действие на погружаемые в БПС тела силы, аналогичной выталкивающей силе Архимеда.

Варьированием геометрических и аэродинамических параметров этого слоя можно создать условия, при которых разделяемая смесь расслаивается на отдельные компоненты, а затем, в зависимости от

схемы рабочего органа, осуществляется раздельный вывод этих компонентов.

Блокированный псевдооживленный слой, обладая высокой разделяющей способностью тел преимущественно по их плотности, сохраняет свои свойства при изменении угла наклона к горизонту и не утрачивает заданных механико-технологических характеристик в ходе процесса сепарации. Эти качества позволяют осуществить в нём устойчивый процесс разделения без применения сложных устройств по регенерации утяжелителя. Они же позволяют выводить из слоя разделившиеся компоненты без погружения в него элементов выгрузных устройств, что также способствует повышению качества сепарации.

Условие равновесия тела в БПС имеет вид

$$F_B = G = F_S + F_\partial \pm F_M, \quad (1)$$

где  $F_S$  и  $F_\partial$  — соответственно статическая и динамическая компоненты выталкивающей силы, действующей на тело в слое;  $F_M = F_\Gamma + F_3$  — сила механического сопротивления гирлянд;  $F_\Gamma$  — сила давления гирлянд;  $F_3$  — сила трения гирлянд о поверхность тела.

В БПС из всех составляющих выталкивающей силы только статическая компонента  $F_S$  не зависит от диаметра тела и определяется так:

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{F_S \cdot 6}{\pi \cdot d^3 \cdot g}. \quad (2)$$

Динамическая компонента выталкивающей силы представится как сила сопротивления сферы воздушному потоку в заблокированном псевдооживленном слое в стеснённых условиях и будет равна

$$F_\partial = \psi_c \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{\rho \cdot V}{2}. \quad (3)$$

После подстановки значений и деления выражения на объём сферы и проведения необходимых преобразований получаем

формулу эффективной плотности заблокированного псевдооживленного слоя:

$$\rho_{\text{Э}} = \rho_{\text{ж}} + \frac{0,9 \cdot \psi_c \cdot V^2}{d} + \frac{1,9 \cdot \rho_M}{d^3}, \quad (4)$$

где  $\rho_M$  — механическая компонента эффективной плотности слоя.

Для использования в качестве разделяющей среды БПС пригоден в том случае, если его эффективная плотность имеет промежуточное значение между величинами плотности разделяемых материалов во всём диапазоне размеров тел независимо от глубины.

Для первой фазы погружения сферы в слой с постоянной статической плотностью, то есть на величину диаметра, формула принимает вид

$$\rho_{\text{Э}} = \rho_{\text{см}} + \frac{0,9 \cdot \psi_c \cdot V^2}{d}. \quad (5)$$

Система сил, действующих на тело со стороны сепарирующего слоя, приводится к главному вектору, являющемуся суммой проекций сил на вертикальную ось. Главный вектор является эффективной выталкивающей силой  $F_B$ . Уравнение в общем виде для псевдооживленного зернистого слоя выглядит так:

$$F_B = F_a - G_{\text{ш}} \pm F_3. \quad (6)$$

Для заблокированного псевдооживленного слоя

$$F_B = F_a \pm P_c \pm F_3, \quad (7)$$

где  $F_a = F_S + F_\partial$  — аэродинамическая компонента выталкивающей силы;  $G_{\text{ш}}$  — сила веса «шапки»;  $P_c$  — сила, обусловленная давлением гирлянд;  $F_3$  — сила, обусловленная внутренним трением слоя;  $F_S$  и  $F_\partial$  — соответственно статическая и динамическая компоненты выталкивающей силы.

Знак (+) ставится перед  $F_3$  при погружении тела, знак (–) — при его всплывании.



Формулы (6) и (7) свидетельствуют о качественной тождественности природы эффективной выталкивающей силы в обеих аэродинамических системах. В связи с этим БПС можно считать псевдооживленной системой с ограниченной подвижностью твёрдой фазы.

Эффективная плотность определялась экспериментальным путём с помощью весового зондирования БПС сферами различных диаметров.

На рисунке 1 приведены результаты такого зондирования.

Здесь  $d$  — диаметр погружаемой в БПС сферы,  $R$  — радиус изгиба воздухораспределительной решётки,  $t$  — шаг дисков по длине гирлянд,  $V$  — скорость воздушного потока, приведённая к воздухораспределительной решётке,  $\varphi_0$  — просвет в БПС, приведённый к воздухораспределительной решётке.

Таким образом, тела диаметром от 30 до 70 мм будут разделяться в БПС по плотности, т. е. тела этого размерного интервала плотностью  $1,3 \text{ г/см}^3$  будут всплывать к

поверхности БПС, а тела плотностью  $2,6 \text{ г/см}^3$  — погружаться на воздухораспределительную решётку. Таким образом, будет происходить распределение компонентов по высоте БПС, что служит предпосылкой для раздельного вывода их из БПС.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Новая сепарирующая система — БПС — обладает свойствами, позволяющими осуществлять с её помощью разделение по плотности компонентов в интервале размеров 30–70 мм.

В дальнейшем необходимо определить возможности настройки системы на разделение по плотности компонентов других размерных и плотностных интервалов.

В перспективе предстоит обосновать основные схемы непрерывных технологических процессов разделения компонентов, а также схемы подачи воздуха и его равномерного распределения по рабочей поверхности БПС.

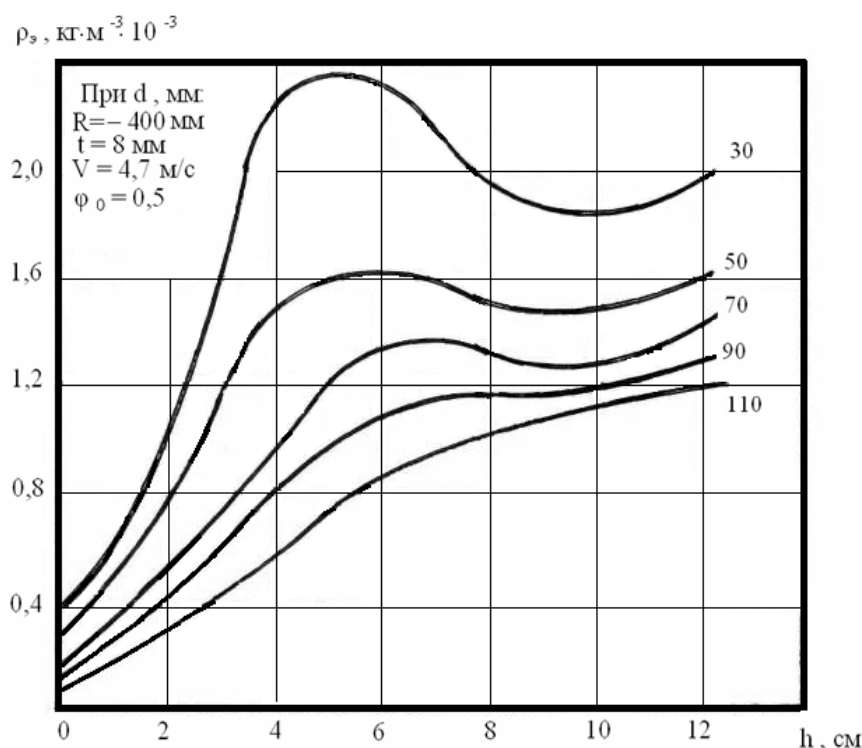


Рисунок 1 Экспериментальные кривые эффективной плотности по высоте БПС

## Библиографический список

1. Пат. 2456099 Российская Федерация, МПК В 03 В 4/04. Установка пневмовакуумной сепарации материалов / Бойко Д. Ю., Калина А. В., Кузьмин А. В., Поломарчук В. С., Табаков Г. Н.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Промышленное обогащение». — № 2010125066/03; заявл. 21.06.10; опубл. 20.07.12, Бюл. № 20. — 8 с. : ил.
2. Кузьмин, А. В. Исследование процесса обогащения углей разреза Бунгур методом пневматической сепарации [Текст] / А. В. Кузьмин, А. В. Калина, В. В. Морозов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2008. — № 10. — С. 236–242.
3. Кобзев, А. С. Направления развития и проблемы радиометрических методов обогащения сырья [Текст] / А. С. Кобзев // Обогащение руд. — 2013. — № 1. — С. 13–16.
4. Пат. 2359006 Российская Федерация, МПК С 10 В 49/10. Способ переработки угля / Исламов С. Р., Степанов С. Г.; заявитель и патентообладатель С. Р. Исламов, С. Г. Степанов. — № 2008117266/15; заявл. 05.05.08; опубл. 20.06.09, Бюл. № 17. — 6 с. : ил.
5. Буряков, В. И. Закономерности обогащения крупных классов углей в аэросуспензиях [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.15.08 / В. И. Буряков. — М. : Ин-т горючих ископаемых, 1969. — 18 с.

© Зубков В. Е.

© Кизияров О. Л.

© Левченко Э. П.

© Псюк В. В.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.,  
д.т.н., зав. каф. АТ ЛНУ им. В. Даля Замотой Т. Н.*

*Статья поступила в редакцию 28.02.20.*

**д.т.н. Зубков В. Е., к.т.н. Кизияров О. Л., к.т.н. Левченко Е. П., к.т.н. Псюк В. В.**  
(ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

# **ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЗБАГАЧЕННЯ МІНЕРАЛІВ У БЛОКОВАНОМУ ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ**

*Роботу присвячено визначенню фізичних основ сепарації за щільністю мінеральних сумішей у новій сепаруючій системі — блокованому псевдозрідженому шарі. Представлено розділення за щільністю компонентів в інтервалі розмірів від 30 до 70 мм.*

**Ключові слова:** збагачення, сировина, блокуючий псевдозріджений шар, крупність компонентів.

**Doctor of Technical Sciences Zubkov V. E., PhD in Engineering Kiziyarov O. L.,  
PhD in Engineering Levchenko E. P., PhD in Engineering Psiuk V. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**  
**PHYSICAL BASIS OF MINERAL DRESSING IN A BLOCKED FLUIDIZED BED**

*The paper is devoted to determining the physical basis of separation by the density of mineral mixtures in a new separation system — in a blocked fluidized bed. The separation of components by density in the size range from 30 to 70 mm is given.*

**Key words:** dressing, raw materials, blocked fluidized bed, fineness of components.

УДК 66.09:539.4+622.7

к.т.н. Науменко В. Г.

(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, andiline.mail@gmail.com)

## РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ В ПРОЦЕССАХ ОБОГАЩЕНИЯ

*Работа посвящена сравнительному анализу двух методов регулирования электрокинетических свойств водоугольных суспензий — реагентному и безреагентному. Установлены закономерности изменения дзета-потенциала частиц различных марок донецких углей в зависимости от pH суспензии. Показано, что способ регулирования существенно не влияет на характер этих зависимостей. Предпочтительным является безреагентный метод как экологически более безвредный. Обосновано ведение технологических процессов обогащения в кислой или щелочной среде, когда достигается минимальное значение дзета-потенциала угольных частиц.*

**Ключевые слова:** водоугольная суспензия, дзета-потенциал угольных частиц, электрокинетические свойства, методы регулирования.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Электрокинетические явления в водоугольных суспензиях решающим образом влияют на ряд технологических процессов в обогащении полезных ископаемых, связанных с ионообменными процессами на границе раздела фаз «уголь — вода»: флотацию, флокуляцию, масляную грануляцию, сгущение, обезвоживание и т. п. [1, 2].

**Анализ исследований и публикаций.** В практике углепереработки сегодня применяются реагентные методы регулирования показателя pH суспензии. Однако этот метод имеет ряд недостатков. Во-первых, он нуждается в использовании дорогих и дефицитных и опасных в эксплуатации реагентов-регуляторов. Во-вторых, сопровождается коррозионным износом оборудования. В-третьих, не является экологически чистым, что в последнее время приобретает решающее значение [3]. Кроме того, электрокинетические явления во многом определяют свойства высококонцентрированных водоугольных суспензий как объектов для транспортирования и сжигания в специальных топках [4]. Следовательно, проблема регулирования электрокинетических свойств водоугольных смесей является актуальной.

**Цель данной работы** — исследование характера зависимости дзета-потенциала

угольных частиц ( $\zeta$ -потенциала) от pH суспензии, а также сравнительный анализ реагентного и безреагентного методов регулирования показателя pH среды, который существенным образом влияет на электрокинетические явления на границе «уголь — вода».

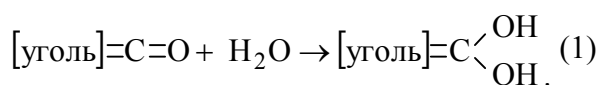
**Объект исследования** — электрокинетические свойства водоугольных суспензий.

**Предмет исследования** — способы регулирования этих свойств, закономерности изменения  $\zeta$ -потенциала угольных частиц в зависимости от pH суспензии.

**Изложение материала и результаты.** Продолжительный контакт с водой приводит к существенным изменениям поверхностных свойств. Интенсивные ионообменные процессы сопровождаются возникновением на угольной поверхности двойных электрических слоёв (ДЭС), мощных гидратных плёнок, которые существенно затрудняют сближение и контакт угольных зёрен и различных реагентов в процессах подготовки и обогащения углей. Кроме того, гидратные плёнки, толщина и прочность которых во многом определяются структурой ДЭС, являются серьёзным препятствием для эффективного сгущения и обезвоживания продуктов обогащения. Очевидно, наилучшие условия для протекания указанных процессов имеют

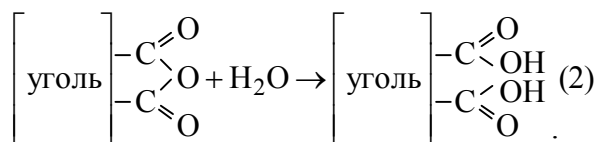
место при минимальном заряде угольной поверхности, или когда её  $\zeta$ -потенциал равняется нулю [5, 6].

Величина и знак заряда угольной поверхности определяются природой поверхностных ионогенных групп, а также характером ионообменных процессов на границе «уголь — вода». Возникновение ионогенных групп, диссоциирующих по щелочному типу, можно представить как результат взаимодействия оксидов на поверхности угля с молекулами воды:



Формирование положительного заряда поверхности, вероятно, происходит в результате возникновения на поверхности радикалов типа  $[\text{C}=\cdot]$  после отщепления гидроксидов  $\text{OH}^-$  от ионогенных групп, которые возникают по указанной реакции.

Возникновение диссоциирующих по кислотному типу групп можно представить как результат взаимодействия оксидов на поверхности с молекулами воды:

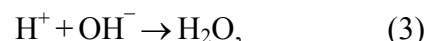


Формирование отрицательного заряда поверхности происходит в результате возникновения на поверхности радикалов типа  $[-\text{COO}^\cdot]$  после отщепления протонов от карбоксильных групп, которые образуются по указанной реакции.

**Методика исследований.** С целью определения величины и знака  $\zeta$ -потенциала частиц углей в воде, а также его зависимости от pH суспензии нами проведены исследования методом электроосмоса. Дзета-потенциал угля измеряли на приборе оригинальной конструкции кафедры коллоидной и физической химии Донецкого национального технического университета. Исследования проводились на донецких углях марок Д, Ж и Т. Регуляторами ки-

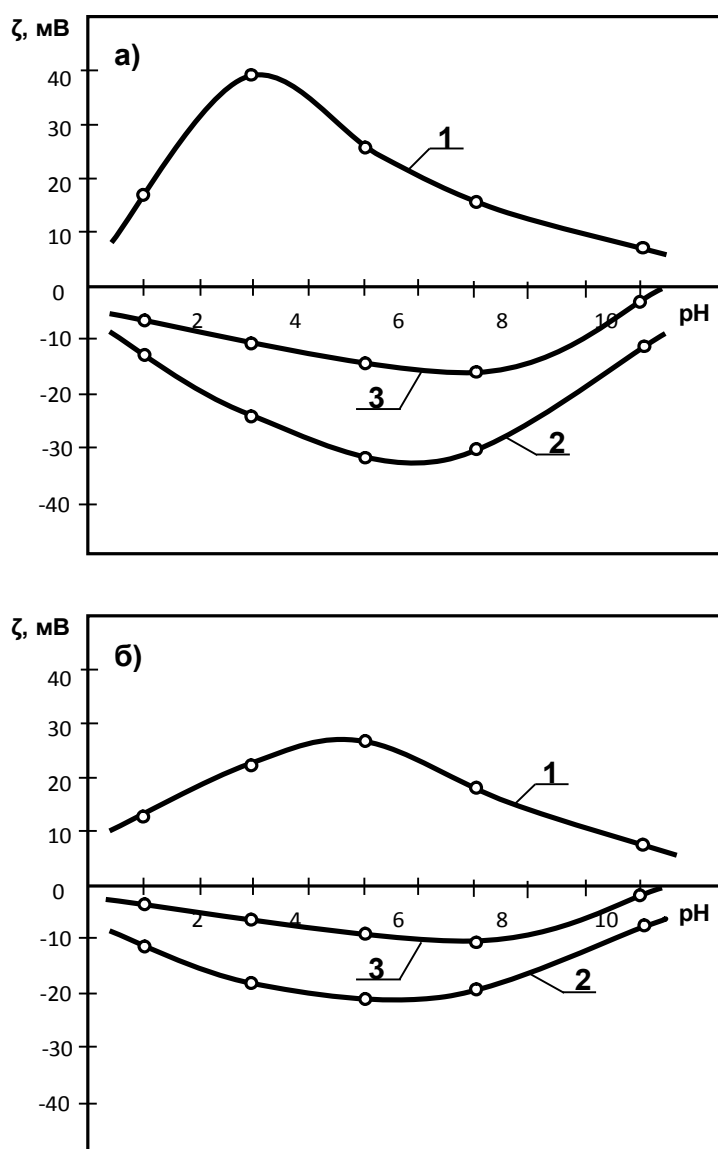
слотно-щелочных свойств среды по первому варианту (реагентный метод регулирования) были приняты соляная кислота и гидроксид натрия соответственно.

Установлено (рис. 1, а), что в диапазоне pH суспензии 1–11 угли марок Ж и Т имеют отрицательный знак заряда поверхности, а уголь марки Д — положительный. Для всех проб угля наблюдается экстремальный характер зависимости  $\zeta=f(\text{pH})$ . Причём для угля марки Г  $\zeta$ -потенциал частиц в кислой среде сначала возрастает, а потом по мере увеличения pH суспензии падает, достигая экстремального значения при  $\text{pH}=3-3,2$ . В условиях стабильной ионной силы среды, которая выдерживалась во всей серии экспериментов, ДЭС имеет постоянную толщину. Можно предположить, что при подкислении среды до  $\text{pH}=3-3,2$  в пределах ДЭС протекает реакция



которая приводит, в силу связывания  $\text{OH}^-$ -ионов, к дальнейшей диссоциации поверхностных ионогенных групп. В результате этого возрастает положительный заряд поверхности и, следовательно,  $\zeta$ -потенциал.

Максимальная величина  $\zeta$ -потенциала достигается в момент предельной диссоциации всех ионогенных групп и при максимальном положительном заряде поверхности угольных частичек. Дальнейшее повышение концентрации протонов вплоть до  $\text{pH}=1$  ведёт к снижению количества гидроксильных ионов в диффузном слое противоионов согласно реакции (3). В результате уменьшается толщина диффузного слоя ДЭС, а значит, и величина  $\zeta$ -потенциала. Если предположить, что такое объяснение справедливо, то становится понятным уменьшение величины электрокинетического потенциала в щелочной области. Действительно, гидроксид натрия относительно данной системы является индифферентным электролитом. Поэтому увеличение концентрации гидроксил-ионов приводит к увеличению  $\zeta$ -потенциала угольной поверхности.



1 — уголь марки Д; 2 — уголь марки Ж; 3 — уголь марки Т

Рисунок 1 Зависимости  $\zeta$ -потенциала донецких углей от pH суспензии:  
а — реагентный метод регулирования pH; б — безреагентный метод

В случае угля марок Ж и Т для зависимостей  $\zeta=f(\text{pH})$  также характерно снижение абсолютной величины электрокинетического потенциала в щелочной и кислой областях (см. рис. 1, а). Очевидно, снижение абсолютной величины  $\zeta$ -потенциала по мере роста концентрации протонов в суспензии (кислотная область) связано с проявлением соляной кислотой свойств индифферентного электролита, то есть электролита, который имеет одинаковый с противоионами ДЭС угольных частиц ион —  $\text{H}^+$ . По мере

увеличения в суспензии концентрации такого электролита толщина ДЭС приближается к толщине адсорбционного слоя. В результате электрокинетический потенциал угольных частиц уменьшается. Снижение  $\zeta$ -потенциала в щелочной среде, вероятно, вызвано упомянутым процессом связывания в диффузной части ДЭС противоионов  $\text{H}^+$  по реакции (3).

Существует безреагентный метод изменения pH воды путём её обработки электрическим током. Его суть состоит в дис-

социации молекул воды под действием электрического поля постоянного тока на ионы  $\text{OH}^-$  и  $\text{H}^+$ , которые разделяют под действием того же поля на катион- и анионсодержащие фракции воды.

В наших опытах применялся прибор для электролиза воды, который представлял собой сосуд объемом 400 мл, оборудованный двумя графитовыми электродами и тканевой диафрагмой, разделяющей сосуд на анодное и катодное отделения. Последние имели сливные отверстия для вывода соответствующей фракции ионизированной воды. Напряжение на электродах составляло 220 В, сила тока — 1 А. Продолжительность электролиза — 5 минут. За исходную бралась водопроводная вода с показателем  $\text{pH}=7,8-8,2$ . Измеренный диапазон  $\text{pH}$  составлял 2–10.

Используя катион- и анионсодержащие фракции воды готовили их смеси с разными показателями  $\text{pH}$ , помещали в них пробу исследуемого угля и определяли зависимость  $\zeta$ -потенциала от показателя  $\text{pH}$ . Согласно методике эксперимента, обязательным условием было достижение сорбционного равновесия в водоугольной смеси, которая достигалась выдержкой угля в суспензии на протяжении суток.

Характер зависимостей  $\zeta(\text{pH})$  практически идентичный для обоих способов регулирования  $\text{pH}$  суспензии (см. рис. 1, б). Наблюдается несколько «сглаженный», «мягкий» характер кривых  $\zeta(\text{pH})$  в случае безреагентного метода регулирования  $\text{pH}$ . Из этого можно сделать предположение, что способ регулирования  $\text{pH}$  среды существенно не влияет на характер процессов в межфазной зоне «уголь — вода». Очевидно, решающим является абсолютное значение концентрации ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ , а не способ их достижения. Именно эти ионы, по-видимому, формируют двойной электрический слой на поверхности угля в воде.

Безреагентный метод регулирования показателя  $\text{pH}$  среды может быть с успехом использован в процессах обогащения

полезных ископаемых, в частности физико-химических процессах переработки горючих ископаемых. Зависимость эффективности процессов флотации, флокуляции и т. п. от  $\text{pH}$  водоугольной суспензии обуславливает востребованность этой технологии для регулирования соответствующих процессов. Вместе с тем продукты технологического процесса обогащения (концентраты, отходы, фугаты, фильтраты и др.) в случае безреагентного метода регулирования  $\text{pH}$  не содержат химически активных примесей (регуляторов среды).

#### **Выводы и направления дальнейших исследований.**

1. Для всего исследуемого угля Донецкого бассейна наблюдается экстремальный характер зависимости  $\zeta=f(\text{pH})$  при заметном снижении электрокинетического потенциала в кислой и щелочной областях. Исходя из этого, следует ожидать существенного повышения эффективности процессов обогащения при их ведении в кислой или щелочной среде. При этом в суспензиях с  $\text{pH}=1$  и  $\text{pH}=10-10,5$  достигается практически одинаковое снижение  $\zeta$ -потенциала частиц угля. Как показывают исследования, в большинстве случаев водородный показатель технической воды, которая используется на углеобогащательных фабриках, составляет 7–8. Следовательно, в случае реагентного метода регулирования ведение физико-химических процессов обогащения в слабощелочной среде более экономично, так как нуждается в меньших расходах электролитов-регуляторов.

2. Способ регулирования электрокинетических свойств существенно не влияет на характер зависимостей  $\zeta(\text{pH})$ . Предпочтительным является безреагентный метод как экологически более безвредный.

В дальнейших исследованиях следует обратить внимание на теоретическое обоснование безреагентного метода регулирования  $\text{pH}$  водоугольных суспензий в конкретных разновидностях процессов физико-химической переработки и обогащения углей.

## Бібліографічний список

1. Курченко, И. П. Состояние, проблемы и перспективы развития обогащения углей в Украине [Текст] / И. П. Курченко, А. А. Золотко // Обогащение полезных ископаемых : научн. техн. сб. — 2004. — Вып. 20 (61). — С. 3–13.
2. Смирнов, В. О. Технологія збагачення вугілля [Текст] / В. О. Смирнов, П. В. Сергєєв, В. С. Білецький. — Донецьк : Східний видавничий дім, 2011. — 476 с.
3. Саранчук, В. И. Физико-химические основы переработки горючих ископаемых [Текст] / В. И. Саранчук, В. В. Ошовский, Г. А. Власов. — Донецьк : Східний видавничий дім, 2001. — 304 с.
4. Круть, О. А. Водовугільне паливо [Текст] / О. А. Круть. — К. : Наукова думка, 2002. — 172 с.
5. Саранчук, В. И. Основы химии и физики горючих копалин [Текст] / В. И. Саранчук, М. О. Ільяшов, В. В. Ошовський, В. С. Білецький. — Донецьк : Східний видавничий дім, 2008. — 640 с.
6. Сергєєв, П. В. Селективна флокуляція вугільних шламів органічними реагентами [Текст] : монографія / П. В. Сергєєв, В. С. Білецький. — Донецьк : Східний видавничий дім, 2010. — 240 с.

© Наumenko В. Г.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. ОПИ ДонНТУ Корчевским А. Н.,  
к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Леоновым А. А.**

Статья поступила в редакцию 02.03.20.

**к.т.н. Наumenko В. Г. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР, andiline.mail@gmail.com)****РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОКІНЕТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДОВУГІЛЬНИХ СУСПЕНЗІЙ В ПРОЦЕСАХ ЗБАГАЧЕННЯ**

Роботу присвячено порівняльному аналізу двох методів регулювання електрокінетичних властивостей водовугільних суспензій — реагентному та безреагентному. Встановлено закономірності зміни дзета-потенціалу часток різних марок донецького вугілля в залежності від рН суспензії. Показано, що спосіб регулювання суттєво не впливає на характер цих залежностей. Кращим є безреагентний метод як екологічно більш безпечний. Обґрунтовано ведення технологічних процесів збагачення в кислому або лужному середовищі, коли досягається мінімальне значення дзета-потенціалу вугільних часток.

**Ключові слова:** водовугільна суспензія, дзета-потенціал вугільних часток, електрокінетичні властивості, методи регулювання.

**PhD in Engineering Naumenko V. G. (DonNTU, Donetsk, DPR, andiline.mail@gmail.com)****REGULATION OF ELECTROKINETIC PROPERTIES OF COAL-WATER SLURRY IN TREATMENT PROCESSES**

The paper is devoted to a comparative analysis of two methods for regulating the electrokinetic properties of coal-water slurry — reagent and reagentless treating. There have been determined the regularities of changing zeta potential particles of different grades of Donetsk coal on the pH slurry. It is shown that the method of regulation does not significantly affect the nature of these dependencies. A reagentless method is preferable, as it is more environmentally friendly. It is justified to conduct technological treatment processes in an acidic or alkaline environment, when the minimum value of zeta potential of coal particles is reached.

**Key words:** coal-water slurry, zeta potential of coal particles, electrokinetic properties, control methods.

УДК 622.416

**Поповский В. Н.**  
(НТЦ ПБ, г. Луганск, ЛНР),  
**к.т.н. Чебан В. Г.**  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА КОЛИЧЕСТВА ВОЗДУХА ДЛЯ ПРОВЕТРИВАНИЯ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ ЛАВ КРУТОГО ПАДЕНИЯ

*Проанализирована методика расчёта необходимого количества воздуха для механизированных лав. Доказана её несостоятельность в условиях шахт Центрального района Донбасса, разрабатывающих крутые и крутонаклонные пласты. Проведены исследования, направленные на уточнение значения коэффициента неравномерности метановыделения.*

**Ключевые слова:** механизированная лава, количество воздуха, метановыделение, концентрация метана, депрессия.

**Постановка проблемы, обоснование её актуальности.** Внедрение механизированной выемки угля обеспечивает повышение нагрузки на очистной забой и безопасности работ при разработке крутых пластов, склонных к внезапным выбросам угля и газа.

Эффективным технологическим схемам выемки угля должны соответствовать и способы проветривания очистных забоев.

При внедрении механизированной выемки на пластах крутого падения возникают значительные трудности в обеспечении нормального режима проветривания выемочных участков, обусловленные воздействием угольного потока на вентиляционную струю.

В отличие от технологии добычи угля в потолкоуступных забоях, в лавах, оборудованных очистными комбайнами и гидроимпульсными установками, падающий уголь уже не рассредоточен, а представляет собой мощный поток, движущийся с большой скоростью вдоль очистного забоя навстречу вентиляционной струе. Это приводит к значительному сокращению количества воздуха, поступающего в лаву, вплоть до полного прекращения или даже опрокидывания вентиляционной струи. Таким образом, во время работы выемочной машины в лаве крутого падения нарушается стабильность проветривания, что приводит к загазированию забоя.

Указанные обстоятельства привели к тому, что на шахтах Центрального района Донбасса имели место вспышки и даже взрывы метана.

После прекращения работы комбайна или гидроимпульсной установки (выемочной машины) газ, накопившийся в очистном забое, выносится на вентиляционный штрек, вследствие чего концентрация метана в исходящей струе может превысить допустимые нормы, а иногда даже достичь взрывоопасных пределов.

Предотвратить подобные случаи возникновения повышенных концентраций метана можно только путём выбора оптимального режима проветривания добычного участка.

Существующая методика расчёта необходимого количества воздуха для механизированных лав крутого падения [1] не может в полной мере быть приемлема для всех условий Центрального района Донбасса. В силу этого обстоятельства возникла актуальная задача по проведению исследований аэродинамических процессов, протекающих в механизированных лавах крутого падения.

**Целью работы** является совершенствование методики расчёта количества воздуха для проветривания механизированных лав крутого падения за счёт уточнения значений коэффициента неравномерности метановыделения.



**Идея работы** заключается в изучении влияния горно-геологических и горнотехнических факторов на колебания концентрации метана в исходящей из выемочного участка струе воздуха при механизированной добыче угля.

**Объект исследований** — процесс метановыделения в механизированных лавах крутого падения, добыча угля в которых осуществляется комбайнами или гидроимпульсными установками.

**Предмет исследований** — закон распределения колебаний метановыделения в исходящей из выемочного участка струе воздуха.

**Задача исследования** заключалась в уточнении значений коэффициента неравномерности метановыделения для определения необходимого количества воздуха.

**Изложение материала и его результаты.** В соответствии с [1], количество воздуха, необходимое для проветривания механизированных лав, оборудованных выемочными машинами, определяется из выражения

$$Q_{yc} = Q + \Delta Q_{yc}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (1)$$

где  $Q$  — расход воздуха, который необходимо подавать на участок, исходя из среднего значения метановыделения в очистной выработке,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$\Delta Q_{yc}$  — поправка, учитывающая уменьшение расхода воздуха под действием падающего угля,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Величина  $Q$  рассчитывается по формуле

$$Q = \frac{100 \cdot \overline{J_{yc}} \cdot K_n}{C - C_o}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2)$$

где  $\overline{J_{yc}}$  — среднее ожидаемое метановыделение во всех выработках участка, определяемое при прогнозе метановыделения пласта,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$C$  — допустимая, согласно ПБ, концентрация метана в исходящей из очистной выработки вентиляционной струе, %;

$C_o$  — концентрация метана в поступающей на выемочный участок вентиляционной струе, %;

$K_n$  — коэффициент неравномерности метановыделения, доли ед.

В соответствии с [1], значение величины  $K_n$  принимается в пределах от 1,28 до 2,43 в зависимости от среднего значения метановыделения.

Проведённые в ДонНИИ исследования [2] показали, что при подсчёте значения величины  $K_n$  колебания метановыделения в исходящей из участка струе воздуха подчиняются нормальному закону распределения случайной величины. Однако в условиях выемки угля выемочными машинами этот показатель изучен недостаточно. Поэтому в работе изложены результаты исследований закона распределения колебаний метановыделения в исходящих струях механизированных лав добычных участков. На основе этих исследований уточнена методика расчёта коэффициента неравномерности метановыделения и, следовательно, количества воздуха, необходимого для проветривания механизированных лав крутого падения.

В соответствии с [1], величина  $\Delta Q_{yc}$  определяется из выражения

$$\Delta Q_{yc} = \frac{(1,4 \cdot h_y - 3) \cdot Q_{yc, \max}}{h_{yc}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3)$$

где  $h_y$  — депрессия, создаваемая потоком падающего угля, даПа;

$h_{yc}$  — депрессия выемочного участка при  $Q_{yc, \max}$ , даПа;

$Q_{yc, \max}$  — наибольший расход воздуха, полученный из результатов расчётов по газовыделению, по людям и другим факторам согласно «Инструкции по расчёту количества воздуха, необходимого для проветривания действующих шахт».

Депрессия, создаваемая потоком падающего угля, определяется из следующего выражения [3]:

$$h_y = \frac{3,78 \cdot b_k \cdot v_k \cdot (v + v_y)}{b_{\min} \cdot K_z \cdot v_y}, \text{ даПа}, \quad (4)$$

где  $b_k$  — ширина захвата выемочной машины, м;

$b_{\min}$  — минимальная ширина призабойного пространства, м;

$K_z$  — коэффициент, учитывающий загромождённость призабойного пространства (для лав с индивидуальной крепью при удержании кровли на кострах принимается равным 0,95, а при обрушении на тумбы — 0,8; для лав, оборудованных механизированными крепями — 0,7);

$v_k$  — скорость подачи выемочной машины, м/с;

$v_y$  — скорость падающего угля, изменяющаяся в зависимости от угла падения пласта от 3,4 до 7,2 м/с;

$v$  — скорость движения воздуха в призабойном пространстве, м/с:

$$v = \frac{Q_{yч. max}}{60 \cdot S \cdot K_{ym} \cdot b_{\min}}, \text{ м/с}, \quad (5)$$

где  $K_{ym}$  — коэффициент, учитывающий утечки воздуха;

$S$  — площадь поперечного сечения призабойного пространства, м<sup>2</sup>:

$$S = K_z \cdot m_n \cdot b_{\min}, \text{ м}^2, \quad (6)$$

где  $m_n$  — мощность пласта, м.

Депрессия выемочного участка  $h_{yч}$  при  $Q_{yч. max}$  рассчитывается или определяется по данным депрессионной съёмки. Если при съёмке фактическое количество воздуха  $Q_{yч. c}$  отличается от  $Q_{yч. max}$ , то  $h_{yч}$  вычисляется по формуле

$$h_{yч} = h_{yч. c} \left( \frac{Q_{yч. max}}{Q_{yч. c}} \right)^2, \text{ даПа}. \quad (7)$$

Допускается приближенный расчёт  $\Delta Q_{yч}$  по формуле

$$\Delta Q_{yч} = \frac{K_{Py}}{Q_{yч. max}}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (8)$$

где  $K_{Py}$  — коэффициент, учитывающий влияние потока падающего угля (в зависимости от значения  $h_y$  принимается в пределах от 13000 до 120000).

При  $h_y < 5$  даПа следует принимать  $\Delta Q_{yч} = 0$ . Однако шахтные исследования показали, что угольный поток оказывает большое влияние на проветривание участка даже в том случае, когда  $h_y = 1,5-2,0$  даПа. Следовательно, расчёт количества воздуха, выполненный по зависимости (1), приводит к неточному результату.

Таким образом, необходимо выполнить уточнение методики расчёта количества воздуха для проветривания очистных забоев на крутых и крутонаклонных пластах, оборудованных комбайнами или гидроимпульсными установками.

Проанализируем принцип расчёта необходимого количества воздуха по существующей методике [1], в соответствии с которой определение количества воздуха ведётся в два этапа: производится расчёт необходимого количества воздуха с учётом прогноза метановыделения на участке, а затем прибавляется дополнительное количество воздуха, которое компенсирует сокращение дебита воздуха через очистной забой под действием падающего угольного потока. Однако, по результатам проведённых шахтных исследований движения воздушных потоков в очистном забое, основной причиной резких повышений концентрации метана в исходящих струях является не уменьшение дебита воздуха по участку, а возникающая в лаве под действием падающего угля рециркуляция воздушных потоков. Вследствие этого в комбайновой части лавы происходит накопление метана, который после остановки комбайна выносится на вентиляционный штрек. При этом в исходящих струях концентрация метана может достигать 2–3 %.

Таким образом, увеличение подачи воздуха на участок на величину его сокращения под действием угольного потока не может гарантировать расчётную концентрацию метана в исходящих струях.

Анализ источника [1] и результатов исследования движения воздушных потоков в очистном забое показал, что колебания концентрации метана на выемочном уча-

стке — величина случайная. Эта величина зависит от горно-геологических и горно-технических условий, к которым относятся: газопроницаемость и газоносность угля, способы управления кровлей, ширина захвата выемочной машины, интенсивности выемки и др., которые, в свою очередь, также являются случайными величинами. Следовательно, нет необходимости вести расчёт необходимого количества воздуха в два этапа. Целесообразно рассматривать все факторы, влияющие на метановыделение, как составляющие единого случайного процесса. Зная закон распределения этого процесса и его параметры, можно с заданной точностью рассчитать необходимое количество воздуха для проветривания добычного участка, оборудованного очистным комбайном или гидроимпульсными установками.

Метановыделение в механизированных лавах в течение суток колеблется в широких пределах. Все факторы, влияющие на метановыделение, мало связаны между собой и носят случайный характер, т. е. содержание метана в исходящей струе выемочного участка представляет собой случайную функцию времени или случайный процесс  $C(t)$ .

Колебания метановыделения при расчётах необходимого количества воздуха учитываются коэффициентом неравномерности  $K_n$ . Большое значение имеет правильный выбор коэффициента неравномерности, так как занижение его приводит к нарушению газового режим участка, а необоснованное его увеличение обуславливает возрастание затрат на проветривание добычного участка и шахты в целом.

Так, согласно проведённым исследованиям [4], увеличение  $K_n$  только на 0,1 повлечёт за собой увеличение затрат на проветривание шахты на 100 тыс. руб. в год.

Согласно существующей инструкции [1], коэффициент неравномерности определяется как отношение максимального газовыделения к его среднему значению:

$$K_n = \frac{I_{\max}}{\bar{I}}. \quad (9)$$

При этом максимальное газовыделение определяется по правилу «трёх сигм»:

$$I_{\max} = \bar{I} + 3 \cdot \sigma, \quad (10)$$

где  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение газовыделения,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Из выражения (10) согласно (9) следует:

$$K_n = 1 + 3 \cdot \frac{\sigma}{\bar{I}}. \quad (11)$$

При использовании полученного по формуле (11) коэффициента неравномерности метановыделения в расчёте необходимого количества воздуха содержание метана в исходящей из участка струе воздуха не превысит 1 % с вероятностью 0,9987. Однако это действительно только для случая, когда колебания метановыделения соответствуют нормальному закону распределения случайной величины.

При разработке пологих пластов колебания метановыделения подчиняются нормальному закону распределения или близки к нему. Что же касается колебаний метановыделения при механизированной выемке крутых и крутонаклонных пластов, то, как показали проведённые исследования, они не подчиняются нормальному закону распределения [2].

На основе проведённых многочисленных газовых съёмок установлено, что колебания газовыделения на шахтах Центрального района Донбасса при механизированной выемке крутых пластов с помощью очистных комбайнов или гидроимпульсных установок подчиняются нормальному логарифмическому закону распределения, то есть такому распределению, при котором нормальному распределению соответствуют не сами значения фактической величины газовыделения, а её логарифмы, то есть  $u = \ln C$ .

Функция распределения и плотность вероятности этого распределения определяются из выражений [5]

$$F(C) = \frac{1}{2} + \Phi(Z); \quad (12)$$

$$f(C) = \frac{1}{\sigma_u \cdot e} \cdot \varphi(Z), \quad (13)$$

где

$$\Phi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_0^x e^{-\frac{Z^2}{2}} dZ; \quad (14)$$

$$\varphi(Z) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{Z^2}{2}}; \quad (15)$$

$$Z = \frac{u - \bar{u}}{\sigma_u}, \quad (16)$$

где

$$\sigma_u = \sqrt{\ln \frac{\sigma_u^2}{\sigma^2} + 1}. \quad (17)$$

До настоящего времени в большинстве случаев при изучении колебаний метано-выделения исследовались вероятностные свойства потока метана  $I$ . Однако в последнее время большинство исследователей предпочитают изучать уже не поток, а концентрацию метана  $C$ . Этот переход основывается на следующем:

1. Оба процесса  $C(t)$  и  $I(t)$  формируются под действием одних и тех же естественных и технологических факторов.

2. Показателем качества проветривания участка, регламентируемым «Правилами безопасности...», является концентрация метана, а не его объём.

3. Концентрация метана является непосредственной измеряемой величиной, поэтому ошибки в оценках её характеристики значительно ниже.

4. Математическая обработка результатов наблюдений  $C(t)$  значительно проще, чем  $I(t)$ .

Поэтому при определении параметров распределения будем пользоваться значениями концентрации метана. Однако при

исследовании вероятностных характеристик процесса  $C(t)$  чаще всего приходится изучать результаты газовой съёмки не одного участка, а группы участков или шахты в целом. Поэтому необходимо использовать усреднённые параметры функции распределения. Для исследования удобно пользоваться безразмерными величинами концентрации метана, представляющими собой отношения фактически измеренных значений концентрации метана  $C_i$  к среднему значению  $\bar{C}$ , т. е. вместо вероятностных характеристик величины  $C$  изучить соответствующие характеристики величины, определяемой из выражения

$$C_i^* = \frac{C_i}{\bar{C}}, \quad (18)$$

где  $\bar{C}$  — среднее значение концентрации метана за время данного наблюдения, определяемое по формуле

$$\bar{C} = \frac{\sum C_i}{m}, \quad (19)$$

где  $m$  — число замеров.

Закон распределения величины  $C^*$  тождественен закону распределения исходной величины  $C$ .

Параметры нормального логарифмического распределения по данным проведения газовых съёмок удобно вычислить с помощью таблиц. Для этого, прежде всего, нужно перейти к безразмерным величинам, вычисленным по формуле (18). Из всех значений  $C_i^*$  находят  $C_{\max}^*$  и  $C_{\min}^*$ , а затем находят величину интервала:

$$\Delta C^* = \frac{C_{\max}^* - C_{\min}^*}{n}, \quad (20)$$

где  $n$  — число интервалов, на которые разбиваются все значения  $C_i^*$ .

Это число определяется по формуле Стерджесса:

$$n = E \{1 + 3,322 \cdot \lg m\}, \quad (21)$$

где  $E$  — символ целой части числа.

Для упрощения расчётов величину интервалов округляют до десятых долей единицы. Затем составляют интервальную таблицу распределения значений  $C_i^*$ . Все результаты заносятся в форму (табл. 1).

В колонку 3 заносится число значений, укладываемых в данный интервал.

В колонку 4 заносятся эмпирические вероятности принятия случайной величины значения в данном интервале, рассчитанные по формуле

$$P_i = \frac{m_i}{m}, \quad (22)$$

где  $m$  — общее количество замеров за время проведения эксперимента.

В колонку 5 заносится условная последовательность равностоящих чисел. Наиболее удобно нулевое значение приписать интервалу с наибольшей частотой. Колонки 6 и 7 служат для вычисления моментов распределения первого и второго порядков в условных единицах.

Начальные моменты определяются из выражений

$$v_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n_i} m_i \cdot t_i; \quad v_2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n_i} m_i \cdot t_i^2, \quad (23)$$

где суммы  $\sum m_i \cdot t_i$  и  $\sum m_i \cdot t_i^2$  берутся из последних колонок 6 и 7.

Математическое ожидание, дисперсии и среднеквадратическое отклонение определяются по формулам

$$\mu(t) = v_1; \quad (24)$$

$$D(t) = v_2 - v_1^2; \quad (25)$$

$$\sigma_t = \sqrt{D(t)}. \quad (26)$$

Заполнив таблицу 1, определяют соответствующие безразмерные величины:

$$\mu(C^*) = C_o^* + v_1 \cdot \Delta C, \quad (27)$$

где  $C_o^*$  — середина интервала с нулевой условной величиной;

$\Delta C$  — ширина интервала с нулевой условной величиной.

$$D(C^*) = e^2 \cdot D(t); \quad (28)$$

$$\sigma_{C^*} = -C \cdot \sigma_C. \quad (29)$$

Зная величины  $\sigma_{C^*}$  и  $\sigma^*$ , вычисляют  $\sigma \cdot \ln C^*$ :

$$\sigma_u^2 = \ln \left( \frac{\sigma_{(C^*)}^2}{\mu(C^*)^2} + 1 \right); \quad (30)$$

$$\bar{u} = \ln C^* - \frac{\sigma_u^2}{2}. \quad (31)$$

Таблица 1

Интервальная таблица

Порядковый номер интервала	Крайнее значение интервала	Частоты в интервале, $m_i$	Частоты, $P_i$	Условные единицы, $t_i$	$m_i \cdot t_i$	$m_i \cdot t_i^2$
1	2	3	4	5	6	7
1						
2						
.....						
n-1						
n						
Сумма						

Для упрощения расчётов представим формулу (16) в следующем виде:

$$Z = \frac{u - \bar{u}}{\sigma_u} = \frac{\ln C^* - \ln C_o^*}{\sigma_u}, \quad (32)$$

где  $\ln C_o^* = \bar{u}$ , отсюда  $C_o^* = e^{\bar{u}}$ , то есть  $C_o^*$  представляет собой значение исходной переменной  $C$ , соответствующее математическому ожиданию переменной  $u$ .

Таким образом, зная значения величин  $\sigma_u$ ,  $\bar{u}$  и  $C_o^*$ , определяют  $Z$

$$Z = \frac{\ln C^* - \ln C_o^*}{\sigma_u} = \frac{1}{\sigma_u} \cdot \ln \frac{C^*}{C_o^*}, \quad (33)$$

а затем определяют функцию распределения и плотность вероятности.

Коэффициент неравномерности определяют из выражения

$$K_n = \frac{C_{\max}^*}{C^*}. \quad (34)$$

Поскольку при переходе к безразмерным величинам концентрации метана  $\mu(C^*) = 1$  и  $\bar{C}^* = 1$ , то

$$K_n = C_{\max}^*. \quad (35)$$

Следовательно, для определения коэффициента неравномерности метановыделения в исходящей струе воздуха необходимо найти  $C_{\max}^*$  при  $F=0,9987$ .

Для этого сначала определяем  $Z$  при этой же вероятности.

При  $F=0,9987$

$$Z = 3,0 \cdot \left( \text{из } \varphi(Z) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int e^{-\frac{t^2}{2}} dt \right),$$

$$\text{так как } Z = \frac{1}{\sigma_u} \cdot \ln \frac{C^*}{C_o^*}, \text{ определяем}$$

$$\ln C^* = 3 \cdot \sigma_u + \ln C_o^*, \text{ а затем и } C_{\max}^* = K_n.$$

Проведённые исследования позволили установить, что для механизированных лав

при разработке крутых пластов коэффициент неравномерности в зависимости от среднего метановыделения в очистной выработке изменяется в пределах от 2,7 до 4,0 и может быть выбран из таблицы 2.

Таблица 2

Значение коэффициента  $K_n$ 

Среднее метановыделение из очистной выработки выемочного участка, м <sup>3</sup> /мин.	0,2	0,6	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0 и более
Значение $K_n$	4,0	3,9	3,8	3,7	3,4	3,0	2,7

Необходимое количество воздуха для механизированных лав определяют с учётом уточнённого значения коэффициента неравномерности по формуле (2).

#### Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Основной причиной резких повышений концентрации метана в исходящей струе механизированных лав крутого падения является рециркуляция воздушного потока, возникающая в лаве под действием мощного потока угля, движущегося с большой скоростью вдоль очистного забоя навстречу вентиляционной струе.

2. Допустимую концентрацию метана в исходящей струе очистного механизированного забоя невозможно обеспечить за счёт увеличения количества подаваемого воздуха на величину потерь, обусловленных рециркуляцией воздушного потока.

3. Колебания газовыделения на шахтах Центрального района Донбасса при механизированной выемке крутых пластов с помощью очистных комбайнов или гидроимпульсных установок подчиняются нормальному логарифмическому закону распределения.

4. При отработке крутых и крутонаклонных угольных пластов коэффициент неравномерности метановыделения в очистном забое изменяется от 2,7 до 4,0.

## Библіографічний список

1. НПАОТ 10.0-7.08-93. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт [Текст] : утв. приказом Государственного комитета Украины по надзору за охраной труда 20.12.1993. — К. : Министерство угольной промышленности Украины, 1994. — 311 с.
2. Волошко, Г. И. Управление газовыделением из выработанного пространства крутого пласта при нисходящем проветривании лавы [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.15.11 / Волошко Геннадий Иванович. — М. : Институт проблем комплексного освоения недр, 1984. — 15 с.
3. Рекомендации по обеспечению нормального проветривания комбайновых лав на крутых пластах с учётом влияния падающего угля и устранения опасности подсыпки угля [Текст] : утв. Минуглепромом Украины 28.10.1974. — Донецк : Министерство угольной промышленности УССР, 1975. — 13 с.
4. Яблоков, Е. С. Совершенствование вентиляционных сетей и методов расчёта параметров шахт Центрального района Донбасса [Текст] / Е. С. Яблоков, Г. И. Волошко, А. И. Шмелев. — М. : ЦНИИУголь, 1987. — 35 с.
5. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель. — М. : Физматгиз, 1962. — 564 с.

© Поповский В. Н.

© Чебан В. Г.

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

*Статья поступила в редакцию 09.12.19.*

**Поповський В. М. (НТЦ ПБ, м. Луганськ, ЛНР), к.т.н. Чебан В. Г. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)  
ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ КІЛЬКОСТІ ПОВІТРЯ  
ДЛЯ ПРОВІТРЮВАННЯ МЕХАНІЗОВАНИХ ЛАВ КРУТОГО ПАДІННЯ**

*Проаналізовано методику розрахунку необхідної кількості повітря для механізованих лав. Доведено її неспроможність в умовах шахт Центрального району Донбасу, що розробляють круті та крутопохилі пласти. Проведено дослідження, що спрямовані на уточнення значення коефіцієнту нерівномірності метановиділення.*

**Ключові слова:** механізована лава, кількість повітря, метановиділення, концентрація метану, депресія.

**Popovskiy V. N. (STCIS (Scientific and Technical Center of Industrial Safety), Lugansk, LPR),  
PhD in Engineering Cheban V. G. (DonSTU, Alchevsk, LPR)  
IMPROVING THE METHOD FOR CALCULATING THE AMOUNT OF AIR TO  
VENTILATE MECHANIZED STEEP-DROP LONGWALL**

*There has been analyzed the method for calculating the required amount of air for mechanized longwall. There has been proved its failure in the conditions of mines in the Central region of Donbass, which develop steep and steep-sided layers. Studies have been carried out to clarify the coefficient value of non-uniformity of methane release.*

**Key words:** mechanized longwall, amount of air, methane release, methane concentration, depression.

УДК 622.81:519.24

**Кулакова С. И.,  
к.т.н. Павлов В. И.**  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, Svet.Kulakova@gmail.com)

## СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ПОВЫШЕНИИ НАГРУЗКИ НА ОЧИСТНОЙ ЗАБОЙ

*Проведено исследование процесса метановыделения в части уточнения влияния высоких нагрузок на его неравномерность. Выполнен кросс-спектральный анализ взаимосвязи метановыделения с нагрузкой. Установлено, что с увеличением нагрузки на механизированный комплекс большие значения мощности спектра метановыделения смещаются в высокочастотную часть и появляются циклические компоненты, согласованные с технологическими ритмами процесса угледобычи.*

**Ключевые слова:** механизированный комплекс, высокие нагрузки, метановыделение, спектральный анализ, спектральная плотность, кросс-спектральный анализ, когерентность.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** С увеличением добычи угля за счёт использования современных, более производительных механизированных комплексов обнаружилось новые тенденции в динамике метановыделения — при достижении высоких нагрузок дебит метана уменьшается. Согласно нормативной методике [1] прогнозные значения метановыделения должны, наоборот, увеличиваться. Исходя из этой новой закономерности, обоснование необходимого количества воздуха для проветривания требует пересмотра. Необходимы дополнительные исследования влияния нагрузки на процесс метановыделения в части уточнения влияния на его неравномерность.

**Анализ исследований и публикаций.** Оценка процесса метановыделения коэффициентом неравномерности, используемая в нормативной методике [1], основывается на представлении о случайности текущих значений. Исследования изменений значений метановыделения во времени как стохастического процесса позволили установить, кроме случайной составляющей, наличие детерминированных компонент, имеющих связь со временем [2]. В работах МакНИИ [2, 3] показано, что в динамике изменения концентрации метана необходимо выделять низко-

частотную часть, задающую тренд процессу, и высокочастотную часть, складывающуюся из множества циклических составляющих. Наиболее опасные, длительные превышения допустимых концентраций метана происходят при наложении больших амплитуд низкочастотных колебаний с высокочастотными составляющими. Эти закономерности положены в основу усовершенствования алгоритма срабатывания аппаратуры автоматического контроля концентрации метана [3].

В исследованиях лаборатории газодинамики угольных месторождений института угля и углехимии СО РАН под руководством Полевщикова Г. Я. [4] доказана идентичность между изменениями метановыделения и динамикой геомеханических процессов. Развитие сдвижений в выработанном пространстве происходит по геомеханическим слоям, начиная с нижних и до земной поверхности, что является причиной низкочастотных колебаний метановыделения с большим периодом времени и амплитудой. При этом увеличение скорости подвигания очистных забоев приводит к увеличению шагов обрушения подрабатываемых слоёв и снижению амплитуды колебания метановыделения.

Подобные выводы получены и в работе [5]. При достижении высоких нагрузок,



согласно математическому моделированию, ожидается качественное и количественное изменение в поведении подрабатываемых породных слоёв, увеличивается шаг обрушения, процесс обрушения постепенно переходит в плавный погиб и снижается вертикальная газовая проницаемость массива.

Профессором Черняком И. Л. исследована периодичность сдвижения геомеханических слоёв с помощью представления динамики опусканий кровли частотным спектром. В работе [6] установлена связь между геомеханическими слоями и низкочастотной частью спектра смещения пород во времени.

Таким образом, на настоящий момент исследования влияния нагрузки на детерминированные компоненты случайного процесса метановыделения не проводились, установлены лишь косвенные факты этого влияния. Для практического использования новых закономерностей процесса метановыделения, противоречащих устоявшимся представлениям, требуется детальное изучение его неравномерности. Как следует из обзора публикаций, использование спектрального анализа предоставляет дополнительные возможности по поиску решений рассматриваемой актуальной проблемы.

**Цель работы** — исследовать влияние нагрузок на неравномерность процесса метановыделения методами спектрального анализа.

В работе поставлены следующие **задачи**:

1. Составить сопряжённые ряды изменения во времени метановыделения и нагрузки на очистной забой.

2. Оценить изменения спектральной плотности процесса метановыделения вследствие увеличения уровня нагрузки.

3. Установить когерентность частотных спектров метановыделения и нагрузки.

4. Произвести идентификацию частотных спектров метановыделения и нагрузки.

**Изложение материала и его результаты.** Для анализа были взяты показатели работы и результаты наблюдений за 18 месяцев по 28-й Орловской лаве пласта  $k_2$

шахты «Молодогвардейская». Метановыделение в исходящую вентиляционную струю из очистного забоя определяли по данным участка ВТБ и АГЗ. Данные по суточной нагрузке выбирались из диспетчерской отчётности и сверялись с декадными маркшейдерскими замерами.

Для представления непрерывных записей концентрации метана дискретным временным рядом использовались средние значения за суточный интервал дискретизации. Подобный подход позволяет уменьшить при спектральном разложении ряда влияние случайной составляющей, а также наложение гармоник близких частот (их маскирование) [7].

Весь период наблюдений был разделён на два непрерывных периода: с высоким и низким уровнем нагрузки. Разделение производилось исходя из условий

$$A_{ср.н.} < 1500 \text{ и } A_{ср.в.} \geq 1500, \quad (1)$$

где  $A_{ср.н.}$ ,  $A_{ср.в.}$  — среднесуточное значение нагрузки в течение выбранного периода соответственно низкого и высокого уровня, т/сут.

В качестве критического значения было принято 1500 т/сут, начиная с которого, по данным работы [8], происходит резкое снижение метановыделения. Высокий уровень нагрузки является реализацией производственных возможностей современных механизированных комплексов и достигается также слаженной организацией труда, сокращением непредвиденных простоев, т. е. устойчивой, равномерной работой выемочного участка по нагрузке. Поэтому дополнительным критерием для разделения использован коэффициент вариации нагрузки [9]:

$$V_n > 30 \text{ и } V_g \leq 30, \quad (2)$$

где  $V_n$ ,  $V_g$  — коэффициент вариации нагрузки в течение выделенного периода соответственно низкого и высокого уровня, %.

Параметры составленных рядов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Статистические характеристики среднесуточных рядов по процессам

Нагрузка на очистной забой				Метановыделение		
Уровень	Ряд	$A_{cp}$ , т/сут	$V$ , %	Ряд	$I_{cp}$ , м <sup>3</sup> /мин	$V$ , %
высокий ( $A_{cp} \geq 1500$ т/сут; $V \leq 30\%$ )	$A_1$	2024	25	$I_1$	8,3	35
низкий ( $A_{cp} < 1500$ т/сут; $V > 30\%$ )	$A_2$	1065	49	$I_2$	8,8	17

В таблице приняты следующие обозначения:

$A_1$ ,  $I_1$  — сопряжённые ряды соответственно среднесуточной метанообильности и суточных нагрузок высокого уровня;

$A_2$ ,  $I_2$  — сопряжённые ряды соответственно среднесуточной метанообильности и суточных нагрузок низкого уровня;

$A_{cp}$ ,  $I_{cp}$  — среднее значение соответственно нагрузки и метановыделения за анализируемый период;

$V$  — коэффициент вариации, %.

Для обеспечения возможности сравнения рядов их длины были выбраны одинаковыми. Как следует из таблицы 1, разделение наблюдений на периоды высоких и низких нагрузок соответствует условиям (1) и (2). Показатели по выделенным периодам существенно различаются, что важно для задач, решаемых в данной работе. Уровень высоких нагрузок выше, а коэффициент вариации меньше в 2 раза. Выборки метановыделения при высоких и низких нагрузках статистически различимы по  $t$ -критерию.

Представление случайного процесса с помощью спектра допустимо при условии обеспечения стационарности ряда. Общеизвестно, что временные ряды метановыделения и нагрузки большой длительности являются нестационарными из-за наличия тренда, вызванного присутствием низких частот с периодом больше длины ряда. Наиболее просто стационарность ряда

обеспечивается цифровым фильтром первых разностей:

$$x_t = X_t - X_{t-1}, \quad (3)$$

где  $x_t$  — текущее значение ряда первой разности;

$X_t$ ,  $X_{t-1}$  — соответственно текущее и предыдущее значения в исходном временном ряде.

Для сравнительного спектрального анализа полученных рядов первых разностей использованы следующие характеристики [10]:

$P_A$ ,  $P_I$  — мощность гармоник соответственно нагрузки и метанообильности;

$P_{AI}$  — кросс-спектральная мощность гармоник нагрузки и метанообильности;

$k$  — коэффициент когерентности, характеризующий степень связи, согласованности гармоник.

В результате преобразования Фурье получено 83 частоты по каждому ряду длиной 166 суток. Распределение их мощности по частотному спектру для рядов  $I_1$  и  $I_2$  приведено на рисунке 1, где визуально наблюдается значительное различие по всему спектру.

Представляет интерес сравнение дисперсий отдельных полос частотного спектра. Первая полоса была ограничена частотами от 0 до  $0,15 \text{ сут}^{-1}$  и включила периоды обрушения пород основной кровли от 6 и более суток. Вторая полоса от  $0,15$  до

0,30 сут<sup>-1</sup> включила периоды обрушения непосредственной кровли от 3 до 6 суток. Третья полоса — интервал от 0,30 сут<sup>-1</sup> до максимального значения частоты спектра 0,50 сут<sup>-1</sup>. Дисперсии полос рассчитаны по формуле [10]

$$D_n = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^n P_i, \quad (4)$$

где  $n$  — количество частот в полосе спектра.

Результаты расчётов по (4) приведены в таблице 2.

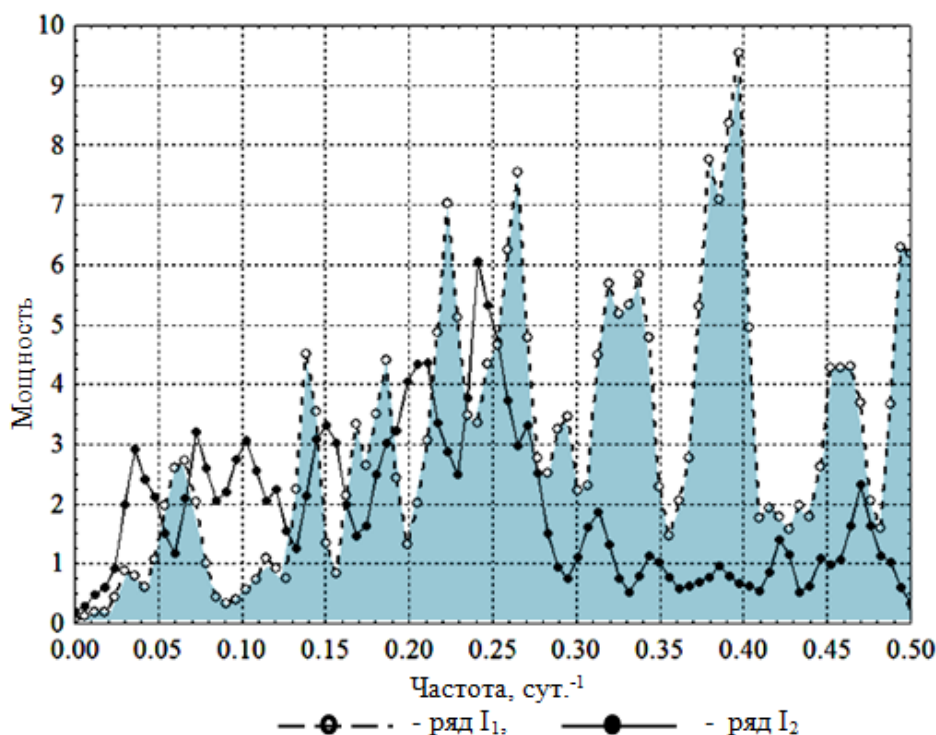


Рисунок 1 Плотность мощности частотного спектра рядов  $I_1$  и  $I_2$

Таблица 2

Распределение дисперсии рядов метанообильности по полосам частот

Ряд метановыделения	1-я полоса частот от 0 до 0,15 сут <sup>-1</sup>		2-я полоса частот от 0,15 до 0,30 сут <sup>-1</sup>		3-я полоса частот от 0,30 до 0,50 сут <sup>-1</sup>		Дисперсия ряда
	$\sum P_i$	$D_n$	$\sum P_i$	$D_n$	$\sum P_i$	$D_n$	
$I_1$	31,59	0,38	91,35	1,10	135,00	1,63	3,10
$I_2$	51,48	0,62	75,08	0,90	32,59	0,39	1,92

В полосе низких частот от 0 до 0,15 сут<sup>-1</sup> при высоком уровне нагрузок наблюдается значительно меньшая (на 38,6 %) дисперсия. Этот факт, как следует из работы [5], объясняется проявлениями плавного прогиба верхних метановых слоев и снижением их газовой проницаемости. В следующих полосах дисперсия ряда  $I_1$ , на-

оборот, больше дисперсии ряда  $I_2$ : во второй полосе — на 17,8 % и в третьей полосе — на 75,9 %. Эти изменения дисперсии свидетельствуют о росте вклада гармоник более высокой частоты в неравномерность процесса метановыделения. Смещение мощности спектра в высокочастотную часть отражает изменение баланса метано-

выделения из подрабатываемых источников, установленное непосредственными замерами метановыделения из дегазационных скважин [11]. Это изменение заключается в следующем: при больших скоростях подвигания очистных забоев (больших нагрузках) уменьшается абсолютное газовыделение из наиболее удалённых источников и увеличивается из близкорасположенных сближенных пластов и вмещающих пород.

Наблюдаемые противоположные изменения дисперсии в третьей полосе, по сравнению со второй, в обоих рядах (рис. 2) следует отнести к неслучайным. Эти изменения могут являться следствием влияния неравномерности нагрузки. Известно, что процесс угледобычи на выемочном участке имеет организационные циклы: технологические выемочные циклы; чередование добычных и ремонтных смен; недельную цикличность, связанную с выходными днями; месячное планирование добычи и т. п. Высокий уровень нагрузки обеспечивается проектной организацией работ, меньшими колебаниями нагрузки, что отражается в низком значении коэффициента вариации (табл. 1).

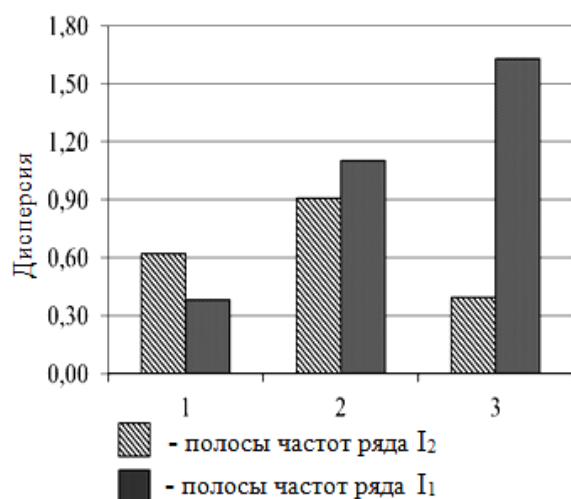


Рисунок 2 Диаграмма сравнения дисперсии спектральных полос рядов  $I_1$  и  $I_2$

Для оценки прямой связи гармоник процессов метановыделения и угледобычи была проведена оценка кросс-спектральных характеристик значимых гармоник сопряжённых рядов  $A_1$ ,  $I_1$ , а также  $A_2$ ,  $I_2$ . Значимость вклада гармоник в общую дисперсию ряда метановыделения оценивалась по статистическому  $F$ -критерию при уровне значимости 0,05. По ряду  $I_1$  установлено 10 значимых гармоник, а по ряду  $I_2$  — 8.

Далее был проведён анализ согласованности значимых гармоник рядов метановыделения, сопряжённых с аналогичными гармониками рядов нагрузки. Решение о наличии связи принималось исходя из сравнительно высоких значений совместной мощности гармоник ( $P_{AI}$ ) и коэффициента их когерентности ( $k$ ).

При низком уровне угледобычи все значимые гармоники метанообильности не согласованы с гармониками ряда нагрузки. Две гармоники имеют высокие значения коэффициента  $k$  (0,78 и 0,66), но отрицательные значения  $P_{AI}$ , что свидетельствует о несогласованности фаз гармоник нагрузки и метановыделения. Остальные шесть значимых гармоник с положительными значениями  $P_{AI}$  имеют низкие коэффициенты когерентности (рис. 3).

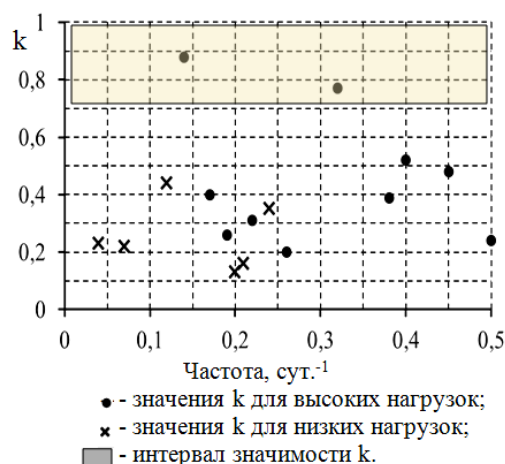


Рисунок 3 Оценка согласованности гармоник рядов  $A_2$ ,  $I_2$  и  $A_1$ ,  $I_1$

При высоком уровне нагрузок проявляется связь с нагрузкой двух гармоник метановыделения с частотами  $0,14 \text{ сут}^{-1}$  (период 7,2 суток) и  $0,32 \text{ сут}^{-1}$  (период 3,1 суток). Значимость связи подтверждается статистической достоверностью не ниже 95 % по критерию Стьюдента. Наибольшая связь наблюдается у гармоники с периодом, практически равным одной неделе (7,2 суток). Оценка связи на этой частоте максимальная ( $k = 0,88$ ), а согласованная мощность гармоник  $P_{AI} = 1689$  больше средней по спектру в 2,6 раза. Отсюда следует, что повышение технологической ритмичности работы выемочного участка при высоких нагрузках определяет возникновение соответствующих гармонических колебаний метановыделения.

**Выводы.** Высокие нагрузки на современные высокопроизводительные механизированные комплексы вызывают изменение внутренней структуры процесса метановыделения.

При увеличении нагрузки на забой:

- амплитуда низкочастотных колебаний значительно снижается, что свидетельствует об уменьшении интенсивности мета-

новыделения из отдалённых в кровле метаносных слоёв;

- вклад в дисперсию процесса высокочастотной части спектра резко возрастает, и поэтому происходит увеличение неравномерности метановыделения;

- возникают детерминированные колебания метановыделения, вызванные технологическими ритмами процесса угледобычи на выемочном участке.

Выявленные связи циклических компонент процессов метановыделения и нагрузки на выемочный участок создают предпосылки к разработке математической модели текущего прогноза метановыделения и к управлению им за счёт научно обоснованного регулирования текущей суточной нагрузки. С этой целью целесообразно исследование области высоких частот для выявления циклических компонент метановыделения периода менее суток. Изучение неравномерности метановыделения в течение суток важно также для оптимизации работы автоматической газовой защиты и более надёжного обоснования необходимого количества воздуха для проветривания выемочного участка.

### Библиографический список

1. ДНАОТ 1.1.30-6.09.93. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт [Текст] : утв. Приказом Гос. ком. Украины по надзору за охраной труда № 131 от 20.12.1993. — К. : Основа, 1994. — 312 с.
2. Иванов, Ю. А. Исследование частотной структуры процесса изменения концентрации метана на выемочных участках [Текст] / Ю. А. Иванов // Молодые ученые — научно-техническому прогрессу в угольной промышленности : матер. IV респуб. науч.-технич. конф.. — Донецк, 1984. — С. 133–134.
3. Бусыгин, К. К. Усовершенствование алгоритма срабатывания аппаратуры автоматического контроля концентрации метана [Текст] / К. К. Бусыгин, Ю. А. Иванов // Создание безопасных условий труда в угольных шахтах : сб. трудов МакНННН. — Макеевка : МакНННН, 1986. — С. 27–32.
4. Полевщиков, Г. Я. Газокинетический паттерн разрабатываемого массива горных пород [Текст] / Г. Я. Полевщиков, Е. Н. Козырева // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2002. — № 11. — С. 117–120.
5. Бокый, Б. В. Влияние скорости подвигания на напряжённо-деформированное состояние и газовую проницаемость массива [Текст] / Б. В. Бокый, О. И. Касимов, И. В. Назимко // Уголь Украины. — 2009. — № 11. — С. 9–13.
6. Черняк, И. Л. Применение гармонического анализа для исследования проявлений горного давления в очистных забоях [Текст] / И. Л. Черняк // Уголь. — 1989. — № 7. — С. 7–10.

7. Хургин, З. Я. Методика статистической обработки случайных процессов на ЭВМ [Текст] / З. Я. Хургин, Г. М. Левинц, О. П. Земскова. — М. : ИГД им. А. А. Скочинского, 1976. — 28 с.
8. Касимов, О. И. Метановыделение в очистные выработки угольных шахт [Текст] / О. И. Касимов, Б. В. Бокий, И. В. Назимко // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. — 2007. — № 1. — С. 232–238.
9. Сургай, Н. С. Надёжность функционирования угольных шахт [Текст] / Н. С. Сургай. — Д. : Арт-Пресс. — 1998. — 192 с.
10. Дженкинс, Г. Спектральный анализ и его приложения [Текст]. В 2-х т. Т. 1 / Г. Дженкинс, Д. Ваттс. — М. : Мир, 1971 — Т. 1. — 316 с.
11. Харин, Е. Н. Комплексный и раздельный способы прогноза газовыделения из подрабатываемых угольных пластов и пород [Текст] / Е. Н. Харин, Н. И. Антощенко, С. И. Кулакова, Л. А. Чепурная // Школа підземної розробки : матер. VI міжнарод. наук.-практ. конф.. — Д. : НГУ, 2012. — С. 229–242.

© Кулакова С. И.

© Павлов В. И.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТУ Литвинским Г. Г.,  
д.т.н., с.н.с. НИИГД «Респиратор» Кудиновым Ю. В.**

Статья поступила в редакцию 19.02.20.

**Кулакова С. И., к.т.н. Павлов В. И. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР, Svet.Kulakova@gmail.com)**  
**СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ МЕТАНОВИДІЛЕННЯ ПРИ ПІДВИЩЕННІ**  
**НАВАНТАЖЕННЯ НА ОЧИСНИЙ ВИБІЙ**

Проведено дослідження процесу метановиділення в частині уточнення впливу високих навантажень на його нерівномірність. Виконано крос-спектральний аналіз його взаємозв'язку з навантаженням. Встановлено, що зі збільшенням навантаження на механізований комплекс великі значення потужності спектра метановиділення зміщуються в високочастотну частину і з'являються циклічні компоненти, узгоджені з технологічними ритмами процесу вуглевидобутку.

**Ключові слова:** механізований комплекс, високі навантаження, метановиділення, спектральний аналіз, спектральна щільність, крос-спектральний аналіз, когерентність.

**Kulakova S. I., PhD in Engineering Pavlov V. I. (DonSTU, Alchevsk, LPR,**  
**Svet.Kulakova@gmail.com)**

**SPECTRAL ANALYSIS OF THE METHANE RELEASE PROCESS WHEN THE LOAD**  
**ON THE BREAKAGE FACE INCREASE**

Study of the methane release process has been carried out to clarify the effect of high loads on its unevenness. A cross-spectral analysis of the interrelation between methane release and load was performed. It was found that with increasing load on the mechanized complex, large values of the power of the methane release spectrum are shifted to the high-frequency part and cyclic components appear that are consistent with the technological rhythms of the coal mining process.

**Key words:** mechanized complex, high loads, methane release, spectral analysis, spectral density, cross-spectral analysis, coherence.



УДК 622.2:622.016

Кладко В. И.

(и/у «Самсоновская-Западная», г. Краснодон, ЛНР, v.kladkovladimir@ya.ru)

## АНАЛИЗ УСЛОВИЙ СООРУЖЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ШАХТЕ «САМСОНОВСКАЯ-ЗАПАДНАЯ»

*Даны краткие сведения об основных технических показателях действующей шахты «Самсоновская-Западная». Описаны горно-геологические условия, характеристика угольных пластов и вмещающих пород, схема вскрытия, порядок отработки, система разработки, подготовительные работы. Рассмотрены условия проведения и крепления подготовительных горных выработок. Дана характеристика проявлений горного давления в подготовительных выработках разных горизонтов.*

**Ключевые слова:** шахта «Самсоновская-Западная», технические показатели, условия разработки, подготовительная горная выработка, горное давление, устойчивость, пучение пород, деформации крепи.

Шахта «Самсоновская-Западная» (рис. 1) (пос. Самсоновка) вместе с находящейся в стадии консервации шахтой «Ореховская» (г. Молодогвардейск) входит в состав шахтоуправления закрытого акционерного общества «Внешторгсервис» структурного подразделения «Краснодонуголь».

Строительство шахты осуществлялось с 1965 по 1999 гг. по проекту, разработанному государственным проектным институтом «Южгипрошахт» (г. Харьков).

Проектирование и строительство шахты представляло собой сложную инженерную задачу: предстояло построить шахту, опасную по внезапным выбросам угля, породы и газа, с опасной по взрывчатости угольной пылью, с очень высокими газообильностями: абсолютной  $51 \text{ м}^3/\text{мин}$  и относительной  $45 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{сут.}$  добычи. Это относило шахту к разряду сверхкатегорных по выделению газа метана и угольной пыли.

Такие горно-геологические условия, наряду с недостаточным финансированием работ, отрицательно сказались на рекордно длительном сроке строительства шахты — почти 35 лет. К тому же из-за длительного строительства устарели санитарные и технические нормы, и проект дважды пересматривался. Кроме того, к предпусковому периоду в значительной мере пришли в негодность ранее построенные

здания и сооружения. Объём ремонтно-восстановительных работ ранее построенных объектов был очень большим и исчислялся миллионами рублей.

Следует отметить, что в проекте строительства были предусмотрены самые передовые на тот период времени технические решения: блоковая схема вскрытия шахтного поля центрально-сдвоенными главными и вспомогательными отнесёнными вентиляционными стволами. Была принята система разработки длинными столбами по простиранию при панельной подготовке и длинными столбами по падению или восстановлению при погоризонтной подготовке.



Рисунок 1 Шахта «Самсоновская-Западная»

В настоящее время в связи с переходом горных работ на большие глубины разработок (гор. 1180 м) одним из значимых сдерживающих эффективность добычи факторов становится снижение устойчивости горных выработок в связи с негативными проявлениями горного давления. Этой проблеме были посвящены многочисленные исследования отечественных и зарубежных учёных [1–5]. Накопленный производственный опыт ремонтов и перекреплений подготовительных горных выработок свидетельствует о высокой актуальности научных и проектно-конструкторских разработок для решения этой задачи.

**Целью** работы является обоснование актуальности и целесообразности изыскания способов и средств повышения устойчивости подготовительных горных выработок для снижения расходов на их крепление и поддержание.

**Идея** работы состоит в использовании функционально-стоимостного анализа горно-геологических и горнотехнических условий и опыта ведения горных работ.

**Объектом** исследования является устойчивость подготовительных горных выработок, а **предмет** исследования — актуальность и эффективность способов и средств их крепления и поддержания.

Для этого следует рассмотреть такие **задачи исследования**:

1) дать краткий анализ существующих технических решений функционирования шахты по добыче угля и развитию горных работ;

2) оценить горно-геологические условия проведения и крепления горных выработок;

3) изучить накопленный на шахте опыт крепления и поддержания подготовительных горных выработок и наметить пути повышения их устойчивости.

При проектировании и в процессе дальнейшей работы шахты после ввода её в эксплуатацию важную роль играли основополагающие проектно-инженерные решения. Последние были выработаны с учётом особых ограничивающих горно-

геологических условий, поскольку шахта является опасной по внезапным выбросам угля, породы и газа. Это потребовало проведения интенсивной дегазации:

– вертикальными скважинами, пробурёнными с поверхности, посредством которых газ каптируется передвижными дегазационными установками;

– подземными скважинами, пробурёнными в выработанное пространство, через которые газ каптируется вакуум-насосной установкой.

На выемочном поле шахты имеется три основных угольных пласта:  $-l_3^6$ ,  $k_2^H$ ,  $i_3^6$  с мощностью 0,8...1,75 м и преобладающими углами падения 0...20°; угли марок «Г» и «Ж». В настоящее время отрабатывается только пласт  $k_2^H$  мощностью 0,85...1,55 м, который является одним из наиболее устойчивых рабочих пластов. Остаточные балансовые запасы пласта — 51,2 млн тонн, промышленные — 39,4 млн тонн. Другие пласты  $i_3^1$  и  $l_3^6$  являются менее перспективными для отработки из-за невыдержанности по мощности.

Необходимо отметить, что эффективность работы шахты во многом обусловлена принятыми в её проекте прогрессивными техническими решениями:

– блоковая схема вскрытия шахтного поля с делением по простиранию на 2 блока: Центральный (первоочередная отработка) и Западный (на поддержание мощности) с примерно равными промышленными запасами — 50...58 млн тонн;

– вскрытие вертикальными стволами: главным (глубина  $H=960$  м,  $D=7,5$  м); вспомогательным ( $H=993$  м,  $D=7,0$  м); вентиляционным № 1 ( $H=857$  м,  $D=5$  м); воздухоподающим ( $H=1020$  м,  $D=7,0$  м) и квершлагами на откаточном горизонте 956 м;

– погоризонтная (при углах падения менее 10°) и панельная (10–20°) подготовка;

– система разработки длинными столбами по простиранию при панельной подготовке и длинными столбами по падению или восстанию при погоризонтной подготовке;



- всасывающий способ и комбинированная схема проветривания шахты;
- прямоточная схема проветривания очистных забоев с разбавлением метана по источникам его поступления;
- полная конвейеризация доставки угля от очистных забоев до камер загрузочных устройств ствола.

Рабочие пласты  $k_2''$  и  $i_3'$  вскрываются квершлагами и наклонными выработками на откаточный горизонт 956 м и квершлагами на вентиляционных горизонтах 714 м для пласта  $k_2''$  и 834 м для пласта  $i_3$ . На участках первоочередной отработки пластов  $k_2''$  с углами падения свыше  $10^\circ$  применялась панельная схема подготовки, при углах падения менее  $10^\circ$  принята погоризонтная подготовка с отработкой столбами по восстанию.

Подготовительные панели в бремсберговом поле гор. 956 м с помощью магистральных штреков и квершлагов связаны с центральными и воздухоподающими стволами.

В настоящее время отрабатываются две лавы уклонной части: длинными столбами по восстанию с длиной линии очистного забоя 250–300 м и плановой нагрузкой 1350 тонн/сут. Столбы отрабатываются обратным ходом, длина столба — 1370 м.

Отработка ярусов в пределах панелей осуществляется длинными столбами по простиранию с погашением грузолудских и поддержанием конвейерных штреков в выработанном пространстве с целью вывода из очистных забоев и подсыхания исходящей струи воздуха.

Подготовка лав в уклонном поле пласта  $k_2''$ , учитывая его пологое залегание, предусмотрена столбами по падению с отработкой их по восстанию, с погашением воздухоподающих уклонов и поддержанием конвейерных уклонов с целью вывода и подсыхания исходящей из лавы струи воздуха.

Выемка угля осуществляется комплексами типа 2КД-90Т. Управление кровлей — полное обрушение. Тип выемочного механизма во всех лавах — узкозахватный комбайн типа 1К-101 с самозарубкой.

Таким образом, очистные работы характеризуются высокой концентрацией и минимальной длиной подготовительных выработок на 1000 т добычи.

Проведение пластовых подготовительных выработок осуществляется проходческими комбайнами КСП-32, КПД, КП-21 или буровзрывным способом в режиме сотрясательного взрывания. Уборка и погрузка горной массы производятся породопогрузочной машиной 2ПНБ-2Б. Крепление выработок производится металлической арочной и анкерной крепью.

Для сооружения и поддержания подготовительных выработок одними из самых значимых факторов являются физико-механические свойства горных пород.

Вмещающие породы углепородного массива представлены чередованием известняков, песчаников, алевролитов и аргиллитов. Непосредственная кровля пластов  $k_2''$  и  $i_3''$  представлена известняком. Она достаточно устойчива при залегании в ней зернистых песчаников и алевролитов, слабоустойчива в случае преобладания аргиллитов. Непосредственная кровля пласта  $i_3'$  характеризуется как относительно устойчивая. Непосредственная почва пласта  $k_2''$  состоит из алевролитов и аргиллитов. Характеризуется в случае аргиллитов как слабоустойчивая и при наличии алевролитов — как относительно устойчивая.

За длительный (более 30 лет) период эксплуатации шахты накоплен большой производственный опыт проведения и поддержания подготовительных выработок и выявлен ряд особенностей их состояния при проявлениях горного давления.

Все горные выработки на шахте подвержены в той или иной степени и смещениям породного контура, и деформациям, иногда значительным, крепи, что вызывает уменьшение поперечного их сечения, потерю нормированных правилами безопасности зазоров и выход из эксплуатационного состояния. Тем самым возникает необходимость проведения ремонтных работ в виде периодических подрывок пород

почвы, ремонта крепи или даже полного перекрепления.

Капитальные горные выработки, расположенные в целиках и не подверженные вредному влиянию очистных работ, достаточно устойчивы и находятся в удовлетворительном состоянии. Уменьшение их поперечного сечения происходит сравнительно медленно, преимущественно за счёт выдавливания (пучения) пород почвы со скоростью до 3 см в год.

Капитальные выработки, попадающие в зону вредного влияния очистных работ, но находящиеся в зоне охранных целиков у отработанных выемочных столбов, деформируются заметно больше. По данным замеров маркшейдерской службы шахты, их сечение уменьшается со скоростью 3–7 см в год.

Заметно интенсивнее наблюдаются проявления горного давления в подготовительных горных выработках в зоне влияния очистных работ. Главной составляющей смещений пород в горные выработки является выдавливание (пучение) пород почвы. Подготовительные горные выработки теряют сечение за счёт пучения пород почвы со скоростью от 8 до 20 см и более в месяц. За счёт деформации элементов арочной крепи (прогиб верхняка, выдавливание стойки в сечение выработки) сечения в свету снизились с  $13,6 \text{ м}^2$  до  $4,5 \text{ м}^2$ .

Характерными являются пучение почвы и деформации арочной крепи в вентиляционном штреке гор. 1180 м (рис. 2). Штрек пройден в слоистых малоустойчивых породах. В кровле расположен алевролит полосчатой текстуры, трещиноватый, малоустойчивый, с коэффициентом крепости по шкале Протодяконова  $f_{II} = 4 \dots 6$ . Почва выработки представлена алевролитом комковатой текстуры, трещиноватым, склонным к пучению, у которого коэффициент крепости по шкале Протодяконова несколько меньше —  $f_{II} = 3 \dots 5$ .

Штрек имел проектное поперечное сечение в свету  $13,6 \text{ м}^2$ , которое после смещений пород уменьшилось до  $5,8 \text{ м}^2$ . Средняя скорость смещения почвы соста-

вила 20...25 см/год, а необходимая величина подрывки пород в среднем достигла 1,8...2 м. Деформации крепи за 10 лет после сдачи в эксплуатацию достигли критических размеров, выработка полностью потеряла арочную форму и требует полного перекрепления.

Несколько иные формы приобрели проявления горного давления в восточном дренажном штреке гор. 1180 м, закреплённом арочной стальной крепью АПЗ/13,8 с деревянной затяжкой (рис. 3), который был пройден по таким же породам, как и вентиляционный штрек. Поперечное сечение в свету за 12-летний срок службы выработки уменьшилось более чем вдвое с проектного значения  $12,8 \text{ м}^2$  до  $5,4 \text{ м}^2$ , а требуемая величина подрывки составила 1,9...2,3 м.



Рисунок 2 Пучение пород почвы в вентиляционном штреке гор. 1180 м на участке подрывки

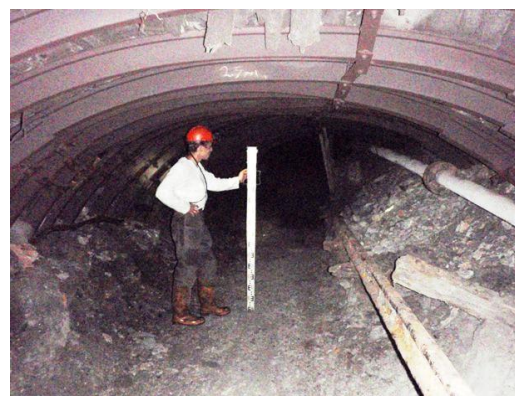


Рисунок 3 Деформация арочной крепи в восточном дренажном штреке гор. 1180 м

В среднем скорость смещения пород почвы оказалась равной 15...20 см/год.

Примерно такое же пучение наблюдалось и в наклонных выработках, что видно из рисунка 4, где показан грузовой уклон гор. 956 м в момент подрывки почвы.

В кровле грузового уклона залегает алевролит полосчатой текстуры, трещиноватый, малоустойчивый, с коэффициентом крепости по шкале Протодяконова  $f_{II}=4...6$ , а в почве — алевролит комковатой текстуры, трещиноватый, склонный к пучению, с  $f_{II}=3...5$ .

В выработке установлена арочная крепь АПЗ/13,8 с железобетонной затяжкой. Требуемая величина подрывки почвы составляет 1,3...1,6 м, поперечное сечение в свету уменьшилось с 12,8 м<sup>2</sup> до 8,1 м<sup>2</sup>.

Нередко при деформации арочной крепи приходилось прибегать к «дедовскому» способу повышения её устойчивости путём установки дополнительных промежуточных стоек под верхняк (рис. 5).

Такой способ является, по сути, аварийным, чтобы не допустить завала выработки, и в то же время малоэффективным, поскольку всегда нарушаются нормы соблюдения требуемых правилами безопасности зазоров. К тому же сочетание деформированных верхняков с жёсткими стойками технически мало оправдано. В частности, такой тип усиления крепи способствует вероятности поломки железобетонной затяжки и падения её в выработку. Это видно из рисунка 6, где показана вторая сторона того же штрека с почти полностью поломанными верхняками и стойками арочной крепи и выдавленной в выработку затяжкой.

Следует обратить внимание, что разрушению верхняков и стоек арки в немалой степени способствовала неудовлетворительная работа податливых узлов крепи, скобы которых, по всей видимости, были излишне затянуты при установке крепи. Как видим, любые, даже незаметные, отклонения от технологических регламентов могут заметно повлиять на работоспособность крепи.



Рисунок 4 Ремонтные работы и подрывка почвы в грузовом уклоне гор. 956 м



Рисунок 5 Повышение устойчивости арочной крепи установкой стоек в восточном полевом вентиляционном штреке гор. 714 м



Рисунок 6 Деформации верхняков, стоек и затяжки арочной крепи в том же вентиляционном штреке



Не лучшее состояние крепи и в западном полевом вентиляционном штреке, что видно из рисунка 7.

Как видно, выработка нуждается для приведения её в безопасное состояние и последующей эксплуатации в немедленном перекреплении, что потребует значительных затрат труда и материальных средств. Обращает на себя внимание то, что здесь стойки усиления устанавливали не только под деформированные верхняки, но и непосредственно под разрушенные породы кровли, что заметно снижало эффективность усиления.

Несмотря на то, что на приведённых рисунках показаны характерные случаи пучения почвы и деформации арочной крепи, имеется также немало выработок, где можно признать состояние удовлетворительным. Поэтому представляется вполне оправданным провести шахтные визуальные и инструментальные наблюдения, чтобы установить соотношение между различными эксплуатационными состояниями горных выработок.

Опыт эксплуатации крепи и многочисленные длительные шахтные наблюдения показали, что рама крепи не разрушается внезапно (при условии надёжности замковых соединений) [5]. Даже при возникновении на отдельных участках «пластических шарниров» крепь может сохранять работоспособное состояние, а иногда и увеличить свою несущую способность. Это зависит в основном от условий взаимодействия крепи и массива горных пород: размеры закрепного пространства, наличие и качество забутовки, типа и распределения действующей нагрузки и т. д. Состояние крепи после достижения в одном из её опасных сечений предельных момента и продольной силы считают недопустимым.

В горной промышленности до настоящего времени крепи горных выработок в большинстве случаев проектируют без какого-либо прочностного расчёта. Принятые ранее за образец и далеко не всегда обоснованные решения по выбору конструкций крепи и способов охраны выработок механически

переносят из одних горнотехнических условий на другие (так называемый эмпирический метод инженерных аналогий).

В результате возникают ошибки проектирования параметров крепи горной выработки I или II рода [5]. В первом случае ошибка появляется в результате недооценки интенсивности проявлений горного давления — смещений пород внутрь выработки и давления их на установленную в ней крепь. Такого рода ошибки приводят к повреждению и разрушению крепи, что требует дорогостоящих ремонтов и перекреплений [5].

В случае появления ошибок проектирования II рода происходит завышенная оценка вредного влияния проявлений горного давления, что ведёт к излишней установке крепи, неоправданному перерасходу материалов и трудовых ресурсов. Выработки обычно полностью сохраняют устойчивость, нередко крепь даже не вступает во взаимодействие с массивом. Ошибки проектирования II рода наблюдаются в среднем на 20–40 % от общей протяжённости выработок. Отсюда следует, что в среднем по отрасли относительная протяжённость подготовительных выработок, для которых можно считать относительно правильно принятыми инженерные решения по выбору типа и параметров крепи, не превышает примерно 35...45 % от общей протяжённости горных выработок.



Рисунок 7 Деформации верхняков, стоек и затяжки арочной крепи в западном полевом вентиляционном штреке гор. 714 м

По мере увеличения глубины разработки проектных ошибок II рода становится всё больше за счёт уменьшения удельного объёма правильно принятых проектных решений. Это объясняется ухудшением горно-геологических условий поддержания подготовительных горных выработок и сравнительно невысоким уровнем изученности особенностей проявлений горного давления на больших глубинах разработки. Это приводит к возрастанию объёмов дорогостоящих ремонтов и перекреплений подготовительных выработок [7].

Таким образом, можно заключить, что проблема крепления и поддержания под-

готовительных горных выработок на ш. «Самсоновская-Западная» далека от своего оптимального решения. На шахте можно наблюдать подготовительные выработки, которые были закреплены с недооценкой интенсивности проявлений горного давления (инженерная ошибка I рода) либо с «запасом» устойчивости (ошибки проектирования II рода). Поэтому исследования, направленные на повышение устойчивости подготовительных выработок во многом сохраняют свою актуальность и позволяют получить значительный экономический эффект.

### Библиографический список

1. Протодьяконов, М. М. Давление горных пород и рудничное крепление [Текст]. Часть 1 / М. М. Протодьяконов. — [2 изд.]. — М.-Л. : Госнаучтехиздат, 1931. — 104 с.
3. Слесарев, В. Д. Механика горных пород и рудничное крепление [Текст] / В. Д. Слесарев. — М. : Углетехиздат, 1948. — 303 с.
4. Tajduś, A. Geomechanika w budownictwie podziemnym. Projectowanie i budowa tuneli [Text] / Antoni Tajduś, Marek Gala, Krzysztof Tajduś. — Krakow : Akademia AGH, 2012. — 762 s.
5. Литвинский, Г. Г. Стальная крепь горных выработок [Текст] / Г. Г. Литвинский. — К. : Техника, 1999. — 216 с.
6. Вопросы теории горного давления [Текст] : сб. науч. переводов / под ред. А. А. Борисова. — М. : Госгортехиздат, 1961. — 229 с.
7. Литвинский, Г. Г. Горное давление на малых и больших глубинах разработки [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — № 37. — С. 5–19.

© Кладко В. И.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. кафедрой СГ ДонГТУ Литвинским Г. Г.,  
к.т.н, доц. каф. РМПИ ДонГТУ Мележиком А. И.*

Статья поступила в редакцию 28.02.20.

**Кладко В. І.** (ш/у «Самсонівська-Західна», м. Краснодон, ЛНР)

### АНАЛІЗ УМОВ СПОРУДЖЕННЯ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК НА ШАХТІ «САМСОНІВСЬКА-ЗАХІДНА»

Дано короткі відомості про основні технічні показники діючої шахти «Самсонівська-Західна». Описано гірничо-геологічні умови, характеристику вугільних пластів і вміщуючих порід, схему розкриття, порядок відпрацювання, систему розробки, підготовчі роботи. Розглянуто умови проведення та кріплення підготовчих гірничих виробок. Дано характеристику проявів гірського тиску в підготовчих виробках різних горизонтів.

**Ключові слова:** шахта «Самсонівська-Західна», технічні показники, умови розробки, підготовка гірничих виробок, гірничий тиск, стійкість, здимання порід, деформації кріплення.

**Kladko V. I.** (*“Samsonovskaya-Zapadnaya” mine, Krasnodon, LPR*)

**ANALYSIS OF CONDITIONS FOR THE CONSTRUCTION OF MINE WORKING AT THE “SAMSONOVSKAYA-ZAPADNAYA” MINE**

*Brief information is given about the main technical indicators of the operating “Samsonovskaya-Zapadnaya” mine. Geological conditions, characteristics of coal seams and enclosing rocks, opening scheme, sequence of mining, method of mining, first mining are described. The conditions for carrying out and attachment the development working are considered. A characteristic of rock pressure manifestations in the development working of different horizons is given.*

**Key words:** *“Samsonovskaya-Zapadnaya” mine, technical indicators, development conditions, development working, rock pressure, rigidity, rock heaving, support deformations.*

УДК 622.831.312

Малышева Н. Н.  
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, rpm@mine.donntu.org)

## ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ВСТУПЛЕНИЯ В РАБОТУ ОХРАННОГО СООРУЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОДДЕРЖАНИЯ ВЫРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ ШАХТЫ «РАССВЕТ-1»

*Работа посвящена исследованию влияния времени вступления в работу охранного сооружения (наличия/отсутствия зазора между кровлей и охранным сооружением, а также его несущей способности) на эффективность поддержания выработки. Предложено охранный сооружение, вступающее в работу в течение суток. Обоснованы его рациональные параметры.*

**Ключевые слова:** охранный сооружение, тумба с распором, ANSYS, доля объяснённой дисперсии, модуль деформации.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** В настоящее время ввиду ограниченности средств, как в экономическом, так и в материальном аспектах, на шахтах одной из главных проблем является обеспечение устойчивости подготовительных выработок в выработанном пространстве. За время отработки выемочного участка в выработках производят до двух-трёх перекреплений, что существенно оказывает влияние на рост травматизма при проведении ремонтных работ, которые практически выполняются вручную. Поэтому исследования, направленные на разработку способов и средств по обеспечению устойчивости подготовительных выработок, являются актуальными и перспективными.

**Постановка задачи.** Одним из способов, повышающих устойчивость выработки, может быть использование такого охранного сооружения, которое быстро включалось бы в работу. В качестве такого охранного сооружения были предложены тумбы с распором [1, 2].

В связи с этим **целью** настоящей работы являлось установление рациональных параметров данных сооружений.

**Объект исследования** — напряжённо-деформированное состояние массива пород при применении охранного сооружения, которое быстро включается в работу по поддержанию выработки.

**Предмет исследования** — рациональные параметры охранного сооружения, которое быстро включается в работу по поддержанию выработки.

### **Задачи исследования:**

- установление более полной картины сдвижений с учётом всех опор, которые находятся в плоскости пласта;
- исследование влияния времени вступления в работу охранного сооружения (наличия/отсутствия зазора между кровлей и охранным сооружением) на эффективность поддержания выработки;
- обоснование критерия для выбора рациональных параметров тумб с распором;
- выделение роли охранного сооружения среди всех искусственных и естественных опор;
- исследование влияния несущей способности предлагаемого охранного сооружения на эффективность поддержания выработки;
- установление его рациональных параметров.

**Изложение материала и его результаты.** Для того чтобы решить первую задачу, было проведено численное моделирование механизма разрушения массива вокруг подготовительной выработки. Решение поставленной задачи выполнялось с использованием программного комплекса ANSYS [3].

Участок массива, рассмотренный в статье [2], был расширен. В него были включены лава и участок выработки впереди

неё. Линейные размеры модели составили: длина участка выработки впереди лавы — не менее длины зоны опорного давления  $l_{оп} = 50$  м [4]; длина участка выработки за лавой принималась равной шагу первичной посадки ( $Ш_0 = 50$  м) для первой пары моделей с шахтным и предлагаемым вариантом охранного сооружения, а для второй пары — шагу последующих посадок ( $Ш_n = 15$  м); размер участка массива в кровлю, почву и бока выработки принимался равным не менее четырёх наибольших размеров выработки — 30 м, — чтобы быть соизмеримым с остальными размерами модели. Дополнительными исходными данными для решения нелинейной стационарной пространственной задачи механики деформируемого твёрдого тела были параметры механических свойств горных пород (прочность на сжатие  $\sigma_{сж}$ , прочность на растяжение  $\sigma_p$ , модуль упругости  $E$ , коэффициент Пуассона  $\mu$ , сцепление  $C$ , угол внутреннего трения  $\phi$ , угол дилатансии  $\delta$ , плотность  $\gamma$ ) [5–9] и охранных сооружений (табл. 1)

Паспорт участка был разбит на блоки (рис. 1). Для каждого блока были определены несущая способность, модуль деформации и объёмный вес. Результаты расчётов сведены в таблицу 1.

После геометрического построения модели, задания свойств материалов и присвоения получившимся объёмам их свойств модель разбивалась объёмными элементами без промежуточных узлов на гранях Solid45 (этот тип элемента поддерживает модель Друкера — Прагера). Затем между соприкасающимися объёмами в модели создавались контактные пары, использующие стандартный тип контакта. После этого модель закреплялась по нижней и боковым граням во избежание перемещений. На верхнюю грань модели прикладывалась равномерно распределённая нагрузка ( $P = 12,8$  МПа), моделирующая вес оставшихся до поверхности пород. Кроме того, к модели была применена объёмная нагрузка в виде поля гравитацион-

ных сил. Далее выбирался тип анализа (статический) и его опций (включены эффекты большой деформации и предварительного напряжения, использовался полный Ньютон — Рафсон с несимметричными матрицами элементов), указывались опции для шага нагружения (расчёт всех элементов решения, плавное приложение нагрузки и разбивка шага нагрузки на подшаги), после чего производился расчёт.

При решении второй задачи измерялись следующие параметры: максимальный зазор ( $gap_{max}$ , м) максимальные контактные давления ( $P_{cont. max}$ , МПа) и их расположение ( $x, y, z$ ) для каждой контактной пары в отдельности и для модели в целом, а также максимальные сжимающие ( $\sigma_3$ , Па) и растягивающие напряжения ( $\sigma_1$ , Па) и их расположение ( $x, y, z$ ) для каждого объёма в модели и для модели в целом.

С помощью теории прочности Мора  $\sigma_{пр} \leq [\sigma]$  [10] были вычислены: объём разрушенных от сжатия и растяжения элементов в породных слоях и в охранных сооружениях; объём разрушенных от сжатия контактных элементов для каждой контактной пары в отдельности; процент расслоившихся контактных элементов; процент поверхности охранного сооружения, которое работает, и при каком давлении это происходит.

Анализ результатов решения второй задачи позволил сделать следующие выводы: при использовании тумб с распором устье магистральной трещины формируется не от растяжения в основной кровле на контакте её с непосредственной, а от сжатия в непосредственной кровле на контакте её с дополнительным охранным сооружением со стороны выработанного пространства. Это происходит вследствие того, что тумбы с распором включаются в работу раньше традиционного охранного сооружения, снимают нагрузку с дополнительного охранного сооружения и с пласта со стороны массива и принимают её на себя. Полученный положительный эффект от использования тумб с распором был следствием того, что тумбы всей своей поверх-



ностью с первого подшага нагрузки включаются в работу по поддержанию выработки, в то время как БЖБТ тратят на это 47 % от шага нагрузки при  $III_0 = 50$  м и 71 % от шага нагрузки при  $III_n = 15$  м.

Кроме того, анализ результатов позволил сделать следующие выводы: с одной стороны, БЖБТ менее эффективны тумб с распором, т. к. они не разрушаются из-за того, что практически не участвуют в поддержании выработки (рис. 2, а); с другой — использование тумб с распором незначительно уменьшает разрушение от сжатия (рис. 2, а) и от растяжения (рис. 2, б), что исключает применение объёма разрушенных элементов в качестве критерия при выборе рациональных параметров тумб с распором.

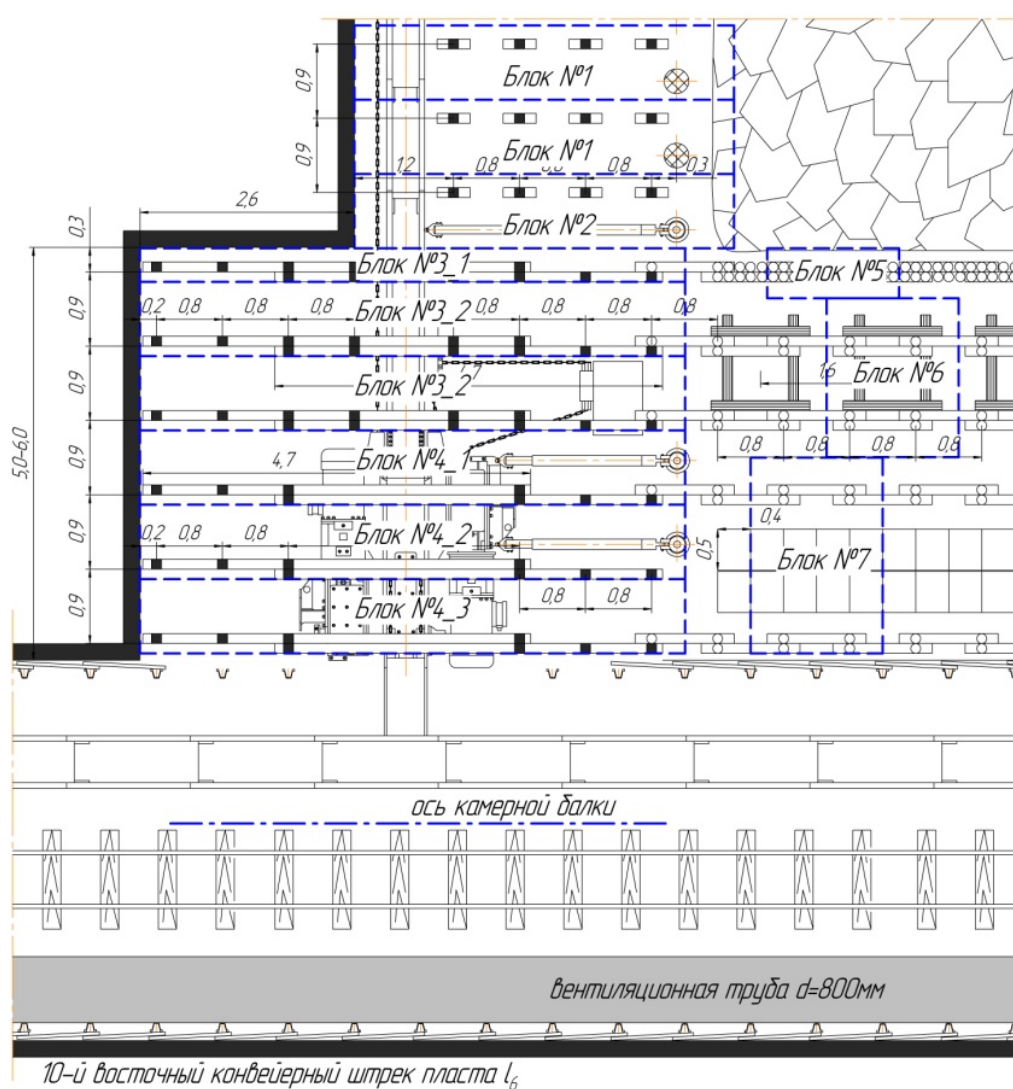
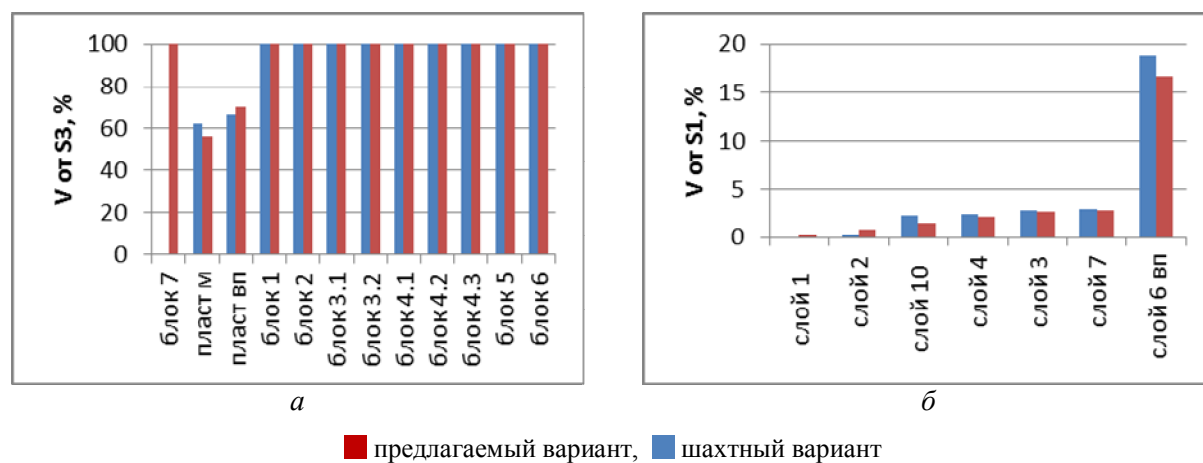
Для того чтобы решить третью задачу, при поиске нового критерия была прове-

дена линейная регрессия. Для неё в качестве зависимой переменной были использованы вертикальные смещения в своде выработки: 25 точек перед лавой, 25 точек за лавой; в качестве независимой переменной — контактные давления на опоре: 50 точек с максимальным значением контактного давления. Линейная регрессия была осуществлена для всех искусственных и естественных опор в плоскости пласта для всех подшагов нагружения. Её результатами были доля объяснённой дисперсии и знак коэффициента при независимой переменной. В 85,6 % случаев знак коэффициента при независимой переменной был отрицательным. Это означает, что увеличение контактных давлений на опоре ведёт к уменьшению смещений в кровле выработки.

Таблица 1

Свойства горных пород и охранных сооружений для условий шахты «Рассвет-1»

место	слой	порода	$m$ , м	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$E$ , МПа	$\mu$	$C$ , МПа	$\varphi$ , °	$\delta$ , °	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>
почва	0	Гл. сл.	10,36	60	10,41	27,85e3	0,14	12,5	45	45	2,73e3
	1	Песч. сл.	16,5	65	14,8	26,9e3	0,24	15,51	38,98	38,98	2,7e3
	2	Песчаник	4,5	85	16,34	22,77e3	0,395	18,63	42,66	42,66	2,62e3
	3	Песч. сл.	1,5	55	14,8	24,04e3	0,255	14,27	35,16	35,16	2,7e3
	4	Песч. сл.	0,6	50	14,9	22,62e3	0,263	13,65	32,74	32,74	2,7e3
пласт	5	Уголь	0,73	15	1,5	0,42e3	0,08	9,9	38	28	1,52e3
кровля	6	Песчаник	2	66	12,49	18,51e3	0,372	14,35	43	43	2,62e3
	7	Песчаник	11	85	16,34	22,77e3	0,395	18,63	42,66	42,66	2,62e3
	8	Песч. сл.	1,6	70	14,9	28,33e3	0,232	16,15	40,47	40,47	2,7e3
	9	Известняк	1,7	80	14,2	22,56e3	0,17	17	44,31	44,31	2,67e3
	10	Песч. сл.	16,33	65	14,8	26,90e3	0,24	15,51	38,98	38,98	2,7e3
блок 1			—	0,52	—	4,74	0,3	—	—	—	117,7
блок 2			—	0,18	—	1,8	0,3	—	—	—	184,3
блок 3_1			—	2,18	—	24,43	0,3	—	—	—	195,5
блок 3_2			—	0,98	—	11,14	0,3	—	—	—	98,6
блок 4_1			—	0,98	—	11,19	0,3	—	—	—	282,7
блок 4_2			—	0,24	—	1,99	0,3	—	—	—	322,4
блок 4_3			—	0,93	—	10,64	0,3	—	—	—	271,8
блок 5			—	9,51	—	943,26	0,3	—	—	—	171,1
блок 6			—	11,59	—	146,89	0,3	—	—	—	78,9
блок 7 (шахтный/ предлагаемый вариант)			—	11,36/ 24,04	—	133,55/ 269,37	0,3	—	—	—	200,3/ 417,7

Рисунок 1 Разделение паспорта поддержания 10-го восточного конвейерного штрака пл.  $I_6$  на блокиРисунок 2 Диаграмма объёма разрушенных элементов по блокам в паспорте и по слоям в массиве: а) от сжатия  $V$  от  $\sigma_3$ , %, б) от растяжения  $V$  от  $\sigma_1$ , %;

Для того чтобы решить четвертую задачу, были построены графики зависимости доли объяснённой дисперсии от давления на верхнюю грань модели, которые показывали вклад опоры в поддержание выработки. Они позволили выделить главные и вспомогательные опоры. К главным относятся те, на которые кровля опускается в первую очередь и вклад которых в поддержание выработки не уменьшается даже после того, как напряжения во всех её элементах не превысят предел прочности на сжатие (пласт со стороны выработанного пространства; крепь в лаве (рис. 3, а); крепь в нише, расположенная напротив костров). К вспомогательным опорам относятся те, вклад которых в поддержание выработки уменьшается по мере их разрушения (пласт со стороны массива; костры; органная крепь, БЖБТ и тумбы с распором (рис. 3, б), а также крепь в нише, расположенная напротив). Таким образом, тумбы с распором относятся к вспомогательным опорам. Очевидно, что для них увеличение площади под кривой доли объяснённой дисперсии означает увеличение работы по поддержанию выработки, которая может служить критерием при выборе их рациональных параметров. Увеличение площади под кривой разру-

шения естественных и искусственных опор и слоёв пород будет означать, что начало разрушения наступило раньше.

Для того чтобы решить пятую задачу, для данных горно-геологических условий при шаге первой и последующих посадок кровли, были отработаны ещё 48 моделей (для шага первой посадки — 24 модели, ещё 24 модели — для шага последующих посадок). Эти модели разнились модулем деформации предлагаемого охранного сооружения. Такое количество моделей обусловлено построением шести латинских кубов. Для каждого количества рядов тумб с распором (с расположением распорного элемента сверху охранного сооружения [1])  $n_{ряд}^{on} = 1; 2; 3$  для каждого диаметра породы  $d_{nop} = 5...10$  мм;  $10...20$  мм был составлен латинский куб, в котором два параметра (диаметр трубки  $d_{mp}$ , м и шаг установки опалубок  $L_{on}$ , м) варьировались на четырёх уровнях. Диаметр опалубки был постоянным и равным диаметру стандартной бочки из-под масла  $D_{on} = 0,57$  м [11], которую можно получить бесплатно. Далее были построены графики зависимости площади под кривой доли объяснённой дисперсии от модуля деформации тумб (рис. 4).

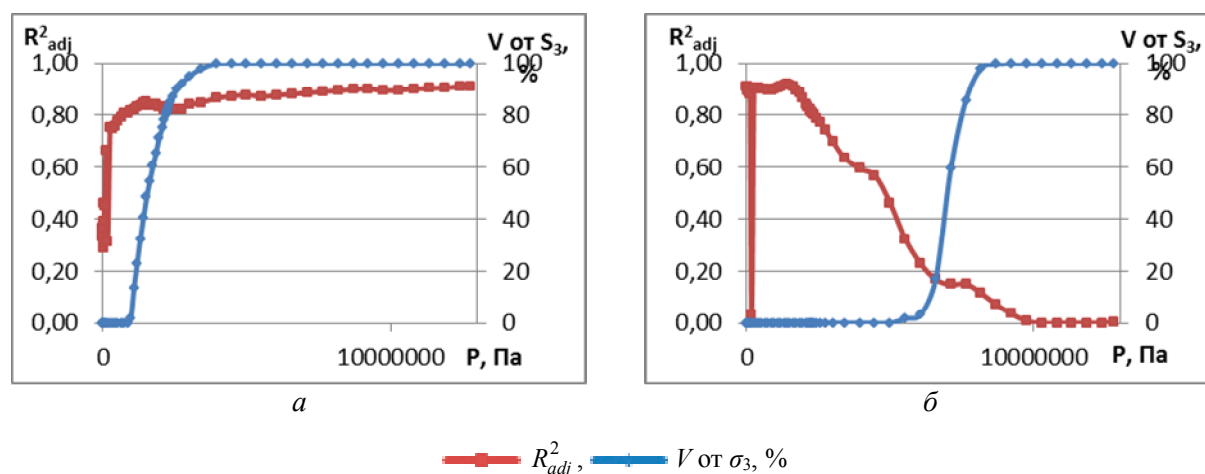


Рисунок 3 График зависимости доли объяснённой дисперсии  $R_{adj}^2$  и объёма разрушенных от сжатия  $V$  от  $\sigma_3$ , % элементов от давления, прикладываемого к верхней грани модели  $P$ , Па (предлагаемый вариант): а) для блока 1, б) для блока 7

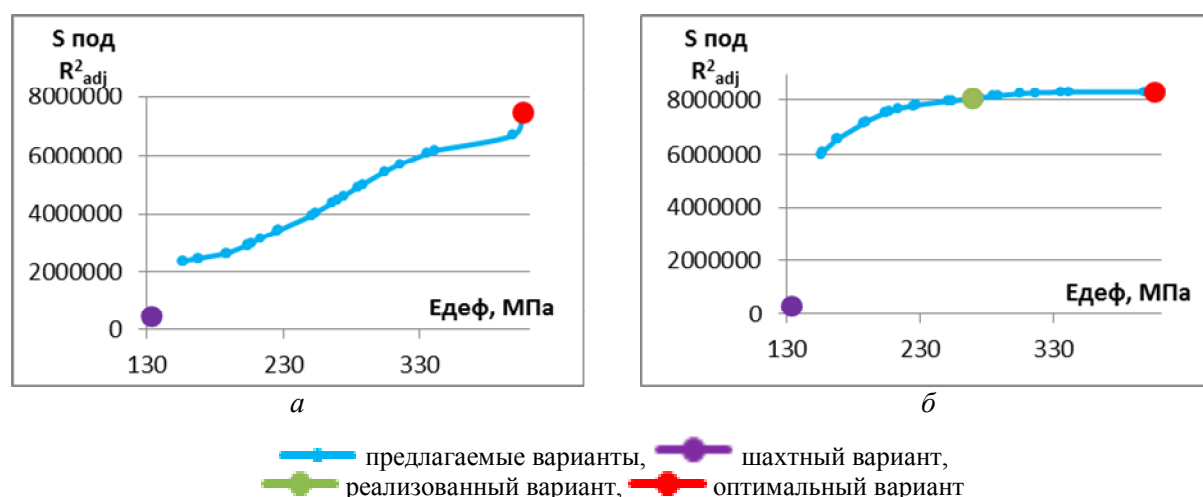


Рисунок 4 График зависимости площади под кривой доли объяснённой дисперсии  $S$  под  $R^2_{adj}$  от модуля деформации тумбы с распором  $E_{def}$ , Па: а)  $I_0 = 50$  м, б)  $I_n = 15$  м

Анализ графиков показал, что увеличение модуля деформации с распором ведёт к увеличению площади под кривой доли объяснённой дисперсии, как при шаге первой посадки ( $I_0 = 50$  м), так и при шаге последующих посадок кровли ( $I_n = 15$  м).

Для того чтобы решить шестую задачу, были рассчитаны суммарные затраты на материалы и оплату труда для шахтного и предлагаемого вариантов, а также затраты при варьировании параметров последнего. Оказалось, что даже самый дорогой вариант реализации тумб с распором дешевле реализации шахтного варианта охранного сооружения в 3,94 раза.

Поскольку затраты на реализацию предлагаемого способа в данных горно-геологических условиях не являются ограничивающим фактором, то рациональными параметрами будут те, что соответствуют максимальному модулю деформации тумб ( $E_{def,max} = 405$  МПа), а именно: диаметр опалубки  $D_{on} = 0,57$  м, высота опалубки  $H_{on} = 0,55$  м, шаг установки опалубок  $L_{on} = 0,8$  м, диаметр трубки  $d_{mp} = 0,14$  м, диаметр породы  $d_{пор} = 5...10$  мм, количество рядов опалубок  $n_{ряд}^{on} = 3$ .

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. При использовании тумб с распором устье магистральной трещины формируется не от растяжения в основной кровле на контакте её с непосредственной, а от сжатия в непосредственной кровле на контакте её с дополнительным охранном сооружением со стороны выработанного пространства. Это происходит вследствие того, что тумбы с распором включаются в работу раньше традиционного охранного сооружения, снимают нагрузку с дополнительного охранного сооружения и с пласта со стороны массива и принимают её на себя. Полученный положительный эффект от использования тумб с распором был следствием того, что тумбы всей своей поверхностью с первого подшага нагрузки включаются в работу по поддержанию выработки, в то время как БЖБТ тратят на это 47 % от шага нагрузки при  $I_0 = 50$  м и 71 % от шага нагрузки при  $I_n = 15$  м.

2. Теснота связи между вертикальными смещениями в своде выработки и контактными давлениями на естественной или искусственной опоре, выраженная как доля объяснённой дисперсии, отражает вклад опоры в поддержание выработки.

3. По изменению доли объяснённой дисперсии на протяжении шага нагружения модели опоры делятся на главные и вспомога-

тельные. К главным относятся те, на которые кровля опускается в первую очередь и вклад которых в поддержание выработки не уменьшается даже после того, как напряжения во всех её элементах не превысят предел прочности на сжатие. К вспомогательным опорам относятся те, вклад которых в поддержание выработки уменьшается по мере их разрушения. Тумбы с распором относятся к вспомогательным опорам.

4. Увеличение площади под кривой доли объяснённой дисперсии означает увеличение работы по поддержанию выработки. Таким образом, площадь под кривой доли объяснённой дисперсии — критерий при выборе рациональных параметров тумб с распором.

5. В условиях шахты «Рассвет-1» увеличение модуля деформации тумб с распором ведёт к увеличению площади под кривой доли объяснённой дисперсии. В

данных горно-геологических условиях затраты на реализацию предлагаемого способа не являются ограничивающим фактором, и рациональными параметрами тумб являются те, которые дают максимальный модуль деформации ( $E_{\text{деф. max}} = 405$  МПа): диаметр опалубки  $D_{\text{оп}} = 0,57$  м, высота опалубки  $H_{\text{оп}} = 0,55$  м, шаг установки опалубок  $L_{\text{оп}} = 0,8$  м, диаметр трубки  $d_{\text{тр}} = 0,14$  м, диаметр породы  $d_{\text{пор}} = 5 \dots 10$  мм, количество рядов опалубок  $n_{\text{ряд}}^{\text{оп}} = 3$ .

Поскольку выполненные исследования подтвердили эффективность использования тумб с распором в качестве основного охранного сооружения, то дальнейшие исследования будут направлены на установление эффективности их использования в качестве дополнительного охранного сооружения и определения их рациональных параметров.

### Библиографический список

1. Касьян, Н. Н. Лабораторные исследования несущей способности охранных сооружений с распорным элементом [Текст] / Н. Н. Касьян, Н. Н. Малышева, И. Г. Сахно // *Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр.* — Днепропетровск : ИГТМ НАНУ, 2012. — Вып. 105. — С. 161–168.
2. Сахно, И. Г. Изучение динамики развития деформационных процессов и трещинообразования в породном массиве вокруг выработки, поддерживаемой за лавой [Текст] / И. Г. Сахно, Н. Н. Малышева, В. Е. Нефёдов // *Науковий вісник Національного гірничого університету.* — 2014. — № 6. — С. 46–51.
3. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера [Текст] : практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. — М. : Едиториал УРСС, 2003. — 272 с.
4. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР [Текст]. — Л. : ВНИМИ, 1986. — 222 с.
5. Охрана капитальных выработок от влияния очистных работ [Текст] / Ю. М. Басинский, В. Ф. Водянов, В. М. Кулешов и др. — К. : Техника, 1983. — 140 с.
6. Исследования физико-механических свойств горных пород глубоких шахт Донбасса [Текст] / И. Л. Черняк, Р. И. Григорьев, Р. А. Фрумкин, В. А. Дорыкин, Нгуен Зань Фьен // *Технология добычи угля подземным способом.* — 1967. — № 7. — С. 35–39.
7. СП 64.13330.2011. Строительные нормы и правила. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 [Текст]. — М. : [б.и.], 2011. — 92 с.
8. СНиП II-V.4-71. Строительные нормы и правила. Часть II, раздел В, глава 4. Деревянные конструкции. Нормы проектирования [Текст]. — М. : [б.и.], 2014. — 33 с.
9. Канин, В. А. Физико-технические основы охраны выемочных выработок в условиях неустойчивых пород : дис. ... докт. техн. наук : 05.15.02 / Канин Владимир Алексеевич. — Донецк, 2010. — 364 с.
10. Изучаем сопротивление материалов [Электронный ресурс] : теория прочности Мора. — Режим доступа: <http://sopromat.in.ua/handbook/teoriya-prochnosti-mora> (дата обращения: 08.11.2017).

11. ГОСТ 13950-91. Бочки стальные сварные и закатные с гофрами на корпусе. Технические условия [Текст]. — Введ. 1993-01-01. — М. : ИПК Изд-во стандартов, 2002. — 34 с.

© Малышева Н. Н.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. зав. каф. СЗПСиГ ДонНТУ Борщевским С. В.,  
к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Леоновым А. А.*

*Статья поступила в редакцию 13.02.20.*

**Малишева Н. М.** (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР, rpm@mine.donntu.org)

**ВПЛИВ ЧАСУ ВСТУПУ В РОБОТУ ОХОРОННОЇ СПОРУДИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ  
ПІДТРИМАННЯ ВИРОБКИ В УМОВАХ ШАХТИ «РАССВЕТ-1»**

*Роботу присвячено дослідженню впливу часу вступу в роботу охоронної споруди (наявності/відсутності зазору між покрівлею і охоронною спорудою, а також її несучої здатності) на ефективність підтримання виробки. Запропоновано охоронну споруду, яка вступає в роботу протягом доби. Обґрунтовано її раціональні параметри.*

**Ключові слова:** охоронна споруда, тумба з розпором, ANSYS, частка поясненої дисперсії, модуль деформації.

**Malysheva N. N.** (DonNTU, Donetsk, DPR, rpm@mine.donntu.org)

**INFLUENCE OF TIME OF PILLAR ENTRY INTO SERVICE ON THE EFFICIENCY  
MAINTENANCE OF WORKING IN MINE “RASSVET-1”**

*The paper is devoted to study the influence of time of pillar entry into service (presence/absence of a clearance between the roof and the pillar and its load-bearing strength) on the efficiency maintenance of working. The pillar that comes into service within a day is proposed. Its rational parameters are justified.*

**Key words:** pillar, pedestal with strut, Ansys, fraction of explained variance, modulus of deformation.



**МЕТАЛЛУРГІЯ  
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

---

---

**МЕТАЛУРГІЯ  
ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

---

---

**METALLURGY  
AND MATERIAL SCIENCES**





УДК 669.18.013

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

## РЕАЛИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ СОЗДАНИЯ МИКРО- И МИНИ-ЗАВОДОВ В УСЛОВИЯХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ

*Рассмотрены основные тенденции реализации стратегии создания микро- и мини-заводов в условиях металлургического комплекса России. Проведён анализ введённых в эксплуатацию, строящихся и нереализованных проектов предприятий с небольшими объёмами производства с точки зрения номенклатуры выпускаемой продукции, финансовых вложений, географического размещения, технологической схемы, а также эффективности производства отдельных видов металлопроката в сравнении с интегрированными предприятиями. Показана целесообразность реализации рассматриваемой стратегии для неметаллургических регионов России, значительно удалённых от производителей металлопродукции, а также для обеспечения рынка малотоннажными партиями дефицитного проката и изделий с высокой добавленной стоимостью.*

**Ключевые слова:** стратегия, металлургия, сталь, микрозавод, мини-завод, интегрированные предприятия, преимущества, продукция, сортовой прокат, арматура.

В странах СНГ до недавнего времени темпы развития мини-металлургии оставались крайне неудовлетворительными, что во многом связано со значительным промышленным спадом, наблюдавшимся накануне и после распада СССР в 90-е годы XX века, а также мировым финансово-экономическим кризисом, начавшимся в 2008 г. и продолжающимся для некоторых стран в настоящее время. В этих условиях для большинства производителей стали можно выделить две основные особенности, характеризующиеся минимальной нагрузкой существующих интегрированных предприятий и переориентацией сбыта металлолома на внешние рынки. В то же время, несмотря на резкий спад спроса на металлопродукцию, большинство введённых в работу микро- и мини-заводов сохранили достаточную устойчивость, особенно с точки зрения номинальных объёмов производства. Характерный для отдельных предприятий этой группы спад на уровне 30–50 % следует рассматривать как определённый сигнал к повышению конкурентоспособности продукции.

Для повышения устойчивости к кризисным явлениям, с учётом опыта ведущих мировых металлопроизводителей, в по-

следние годы в России, Украине, Казахстане и других странах содружества наблюдается положительная динамика в проектировании и строительстве металлургических микро- и мини-производств. Эти предприятия стратегически ориентированы на определённые ниши рынка и могут представлять серьёзную конкуренцию для традиционных производителей стали за счёт более выгодного географического расположения, использования местных ресурсов и условий.

Кроме того, новый металлургический комбинат полного цикла годовой мощностью 5,5 млн т стали нужно строить не менее 5–7 лет при расходе инвестиций более \$8,5 млрд и сроке окупаемости затрат более 10 лет.

Мини-завод годовой мощностью 1,8 млн т проката потребует инвестиций \$600 млн. Следовательно, три мини-завода совокупной мощностью 5,4 млн т обойдутся инвестору в \$1,8 млрд против \$8,5 млрд при строительстве комбината полного цикла. Затраты мини-завода окупаются в течение 5–7 лет и зависят от конъюнктуры рынка [1–3].

Если же мини-заводы строить в условиях существующей инфраструктуры закон-

сервированных, перепрофилируемых или действующих крупных предприятий с сохранением электрических, газовых, водных, транспортных сетей, складов, бытовых помещений и т. п., то понятно, что их строительство будет ещё дешевле.

Кроме капитальных вложений микро- и мини-заводы привлекательны с точки зрения решения проблем рационального снабжения металлопродукцией так называемых неметаллургических регионов, возможности сконцентрировать внимание на нуждах одного сегмента рынка или конкурентной группы покупателей, минимизации издержек производства и реализации своей продукции [4], гибкости при перевооружении, модернизации и внедрении новых технологических решений, экологии и т. д.

По данным работы [3], уже в 2007 г. российские микро- и мини-заводы обеспечивали почти 25 % объёма производимой стали. Примерно такая же доля в объёмах производства характерна для мини-заводов Казахстана. В Украине имевшиеся на 2014 г. малые металлургические заводы обладали потенциалом производительности около 6,5 млн т стали в год, однако в связи с различными проблемами фактическое производство составило всего 2,5 млн т/год, или 7,5 % от общего объёма произведённой в этот период стали.

В ближайшей перспективе строительство мини-заводов на территории СНГ продолжится даже несмотря на кризисные явления. Однако, на наш взгляд, предпочтение будет отдаваться в первую очередь заводам небольшой производительности, специализирующимся на качественной продукции.

Несомненным лидером среди металлургических стран СНГ является Россия. В её металлургическом комплексе сочетаются все элементы стратегии металлургического производства, свойственные технологиям, используемым независимыми государствами, образовавшимися после распада СССР.

Поэтому основная *цель данной работы* заключалась в анализе состояния и оценке перспектив развития мини- и микропроиз-

водств в условиях металлургического комплекса России для последующего использования полученных данных при разработке стратегии развития экономики Народных Республик Донбасса.

*Объект исследования:* металлургический комплекс России.

*Предмет исследования:* особенности создания и функционирования металлургических мини- и микрозаводов.

*Методы исследования:* анализ и оценка эффективности различных стратегий развития металлургии.

Специфика развития мини-металлургии в России такова, что производителями, резко нарастившими выпуск строительного проката и, в первую очередь, стальной арматуры, прежде всего, стали классические металлургические предприятия, модернизовавшие существующие или основывшие новые цеха, которые начали работать по «урезанной» мини-технологии. К таким предприятиям в первую очередь необходимо отнести Челябинский (ПАО «Мечел») и Череповецкий (ЧерМК, ПАО «Северсталь») металлургические комбинаты, ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК), ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (НЛМК). Существенные объёмы производства металлопродукции строительного назначения приходится на ОАО «Амурметалл», ЗАО «Ниже-Сергинский метизно-металлургический завод» (НСММЗ), ОАО «Ревякинский металлургический завод» и другие предприятия, относящиеся к категории мини-заводов.

На сегодняшний день номенклатура российских микро- и мини-заводов представлена не только арматурой и включает в себя достаточно широкий спектр узкоспециализированных видов проката (уголок, швеллер, катанка, шары, лист и т. д.), пользующегося повышенным спросом, особенно в отдалённых и неметаллургических регионах.

ОАО «Гурьевский металлургический завод» (Сибирь, Кемеровская область) имеет в своём составе легко перенастраи-

ваемые линейные прокатные станы, что позволяет производить желаемые, в том числе и небольшие, партии проката сложного профиля любой конфигурации. Кроме того, это предприятие является поставщиком практически четверти всех мелющих шаров, используемых в измельчении минерального сырья России и СНГ.

АО «Омутнинский металлургический завод», расположенный в Кировской области, является одним из крупнейших производителей стальных фасонных профилей высокой точности для автомобилестроения, лифтостроения, горнодобывающей промышленности, станкостроения, судостроения.

Начавший работу в 2015 г. в Рязанской области завод высокопрочного крепежа «Бервел» производит калиброванный прокат и высокопрочный крепёж [5].

Известная компания «Норильский никель», потребляющая на строительные и эксплуатационные нужды около 150 тыс. т металлопродукции в год, реализует проект, предусматривающий строительство небольшого металлургического предприятия на базе принадлежащего ей ремонтно-механического завода. С целью расширения номенклатуры и объёмов производства проектом предусмотрено строительство шаропрокатного стана для мелющих шаров. Ожидается, что мощность нового производства составит 50–70 тыс. т в год и позволит частично обеспечить собственные потребности компании в металлопродукции [6].

Есть проработки по эффективному производству российскими микроразводами, например Миньярским прокатно-термическим заводом, плоского проката. Производство полосы из специальных сталей шириной 350–500 мм в рулоне может быть достаточно эффективным и высокорентабельным [6].

Основными предпосылками расширения сети металлургических микро- и мини-заводов в России являются значительная удаленность производителей от многих потенциальных потребителей металлопродукции, а также имеющиеся в от-

дельных регионах достаточные и относительно дешёвые источники сырья и в первую очередь металлического лома. К примеру, в европейских странах доставка металлопродукции на расстояние свыше 700 км считается нерентабельной, а в условиях России расходы на перевозку металла достигают иногда 20–30 % [7] от его продажной цены. Кроме того, Россия ежегодно экспортирует более 4 млн т лома, который может успешно использоваться новыми металлургическими предприятиями с небольшими объёмами производства, вводимыми в эксплуатацию в регионах непосредственного его накопления.

Современная российская история создания металлургических мини-заводов по производству стали началась с ввода в эксплуатацию мини-заводов ООО «Новоросметалл» в 2001 г. и АО «Волга-Фэст» в 2003 г., работающих по «урезанной» первой модели Nucor (переплавка лома в дуговой сталеплавильной печи (ДСП), машина непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), прокатный стан).

В 2007 г. УК «ЭСТАР» запустила новое производство стали по мини-технологии в г. Шахты (Ростовская область). Также в 2007 г. при финансовой поддержке правительства г. Москвы в г. Ярцево (Смоленская область) было запущено Государственное унитарное предприятие «Литейно-прокатный завод» (ГУП «ЛПЗ») мощностью 300 тыс. т стали в год для снабжения строительного комплекса г. Москвы сортовым прокатом, а также переноса металлургического производства завода «Серп и Молот» за её пределы [8].

На примере создания этого предприятия можно проиллюстрировать целый ряд преимуществ малых металлургических производств, особенно для депрессивных регионов, испытывающих серьёзные проблемы с рынком труда. В г. Ярцево стоял полузаброшенный, обанкроченный завод, являющийся филиалом завода ЗИЛ, производящий различные литые детали и заготовки для автомобилестроения. Предпри-

ятие попало в ситуацию, когда спрос на его продукцию прекратился, и технология практически умерла. Остановка завода негативно сказалась на городском хозяйстве, а жителей вынудила ездить за 350 км вахтенным способом на работу в г. Москву.

Начало строительства, или преобразование, этого брошенного завода в новый металлургический мини-завод вдохнуло жизнь как в город, так и в горожан. Для создания нового предприятия понадобились усилия нескольких тысяч человек, что привело к появлению новых рабочих мест и, соответственно, повышению занятости населения.

Кроме того, вокруг завода появились дочерние предприятия, которые снабжали его строительными материалами, началась реконструкция сетей, в том числе инженерных и бытовых, которые обеспечивали, собственно, и город. Возобновилось строительство жилья для работников этого завода, особенно привлечённых, потому что при создании нового предприятия рынок местных специалистов, как правило, крайне ограничен [6].

В последние годы в России идёт активное строительство и ввод новых мощностей как крупными, так и малыми металлургическими компаниями, которые ввели и готовят к запуску более десятка мини- и микрозаводов.

В основном это инвестиции, которые планировались российским бизнесом ещё до кризиса в 2005–2007 годах с расчётом на будущий рост потребления. Теперь замороженные инвестиционные проекты постепенно реализуются. Спрос на металлургическую продукцию в стране хоть и растёт, но не так быстро, как хотели бы производители.

В 2010 г. ООО «Абинский электрометаллургический завод» — предприятие по производству арматурной стали, расположенное на Юге России и входящее в состав компании «Новороссметалл» (оптовый заготовитель и экспортёр металлолома), — запустило в эксплуатацию первую очередь комплекса мелкосортного стана, а

в 2013 г. ввело в строй оборудование по выпуску стальной литой заготовки мощностью 0,95 млн т/год.

ООО АМК «СибирьСталь» имеет малый металлургический завод в г. Новосибирске (СФО), оснащённый электропечью, МНЛЗ и прокатной линией, начавший освоение своих производственных мощностей с 2010 г. Производительность предприятия составляет около 50 тыс. т сортового проката в год. В основном завод выпускает из металлолома строительную арматуру класса А-III (А400) и А-I (А240).

В 2013 г. на ООО «Волжский ЭлектроМеталлургический Завод» введён в эксплуатацию сортопрокатный стан компании Perimer (Турция) производительностью 120 тыс. т/год [9] по выпуску арматуры класса А500С диаметром 6–18 мм для строительных предприятий, прежде всего, Ивановской и соседних областей (Ярославской, Владимирской, Костромской и Московской), а также АО «Северсталь — Сортовой завод Балаково» и ООО «НЛМК-Калуга», строительство которых происходило при поддержке крупнейших российских холдингов ПАО «Северсталь» и ПАО «НЛМК».

9 июля 2013 г. запустило металлопрокатное производство ООО «Тульский комбайновый завод» в Щегловской засеке, конечной продукцией которого являются арматурная сталь и специальные профили. Уникальность данного производства состоит в том, что исходным сырьём для него являются рельсы, отслужившие свой срок.

На ООО «Завод УГМК „Электросталь Тюмени“» (входит в состав компании «УГМК-Сталь») в августе 2013 г. выпущены первые опытные партии квадратной заготовки сечением 125 мм. В состав предприятия входит сталеплавильный цех (560 тыс. т/год): ЭДП, сортовая МНЛЗ, агрегат внепечной обработки стали «ковш-печь» (АКП) и вакууматор. Также построены прокатный стан производительностью 550 тыс. т/год сортового проката строительного сортамента (в частности, кругов, арматуры диаметром 8–32 мм,

уголка с полкой 32–100 мм) и линия отделки. Поставщиками оборудования являются итальянские компании Danieli и Siad.

В ноябре 2013 г. остановлено мартеновское производство на реконструированном ПАО «Таганрогский металлургический завод». Разливаемая с 2006 г. на 5-ручьева блюмовой МНЛЗ мартеновская сталь заменена электросталью, выплавляемой в новой ЭДП компании SMS Demag (Германия) годовой производительностью 950 тыс. т. Из общего объёма около 500 тыс. т трубной заготовки в год предполагается использовать для обеспечения собственного трубопрокатного производства, а остальная будет экспортироваться.

В июле 2016 года начал свою работу АО «Камский металлургический комбинат „ТЭМПО“» проектной мощностью 500 тыс. т/год квадратной заготовки и строительной арматуры. Производственные мощности предприятия позволяют выпускать арматуру горячекатаную для армирования железобетонных конструкций и арматуру термомеханическую упорочнённую, предназначенные для армирования обычных и предварительно напряжённых железобетонных конструкций.

В настоящее время заканчивается строительство второй очереди сортопрокатного стана «550/300» (мощность порядка 200 тыс. т/год) на ООО «Ростовский электрометаллургический завод», входящем в ПАО «Мечел».

В г. Калаче-на-Дону Волгоградской области будет построен литейно-прокатный комплекс ООО «Цимлянский литейно-прокатный завод» с выплавкой стали в ЭДП, внепечной обработкой в АКП и непрерывной разливкой. Комплекс предлагается разместить на производственных площадях недействующего в настоящее время авторемонтного предприятия. Завод будет производить арматуру для строительных и других металлопотребляющих предприятий в объёме 200 тыс. т/год.

В Ростовской области компанией «Дон-Металл» реализуется инвестиционный

проект по строительству в г. Каменск-Шахтинский металлургического завода по выпуску горячекатаной арматуры производственной мощностью 250 тыс. т/год для РФ и стран СНГ. Объём инвестиций по проекту составит 3,3 млрд руб. На предприятии будет создано 480 рабочих мест. В настоящее время построена трансформаторная подстанция, подготовлена проектно-сметная документация на строительство подъездных железнодорожных путей, завершается возведение производственного корпуса, закуплено оборудование для выпуска строительной арматуры. Однако необходимо отметить, что строительство отстает от графика и его завершение планируется в 2021 г.

Планируется построить новое металлургическое предприятие по производству сортового металлопроката и в г. Пикалево Ленинградской области. Мини-завод с собственным сталеплавильным цехом сможет выпускать до 0,35 млн т готовой металлопродукции в год. Намечено, что данный проект будет полностью разработан и реализован компанией Danieli (Италия). В его основу будет положено техническое решение Danieli на примере микрозавода Mi.Da, построенного в 2009 г. в г. Месса (штат Аризона, США). По предварительным расчётам предприятие обеспечит вливания в бюджеты всех уровней от 1,0 млрд руб., а также создание 400 новых рабочих мест и более 1500 рабочих мест в смежных производствах на территории Ленинградской области. Реализация проекта намечена на 2020 год.

Начаты работы по строительству микрозавода в посёлке Нижний Бестях в Якутии. Это будет первый в мире металлургический завод, который строится на вечной мерзлоте. Несмотря на достаточно большие строительные затраты по подготовке площадки на вечной мерзлоте, ожидаемые экономические показатели нового предприятия являются весьма привлекательными. В силу удалённости этого региона от основных производителей стали пред-

полагаемая рентабельность микрозавода может превышать 35 %, а сроки окупаемости составят не более 2,5 лет [6].

В Брянской области предполагается строительство металлургического завода неполного цикла по производству наноструктурированного стального металлопроката из лома чёрных металлов производительностью около 200 тыс. т/год [5].

«Роснефть» планирует строительство металлообрабатывающего и металлопроизводящего комплекса для обеспечения нужд судостроения «Звезда» объёмом 330 тыс. т/год листа необходимого формата. Сварка малоразмерных листов стали в процессе судостроения до 50 % удорожает цену корпуса и до 10 % в целом по готовому изделию, а это очень большой показатель, снижающий конкурентоспособность. Ближайшим производителем необходимых листов является ЕВРАЗ Объединённый Западно-Сибирский металлургический комбинат (г. Новокузнецк), находящийся в 5000 км от Владивостока, а имеющийся в регионе ОАО «Амурметалл» не выдержал конкуренции на рынке и с 2013 года находится в стадии конкурсного управления.

Необходимо отметить, что далеко не все из заявленных с 2007 г. проектов металлургических микро- и мини-заводов были реализованы (табл.). Причём большая часть из них была ориентирована на европейские технологии и оборудование, которые после падения курса рубля в 2014 г. оказались очень дорогими [10].

Анализируя представленные в таблице проекты, можно отметить, что большая их часть не была реализована, прежде всего, из-за недостаточной финансовой состоятельности инвесторов, переоценки возможностей сбора стального лома в регионе строительства и в стране в целом, протестов местных жителей, а также из-за недоступности заёмных средств и роста стоимости оборудования в результате резкого ослабления курса рубля. Кроме того, определённую роль в этом процессе сыграл за-

пуск двух мощных сортовых заводов: в г. Балакове (ПАО «Северсталь») и в г. Калуге (ПАО «НЛМК»).

Практически все новые микро- и мини-заводы России предполагают использование в своей технологической схеме ЭДП ёмкостью 6–120 т в качестве плавильных агрегатов, внепечной обработки с использованием АКП, непрерывной разливки на сортовых МНЛЗ и сортопрокатного стана. ООО «Завод УГМК „Электросталь Тюмени“» помимо АКП использует в технологии вакууматор.

Необходимо отметить, что часть построенных малых металлургических предприятий на первом этапе строительства вводила в эксплуатацию мощности по производству товарной заготовки, а часть осваивала производство проката на привозном сырье, параллельно сооружая собственное производство по выплавке, внепечной обработке и разливке стали.

Высокорентабельный выпуск и быстрый рост спроса на экспортную стальную заготовку и арматуру, потребление которой было связано с ростом строительного рынка в России, сделали актуальным вопрос о быстром расширении этих производств. В связи с этим число таких проектов стало стремительно увеличиваться, существенно повышая конкуренцию на российском рынке металлопродукции, что в первую очередь связано с грозящим профицитом, обусловленным вводом в эксплуатацию новых современных производств.

Стратегия развития чёрной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года предполагает даже при консервативном сценарии рост внутреннего потребления стали на уровне 2,8–4 % [11]. Однако, по данным международного рейтингового агентства Moody's [12], в 2020 году рост спроса на сталь в РФ замедлится до 1–2 %, что может неизбежно привести к сокращению числа участников рынка, неспособных обеспечить конкурентоспособные параметры производимого продукта.

**МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Таблица

Некоторые проекты, не реализованные за последние годы в России

Название и расположение металлургического завода	Владелец, заявлен/срок запуска, объём инвестиций
Армавирский МЗ, г. Армавир, Краснодарский край, ЮФО	компания «ИСД» (Украина), 2007/2009 г., \$250 млн
«АВ-Сталь», г. Суровикино, Волгоградская область, ЮФО	финансовая группа Taurus Capital компании TESO Engineering и SSP Company Limited, 2009/2012 г.
Тихорецкий МЗ, Тихорецкий район Краснодарского края, ЮФО	2011/2014, 5 млрд руб.
«Донэлектросталь», Новоалександровский индустриальный парк, Ростовская область, ЮФО	2013/-, около 4,8 млрд руб.
Ковровский СПЗ, г. Ковров, Владимирская область, ЦФО	компания «Макси-Инвест», 2009/2012 г., \$485 млн
Металлургический завод, г. Мценск, Орловская область, ЦФО	компания «Сталькрон», 2009/-
«Лугас Металл Нижний Новгород», г. Балахна, Нижегородская область, ПФО	2009/2012 г.
«Татсталь», г. Лениногорск (Татарстан), ПФО	компания «Макси-Инвест», 2009/2013 г.
«Русполимет», Кулебакский ЭМЗ или на новой площадке в Нижегородской области, ПФО	компания «Русполимет», 2010/-
«Волгоцеммаш» (Тольятти), ПФО	2011/2015 г.
Электросталеплавильный комплекс на Чусовском металлургическом заводе, ПФО	2012/-
Металлургический завод в Башкортостане, ПФО	компания «Русарм», 2011/-, €200 млн
Микрозавод на Ижорских промышленных площадках, г. Санкт-Петербург, СЗФО	ООО «МЕРА-Сталь», компания Danieli, 2014/2017 г., 7,5 млрд руб.
Металлургический завод в Дагестане, на площадке простаивающего Дагестанского завода электротермического оборудования (г. Избербаш), СКФО	2013/-
«Сибэлектросталь», на базе старого советского завода, СФО	2011/-
Братский МЗ, пос. Гидростроитель, Иркутская область, СФО	Восточно-Сибирская металлургическая компания, 2013/-, около 6,6 млрд руб.
Завод в г. Ангарске, Иркутская область, СФО	компания «Иркутскэнерго», 2013/-, около 6 млрд руб.

Тем не менее анализ современного российского рынка строительного проката показывает, что там присутствует довольно большая доля импорта из Украины и стран СНГ, составляющая 17–18 % [13]. С усилением конкуренции импортёры будут вынуждены сократить своё присутствие в России. Это обусловлено тем, что их экспортный паритет сделает более выгодной продажу продукции и заготовки в страны дальнего зарубежья, нежели со-

хранение присутствия в прежних объёмах в России.

Попытки изменить ситуацию, при которой внутренний спрос на металлопродукцию удовлетворяется за счёт импорта, предпринимались в России многократно. Компаниями и государством разрабатывались соответствующие программы многие, из которых оказались вполне успешными. В качестве примера можно отметить отечественную переработку металлолома с



использованием микро- и мини-заводов. В результате реализации такой стратегии экспорт лома снизился с 12,8 млн т в 2004 г. до 4 млн т в 2016 г. Налажен выпуск труб большого диаметра, длинномерных рельсов. Значительно увеличен выпуск оцинкованной стали, в результате чего производств, занимающихся оцинкованием, стало уже не два, а 58. Также выросли показатели проката с полимерными покрытиями [14].

Кроме того, развитию российской мини-металлургии за последние годы в значительной степени способствовала реализация крупных инфраструктурных проектов, среди которых можно выделить зимнюю олимпиаду в г. Сочи, чемпионат мира по футболу в 2018 г., строительство моста через Керченский пролив, универсиаду в Красноярске в 2019 г., программу «Жильё для российских семей» и др.

В качестве основных выводов по данной работе можно отметить следующее:

– показавшая свою высокую эффективность мировая стратегия создания и развития микро- и мини-заводов успешно реализуется и в условиях металлургического комплекса России;

– с начала третьего тысячелетия в России введено в эксплуатацию и находится в стадии активного строительства более двух десятков металлургических микро- и мини-заводов;

– в ближайшей перспективе данный тип производств будет неуклонно развиваться, поскольку имеет ряд неоспоримых пре-

имуществ, заключающихся в возможности организовать производство в непосредственной близости от потребителя, более гибких условиях формирования портфеля заказов, ориентированных «на клиента» в производственном процессе и др.;

– несмотря на определённые трудности, российские предприятия с небольшими объёмами производства постепенно увеличивают общие объёмы выпуска проката и расширяют его номенклатуру. Если для первых их представителей основным видом продукции была арматура, то сейчас они сосредотачиваются на производстве малотоннажной продукции с высокой добавленной стоимостью;

– на примере России видно, что основная часть вновь создаваемых металлургических микро- и мини-заводов работает для удовлетворения потребностей внутреннего рынка и располагается преимущественно в регионах, значительно удалённых от традиционных сталеплавильных центров, а также в районах, испытывающих дефицит определённого вида металлопродукции и, прежде всего, проката строительного назначения. Наибольшую потребность в таких производствах испытывают районы, где быстрыми темпами развивается гражданское строительство и строительство инфраструктурных объектов.

В ходе дальнейших исследований предполагается проанализировать состояние и перспективы реализации стратегии микро- и мини-заводов в условиях металлургических комплексов стран СНГ.

### **Библиографический список**

1. Смоляренко, В. Д. Мини-заводы нового поколения : развитие на основе инноваций [Текст] / В. Д. Смоляренко // *Материалы семинара. Современная электрометаллургия.* — 2005. — № 3. — С. 68–69.
2. Чайка, В. В. Тенденции развития чёрной металлургии Украины как объекта инвестиций [Текст] / В. В. Чайка // *Актуальные проблемы экономики.* — 2007. — № 1. — С. 13–25.
3. Шевченко, Н. Плавильные лишения. Металлургия [Текст] / Н. Шевченко // *Бизнес.* — 2008. — № 47. — С. 105–107.
4. Смирнов, А. Н. Конкурентоспособность микро металлургических заводов: технологические аспекты [Текст] / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, И. В. Шутов, Д. В. Спиридонов // *Сб. науч. трудов.* — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — Вып. № 34. — С. 112–121.

5. Куберский, С. В. Актуальность создания микрозаводов в структуре металлургического комплекса Народных Республик Донбасса [Текст] / С. В. Куберский // Сб. науч. трудов. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — Вып. 17 (60). — С. 52–62.
6. Мини-миллы : преимущества и недостатки. Онлайн-конференция [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.metalinfo.ru/ru/magazine/livestreams/23>.
7. Сивак, Б. Современное состояние и перспективы развития мини-заводов по производству сортового проката [Текст] / Б. Сивак, А. Протасов // Национальная металлургия. — 2002. — № 2. — С. 38–46.
8. Металлургия малого формата [Текст] // Коммерсант «BUSSINESS GUIDE (Металлургия)». Приложение. — 2006. — № 91 (3422).
9. На Волжском ЭМЗ введён прокатный стан [Текст] // Металл-курьер. — 2013. — № 36 (1157). — С. 4.
10. Худалов, М. Бумажная металлургия. Коммерсант. «Металлургия». Приложение. — 2017. — № 241. — С. 18; То же [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://www.kommersant.ru/doc/3508369?from=doc\\_vrez](https://www.kommersant.ru/doc/3508369?from=doc_vrez).
11. Об утверждении Стратегии развития чёрной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года и Стратегии развития цветной металлургии России на 2014–2020 годы и на перспективу до 2030 года : приказ Минпромторга РФ от 5 мая 2014 г. № 839 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?](http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?)
12. Moody's : Рост спроса на сталь в РФ замедлится до 1–2 % в 2020 г. (22 октября 2019 года) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.finmarket.ru/news/5101348>.
13. Россия : Импорт проката чёрных металлов и стальных труб в РФ вырос в январе-августе 2019 года. Металл Украины и мира [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ukrmet.dp.ua/2019/10/11/rossiya-import-prokata-chernyh-metallov-i-stalnyh-trub-v-rf-vyros-v-yanvare-avguste-2019-goda.html>.
14. Буданов, И. Инновации в роли догоняющего [Электронный ресурс] // Российская газета. Спецвыпуск № 252 (7120). 07.11.2016. — Режим доступа: <https://rg.ru/2016/11/07/ekspert-metallurgii-nuzhdaetsia-v-nadezhnom-potrebitel-produkcii.html>.

© Куберский С. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТУ Должиковым В. В.,  
зам. нач. ЦЛК филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» Тарасовым В. Н.**

Статья поступила в редакцию 28.02.20.

**Куберський С. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)**

## **РЕАЛІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЇ СТВОРЕННЯ МІКРО- І МІНІ-ЗАВОДІВ В УМОВАХ МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ РОСІЇ**

Розглянуто основні тенденції реалізації стратегії створення мікро- і міні-заводів в умовах металургійного комплексу Росії. Проведено аналіз підприємств з невеликими обсягами виробництва, які введені в експлуатацію або будуються, а також нереалізованих проектів з точки зору номенклатури продукції, що випускається, фінансових вкладень, географічного розміщення, технологічної схеми, а також ефективності виробництва окремих видів металопрокату в порівнянні з інтегрованими підприємствами. Показано доцільність реалізації даної стратегії для неметалургійних регіонів Росії, значно віддалених від виробників металопродукції, а також для забезпечення ринку малотоннажними партіями дефіцитного прокату і виробів з високою доданою вартістю.

**Ключові слова:** стратегія, металургія, сталь, мікрозавод, міні-завод, інтегровані підприємства, переваги, продукція, сортовий прокат, арматура.

**PhD in Engineering Kuberskiy S. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**

**IMPLEMENTATION OF THE STRATEGY FOR CREATING MICRO-AND MINI-PLANTS  
IN CONDITIONS OF METALLURGICAL COMPLEX OF RUSSIA**

*The main trends in the implementation of the strategy for creating micro- and mini-plants in conditions of metallurgical complex of Russia are considered. There has been carried out the analysis of commissioned, under construction and not implemented projects of enterprises with small production volumes in terms of product range, financial investments, geographical location, technological scheme, as well as the efficiency of production of certain types of rolled metal in comparison with integrated enterprises. The expediency of implementing this strategy is shown for non-metallurgical regions of Russia that are significantly remote from steel producers, as well as for providing the market with low-tonnage lots of scarce rolled products and products with high added value.*

**Key words:** *strategy, metallurgy, steel, micro-plant, mini-plant, integrated enterprises, advantages, products, long products, reinforcement.*

УДК 621.73:06-52

к.т.н. Куберский С. В.,  
к.т.н. Коваленко О. А.,  
Мурга Е. В.,  
Мурга С. В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ И СПЛАВОВ

*Приведены результаты экспериментальных исследований влияния технологических параметров процесса лазерного упрочнения конструкционных, инструментальных сталей и твёрдых сплавов на износостойкость. Показано, что использование лазерной обработки со сложным импульсом накачки приводит к улучшению эксплуатационных характеристик обрабатываемой поверхности по сравнению с существующими аналогами и позволяет повысить износостойкость режущего инструмента из различных материалов в 1,4–1,8 раза, а скорость резания — на 11–47 %, что подтверждает технологичность лазерной обработки и её эффективность.*

**Ключевые слова:** упрочнение поверхности, лазерная обработка, режим питания лазера, импульс, гладкий, сложный, износостойкость, твёрдость.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Конкурентоспособность отечественной металлопродукции на мировом и внутреннем рынках в значительной степени определяется её себестоимостью и качеством, что необходимо учитывать на всех этапах металлургического передела от подготовки сырья до чистовой обработки металлов с целью получения готовых изделий.

Большую часть металлопродукции получают различными методами механической обработки и обработки давлением. При этом достаточно актуальным остаётся вопрос повышения стойкости металлообрабатывающего оборудования и инструмента, а также продления его ресурса на всех стадиях его жизненного цикла.

В настоящее время известно большое количество методов упрочнения инструментальных и конструкционных материалов. К таким методам можно отнести: нанесение покрытий, дробеструйную обработку, магнитно-импульсное упрочнение, термическую обработку и другие, позволяющие улучшать физико-механические свойства инструментальных и конструкционных материалов. Однако большинство традиционных мето-

дов, используемых для поверхностной обработки металлов и сплавов, являются энерго-, ресурсо- и трудоёмкими. Кроме того, следует отметить, что отдельные методы пригодны для упрочнения лишь ограниченного ассортимента материалов. Поэтому достаточно актуальной является разработка таких методов упрочнения, которые позволили бы улучшать физико-механические свойства широкого спектра инструментальных и конструкционных материалов при минимальных затратах на обработку.

В настоящее время наиболее эффективными и распространёнными способами упрочнения материалов являются методы поверхностного упрочнения [1], в том числе и лазерное упрочнение, рассматриваемое в данной работе.

Применительно к процессу лазерного упрочнения важной научно-практической задачей являются расширение технологических возможностей оборудования и разработка эффективных режимов обработки металлических поверхностей выбранным способом. Решение отмеченных задач представляется возможным при условии проведения всесторонних теоретических и экспериментальных исследований, на-

правленных на разработку рекомендаций по совершенствованию технологии и методов упрочнения.

**Цель** данной работы заключалась в оценке влияния технологических параметров процесса лазерного упрочнения на износостойкость изделий из конструкционных, инструментальных сталей и твёрдых сплавов.

**Объект исследования:** процесс упрочнения металлических изделий.

**Предмет исследования:** износостойкость металлических изделий, упрочнённых методом лазерной обработки.

**Методы исследования:** лабораторные эксперименты по упрочнению, стандартные методы термообработки, оценки твёрдости и износостойкости, статистическая обработка экспериментальных данных.

**Изложение материала и его результаты.** Для реализации поставленной задачи в работе были проведены эксперименты, позволяющие выявить некоторые особенности обработки материалов при питании лазера сложными импульсами накачки. Улучшение временных и энергетических параметров лазерных импульсов довольно сильно влияет на скорость обработки и её качество [2]. В значительной степени это проявляется при проведении технологических операций по упрочнению поверхности деталей из стали и сплавов.

В процессе исследований проводилась лазерная обработка кромок режущего инструмента и последующий анализ их твёрдости, а также испытания на износостойкость для оценки жизненного ресурса.

Сравнительная оценка качества обработанной поверхности при традиционном «гладком» режиме возбуждения и возбуждении «сложным» импульсом накачки производилась на установках с рубиновым активным элементом (установка «Корунд») и активным элементом из алюмоиттриевого граната, легированного неодимом (установка «Квант») [3].

Эффективность используемых режимов оценивалась по однородности структуры обрабатываемой поверхности, глубине уп-

рочнённого слоя, его механическим свойствам и износостойкости.

Стоит отметить, что традиционные методы упрочняющей термообработки (например, для стали Р6М5), заключающиеся в закалке от температуры 1200 °С и многократном отпуске или в сочетании с обработкой холодом, являются энерго- и трудоёмкими процессами и обеспечивают получение твёрдости не более 65 HRC.

В таблице представлены данные, полученные при анализе операции лазерного упрочнения режущего инструмента. Оценка твёрдости производилась по методу Роквелла (HRC). Изменение износостойкости оценивалось в процентах в сравнении с износостойкостью инструмента, обработанного традиционным методом закалки (для сталей ШХ15 и Р6М5), и без закалки для инструмента из сплавов Т5К10 и Т15К6.

Как видно из результатов, представленных в таблице, лазерное упрочнение кромок стальных резцов способствует повышению их твёрдости в 2,3–2,9 раза. Причём способ накачки практически не влияет на твёрдость обработанной поверхности, а эксплуатационные характеристики и в первую очередь износостойкость инструмента значительно улучшаются при обработке материала с использованием предложенного режима возбуждения лазера. Также необходимо отметить и тот факт, что более высокий жизненный ресурс инструмента был получен при больших значениях скорости резания, которая позитивно влияет на производительность технологического оборудования и процесса в целом. Наиболее сильное влияние способа накачки импульса на скорость резания отмечается при упрочнении твердосплавных материалов, для которых при использовании «сложного» режима возбуждения скорость резания возрастает на 29–47 %, тогда как для сталей это повышение составляет 11–12 %.

Улучшение эксплуатационных характеристик быстрорежущих и легированных сталей Р6М5 и ШХ15 обусловлено увеличением поверхностной твёрдости при сохранении пластичности изделия в целом.

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Таблица

Значения твёрдости и износостойкости кромок режущего инструмента при их лазерном упрочнении с использованием гладкого и сложного режима накачки

Материал	Твёрдость, HRC		Максимальная скорость резания (мм/мин)	Повышение износостойкости, %
	до обработки	после обработки		
ШХ15 <sub>(гл)</sub> *	22	62	50	+50
ШХ15 <sub>(сл)</sub> **	22	64	56	+60
P6M5 <sub>(гл)</sub>	28	65	54	+40
P6M5 <sub>(сл)</sub>	28	65	60	+80
T5K10 <sub>(гл)</sub>	82	83	62	0
T5K10 <sub>(сл)</sub>	82	84	80	+50
T15K6 <sub>(гл)</sub>	90	89	68	0
T15K6 <sub>(сл)</sub>	90	88	100	+70

\* — «гладкий» импульс накачки (гл); \*\* — «сложный» импульс накачки (сл).

Кроме того, в случае возбуждения лазерного излучения «сложным» импульсом накачки величина упрочнённого поверхностного слоя оказывается меньше (рис. 1), но имеет более однородную структуру.

Таким образом, результаты исследований показывают, что для увеличения глубины упрочнённого слоя вполне достаточно обеспечить соответствующие поверхностную плотность мощности падающего излучения и коэффициент перекрытия.

Оценка износостойкости и ресурса инструмента показала, что помимо поверхностной мощности немаловажное значение имеет равномерность распределения энергии в сечении лазерного пучка и её повторяемость. Увеличение максимальной скорости резания и повышение износостойкости обусловлено более равномерным распределением зон термического воздействия. Приведённые данные характеризуют целесообразность использования предложенного режима обработки.

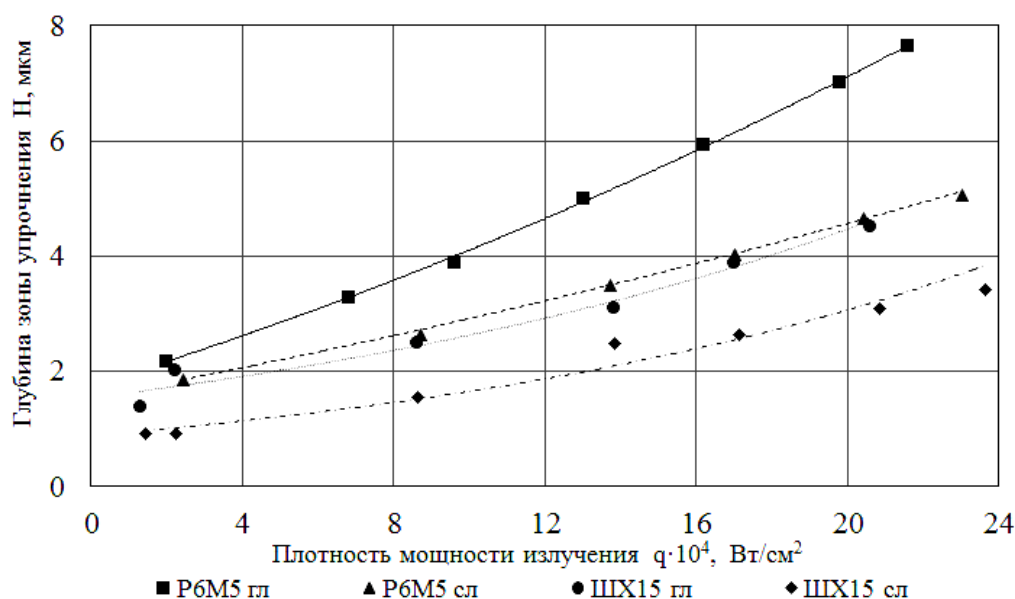


Рисунок 1 Изменение глубины упрочнения сталей P6M5 и ШХ15 при различной плотности мощности падающего излучения и режимах питания лазера «гладким» и «сложным» импульсом

На рисунках 2 и 3 представлено изменение величины износа инструмента из легированных и быстрорежущих сталей при различных скоростях резания. Критерием износа являлось изменение величины линейного размера инструмента, которая определялась на режущих поверхностях через определённые фиксированные промежутки времени.

Обработка двухкарбидных твёрдых сплавов Т5К10 и Т15К6 с использованием предложенного метода показала, что изменения поверхностной твёрдости инструмента из этих материалов практически не наблюдается.

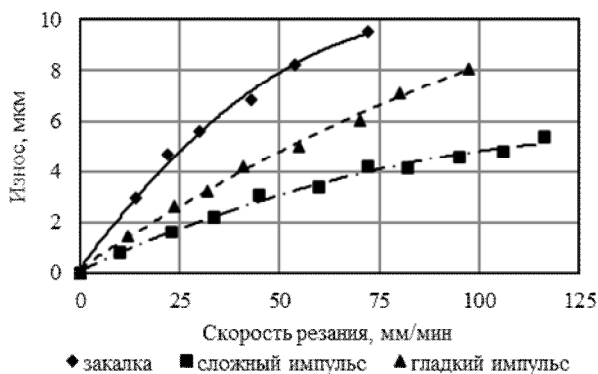


Рисунок 2 Изменение износостойкости реза из стали Р6М5, подвергнутого закалке и лазерной обработке с различным импульсом накачки, при различных скоростях резания

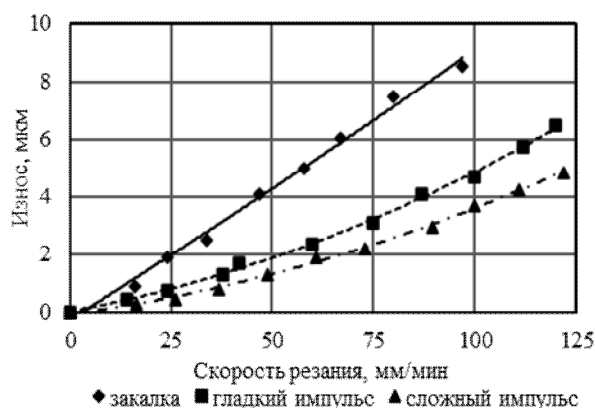


Рисунок 3 Изменение износостойкости реза из стали ШХ15, подвергнутого закалке и лазерной обработке с различным импульсом накачки, при различных скоростях резания

Тем не менее представленные в таблице данные свидетельствуют о том, что износостойкость, а следовательно, и жизненный ресурс инструмента после лазерной поверхностной обработки с использованием предложенного способа накачки лазера существенно возрастает.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что область применения такого вида лазерной поверхностной обработки может быть распространена и на твердосплавные материалы. Эффект, полученный при обработке двухкарбидных материалов, как показали исследования, можно объяснить спеканием гранул твердотельного материала в слое, подвергнутом лазерной обработке, что приводит к улучшению его пластических свойств без существенного изменения поверхностной твёрдости материала. В конечном итоге это позитивно сказывается на повышении износостойкости и увеличении жизненного ресурса инструмента. Данные, приведённые на рисунке 1, свидетельствуют о том, что улучшение эксплуатационных свойств изделий, подвергнутых обработке лазерным излучением со «сложным» импульсом накачки, получено не за счёт увеличения твёрдости поверхности, а в основном за счёт улучшения структуры поверхности.

Это объясняется тем, что при возбуждении активной среды «сложным импульсом» накачки, как показали исследования с использованием лазеров на рубине и гранате, улучшается пространственное распределение интенсивности излучения. При этом выравнивание интенсивности излучения позволяет улучшить качество обработанной поверхности [2]. Кроме того, наблюдается уменьшение расходимости генерируемого излучения и более равномерное распределение интенсивности в поле излучения лазера при сложнопериодическом возбуждении активной среды. Данное свойство излучения при накачке «сложным» импульсом успешно используется при обработке поверхности материалов, а именно позволяет производить не

полную, а точечную обработку инструмента (мелкие и труднодоступные детали).

Это позволяет применять один и тот же источник излучения для различных технологических операций, связанных с нагревом, плавлением и испарением материалов.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Экспериментально исследовано влияние способа возбуждения лазера на качество обрабатываемой поверхности и эксплуатационные свойства изделий из твердосплавных материалов, конструкционных и быстрорежущих сталей. Проанализировано изменение твердости, глубины упрочнённого слоя и износостойкости при различных методах упрочняющей обработки и режимах питания лазера.

Произведена сравнительная оценка износостойкости и ресурса инструмента при обработке его лазером с различными режимами питания. Показано, что предложенный режим питания позволяет повысить износостойкость инструмента из различных материалов в 1,4–1,8 раза.

Установлено, что применение разработанного режима питания лазера приводит к улучшению эксплуатационных характеристик обрабатываемой поверхности по сравнению с другими методами обработки, что позволяет распространить электротермические методы упрочнения, в частности лазерную поверхностную обработку, даже на те изделия, для которых подобные операции ранее не применялись из-за их низкой эффективности. Обработка изделий из двухкарбидных материалов позволяет увеличить ресурс инструмента из твердосплавных материалов в среднем в 1,6 раза при достаточно высоких скоростях резания.

Полученные результаты экспериментальных исследований подтверждают технологичность лазерной обработки и её эффективность.

Целью дальнейших исследований являются алгоритмизация предложенного режима лазерного упрочнения и разработка технологии обработки инструмента при использовании предложенного режима питания лазера.

### Библиографический список

1. Луценко, В. А. Выбор метода упрочнения разделительных штампов [Текст] / В. А. Луценко, О. А. Коваленко, П. В. Боровик // Сб. научн. тр. Донбасского государственного технического университета. — Алчевск : ДонГТУ, 2008. — Вып. 27. — С. 171–179.
2. Мурга, В. В. Влияние режима возбуждения лазера на пространственные характеристики излучения [Текст] / В. В. Мурга, В. Г. Колобродов, И. И. Антропов, Д. К. Гамазин // Вопросы атомной науки и техники (ВАНТ). Серия : Физика радиационных повреждений и явлений в твёрдых телах. — 2015. — № 2 (96). — С. 166–170.
3. Мурга, В. В. Экспериментальный лазерный комплекс для обработки поверхности материалов [Текст] / В. В. Мурга, Е. В. Мурга // Застосування комп'ютерних технологій у навчальному процесі і науково-дослідній роботі : матеріали конференції. — Алчевськ, 1999. — С. 74–75.

© Куберский С. В.

© Коваленко О. А.

© Мурга Е. В.

© Мурга С. В.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТУ Должиковым В. В.,  
ст. мастером участка разливки стали ККЦ  
Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» Максаевым Е. Н.*

Статья поступила в редакцию 28.02.20.



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

### ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО ЗМІЦНЕННЯ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ВИРОБІВ ЗІ СТАЛІ ТА СПЛАВІВ

*Наведено результати експериментальних досліджень впливу технологічних параметрів процесу лазерного зміцнення конструкційних, інструментальних сталей і твердих сплавів на зносостійкість. Показано, що використання лазерної обробки зі складним імпульсом накачки забезпечує поліпшення експлуатаційних характеристик оброблюваної поверхні в порівнянні з існуючими аналогами та дозволяє підвищити зносостійкість ріжучого інструменту з різних матеріалів в 1,4–1,8 разу, а швидкість різання — на 11–47 %, що підтверджує технологічність лазерної обробки та її ефективність.*

**Ключові слова:** зміцнення поверхні, лазерна обробка, режим живлення лазера, імпульс, гладкий, складний, зносостійкість, твердість.

PhD in Engineering Kuberskiy S. V., PhD in Engineering Kovalenko O. A., Murga E. V., Murga S. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

### INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF LASER HARDENING ON WEAR RESISTANCE OF STEEL AND ALLOY PRODUCTS

*There have been given the experimental results of influence of technological parameters of laser hardening the structural, tool steel and hard alloys on wear resistance. It is shown that the use of laser processing with a complex pump pulse leads to an improvement in the performance characteristics of the processed surface compared to existing analogues and allows to increase the wear resistance of cutting tools made of various materials by 1,4–1,8 times, and the cutting rate by 11–47 %, which confirms the processibility of laser processing and its efficiency.*

**Key words:** surface hardening, laser processing, laser power mode, pulse, smooth, complex, wear resistance, hardness.

УДК 621.77

к.т.н. Денищенко П. Н.,  
Макаганюк А. С.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, alexandr\_jes@mail.ru)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРПОВИДНОСТИ РАСКАТА ПРИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ С УЧЁТОМ УШИРЕНИЯ

*Работа посвящена разработке математической модели серповидности раската при толстолистовой прокатке с учётом уширения в четырёхвалковой клетке. Представлена методика количественной оценки эффекта самовыравнивания вытяжек по ширине раската при толстолистовой прокатке.*

**Ключевые слова:** толстолистовая прокатка, четырёхвалковая клетка, серповидность, самовыравнивание вытяжек по ширине раската, уширение.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** На современном этапе развития прокатного производства основной тенденцией следует считать освоение и внедрение в производство принципиально новой техники и технологий, обеспечивающих наряду с увеличением объёма производства повышение прямолинейности листовой стали.

Наиболее актуальна проблема получения прямолинейной формы при прокатке листов на станах горячей прокатки. Однако, несмотря на имеющиеся успехи в области улучшения прямолинейности прокатываемых листов, некоторые принципиально важные вопросы остаются малоизученными. Например, не до конца выясненным является механизм нарушения прямолинейности раската при прокатке с уширением.

Выдриным В. Н. показано [1–3], что неравномерность вытяжки и обжатия по ширине полосы даёт правильное представление о процессе нарушения плоскостности лишь в частных случаях; о дефектах неплоскостности полосы правильно судить не по характеру распределения вытяжки, а по характеру распределения скоростей течения металла по ширине полосы в плоскостях входа и выхода очага деформации. Поведение полосы при выходе из валков полностью определяется процессом деформации только в зоне опережения, а при входе в валки — процессами деформации только в зоне отставания.

Железновым Ю. Д., Григоряном Г. Г. и др. было замечено, что неравномерность вытяжек раската после прокатки оказывается меньше рассчитанной в предположении плоской схемы деформации. Это явление вызвано механизмами самовыравнивания, один из которых связан с поперечными перемещениями металла в очаге пластической деформации. Имеется достаточное количество экспериментальных подтверждений его эффективности. На возможность поперечных перемещений при листовой прокатке указывается в работах [4–9].

**Постановка задачи.** При толстолистовой прокатке особое влияние на серповидность раската оказывает поперечная разнотолщинность, которая приводит к неравномерному распределению скоростей течения металла при выходе из валков. Поперечное течение металла в очаге пластической деформации уменьшает неравномерность коэффициентов удлинения и продольных напряжений по ширине прокатываемых полос на выходе из очага пластической деформации [10].

В связи с этим **целью** настоящей работы является разработка математической модели серповидности раската на основе неравномерного распределения выходных скоростей металла с учётом поперечного течения металла в очаге пластической деформации.

**Объект исследования** — технологический процесс прокатки толстолистовой

стали с неравномерной толщиной на входе в валки четырёхвалковой клетки.

**Предмет исследования** — очаг пластической деформации металла неравномерной толщины на входе в валки и с неравномерным распределением продольного и поперечного течения металла.

**Задачи исследования:**

- оценка влияния входной поперечной разнотолщинности на выходное распределение скоростей металла;
- определение влияния уменьшения неравномерности коэффициентов вытяжки по ширине прокатываемого раската за счёт поперечного течения металла;
- определение величины серповидности раската при прокатке металла неравномерной толщины.

**Изложение материала и его результаты.** Подкат шириной  $2B$ , профиль поперечного сечения которого состоит из двух областей  $A$  и  $B$ , имеющих толщины  $h_{0A}$ ,  $h_{0B}$ , входит в очаг пластической деформации со скоростью  $v_0$ , и на выходе из него прокатанная полоса имеет одинаковую толщину  $h_1$ .

Если бы прокатка осуществлялась по схеме плоской деформации, то вытяжка и выходная скорость областей металла в областях  $A$ ,  $B$  определялись следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \lambda_A &= \frac{h_{0A}}{h_1}; \quad v_{x1} = v_0 \frac{h_{0A}}{h_1}; \\ \lambda_B &= \frac{h_{0B}}{h_1}; \quad v_{x2} = v_0 \frac{h_{0B}}{h_1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Границы областей  $A$ ,  $B$  при этом определяются плоскостями, параллельными боковым кромкам полосы и проходящими через отрезки прямых  $aa$  (рис. 1).

Поперечное перемещение металла со скоростью  $v_y$  в очаге деформации на величину  $S$  изменяет границы областей, и области  $A$ ,  $B$  переходят в области  $A'$ ,  $B'$ , причём плоскости, их разделяющие, проходят через отрезки прямых  $a'a'$  (рис. 2).

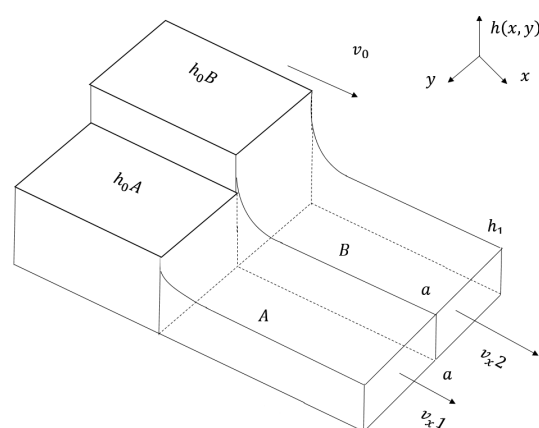


Рисунок 1 Распределение скоростей течения металла при отсутствии уширения

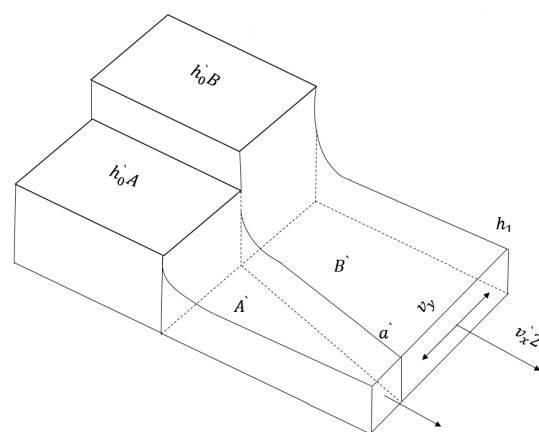


Рисунок 2 Распределение скоростей течения металла при наличии поперечного течения металла

При наличии поперечного перемещения металла в очаге деформации продольная скорость металла в области  $A$   $v_{x1}$  увеличивается, а в области  $B$   $v_{x2}$  — уменьшается по отношению к скоростям в случае плоской схемы деформации.

На рисунке 3 распределение скоростей металла по ширине полосы в случае плоской схемы деформации показано ломаной штрихпунктирной линией с амплитудой  $\Delta v_X = A$ . Распределение продольных скоростей металла по ширине полосы при наличии поперечного перемещения металла в очаге деформации показано сплошной линией с амплитудой  $\Delta v'_X = A'$ ; при этом

коэффициенты вытяжки металла в соответствующих областях, вычисляемые как отношение входной и выходной толщин, остаются неизменными.

Влияние поперечных перемещений металла в очаге деформации на уменьшение неравномерности вытяжек по ширине полосы учитывается коэффициентом  $\rho$ :

$$\frac{\Delta\lambda_{(y)}}{\lambda} = \rho \left[ \frac{\delta h_0(y)}{h_0} - \frac{\delta h_1(y)}{h_1} \right], \quad (2)$$

где  $\Delta\lambda_{(y)}$  и  $\lambda$  — величина текущей неравномерности вытяжек и величина средней вытяжки по ширине полосы;  $\delta h_0(y)$  и  $h_0$  — величина текущей поперечной разнотолщинности и величина средней толщины подката, мм;  $\delta h_1(y)$  и  $h_1$  — величина текущей поперечной разнотолщинности и величина средней толщины полосы, мм;  $\rho = \frac{A'}{A}$  — коэффициент, учитывающий влияние поперечного перемещения металла в очаге пластической деформации ( $0 < \rho < 1$ ; при плоской схеме деформации  $\rho = 1$  [11]), где  $A$  — амплитуда входной неравномерности скоростей металла:

$$A = \cos \phi \left( 1 + \beta - \beta \frac{x_n}{l} \right) \left[ a + \varepsilon \left( \frac{x_n}{l} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

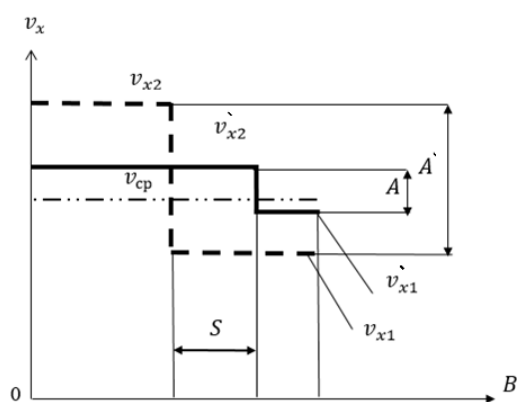


Рисунок 3 Распределение скоростей течения металла и вытяжек при наличии поперечного течения металла

Для уточнения описания процесса уширения в очаге пластической деформации воспользуемся расчётной схемой, приведённой на рисунке 4. Очаг пластической деформации разбит на две области — зону опережения и зону отставания [11]. Форма кромки (штриховая линия) аппроксимирована двумя отрезками прямых — для зоны отставания и зоны опережения. Тогда уравнения, описывающие форму боковых кромок полосы в очаге пластической деформации, запишутся следующим образом:

а) для зоны опережения  $0 \leq x \leq x_n$ :

$$B_{on}(x) = B_0 \left[ 1 + \beta + (\beta_t - \beta) \frac{x}{x_n} \right]; \quad (4)$$

б) для зоны отставания  $x_n \leq x \leq \ell$ :

$$B_{om}(x) = B_0 \left[ 1 + \frac{\beta_t}{1 - t_n} - \frac{\beta_t}{1 - t_n} \frac{x}{\ell} \right], \quad (5)$$

где

$$\beta = \frac{\Delta B}{B_0}, \quad \beta_t = \frac{\Delta B_t}{B_0}, \quad \beta_t = \frac{\Delta B_t}{B_0},$$

$$\Delta B = B_1 - B_0, \quad \Delta B_t = B_n - B_0, \text{ мм,}$$

$$t_n = \frac{x_n}{\ell},$$

где  $\ell, x_n$  — длина очага деформации и зоны опережения, мм;  $B_0, B_n, B_1$  — полуширина полосы на входе, в нейтральном сечении и на выходе соответственно, мм.

Входную неравномерность скоростей опишем функцией  $f'(y)|_{x=\ell} \ll 1$ , а выходную —  $\phi'(y)|_{x=0} \ll 1$ , причём  $f'(x, y)$  и  $\phi'(x, y)$  — самоуравновешенные функции,

$$\text{т. е. } \int_0^{B_0} f'(x, y) dy = 0, \quad \int_0^{B_1} \phi'(y) dy = 0.$$

Функцию неравномерности распределения входных скоростей металла зададим следующим образом:

$$f'(x, y) = A \cos \left[ k\pi \frac{y}{B(x)} \right], \quad (6)$$

где  $B(x)$  — текущая ширина полосы в очаге деформации, мм;  $k$  — целое число, принимающее значения  $1, n$ .

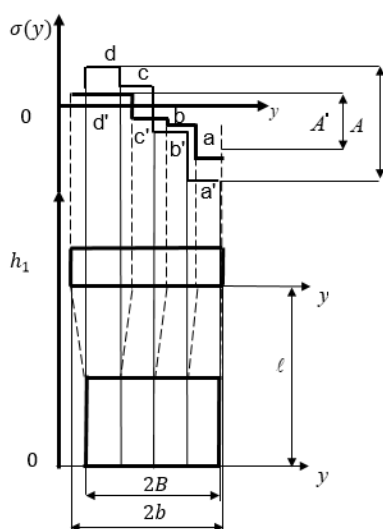
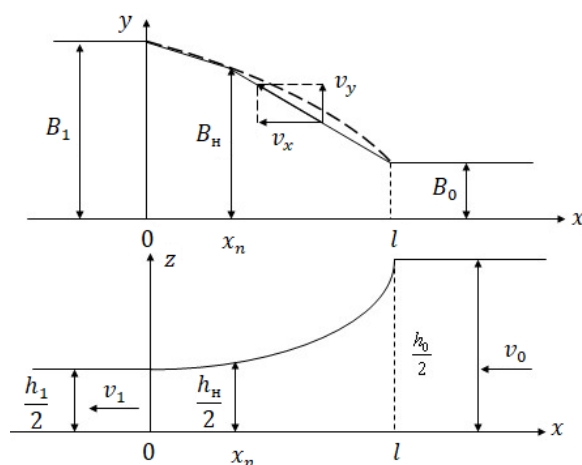


Рисунок 4 Механизм уменьшения неравномерности остаточных напряжений при прокатке с уширением



$v_0, v_1, v_x, v_y$  — входная и выходная скорости полосы и проекции скорости течения металла боковой кромки на оси  $x, y$  соответственно, мм/с;  
 $h_0, h_n, h_1$  — толщина полосы на входе, в нейтральном сечении и на выходе соответственно, мм

Рисунок 5 Расчётная схема для определения уширения

Назовём отношение амплитуды неравномерности выходных скоростей металла в полосе, прокатанной с уширением, к амплитуде выходных скоростей металла в той же полосе, но прокатанной без уширения (рис. 5, 6), коэффициентом  $\rho_B$ . Заметим, что при  $\Delta B = 0$  задача становится плоской и  $\rho_B$  становится равным единице. Функция неравномерности распределения выходных скоростей металла:

$$\phi'(x, y) = A \rho_B \cos \left[ k\pi \frac{y}{B(x)} \right], \quad (7)$$

где  $0 < \rho_B < 1$  — коэффициент, учитывающий влияние поперечного перемещения металла в очаге пластической деформации.

Для очага деформации будем предполагать модель жёсткопластических сред с упругими внешними зонами, то есть считаем, что металл, не обладающий эластичностью в деформационном очаге, сразу же приобретает её на выходе из деформационного очага. Применяя принцип вариации Журдена к такой определённой деформации, получаем уравнение [8], аналогичное [11], но без учёта натяжений при прокатке

$$\delta \left( \iiint_{\Omega} \Pi_v d\Omega - \iint_S \bar{v} ds + \sum_{i=1}^n \iint_{S_i} \tau_s |\Delta v_i| ds \right) = 0, \quad (8)$$

где  $\Pi_v = \int_0^H T dH$  — скоростной потенциал;  $T$  и  $H$  — интенсивности касательных напряжений и скоростей сдвиговых деформаций, МПа;  $\tau_s$  — предел текучести на сдвиг, МПа;  $\Delta v_i$  — скачок скоростей на  $i$ -ой поверхности среза  $S_i$ , мм/с;  $\delta$  — символ варьирования.

Рассмотрим выражение для скоростей течения металла (рис. 7) в очаге деформации с учётом уширения:

$$v_x = v_{ex} \left[ 1 + f \frac{h_x - h_1}{\Delta h} \frac{B_0}{B_1} + \varphi \frac{h_0 - h_x}{\Delta h} \frac{B_1}{B_x} \right]. \quad (9)$$

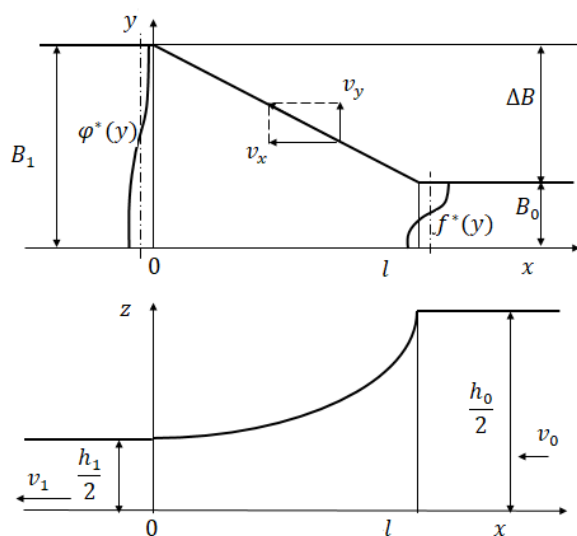


Рисунок 6 Расчётная схема распределения скоростей с учётом уширения

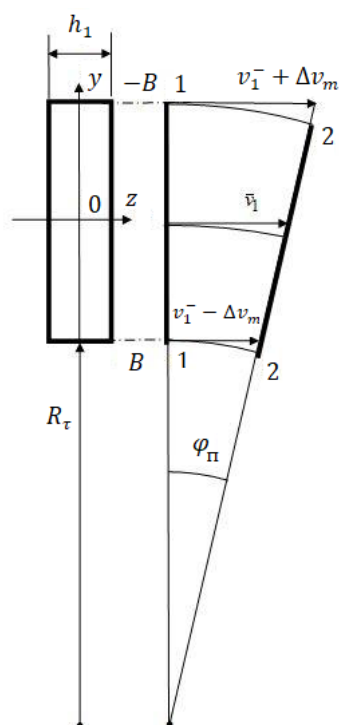


Рисунок 7 Схема процесса образования серповидности раската

Радиус поворота поперечного сечения:

$$r = \frac{b_1}{\frac{\mu_{aa}}{\mu_{bb}} - 1}, \quad (10)$$

где  $h_x, B_x$  — толщина и ширина металла в нейтральном сечении, мм;  $\mu_{aa}, \mu_{bb}$  — коэффициенты вытяжек с учётом неравномерности выходных скоростей:

$$\mu_{aa} = \frac{h_0 V_{cp}}{h_1 V_{aa}}, \quad (11)$$

где  $V_{cp}, V_{aa}$  — средняя скорость по ширине раската и скорость на выходе из валков, мм/с.

Полученная математическая модель была реализована на ЭВМ в среде Microsoft Excel. При помощи разработанной модели выполнены расчёты величин серповидности раскатов при прокатке на толстолистовом стане 3000 филиала № 12 ЗАО «ВТС». ТЛС 3000 состоит из двух реверсивных четырёхвалковых клеток — черновой и чистовой. Диаметр рабочих валков чистовой клетки 900 мм, длина бочки 3000 мм. Определили серповидность раската после первого прохода в чистовой клетки из подката толщиной 50 мм, шириной 2220 мм, длиной 5218 мм из стали 09Г2С, переданного после прокатки в черновой клетки. Исходная поперечная разнотолщинность подката составила 0,3 мм (назовём это сечение  $aa$ ). На рисунках 8 и 9 приведены расчётные схемы для определения скоростей выхода металла из очага деформации и величины серповидности раската. Расчёт величины серповидности раската выполнен исходя из условия, что сечение раската на входе в очаг деформации имеет разные толщины левой и правой кромок, а на выходе из валков толщина раската одинаковая по всей ширине. Расчётные данные представлены в таблицах 1–4.

Таким образом, результаты расчёта показали работоспособность модели по определению величины серповидности раската при толстолистовой прокатке. Для подтверждения адекватности модели необходимо проведение экспериментальных исследований.

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

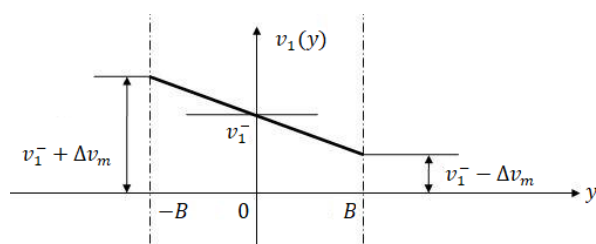


Рисунок 8 Расчётная схема для определения скоростей выхода металла из очага деформации

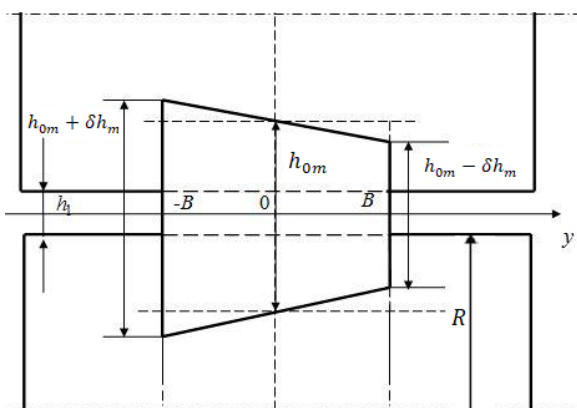


Рисунок 9 Расчётная схема для определения величины серповидности раската

Таблица 1

Режим обжатий в сечении aa

№ прох.	$\Delta h$ , мм	$H$ , мм	$B$ , мм	$\Delta b$ , мм	$V$ , м/с	$\mu$
0	---	50,3	2220	---	---	---
1	9,3	41	2222	2	1,2	1,23

## Библиографический список

1. Выдрин, В. Н. Об основах планшетности полосы [Текст] / В. Н. Выдрин // Теория и технология прокатки : сб. науч. тр. — Челябинск, 1972. — Вып. 102. — С. 208–219.

Таблица 2  
Режим обжатий в сечении bb

№ прох.	$\Delta h$ , мм	$H$ , мм	$B$ , мм	$\Delta b$ , мм	$V$ , м/с	$\mu$
0	---	50	2220	---	---	---
1	9	41	2222	2	1,2	1,22

Таблица 3

Сводная таблица результатов расчёта параметров серповидности раската

№	$V(aa)$ , мм/с	$V(bb)$ , мм/с	$V(cp)$ , мм/с	$L(aa)$ , мм	$L(bb)$ , мм	$\varphi$ , град
1	1868	1885	1877	6399	6391	0,20

Таблица 4

Сводная таблица результатов расчёта параметров без учёта поперечного перемещения металла

№ прох.	$\Delta h(aa)$ , мм	$\Delta h(bb)$ , мм	$B$ , мм	$L(aa)$ , мм	$L(bb)$ , мм
1	9,3	9	2220	6427	6363

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Получена работоспособная математическая модель серповидности раската при толстолистовой прокатке учитывающая неравномерное распределение выходных скоростей и поперечное течение металла в очаге пластической деформации.

2. Разработана методика количественной оценки эффекта самовыравнивания вытяжек по ширине раската при толстолистовой прокатке, учитывающая уширение. Расчёт показал, что наличие абсолютного уширения 2 мм сокращает разность вытяжек на 87,5 %, что позитивно сказывается на уменьшении серповидности.

Дальнейшие исследования будут направлены на подтверждение адекватности разработанной модели и разработку методики прогноза серповидности с учётом температурного градиента по ширине раската.

2. Выдрин, В. Н. Постановка задачи по исследованию условия получения планшетных листов при холодной прокатке [Текст] / В. Н. Выдрин, Н. В. Судаков, Е. А. Остсемин // Теория и технология прокатки : сб. науч. тр. — Челябинск, 1978. — Вып. 209. — С. 23–30.
3. Выдрин, В. Н. Теоретическое и экспериментальное исследование условий получения планшетных листов при несимметричной и симметричной прокатке [Текст] / В. Н. Выдрин, Н. В. Судаков, Е. А. Остсемин // Теоретические проблемы прокатного производства : тезисы докл. и сообщений III всесоюзной науч.-техн. конф. — Днепропетровск, 1980. — С. 184.
4. Железнов, Ю. Д. Прокатка ровных листов и полос [Текст] / Ю. Д. Железнов. — М. : Металлургия, 1971. — 200 с.
5. O'Connor, H. W. Shape Flatness in Thin Strip Rolling // ASME Paper. — 1971. — Vol. 13. — P. 9–13.
6. Bernsmann, G. P. Lateral Material Flow During Cold Rolling of Strip // Iron and steel Engineer. — 1972. — Vol. 49. — P. 67–71.
7. Григорян, Г. Г. Настройка, стабилизация и контроль процесса тонколистовой прокатки [Текст] / Г. Г. Григорян, Ю. Д. Железнов, Черный В. А. и др. — М. : Металлургия, 1975. — 368 с.
8. Железнов, Ю. Д. Исследование точной тонколистовой прокатки [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук / Ю. Д. Железнов. — М., 1971. — 267 с.
9. Бельский, С. М. Расчёт распределения усилия прокатки по ширине полосы и остаточных напряжений в полосе вариационным методом [Текст] / С. М. Бельский, С. Л. Коцарь, Б. А. Поляков // Изв. вузов. Чёрная металлургия. — 1990. — № 10. — С. 32–34.
10. Belskiy, S. M. Mathematical Model of hot-rolled Strip's Camber Formation / S. M. Belskiy, I. P. Mazur // 8th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing. — Lipetsk State Technical University, 2016. — P. 5–7.
11. Бельский, С. М. Совершенствование технологий формообразования полос и листов на основе развития теории симметричной и асимметричной горячей прокатки [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук / С. М. Бельский. — Липецк, 2009. — 368 с.

© Денищенко П. Н.

© Макаганюк А. С.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н., к.т.н., пом. нач. СПЦ филиала № 12 ЗАО «ВТС» по технологии Чичкан А. А.**

Статья поступила в редакцию 27.02.20.

**к.т.н. Денищенко П. Н., Макаганюк О. С. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР, alexander\_jes@mail.ru)**

#### **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕРПОПОДІБНОСТІ РОЗКАТУ ПРИ ТОВСТОЛИСТОВІЙ ПРОКАТЦІ З УРАХУВАННЯМ РОЗШИРЕННЯ**

Роботу присвячено розробці математичної моделі серпоподібності розкату при товстолистовій прокатці з урахуванням розширення в чотиривалковій клітці. Представлено методику кількісної оцінки ефекту самовирівнювання витяжок по ширині розкату при товстолистовій прокатці.

**Ключові слова:** товстолистова прокатка, чотиривалкова кліть, серпоподібність, самовирівнювання витяжок по ширині розкату, розширення.

**PhD in Engineering Denishchenko P. N., Makaganiuk A. S. (DonSTU, Alchevsk, LPR, alexander\_jes@mail.ru)**

#### **MATHEMATICAL MODELING OF THE HOT-ROLLED BREAKDOWN CAMBER DURING THICK-SHEET ROLLING TAKING INTO ACCOUNT THE BROADENING**

The work is devoted to the development of a mathematical model of the hot-rolled breakdown camber during thick-sheet rolling taking into account the broadening in a four-high rolling mill. The paper presents a method for quantifying the effect of self-alignment the cogging back along the width of the hot-rolled breakdown during thick-sheet rolling.

**Key words:** thick-sheet rolling, four-high rolling mill, camber, self-alignment the cogging back along the width of the hot-rolled breakdown, broadening.





**СТРОИТЕЛЬСТВО  
И АРХИТЕКТУРА**

---

---

**БУДІВНИЦТВО  
І АРХІТЕКТУРА**

---

---

**CIVIL ENGINEERING  
AND ARCHITECTURE**



УДК 624.012

к.т.н. Карапетян С. Х.,  
к.т.н. Псюк В. В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## К ПОСТРОЕНИЮ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ИЗ ОПЫТА НА ВНЕЦЕНТРЕННОЕ СЖАТИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТОЕК ПРИ ОДНОКРАТНЫХ И ПОВТОРНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

Приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований по установлению связи между напряжениями и деформациями в условиях неоднородного сжатия бетона с использованием дифференциального метода Фере.

**Ключевые слова:** железобетонная стойка, внецентренное сжатие, многократно повторные нагрузки, деформативность, дифференциальный метод.

**Актуальность проблемы.** Допустимость использования диаграмм деформирования бетона « $\sigma_b - \varepsilon_b$ », полученных из отдельных опытов при центральном сжатии и растяжении к расчёту изгибаемых или внецентренно сжатых железобетонных элементов, где обе деформации происходят одновременно и в одном образце, до сих пор поддаётся сомнению [5, 3]. Следовательно, при подобного рода воздействиях между напряжениями и деформациями должна быть принципиально иная связь, чем при осевом сжатии. Для этого необходимо одновременно с испытаниями на центральное сжатие и растяжение получить диаграмму состояния бетона « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » непосредственно по результатам испытания изгибаемых или внецентренно сжатых элементов [1, 2, 6].

Для построения таких диаграмм, как следует из работ [1, 2, 4, 6, 8], наиболее приемлем дифференциальный метод Фере (Ferret), позволяющий установить закон деформаций бетона из опыта на изгиб. В дальнейшем этот приём разработан для железобетонной балки на изгиб с одиночным и двойным армированием для случая однократного статического нагружения [5–7]. Применимость указанного метода, модифицированного для случая многократно повторных нагружений при изгибе, экспериментально доказана в работе [4].

Логическим продолжением вышеприведённых работ следует считать исследование и обоснование возможности использования вышеуказанного метода и для внецентренно сжатых элементов. Поэтому с целью установления связи между напряжениями и деформациями бетона из опыта на внецентренное сжатие в [3] было выполнено развитие метода Фере.

**Постановка задачи.** Задачей исследований является построение диаграмм деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » бетона указанным методом для железобетонных стоек как при однократном, так и при повторных нагружениях.

**Изложение материала и его результаты.** Для получения указанных диаграмм используем следующие уравнения, полученные в рамках развития метода Фере:

$$\sigma_{1,i} = \left( \frac{dp}{d\varepsilon_1} \right) \left\{ \varepsilon_{2,i} + \varepsilon_{P,i} + p_i \left( \frac{de}{dp} \right)_i \times \right. \\ \times \frac{\varepsilon_{2,i} + \varepsilon_{P,i}}{e_i} + \left( \frac{d\varepsilon_P}{dp} \right)_i - \frac{E_s \mu}{e_i} \times \\ \times \left[ \left( \frac{dQ_2}{dp} \right)_i - \left( \frac{dP_2}{dp} \right)_i \varepsilon_{2,i} + \right. \\ \left. \left. + \left( \frac{dQ_1}{dp} \right)_i + \left( \frac{dP_1}{dp} \right)_i \varepsilon_{2,i} \right] \right\}; \quad (1)$$

$$\sigma_{2,i} = \left( \frac{dp}{d\varepsilon_2} \right) \left\{ \varepsilon_{1,i} + \varepsilon_{P,i} + p_i \left( \frac{de}{dp} \right)_i \times \right. \\ \times \frac{\varepsilon_{1,i} + \varepsilon_{P,i}}{e_i} + \left( \frac{d\varepsilon_P}{dp} \right) - \frac{E_s \mu}{e_i} \times \\ \times \left[ \left( \frac{dQ_2}{dp} \right)_i - \left( \frac{dP_2}{dp} \right)_i \varepsilon_{1,i} + \right. \\ \left. + \left( \frac{dQ_1}{dp} \right)_i + \left( \frac{dP_1}{dp} \right)_i \varepsilon_{1,i} \right] \left. \right\}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{1,i}$  и  $\sigma_{2,i}$  — фибровые напряжения сжатия и растяжения в бетоне стойки на  $i$ -м этапе нагружения;  $\varepsilon_{1,i}$ ,  $\varepsilon_{2,i}$  — полные фибровые деформации бетона стойки с учётом начальных и остаточных;  $\varepsilon_{P,i}$  — деформация волокна, имеющего ординату  $y_P$ ;  $e_i = \varepsilon_{1,i} + \varepsilon_{2,i}$ ;  $p_i = P_i/bh$  — приведённая сжимающая сила;  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $Q_1$  и  $Q_2$  — функции, зависящие от  $\varepsilon_{1,i}$  и  $\varepsilon_{2,i}$ .

**Построение диаграмм деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » бетона для стоек.** В качестве исходной информации использовались экспериментальные данные, полученные по результатам испытаний железобетонных внецентренно сжатых стоек трёх серий: С-I, С-II и С-III [9]. Полученные зависимости между напряжениями и деформациями в условиях неоднородного сжатия бетона как при однократном (серия С-I), так и при многократно повторных нагружениях стоек (серии С-II и С-III) показаны на рисунках 1, 2 и 3.

Для стоек серий С-II и С-III приведены диаграммы для первого и последующих циклов нагружений.

Кроме того, для сравнения приведены кривые состояния стоек « $P - \varepsilon_{1,2}$ » (сжимающая сила — фибровые деформации на сжатой и растянутой гранях сечения) (рис. 4) и « $P - \varepsilon_1(n)$ » (сжимающая сила — фибровые деформации на сжатой грани сечения в зависимости от количества циклов  $n$ ) (рис. 5 и 6), полученные в опытах [6, 9].

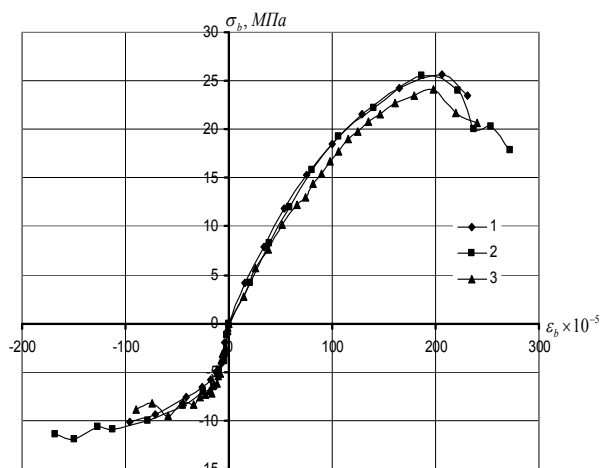


Рисунок 1 Диаграммы деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » бетона стоек серии С-I: 1, 2, 3 — соответственно для стоек С-I-1, С-I-2, С-I-3

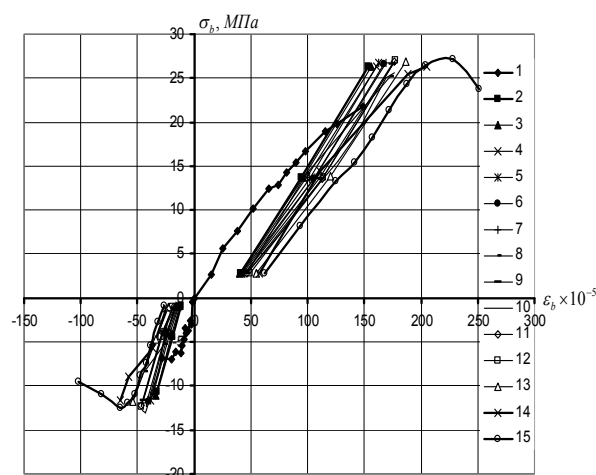


Рисунок 2 Диаграмма циклического деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » стойки С-II-1 при повторных нагружениях: 1 — нагрузка 1-го цикла; 2–14 — нагрузки 2–14-го циклов соответственно; 15 — нагрузка 15-го цикла

При проведении экспериментальных исследований изучали особенности деформирования и исчерпания несущей способности, а также изменения прочностных и деформативных характеристик бетона в стойках при многократно повторных нагружениях.

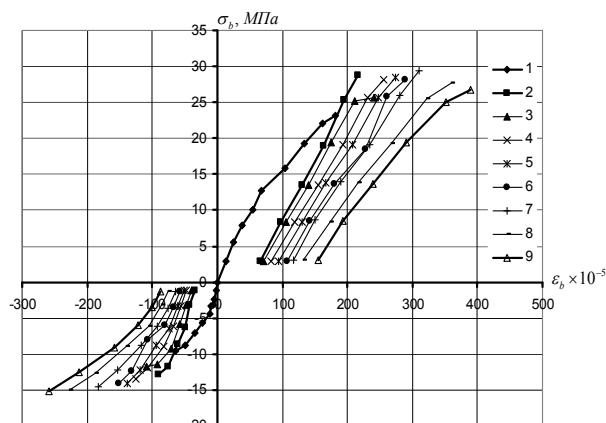


Рисунок 3 Диаграмма циклического деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » стойки С-III-1 при повторных нагрузках: 1 — нагрузка 1-го цикла; 2–7 — нагрузки 11, 21, 41, 61, 81, 101, 111-го циклов соответственно; 9 — нагрузка 121-го (последнего) цикла

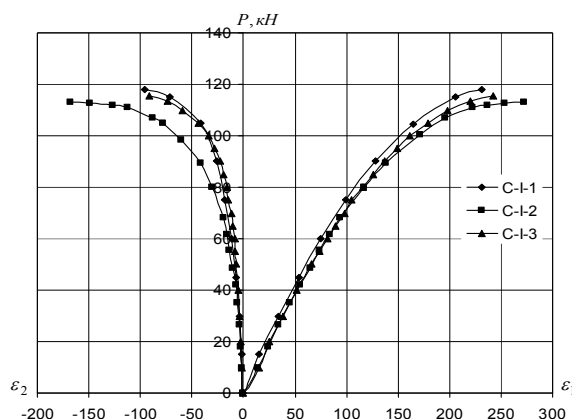


Рисунок 4 Диаграммы деформирования « $P - \varepsilon_{1,2}$ » стоек серии С-I

Сравнение диаграмм при однократных нагрузках (серия С-I) позволило выявить отличие « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » от кривых состояния стоек « $P - \varepsilon_{1,2}$ ». Характерной особенностью и отличием указанных диаграмм является наличие на « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » ниспадающих участков с координатами напряжений  $\sigma_{b,min} < \sigma_{b,max}$  и соответствующих им деформаций на сжатых фибрах стоек  $\varepsilon_{b,max} = \varepsilon_{1,max} > \varepsilon_{bR}$  ( $\varepsilon_{1,max}$  — абсцисса точек на кривых « $P - \varepsilon_1$ », в которых

$P = P_{cr}$ ). При этом, как показали вычисления, напряжения в вершинах диаграмм деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ », достигают максимальных значений  $\sigma_{b,max}$  при деформациях  $\varepsilon_b < \varepsilon_{1,max}$  и соответствующих значениях нагрузок, равных  $P < P_{cr}$  или в среднем по серии  $P(\sigma_{b,max}) \approx 0,95P_{cr}$ .

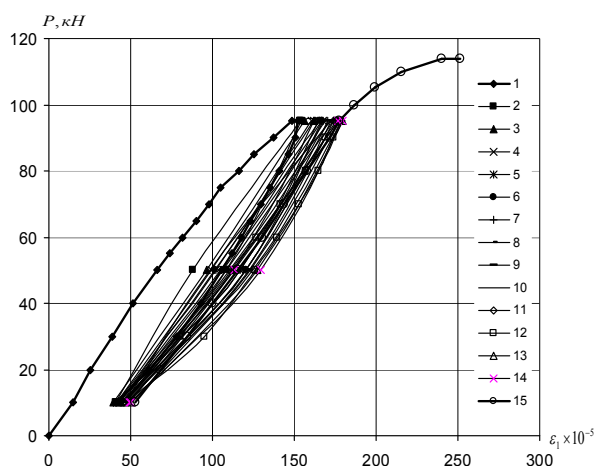


Рисунок 5 Характерная диаграмма деформирования « $P - \varepsilon_1(n)$ » стойки С-II-1 при повторных нагрузках: 1 — нагрузка 1-го цикла; 2–14 — нагрузки 2–14-го циклов соответственно; 15 — нагрузка 15-го цикла

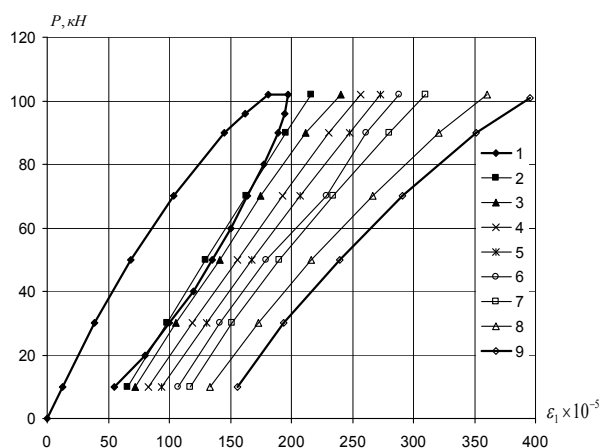


Рисунок 6 Диаграмма циклического деформирования « $\sigma - \varepsilon$ » стойки С-II-1 при повторных нагрузках: 1 — нагрузка 1-го цикла; 2–14 — нагрузки 2–14-го циклов соответственно; 15 — нагрузка 15-го цикла

Это даёт основание предположить, что в процессе нагружения стоек достижение крайними фибрами сжатого бетона максимальных напряжений  $\sigma_{b,\max}$  происходит раньше достижения нагрузкой значения  $P_{cx}$ . Дальнейшее уменьшение напряжений при увеличивающейся нагрузке связано с реализацией нисходящей ветви диаграммы бетона стоек « $\sigma_b - \varepsilon_b$ », но при более интенсивном росте деформаций. В момент потери несущей способности стоек (при нагрузке  $P = P_{cr}$ ) значения указанных напряжений, соответствующих концам нисходящих ветвей диаграммы деформирования бетона в среднем составили  $\sigma_{b,\min} \approx 0,87\sigma_{b,\max}$ . Таким образом, достижение максимумов кривых « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » и « $P - \varepsilon_1$ » происходило практически одновременно (расхождение значений не более 5 %).

Отмеченное выше наличие ниспадающих участков на диаграммах « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » бетона внецентренно сжатых стоек подтверждается опытами других исследователей и, как показано в работе [10], является необходимым условием, которому должна отвечать диаграмма « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » материала, чтобы кривые состояния изгибаемых и внецентренно сжатых элементов при деформациях крайних фибр  $\varepsilon_b > \varepsilon_{bR}$  имели максимум, то есть точку, соответствующую потере устойчивости. Что же касается изломов на ниспадающих ветвях диаграмм деформирования стоек, то они, возможно, связаны с погрешностями эксперимента и заменой дифференциала в уравнениях (1) и (2) конечными приращениями.

Анализ диаграмм циклического деформирования бетона « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » повторно нагружаемых стоек (рис. 2 и 3) позволил сделать вывод, что восходящий участок диаграммы вследствие постепенного накопления пластических (остаточных) деформаций в пределах заданных нагружений выпрямляется и бетон сжатой зоны сечения ведёт себя как упругий материал.

При этом угол наклона «прямых» « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » к оси абсцисс, начиная со второго цикла, постепенно уменьшается, что является свидетельством снижения начального модуля упругости бетона (жёсткостных характеристик сечений) стоек. На втором цикле нагружения угол наклона становится равным углу наклона касательной к кривой первого цикла, а затем, постепенно, от цикла к циклу, происходит его дальнейшее уменьшение. Из рисунков видно, что при постоянной величине максимального усилия циклов повторного нагружения значения фибровых напряжений, достигаемые в конце полуциклов, увеличиваются сразу после первого цикла и стабилизируются, начиная со второго цикла (наступление приспособляемости).

Данное явление можно объяснить перераспределением усилий между сжатым бетоном и растянутой арматурой вследствие развития пластических деформаций, приводящих к увеличению эксцентриситета приложения  $P_{\max}^{cyc}$  и циклического уплотнения бетона, связанного с уплотнением его структуры. При этом увеличение значения напряжений, наблюдаемое при переходе с первого на второй цикл, связано с величиной остаточного прогиба после первого цикла, который является дополнительным эксцентриситетом второго цикла.

На рисунке 7 приведено сопоставление диаграмм деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » внецентренно сжатых однократно и повторно нагружаемых стоек (со смещением последних на начало координат) с диаграммами центрально сжатых бетонных призм проектной прочности.

Как видно из рисунка, приведённые кривые « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » имеют характерное очертание и в целом достаточно близки между собой. Следует также заметить, что верхние точки (напряжения в вершинах диаграмм деформирования) кривых стоек практически не выходят за пределы, ограниченные кривой призмы. Это даёт основание заклю-

чить, что диаграмма деформирования бетона при однократном центральном нагружении призм является огибающей для « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » бетона стоек при однократных и повторных нагружениях мягкого режима.

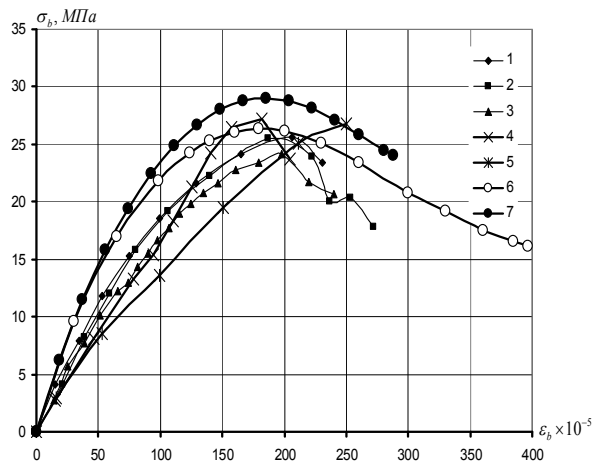


Рисунок 7 Диаграммы деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » бетона стоек и призм: 1–3 — стойки С-I-1, С-I-2, С-I-3 при однократных нагружениях; 4, 5 — стойки С-II-1, С-III-1 после действия повторных нагружений со смещением на начало координат; 6 и 7 — призмы прочностью  $R_b = 26,4$  МПа и  $R_b = 29$  МПа

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Полученные зависимости дифференциального метода позволили построить диаграммы деформирования « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » сжатого бетона непосредственно по результатам испытаний железобетонных внецентренно сжатых стоек в условиях однократных и многократно повторных нагружений и выявить следующее:

– для исследуемых железобетонных внецентренно сжатых стоек достижение максимумов кривых « $P - \varepsilon_1$ » и « $\sigma_b - \varepsilon_b$ » в процессе однократного кратковременного нагружения происходит практически одновременно, при этом достижение  $\sigma_b = \sigma_{b, \max}$  несколько опережает достижение  $P = P_{\max}$  на кривой « $P - \varepsilon_1$ »;

– результаты сопоставления параметров диаграмм « $\sigma_b - \varepsilon_b$ », полученных при однократном внецентренном сжатии железобетонных стоек и центральном сжатии бетонных призм, свидетельствуют об их практическом совпадении, что говорит о возможности использования последних для расчёта железобетонных стержневых элементов.

### Библиографический список

1. Бачинский, В. Я. Связь между напряжениями и деформациями бетона при кратковременном неоднородном сжатии [Текст] / В. Я. Бачинский, А. Н. Бамбура, С. С. Ватагин // Бетон и железобетон. — 1984. — № 10. — С. 18–19.
2. Бамбура, А. Н. К построению деформационной теории железобетона стержневых систем на экспериментальной основе [Текст] / А. Н. Бамбура, А. Б. Гурковский // Сборник научных трудов НДБК. — К., 2003. — Вып. 59. Книга 1. — С. 121–130.
3. Карпетян, С. Х. Развитие метода Фере для нахождения закона деформаций бетона из опыта на внецентренное сжатие при однократных и многократно повторных нагружениях [Текст] / С. Х. Карпетян // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2008. — Вып. 26. — С. 287–296.
4. Подобенко, Т. Н. Напряжённо-деформированное состояние железобетонных изгибаемых элементов при кратковременных повторных нагружениях [Текст] : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.23.01 / Подобенко Татьяна Николаевна. — К. : НИИСК, 1991. — 17 с.
5. Столяров, Я. В. Введение в теорию железобетона [Текст] / Я. В. Столяров. — М. : Стройиздат Наркомстроя, 1941. — 446 с.
6. Карпетян, С. Х. Прочность и устойчивость внецентренно сжатых стержней в условиях многократно повторных нагружений [Текст] : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.23.01 / Карпетян Смбат Хачатурович. — К. : НИИСК, 2009. — 20 с.



7. Методические рекомендации по определению параметров диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » бетона при кратковременном сжатии [Текст] / В. Я. Бачинский, А. Н. Бамбура и др. — К., 1985. — 16 с.

8. Ватагин, С. С. Связь между напряжениями и деформациями бетона в сжатой зоне ж/б элементов. Интегральная оценка работы растянутого бетона [Текст] : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.23.01 / С. С. Ватагин. — К. : НИИСК, 1987. — 19 с.

9. Карапетян, С. Х. Результаты экспериментальных исследований влияния многократно повторных нагрузжений на несущую способность внецентренно сжатых стоек [Текст] / С. Х. Карапетян, А. И. Давиденко, А. П. Иванов, В. В. Псюк // Сборник научных трудов НДІБК. — К., 2005. — Том 1. — Вып. 62. — С. 131–136.

10. Бамбура, А. М. Про втрату стійкості позацентрово стиснутих елементів з пружно-пластичного матеріалу [Текст] / А. М. Бамбура // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій : збірник наукових праць. — Львів : Каменяр, 2002. — Вип. 5. — С. 213–218.

© Карапетян С. Х.

© Псюк В. В.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ПГС и АИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Хвортовой М. Ю., к.т.н., доц., зав. каф. АПИИГ ДонГТУ Бондарчуком В. В.*

Статья поступила в редакцию 28.02.20.

**к.т.н. Карапетян С. Х., к.т.н. Псюк В. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)  
ДО ПОБУДОВИ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ БЕТОНУ З ДОСЛІДУ  
НА ПОЗАЦЕНТРОВЕ СТИСНЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СТОЯКІВ  
ПРИ ОДНОРАЗОВИХ ТА ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ**

*Наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень зі встановлення зв'язку між напруженнями і деформаціями в умовах неоднорідного стиснення бетону з використанням диференційного методу Фере.*

**Ключові слова:** залізобетонний стаяк, позацентрове стиснення, небагаторазове повторне навантаження, деформативність, диференційний метод.

**PhD in Engineering Karapetyan S. Kh., PhD in Engineering Psiuk V. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)  
TO CONSTRUCT DIAGRAMS OF CONCRETE DEFORMATION FROM THE  
EXPERIENCE OF THE OFF-CENTER COMPRESSION OF REINFORCED CONCRETE  
PROPS UNDER SINGLE AND REPEATED LOADS**

*There have been given the results of experimental and theoretical studies on connection between stresses and deformations in conditions of non-uniform concrete compression using the differential Fere method.*

**Key words:** reinforced concrete prop, off-center compression, intermittent load, deformability, differential method.

УДК 624.014.074

к.т.н. Усенко В. Н.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕКРЁСТНО-БАЛОЧНЫХ СИСТЕМ ПОКРЫТИЙ С ГИБКИМИ ЗАТЯЖКАМИ В НЕСКОЛЬКИХ УРОВНЯХ

*Рассматривается задача проверки эффективности пространственных перекрёстно-балочных систем с гибкими затяжками в нескольких уровнях при расчёте их методами оптимального проектирования с использованием ПК «ЛИРА».*

**Ключевые слова:** пространственные перекрёстно-балочные системы с гибкими затяжками, методы оптимального проектирования, экономический эффект.

**Актуальность проблемы.** Одно из направлений повышения эффективности строительного производства — переход к применению лёгких металлических конструкций, в том числе эффективных пространственных покрытий.

Здания и сооружения с применением лёгких металлических конструкций комплектной поставки особо перспективны для строительства в сельских районах республики, где отсутствует или слабо развита строительная база и ощущается недостаток трудовых ресурсов, а также при реконструкции действующих предприятий, где имеют место стеснённые условия монтажа.

Применение предварительного напряжения является одним из направлений в решении проблемы снижения материалоемкости металлических конструкций. В этой связи существенно возрастает роль оптимального проектирования, которое в практике строительства применяется ещё недостаточно широко.

Таким образом, направленность работы совпадает с одной из главных и долговременных задач капитального строительства — снижением материалоемкости строительных металлоконструкций.

**Основная часть.** На кафедре строительных конструкций ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ» разработана конструкция покрытия, которая представляет собой систему перекрёстных металлических балок с предварительно на-

пряжёнными гибкими затяжками, расположенными в нескольких уровнях.

Схема конструкции, показанная на рисунке 1, включает в себя опирающиеся по контуру балки продольного и поперечного направлений, к узлам соединения которых верхними концами шарнирно прикреплены вертикальные стойки, их нижние концы соединены с гибкими затяжками первого уровня. С целью повышения жёсткости конструкции в промежутках между стойками первого (нижнего) уровня выполнен второй (верхний) уровень гибких затяжек.

Жёсткие верхние пояса шпренгельных балок и вертикальные стойки выполняются из прокатных или гнутосварных профилей. Балки перекрёстных направлений в точках пересечений соединяются между собой жёсткими узлами, способными воспринимать изгибающие моменты и поперечные силы соответственно в плоскости каждой примыкающей к узлу шпренгельной балки.

Гибкие затяжки выполняются из канатов, пучков или стержней из высокопрочной стали и закреплены в приопорных участках балок. Очертание затяжек принято в виде ломаной линии, вписанной в квадратную параболу. Величины стрелок парабол и количество панелей принимаются в зависимости от конкретных условий, учитывая, что увеличение этих параметров, как правило, ведёт к уменьшению материалоемкости конструкции.

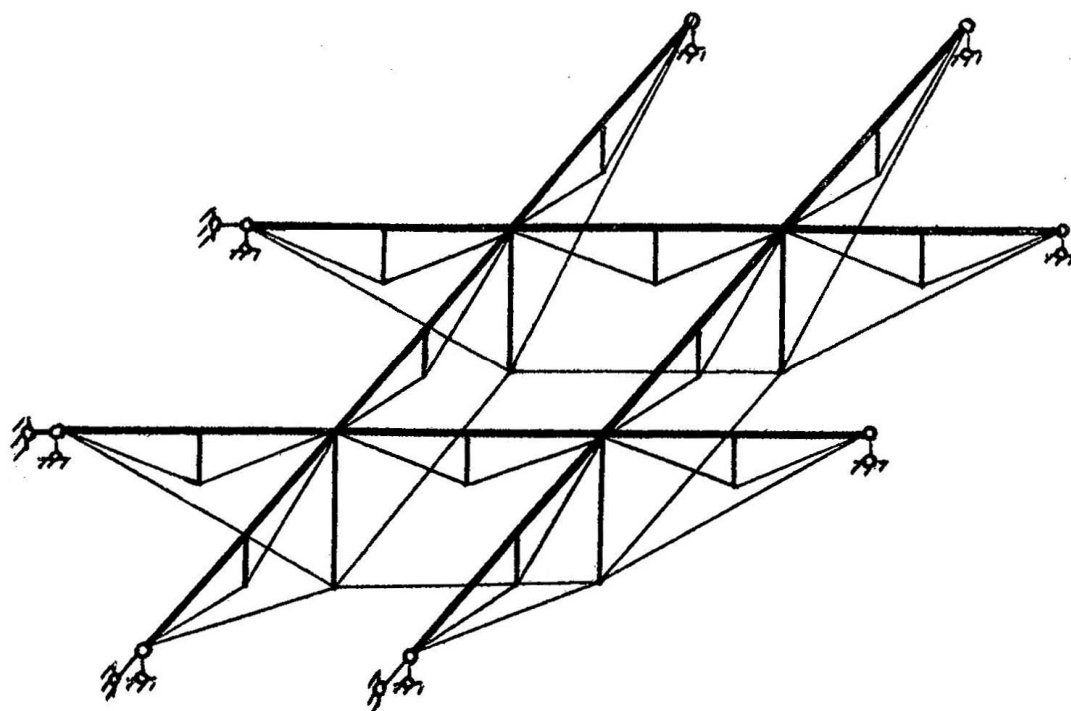


Рисунок 1 Перекрёстно-балочная система покрытий с гибкими затяжками в нескольких уровнях

С целью исключения геометрической изменяемости конструкции предусмотрена постановка диагональных связей в плоскости балок.

Предлагаемые конструкции покрытия обладают достоинствами: применение предварительного напряжения и гибких затяжек из сталей повышенной прочности, значительная жёсткость покрытия, высокая степень надёжности от внезапного разрушения, возможность регулировать распределение усилий в балках за счёт изменения уровня напряжений в затяжках.

Исследуемые конструкции могут быть использованы в качестве покрытий большепролётных зданий и сооружений. Эффективность применения конструкции в качестве покрытий большепролётных зданий и сооружений зависит от целого ряда факторов, а именно: величины и характера нагрузки, количества панелей балки, высоты шпренгеля, сечения, шага балок в продольном и поперечном направлениях, марки стали и др.

Преимущества предлагаемых систем покрытий также состоят в том, что наличие нескольких уровней гибких затяжек, а

также возможность регулировать распределение изгибающих моментов по длине балок за счёт величины предварительного напряжения затяжек позволяют значительно уменьшить расчётные значения изгибающих моментов.

В основу работы положен метод оптимизации предварительно напряжённых металлических конструкций. Подлежит решению первая задача оптимального проектирования, сформулированная в [2, 3]: нахождение оптимального распределения внутренних усилий и материала в статически неопределимых системах с заданной геометрической схемой при условии введения предварительного напряжения в лишние связи. То есть при выполнении системы ограничений, учитывающей требования прочности, устойчивости и работоспособности элементов, необходимо определить величины искомых параметров, соответствующих минимальному значению целевой функции (принятому критерию качества).

В качестве целевой функции (критерия оптимальности) принята стоимость мате-

риалов конструкции, представленная как сумма соответствующих показателей составляющих элементов и имеющая вид

$$Z = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n A_i \cdot l_i \cdot \gamma_i \cdot \varphi_i \cdot c_i, \quad (1)$$

где  $A_i$  — площадь поперечного сечения элемента;  $l_i$  — длина элемента;  $\gamma_i$  — плотность материала;  $\varphi_i$  — конструктивный коэффициент;  $c_i$  — стоимость единицы массы конструкции.

Целью численных исследований оптимального распределения усилий и материала является проверка эффективности предлагаемых пространственных предварительно напряжённых перекрёстных систем покрытий с гибкими затяжками при расчёте их методами оптимального проектирования. В то же время численные исследования дают возможность совершенствовать и развивать методику расчёта.

При проведении численных исследований с использованием ПК «ЛИРА» [1, 5] ставились следующие задачи:

1. Определить оптимальное количество перекрёстных балок, соответствующее минимальной стоимости конструкции при различных внешних нагрузках.

2. Исследовать степень влияния второго уровня затяжек на величину усилий и перемещений пространственных систем.

3. Получить значение оптимальной высоты конструкции для рассматриваемых систем покрытий.

Численное исследование проводилось в следующей последовательности:

1. Выбор количества перекрёстных балок (размера ячейки системы).

2. Исследование оптимального распределения усилий и материала в системах с различным количеством перекрёстных балок и числом уровней затяжек.

3. Поиск оптимальной высоты конструкции.

Критерием эффективности решения поставленной задачи являются расход материала и стоимость по сравнению с показателями типовых систем покрытий, проектирование которых осуществлялось вариан-

тными методами.

При проектировании данной перекрёстно-балочной конструкции исследовались различные варианты конструктивных решений предлагаемых систем покрытий, имеющих один и два уровня гибких затяжек, с изменением количества перекрёстных балок от  $2 \times 2$  до  $7 \times 7$  (размер ячейки изменялся от  $4,0 \times 4,0$  м до  $1,5 \times 1,5$  м).

Оптимизационный расчёт конструкций выполнялся согласно разработанному алгоритму. Соотношение жёсткостей элементов, необходимое для расчёта ненапряжённой статически неопределимой системы и определения усилий самонапряжения, принималось исходя из имеющегося опыта проектирования аналогичных конструкций.

Исследовалась также возможность введения начальных усилий не во все лишние связи, а только в гибкие затяжки ввиду удобства создания в них усилий предварительного напряжения. Кроме того, введение начальных усилий в места пересечения балок трудноосуществимо и ведёт к значительному усложнению конструкции узлов.

В случае если усилия предварительного напряжения вводятся только в гибкие затяжки, то материалоёмкость конструкции повышается на 4,85 % по сравнению со случаем введения начальных усилий во все лишние связи системы.

Для определения показателей трудоёмкости и стоимости пространственных перекрёстных систем с гибкими затяжками использована методика Я. М. Лихтарникова [4].

При определении стоимости исследуемых систем покрытий затраты, несущественно зависящие от массы и технологии изготовления конструкций, не учитывались. В частности, не учитывались затраты на монтаж, зависящие в большей степени от принятой технологии производства работ, количества монтажных единиц и т. п. и в меньшей степени — от массы монтируемых конструкций. Также не учитывались транспортные расходы, которые зависят не только от массы, но и от расстояния транспортировки.

Поиск оптимальной высоты рассматриваемых систем покрытий с количеством перекрёстных балок  $2 \times 2$  и  $3 \times 3$  с одним уровнем гибких затяжек выполнялся с помощью итерационного процесса путём целенаправленного изменения высоты конструкции  $H$ . При решении данной задачи для различных значений параметра  $H$  распределение усилий, материала и основные показатели конструктивной формы определяются по алгоритму оптимизационного расчёта конструкций с заданной геометрической схемой.

Анализ полученных результатов расчётов показывает, что рост количества перекрёстных балок (уменьшение размера ячейки) приводит к снижению стоимости материала конструкции. Удельный расход стали на предлагаемое покрытие с учётом контурных ферм составил  $18,2 \text{ кг/м}^2$ , что меньше, чем на аналогичные типовые покрытия из лёгких металлических конструкций комплектной поставки («Молодечно» —  $22,8 \text{ кг/м}^2$ , «Кисловодск» —  $19,1 \text{ кг/м}^2$ , «ЦНИИСК» —  $18,5 \text{ кг/м}^2$ ).

Функция зависимости стоимости конструкции с учётом затрат на создание предва-

рительного напряжения от количества перекрёстных балок имеет экстремум (минимум) для систем с количеством перекрёстных балок  $2 \times 2$  (размер ячейки  $4,0 \times 4,0 \text{ м}$ ) и  $3 \times 3$  (размер ячейки  $3,0 \times 3,0 \text{ м}$ ). Исходя из этого, следует считать, что количество перекрёстных балок должно назначаться соответствующим минимальной стоимости конструкции с учётом затрат на создание предварительного напряжения, при котором возможно беспрогонное решение кровли.

С увеличением количества перекрёстных балок эффективность применения второго уровня гибких затяжек снижается, однако его наличие способствует уменьшению усилий в элементах системы и снижению материалоемкости.

Оптимальная высота исследуемых перекрёстно-балочных систем с гибкими затяжками, соответствующая минимальной стоимости материала конструкции, равна  $2,5 \text{ м}$ , т. е.  $1/4,8$  её пролёта (рис. 2). Результат получен без учёта повышения стоимости несущих и ограждающих конструкций при увеличении строительного объёма здания.

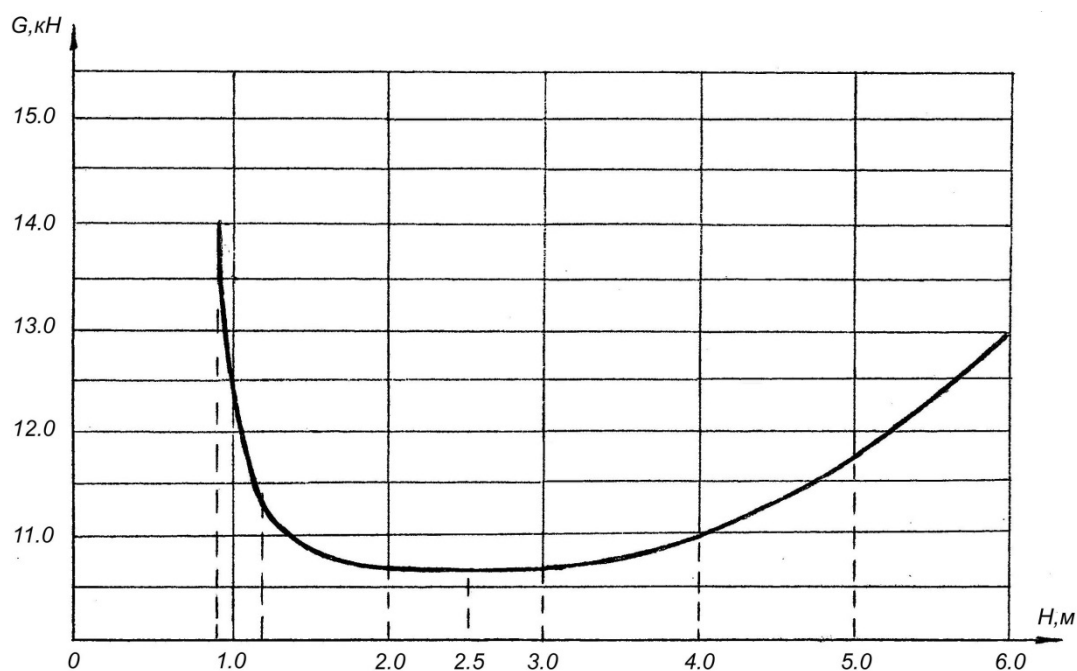


Рисунок 2 Зависимость материалоемкости конструкции покрытия с количеством перекрёстных балок  $2 \times 2$  с одним уровнем затяжек от высоты системы  $H$

В области экстремума функция имеет пологий характер, поэтому при отклонении фактической высоты конструкции от оптимальной на 20 % материалоемкость возрастает всего на 8–10 %.

При реальном проектировании конкретных перекрёстно-балочных систем исследуемого типа назначение такой большой высоты вряд ли возможно, поэтому можно полагать, что увеличение выноса гибких затяжек в пределах общей строительной высоты, как правило, приводит к снижению материалоемкости конструкции.

#### Выводы:

1. Применение пространственных перекрёстных систем с гибкими затяжками взамен существующих даёт экономический эффект за счёт уменьшения массы расходуемой стали до 25 % по сравнению с типовыми конструкциями.

2. Количество перекрёстных балок должно назначаться соответственно минимальной стоимости конструкции с учётом затрат на создание предварительного напряжения, при котором возможно беспрогонное решение кровли.

3. При увеличении количества перекрёстных балок эффективность применения второго уровня гибких затяжек снижается, однако наличие второго уровня затяжек способствует уменьшению усилий в элементах системы и снижению материалоемкости.

4. Поиск оптимальной высоты конструкции показал, что с увеличением высоты (до 1/4,8 её пролёта) материалоемкость предлагаемых систем покрытий снижается. Поэтому на практике высоту конструкции следует принимать не ниже типовой, а в случае если увеличение высоты не приводит к росту строительной высоты покрытия, то её необходимо назначать в пределах до 1/4,8 пролёта.

5. Методика оптимального проектирования перекрёстных систем исследуемого типа на ряде этапов предполагает использование стандартных программ расчёта стержневых конструкций и программ решения основной задачи линейного программирования, что позволяет снизить трудоёмкость расчётов и сократить сроки проектирования.

#### Библиографический список

1. Свод правил СП 16.13330.2011. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81\*. — М. : Минрегион России, 2011. — 173 с.
2. Трофимович, В. В. Оптимальное проектирование металлических конструкций [Текст] / В. В. Трофимович, В. А. Пермяков. — К. : Будівельник, 1981. — 136 с.
3. Трофимович, В. В. Оптимизация металлических конструкций [Текст] / В. В. Трофимович, В. А. Пермяков. — К. : Вища школа, 1983. — 200 с.
4. Лихтарников, Я. М. Металлические конструкции : методы технико-экономического анализа при проектировании [Текст] / Я. М. Лихтарников. — М. : Стройиздат, 1968. — 263 с.
5. Метод конечных элементов [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/>.

© Усенко В. Н.

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ПГС и А ИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Хвортовой М. Ю., к.т.н., доц., зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В.

Статья поступила в редакцию 28.02.20.

к.т.н. Усенко В. М. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

**ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ПЕРЕХРЕСНО-БАЛКОВИХ СИСТЕМ ПОКРИТТІВ З ГНУЧКИМИ ЗАТЯЖКАМИ  
У КІЛЬКОХ РІВНЯХ**

*Розглядається актуальна задача перевірки ефективності просторових перехресно-балкових систем покриттів з гнучкими затяжками при розрахунку їх методами оптимального проектування з використанням ПК «ЛІРА».*

**Ключові слова:** просторові перехресно-балкові системи з гнучкими затяжками, методи оптимального проектування, економічний ефект.

PhD in Engineering Usenko V. N. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

**NUMERICAL INVESTIGATION AND DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF  
CROSS-BEAM COATING SYSTEMS WITH FLEXIBLE TIE-BARS AT SEVERAL LEVELS**

*We consider the problem of checking the effectiveness of dimensional cross-beam systems with flexible tie-bars at several levels when calculating them by optimal design methods using the “LIRA” software package.*

**Key words:** dimensional cross-beam systems with flexible tie-bars, optimal design methods, economic effect.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ  
И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

---

**МАШИНОБУДУВАННЯ  
ТА МАШИНОЗНАВСТВО**

---

**MECHANICAL ENGINEERING  
AND MACHINE SCIENCE**





УДК 621.876.212

д.т.н. Корнеев С. В.,  
к.т.н. Доброногова В. Ю.,  
Долгих В. П.,  
Захаров О. В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

### МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ANSYS WORKBENCH НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗИНОТКАНЕВОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ С МЕХАНИЧЕСКИМ СТЫКОМ ПРИ ИЗГИБЕ НА ОБВОДНЫХ БАРАБАНАХ

*Приводится модель и результаты моделирования в программном комплексе ANSYS Workbench напряжённно-деформированного состояния механического стыка резиноканевых конвейерных лент при прохождении им обводного барабана. Установлены коэффициенты концентрации напряжений в элементах механического стыка и расчётные запасы прочности.*

**Ключевые слова:** конвейерная лента, механическое соединение, моделирование, напряжённно-деформированное состояние, напряжение.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** В участковых шахтных конвейерах резиноканевые ленты соединяются, как правило, механическим способом. Прочность различного типа механических стыков, согласно требованиям отраслевого стандарта [1], должна быть не менее 60 % агрегатной прочности ленты, а на практике составляет всего лишь 30...40 % [2]. Срок службы стыка, выполненного с помощью заклёпок, составляет 3...4 месяца, а с помощью П-образных скоб — 6...8 месяцев, что примерно в 5 раз меньше срока службы ленты [2].

Важным этапом, предшествующим разработке мероприятий по повышению прочности и долговечности механического стыка, является выбор подходящего метода исследования и определение нормальных напряжений в прокладках ленты и касательных напряжений в сквидах, возникающих в зоне механического стыка при прохождении им обводных и приводных барабанов конвейера.

Известны различные аналитические методы исследования напряжённно-деформированного состояния (НДС) конвейерной ленты и вулканизированных стыков при воздействии растягивающих и из-

гибных нагрузок на отклоняющих барабанах. В работе [4], например, в которой рассматривается слоистая структура ленты, достигнуто наибольшее приближение структуры модели к оригиналу. Однако при линейной постановке задачи рассматриваются только продольные деформации ленты без учёта упругих и прочностных свойств прокладок по утку, что, несомненно, снижает точность полученных результатов.

Получение новых научных результатов в исследуемой предметной области объёмной деформации элементов механических соединений лент стало возможным благодаря применению новых технологий исследования, в частности программного комплекса ANSYS Workbench. Проведённые с применением ANSYS Workbench исследования НДС при растягивающих нагрузках, передаваемых ленте от размещённых в ней скрепляющих металлических стержней (заклёпок или болтов), позволили выявить значительную концентрацию напряжений вокруг отверстий, в которых размещены эти стержни [3]. Коэффициенты концентрации напряжений в прокладках и сквидах при определённых сочетаниях параметров стыка достигают значений, близких к нормативным запасам

прочности ленты, что может привести к разрушению стыка. Очевидно, что программный комплекс ANSYS Workbench может быть применён и для моделирования более сложных случаев нагружения, в том числе и таких, которые возникают при прохождении механическим стыком обводных и приводных барабанов конвейера. Исследования такого рода не проводились.

**Целью работы** является исследование с применением программного комплекса ANSYS Workbench напряжённо-

деформированного состояния конструктивных элементов механического стыка резиноканевой конвейерной ленты при прохождении ею обводных барабанов.

**Изложение материала и результатов исследования.** На рисунке 1 представлена разработанная в программном комплексе ANSYS Workbench геометрическая модель ленты с механическим соединением типа «Флекско» и обводного барабана в начальном положении, а на рисунке 2 — нанесённая на неё конечно-элементная сетка.

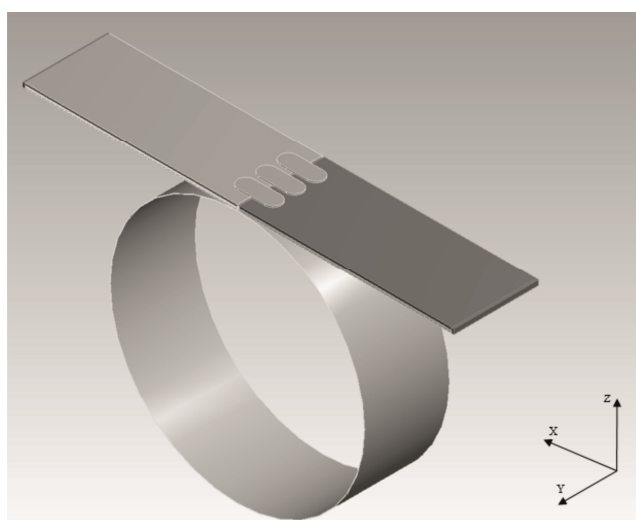


Рисунок 1 Геометрическая модель обводного барабана и ленты с механическим стыком

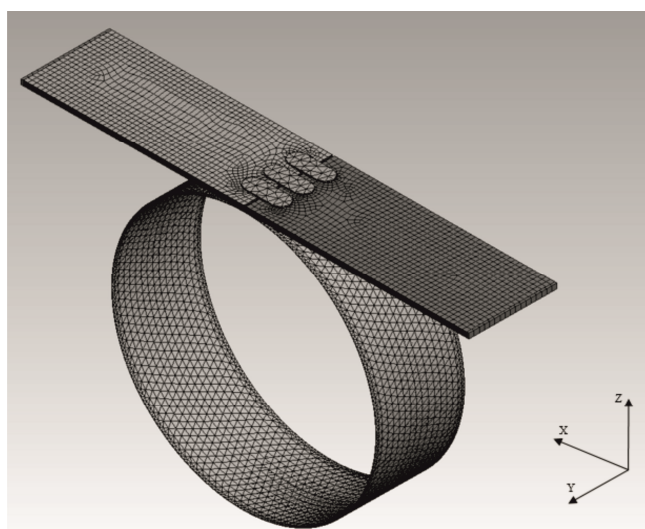


Рисунок 2 Конечно-элементная сетка модели обводного барабана и ленты с механическим стыком

При составлении конечно-элементной модели системы «лента — механическое соединение — барабан» принимаются следующие положения:

1) резинотканевая лента является слоистой композицией из тканевых прокладок, резиновых прослоек и обкладок;

2) тканевые прокладки представляются в виде упругих ортотропных тел;

3) резиновые прокладки и обкладки являются упругими изотропными телами;

3) барабан и элементы механического соединения — абсолютно твёрдые тела;

4) трение между лентой и обводным барабаном отсутствует;

5) для сокращения продолжительности компьютерного моделирования рассматривается не вся лента, а два выделенных отрезка в виде продольных полос, соединённых тремя П-образными скобами, что допустимо ввиду регулярного строения ленты и распределения напряжений в области стыка [3];

6) на свободные концы отрезка ленты, расположенного на обводном барабане и плоского в исходном относительно барабана положении, действует равномерно распределённое между прокладками и по ширине отрезка изгибающее усилие  $S$ , направленное вдоль оси конвейера (в исходном положении ленты — по нормали к её поверхности);

7) нагружение ленты производится в статическом режиме, т. е. динамика, насколько это возможно, минимизируется. При этом силы инерции и внутреннего трения незначительны;

8) лента находится в работоспособном состоянии, если выполняются условия прочности  $\sigma_1 \leq [\sigma_{\text{пр.о}}]$ ,  $\sigma_2 \leq [\sigma_{\text{пр.у}}]$  (первая теория прочности) и  $\tau_{\text{max}} \leq [\tau]$ , где  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  — главные нормальные напряжения в прокладках ленты,  $[\sigma_{\text{пр.о}}]$  и  $[\sigma_{\text{пр.у}}]$  — пределы прочности по основе и по утку,  $\tau_{\text{max}}$  и  $[\tau]$  — максимальное и допустимое

по условию сцепления резины с прокладками тангенциальные напряжения в сквиджах и обкладках.

Принятые допущения в ANSYS Workbench обеспечиваются следующим образом:

1) элементы системы «лента — барабан» моделируются объёмными трёхмерными конечными элементами (КЭ) в виде призм и тетраэдров;

2) между КЭ прокладок и КЭ окружающих их прослоек и обкладок осуществляется связь типа Bonded;

3) между поверхностями нижней обкладки и барабана принимается контакт типа Frictional;

4) между металлическими пластинами механического соединения и обкладками ленты принимается контакт типа Frictional;

5) резиновые обкладки и прослойки ленты представляются в виде двухпараметрической модели Муни — Ривлина, которая обычно используется для описания гиперупругих материалов. Модель определяется так называемыми материальными коэффициентами  $C_{10}$  и  $C_{01}$  в зависимости «напряжение — деформация». Значения коэффициентов, полученные расчётным путём на основании известных экспериментальных зависимостей «нагрузка — деформация»:  $C_{10} = 0,66$  МПа,  $C_{01} = 0,324$  МПа [5].

В качестве исходных данных принимаются геометрические параметры и физико-механические свойства конструктивных элементов системы «лента — механический стык — барабан».

*Исходные данные:* отрезок ленты типа ЕР шириной 0,2 м и с числом прокладок  $n=3$ ; обкладочная резина класса А; изгибающее усилие, действующее на ленту вдоль оси конвейера (вначале в направлении, противоположном оси  $z$ ) — 10 Н; растягивающее усилие, прикладываемое к концам отрезка ленты по окончании изгиба — 2 кН; модули упругости тканевой прокладки ленты по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ :  $E_x = 10^8$  Па,  $E_y = 6 \cdot 10^7$  Па,  $E_z = 6 \cdot 10^7$  Па; модули сдвига по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ :  $G_x = 2,85 \cdot 10^8$  Па,  $G_y = G_z = 1,14 \cdot 10^8$  Па;

коэффициенты Пуассона: для тканевой прокладки по основе  $\mu_{то}=0,275$  и по утку  $\mu_{ту}=0,135$ , для резины —  $\mu_r=0,4$ ; прочность тканевых прокладок по основе  $[\sigma]_x$  и по утку  $[\sigma]_y$  равна соответственно 125 и 34,4 МПа; толщина тканевых прокладок  $\delta_n=1,2$  мм; толщина резиновых прослоек (сквиджей)  $\delta_c=0,5$  мм; диаметр барабана  $D=500$  мм.

Тип используемого механического соединения — Flexco Bolt Solid Plate. Диаметр стержней  $d$  и шаг их установки  $l$  принимаются равными соответственно 11 и 50 мм. Длина и ширина металлических пластин механического соединения равны соответственно 102 и 38 мм. Расстояние между стержнями — 62,5 мм.

Моделирование, в соответствии с принципом суперпозиции упругих сил, проводится в два этапа. Вначале к концам отрезков прикладывается сила, достаточная лишь для осуществления изгиба. Затем, по окончании изгиба, к ленте дополнительно прикладываются растягивающие силы, соответствующие номинальной нагрузке ленты (примерно 10 % от разрывного усилия). Такой подход позволяет выделить составляющие напряжений, обусловленные изгибом и растяжением ленты, а также установить соотношение между этими составляющими. В результате моделирования на каждом этапе определялись нормальные и касательные напряжения на

площадках, нормальных к осям  $x$ ,  $y$ , и  $z$  локальной системы координат, главные напряжения  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  в прокладках.

Для проверки точности расчётов с применением программного комплекса ANSYS Workbench произведено моделирование изгиба ленты без стыка и сопоставление полученных нормальных и касательных напряжений (рис. 3) с аналогичными напряжениями, полученными по известным аналитическим зависимостям Завгороднего — Морева [4]. Рассчитанные по формулам Завгороднего — Морева максимальные значения напряжений в тканевой прокладке ленты при угле обхвата барабана  $90^\circ$  не превышают 2 МПа. Результаты расчётов, полученные при моделировании с применением предложенной нами модели, приведены в таблице 1 и не превышают 2,2 МПа. Разработанная методика компьютерного моделирования изгибных нагрузок в элементах конвейерных лент даёт более точную оценку (до 10 %), так как позволяет учитывать большее число факторов при меньшем числе ограничений. Таким образом, есть основания полагать, что предлагаемая методика компьютерного моделирования обладает достаточной точностью и может быть применена также для исследования НДС механического стыка.

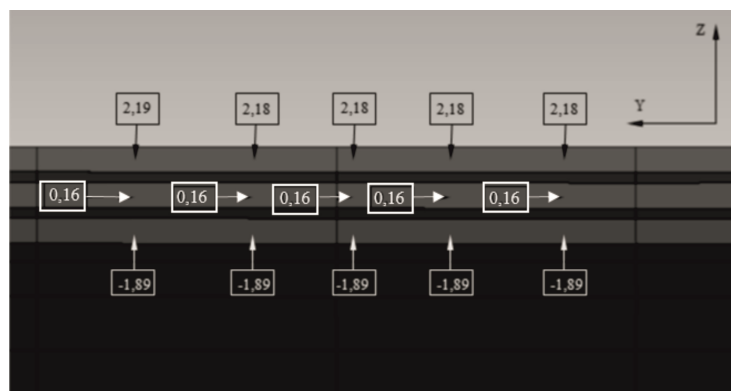


Рисунок 3 Распределение напряжений  $\sigma_x$  (МПа) в прокладках ленты при изгибе на обводном барабане

Таблица 1

Результаты расчёта с применением ANSYS Workbench  $\sigma_x$  в прокладках ленты в зависимости от угла изгиба на обводном барабане

$\sigma_x$ , МПа	Угол изгиба, град						
	0	15	30	45	60	75	90
Верхняя прокладка	$4,1 \cdot 10^{-2}$	0,3	1,03	1,07	1,6	2,1	2,2
Средняя прокладка	$-1,1 \cdot 10^{-2}$	$-7 \cdot 10^{-2}$	$-8,3 \cdot 10^{-2}$	$-7,9 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-2}$	0,15	0,15
Нижняя прокладка	$-5,5 \cdot 10^{-2}$	-0,49	-1,2	-1,2	-1,5	-1,8	-1,89

На рисунке 4 отражено положение ленты с механическим соединением, изогнутой на обводном барабане в конце первого этапа моделирования. На рисунке 5 отображено распределение полученных при изгибе нормальных напряжений  $\sigma_x$  в ленте вокруг центрального отверстия. В прокладках наблюдаются зоны растяжения ( $\sigma_x > 0$ ) и сжатия ( $\sigma_x < 0$ ). На данном этапе модуль сжатия принимался равным модулю растяжения, так как сжатие при изгибе следует считать условным, поскольку при наложении на втором этапе значительного растягивающего усилия в ленте возможны

только деформации растяжения. Верхняя прокладка при изгибе подвергается значительно большему нагружению, чем нижние прокладки. Максимальное напряжение растяжения в верхней прокладке  $\sigma_{x \text{ изг}}$  возникает на поверхности отверстия в поперечном сечении, проходящем через ось отверстия, и достигает 1,01 МПа. Изгибные нагрузки в верхней прокладке перфорированной и разрезанной ленты вследствие меньшей её изгибной жёсткости примерно в два раза меньше, чем в аналогичной прокладке целой ленты.

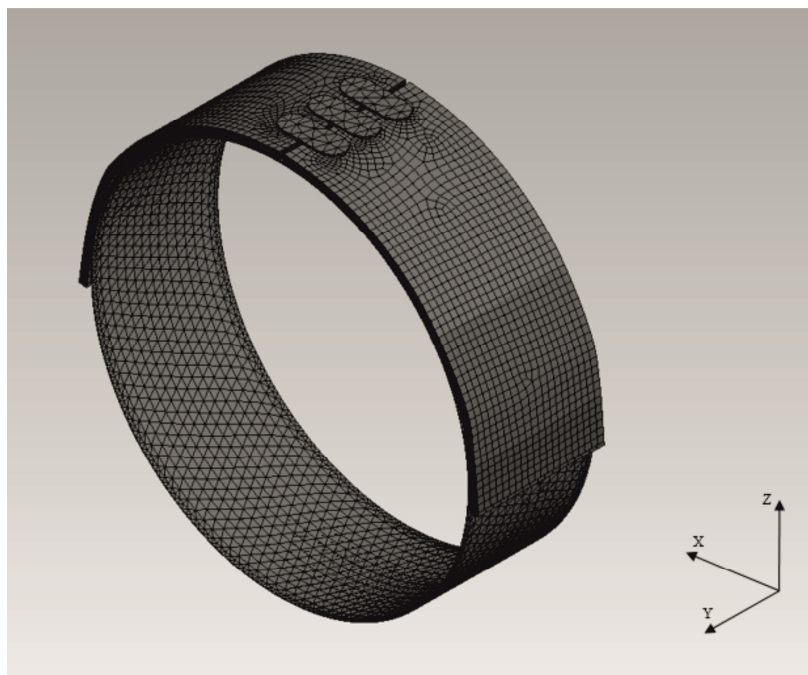


Рисунок 4 Положение ленты с механическим стыком, изогнутой на обводном барабане

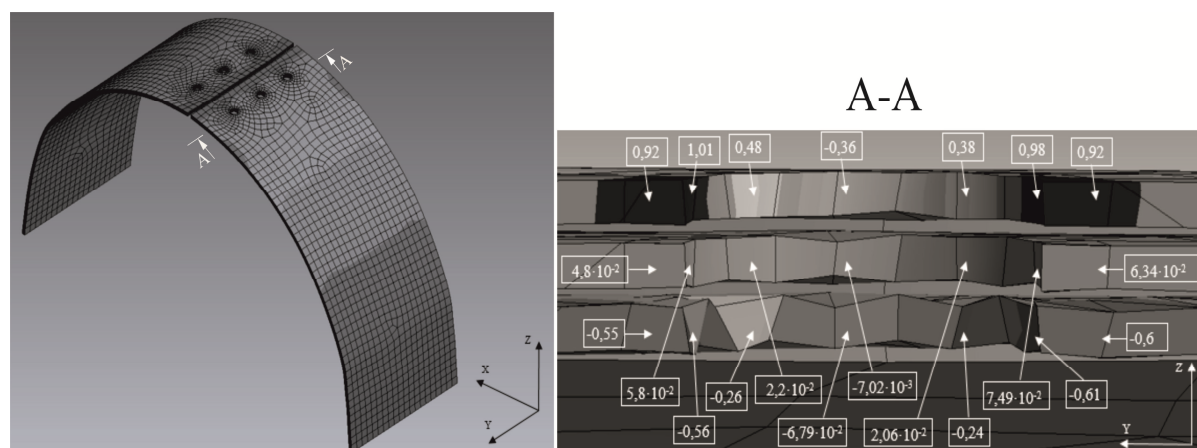


Рисунок 5 Распределение напряжений  $\sigma_x$  (МПа) в прокладках ленты вокруг центрального отверстия при изгибе на обводном барабане

На рисунке 6 отображена аналогичная картина распределения напряжений  $\sigma_y$  вокруг центрального отверстия. Максимальное значение напряжения  $\sigma_{y, \text{изг}}$  в области растяжения составляет 0,26 МПа. Асимметрия нагрузок в верхней прокладке вызвана перекосом первоначально нормального к поверхности ленты скрепляющего болта в отверстии при его слабом зажатии. В верхней точке верхней прокладки имеет место только деформация растяжения, вызванная изгибом ( $\sigma_y = 0,26$  МПа), а в нижней точке на деформацию растяжения накладывается деформация сжатия, вызванная давлением стержня ( $\sigma_y = 0,16$  МПа). В нижней про-

кладке всё наоборот: в нижней точке наблюдается деформация сжатия от изгиба в чистом виде ( $\sigma_y = -6,65 \cdot 10^{-2}$  МПа), а в верхней к ней добавляется деформация сжатия, вызванная давлением стержня, (суммарное напряжение  $\sigma_y = -0,1$  МПа). Таким образом, при чистом изгибе ленты на барабане применение П-образных скоб для соединения лент приводит к увеличению нагрузок. Необходимо стремиться к исключению перекосов болтов, применяя короткие или составные с шарнирами соединительные пластины. Резину обкладок под пластинами следует удалять.

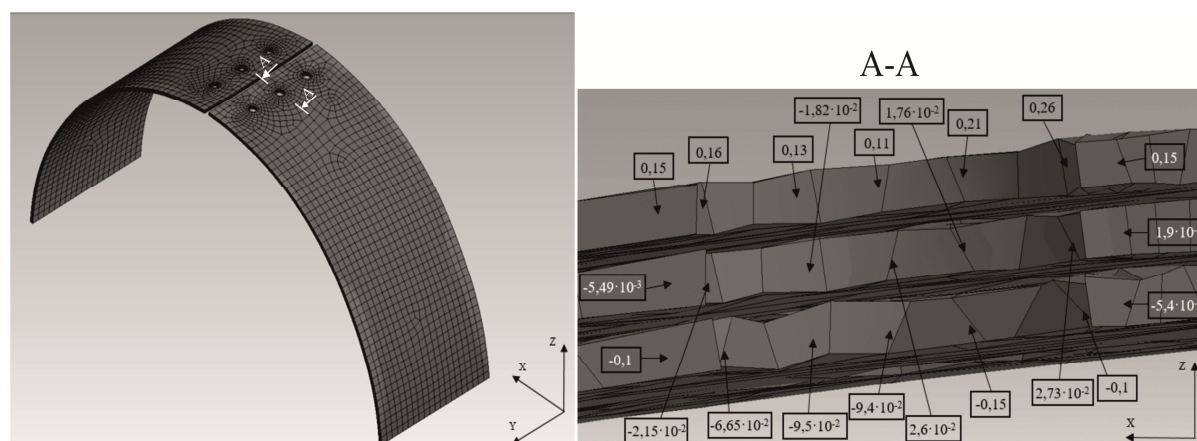


Рисунок 6 Распределение напряжений  $\sigma_y$  (МПа) в прокладках ленты вокруг центрального отверстия при изгибе на обводном барабане



На рисунках 7 и 8 показана картина распределения нагрузок вокруг центрального отверстия при изгибе и приложенной к концам ленты растягивающей нагрузке, равной 2 кН, (второй этап нагружения). Максимальные напряжения  $\sigma_{x \max}$  (см. рис. 7), равные 5,67 МПа, наблюдаются на поверхности отверстия в верхней прокладке.

Наибольшее напряжение  $\sigma_{x \text{ раст}}$  от растяжения по основе определяется согласно принципу суперпозиции. При этом из максимального суммарного напряжения  $\sigma_{x \max}$ , полученного на втором этапе нагружения, вычитается полученное в той же точке на первом этапе напряжение от чистого изгиба  $\sigma_{x \text{ изг}}$ , т. е.

$$\sigma_{x \text{ раст}} = \sigma_{x \max} - \sigma_{x \text{ изг}}. \quad (1)$$

В рассматриваемом случае при  $\sigma_{x \max} = 5,67$  МПа и  $\sigma_{x \text{ изг}} = 0,92$  МПа получается  $\sigma_{x \text{ раст}} = 4,75$  МПа.

Составляющая напряжения от изгиба ленты по основе составляет 16,2 % от суммарной нагрузки и должна учитываться при прочностных расчётах.

Коэффициент концентрации напряжений в верхней прокладке

$$k_x = \sigma_{x \max} / \sigma_{x p}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{x p}$  — расчётное нормальное напряжение в сечении прокладки плоскостью  $yz$ , проходящей через оси отверстий.

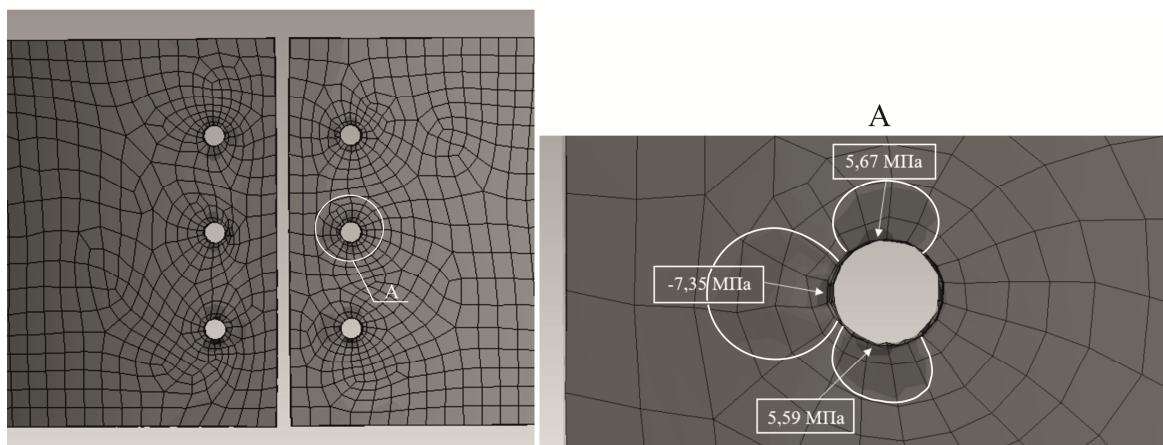


Рисунок 7 Распределение напряжений  $\sigma_x$  (МПа) в прокладках ленты вокруг центрального отверстия при изгибе и растягивающей нагрузке на обводном барабане

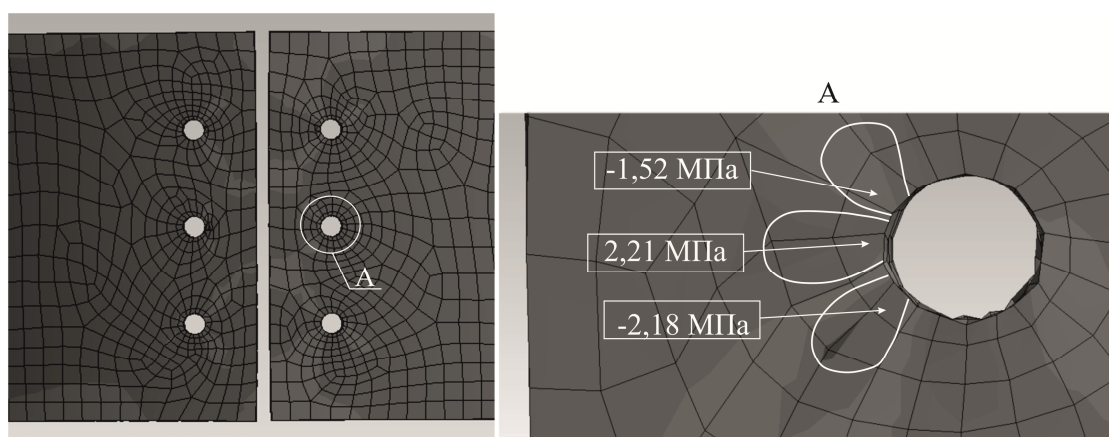


Рисунок 8 Распределение напряжений  $\sigma_y$  (МПа) в прокладках ленты вокруг центрального отверстия при изгибе и растягивающей нагрузке на обводном барабане



Расчётное нормальное напряжение

$$\sigma_{x p} = \frac{S}{\delta_{\Pi} n (B - 3d)} + \sigma_{x \text{ изг}}. \quad (3)$$

В данном случае  $k_x = 1,7$ .

Фактический коэффициент запаса прочности прокладки по основе

$$n_x = [\sigma]_x / k_x \sigma_{x p} = 125 / 1,7 \cdot 4,3 = 17. \quad (4)$$

Полученный запас прочности механического соединения ленты на обводном барабане значительно превышает его нормативное значение  $n_n$  (обычно  $n_n = 8 \dots 10$ ). При изменении натяжения  $S$  или параметров стыка ситуация может измениться, что в случае  $n_x \leq n_n$  может привести к разрыву ленты по основе.

Напряжение от растяжения по утку определяется аналогичным образом:

$$\sigma_{y \text{ раст}} = \sigma_{y \text{ max}} - \sigma_{y \text{ изг}}, \quad (5)$$

$$\sigma_{y \text{ раст}} = 2,21 - 0,26 = 1,95 \text{ МПа}.$$

Составляющая напряжения от изгиба ленты по утку составляет 11,8 % от суммарной нагрузки (изгиб вместе с растяжением), что не позволяет пренебрегать изгибными напряжениями в ленте.

Фактический коэффициент запаса прочности прокладки по утку

$$n_y = [\sigma]_y / \sigma_{y \text{ max}} = 34,4 / 2,21 = 15,5. \quad (6)$$

Анализ результатов моделирования:

1) составляющие изгибных напряжений по основе и по утку составляют соответственно 16,2 % и 11,8 % от суммарной нагрузки при изгибе и растяжении;

2) коэффициент концентрации напряжений по основе составляет 1,7;

3) при заданной растягивающей нагрузке расчётные значения запасов прочности при изгибе на обводном барабане превышают нормативные значения, т. е. в данном случае механический стык удовлетворяет условиям прочности;

4) разработанная модель позволяет провести дальнейшие исследования НДС стыка на приводном барабане.

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Разработана компьютерная модель напряжённо-деформированного состояния элементов механического соединения резинотканевой конвейерной ленты, проходящих по одному барабану. При моделировании применён программный комплекс ANSYS Workbench.

Данная модель может быть адаптирована для исследования механического соединения, взаимодействующего с приводным барабаном.

### Библиографический список

1. ДСТУ 10124183643.001-2003. Змикання та ремонт гумовотканевих конвеєрних стрічок рознімними з'єднувачами. Вимоги до технології виконання : чинний з 2003-10-14. — К. : Міппалівернерго України, 2003. — 46 с.
2. Комраков, А. Н. Применение механических соединений для стыковки конвейерных лент на угольных шахтах и промышленных предприятиях России [Текст] / А. Н. Комраков, А. Ю. Кондрашин, Р. Н. Николаев // Горный информационно-аналитический бюллетень. Горный инженер. — 2009. — № 10. — С. 44–55.
3. Корнеев, С. В. Моделирование напряжённо-деформированного состояния механических стыков конвейерных лент [Текст] / С. В. Корнеев, В. Ю. Доброногова, В. П. Долгих, О. В. Захаров // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — Вып. 54. — С. 101–109.
4. Завгородний, Е. Х. Расчёт напряжений в многослойной ленте при одновременном действии изгиба и растяжений [Текст] / Е. Х. Завгородний, Ю. П. Ярцев, В. И. Морев, А. В. Переселков // Проблемы разработки угольных пластов Донбасса : сб. науч. тр. — К. : УМК ВО, 1991. — 144 с.
5. Корнеев, С. В. Коэффициенты модели Муни—Ривлина в пакете программ ANSYS Workbench, полученные для обкладочной резины шахтных конвейерных лент [Текст] /

С. В. Корнеев, В. П. Долгих // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2014. — Вып. 42. — С. 45–49.

6. Бруяка, В. А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench [Текст] : учеб. пособ. / В. А. Бруяка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова. — Самара : Самар. гос. техн. ун-т, 2010. — 271 с.

© Корнеев С. В.

© Доброногова В. Ю.

© Долгих В. П.

© Захаров О. В.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.,  
к.т.н., доц., зав. каф. ГЭиТС СУНИГОТ ЛНУ им. В. Даля Петровым А. Г.

Статья поступила в редакцию 20.02.20.

д.т.н. Корнеев С. В., к.т.н. Доброногова В. Ю., Долгих В. П., Захаров О. В. (ДонГТУ,  
м. Алчевськ, ЛНР)

#### МОДЕЛЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ANSYS WORKBENCH НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГУМОВОТКАНИННОЇ КОНВЕЄРНОЇ СТРИЧКИ З МЕХАНІЧНИМ СТИКОМ ПРИ ЗГИНАННІ НА ОБВІДНИХ БАРАБАНАХ

Наводиться модель і результати моделювання напружено-деформованого стану механічного стику гумовотканинних конвеєрних стрічок при згинанні на обвідних барабанах в програмному комплексі ANSYS Workbench. Встановлено коефіцієнти концентрації напружень в елементах механічних стиків і розрахункові запаси міцності.

**Ключові слова:** конвеєрна стрічка, механічне з'єднання, моделювання, напружено-деформований стан.

Doctor of Technical Sciences Korneev S. V., PhD in Engineering Dobronogova V. Yu.,  
Dolgikh V. P., Zakharov O. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

#### ANSYS WORKBENCH MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A FABRIC-PLY BELT WITH A MECHANICAL JOINT UNDER BENDING ON RETURN PULLEYS

The model and results of modeling the stress-strain state of the mechanical joint of fabric-ply belts under bending on return pulleys in the ANSYS Workbench software package are presented. The ANSYS Workbench software package is used to simulate the complex loading process of a mechanical joint when it passes the conveyor's return pulleys. The stress concentration factors in the elements of mechanical joints and calculated strength reserves are determined.

**Key words:** conveyor belt, mechanical connection, modeling, stress-strain state.

УДК 621.9

*к.т.н. Костенко А. В.  
(КамчатГТУ, г. Петропавловск-Камчатский, РФ),  
д.т.н. Михайлов А. Н.,  
к.т.н. Матвиенко С. А.,  
к.т.н. Лукичев А. В.  
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*

## СТРУКТУРА СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ФУНКЦИОНАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

*Приведена объектная модель классификационных систем деталей машин, методов отделочно-упрочняющей обработки и средств технологического обеспечения. Средства технологического обеспечения представлены как комплекс на базе объектно ориентированного подхода в виде множества элементов полной структуры средств. Получено выражение, которое полностью определяет структуру средств.*

**Ключевые слова:** средства технологического обеспечения, функционально ориентированная технология, отделочно-упрочняющая обработка, классификационная схема, структура, объектная модель.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Одной из задач, стоящих перед современным машиностроением, является проектирование технологических процессов (ТП) для изготовления деталей, работающих в сложных эксплуатационных условиях, например, цилиндровых втулок судовых дизелей [1].

Профессор Базров Б. М. в своей работе [2] обозначил проблему стихийного развития средств технологического обеспечения (СТО) технологических процессов, а также классификационных систем СТО и наметил пути их решения на основе модульного подхода.

В работе [3] рассмотрены особенности классификационных схем в функционально ориентированных технологиях (ФОТ) машиностроения на основе объектно ориентированного подхода (ООП), в частности приведена объектная модель изделия судового машиностроения в нотации UML (Unified Modeling Language). В работе [4] рассмотрена многоаспектная классификация компонентов агрегатов. В монографии профессора Михайлова А. Н. [5] описаны основные положения ФОТ в машиностроении и среди прочего отмечается, что СТО

строятся на базе структуры функционально ориентированного технологического процесса, структуры каждой операции и схем технологического воздействия орудий и средств обработки на изделия.

Одной из проблем процесса проектирования ФОТ является подбор или разработка СТО. Стихийное их развитие и отсутствие связей между классификациями технологических процессов, методов, изделий и СТО являются актуальными проблемами современного машиностроения.

**Целью статьи** является установление взаимосвязи между классификационными схемами средств технологического обеспечения, методами отделочно-упрочняющей обработки и деталей агрегатов, а также разработка структуры средств технологического обеспечения.

**Изложение материала и его результаты.** Приведенная на рисунке 1 объектная модель классификационных систем деталей машин и методов отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) показывает взаимосвязь между методами ОУО и эксплуатационными свойствами функциональных элементов деталей.

# МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

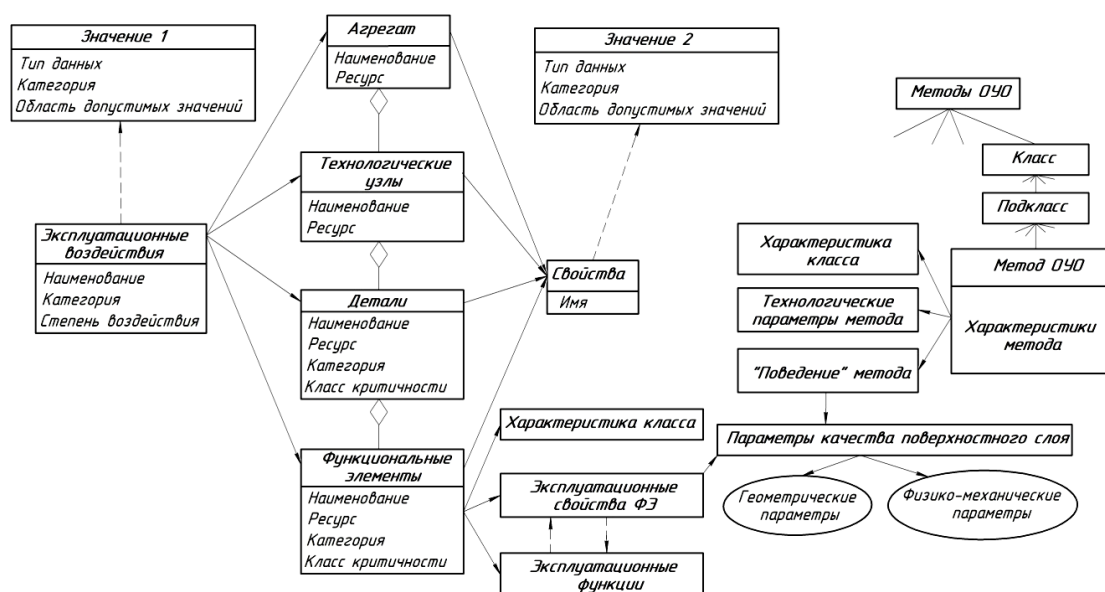


Рисунок 1 Объектная модель классификационных систем деталей машин и методов ОУО в нотации UML

Методы ОУО, используемые для реализации показателей качества, вытекающих из эксплуатационных свойств, должны быть обеспечены соответствующими СТО, включающими в себя (рис. 2) оборудование, приспособления, инструментальную наладку и измерительные средства.

Каждая составляющая СТО представляет собой множество, обладающее своими характерными классификационными схемами, также отличающимися большим разнообразием. Однако в рамках применения одного метода используемый набор СТО должен быть, безусловно, взаимосвязан.



Рисунок 2 Средства технологического обеспечения ТП

Тогда весь комплекс СТО на базе ООП можно представить как множество элементов полной структуры СТО, т. е. совокупность множеств, обладающих определённым набором характеристик:

$$Y = \begin{cases} N = \{N_1, N_2, N_3\}; \\ P = \{P_1, P_2, P_3\}; \\ Q = \{Q_1, Q_2, Q_3\}; \\ S = \{S_1, S_2, S_3\}. \end{cases} \quad (1)$$

Множества  $N$ ,  $P$ ,  $Q$  и  $S$  являются соответственно множествами оборудования, приспособлений, инструментальных наладок и измерительных средств. При этом каждое множество системы (1) обладает следующими характеристиками:

$N_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ ,  $S_1$  — характеристики класса, в который входят соответственно применяемое оборудование, приспособления, инструментальные наладки и измерительные средства. Например, оборудование для лазерной закалки, с одной стороны, является представителем технологических методов ОУО с изменением структуры поверхностного слоя, с другой — входит в класс лазерных установок и может клас-

сифицироваться по следующим признакам [6]: мощности излучения, режиму работы, длине волны генерируемого излучения, методам накачки, способам отвода тепла, назначению, активному элементу, конструктивному исполнению. Характеристики этих признаков на основе принципа наследования позволяют выделять в параметрах лазерной установки для закалки такие общие параметры, которые являются общими для всех лазерных установок.

$N_2$ ,  $P_2$ ,  $Q_2$ ,  $S_2$  — характеристики непосредственно используемого оборудования, приспособлений, инструментальных наладок и измерительных средств, что пред-

деляет его технологические возможности применения. На основе принципа полиморфизма эта группа характеристик выделяет параметры, характерные только для применяемого СТО в соответствующем методе ОУО.

$N_3$ ,  $P_3$ ,  $Q_3$ ,  $S_3$  — характеристики функционирования, что в контексте ФОТ означает наличие характеристик, определяющих особенности воздействия оборудования, приспособлений, инструментальных наладок и измерительных средств на объект.

Взаимосвязи описанных выше элементов (изделия, методов ОУО и СТО) в единой системе показаны на рисунке 3.

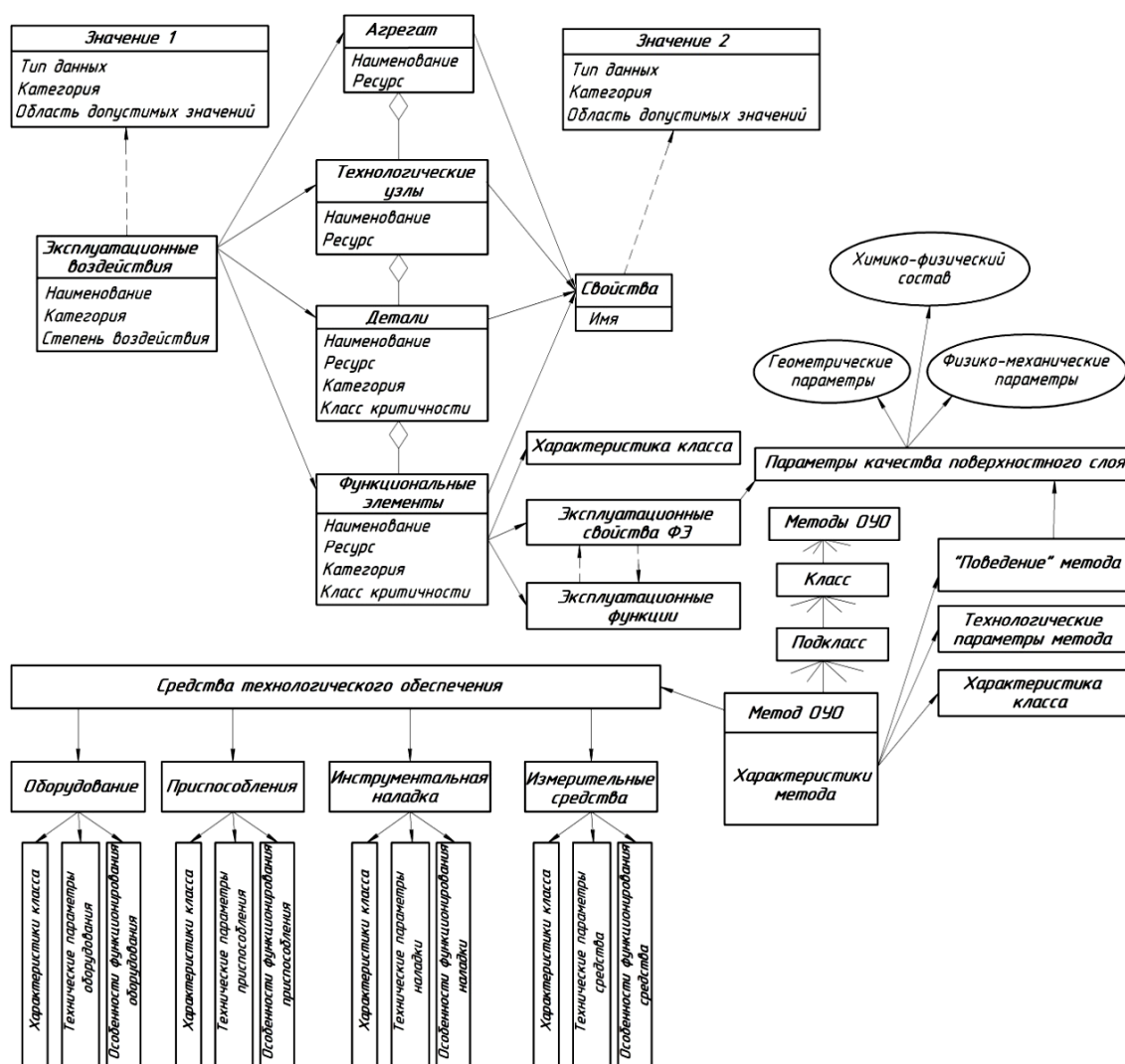


Рисунок 3 Объектная модель классификационных систем деталей машин, методов ОУО и СТО

В случае если необходимо использовать специальное технологическое оснащение, то следует учитывать, что оснащение для функционально ориентированных технологий может строиться с использованием следующих составляющих: мехатронного технологического оснащения; механизмов малых перемещений для различного технологического оборудования; адаптивных систем управления для различного технологического оборудования; специальных технологических лазеров, плазматронов, вакуумных ионно-плазменных устройств; специального оснащения.

Для реализации конкретной функционально ориентированной операции и изготовления изделия на базе особой группы ориентации технологических воздействий и свойств этих технологий в каждом конкретном случае должно строиться своё специализированное технологическое обеспечение [5].

СТО для функционально ориентированных технологических процессов имеют специальные принципы проектирования и предназначены в основном для выполнения технологических воздействий орудий и средств обработки только на конкретные изделия в сложных эксплуатационных условиях.

Структура СТО является изоморфным отображением и реализацией функционально ориентированного процесса ОУО. Изоморфным отображением называется отношение между двумя системами типов «технологический процесс» и «технологический объект», когда каждой составной части одной системы может быть поставлена в соответствие определённая составная часть другой системы и наоборот. А также когда для каждого отношения между двумя соответствующими составными частями имеется такое же отношение в другой системе и наоборот. Это даёт возможность сопоставить структуру ТП структуре СТО при её структурном анализе [7].

Частично структура СТО известна на основании предварительно разработанной структуры ТП. При этом используется го-

моморфное отображение множеств элементов и отношений ТП на множества элементов и отношений СТО. Гомоморфное отображение — это отношение между двумя системами типов «технологический процесс» и «технологический объект», когда каждую составную часть и каждое отношение системы типа «технологический процесс» можно отобразить на некоторую составную часть и некоторое отношение системы типа «технологический объект» (но не обратно). Используя гомоморфное отображение можно перенести структуру ТП на структуру СТО. Гомоморфное отображение множеств элементов и отношений структуры технологического процесса на множества элементов и отношений структуры СТО математически можно представить следующим образом:

$$\varphi_1 : X \rightarrow Y_T; \quad (2)$$

$$\varphi_2 : E \rightarrow A_T, \quad (3)$$

где  $X$  — множество формализованных элементов структуры технологического процесса;  $Y_T$  — множество формализованных элементов структуры СТО только в технологической зоне;  $E$  — множество отношений между элементами структуры технологического процесса;  $A_T$  — множество отношений между элементами структуры СТО в технологической зоне;  $\varphi_1$  — отображение множеств элементов структуры;  $\varphi_2$  — отображение множеств отношений структуры.

Структура СТО, составленная из множеств (2) и (3), будет частичной и отражает её только в технологической зоне. Для реализации полной структуры СТО эти множества необходимо дополнить:

$$Y = Y_T \cup Y_B; \quad (4)$$

$$A = A_T \cup A_B, \quad (5)$$

где  $Y$  — множество формализованных элементов полной структуры СТО;  $Y_B$  — множество формализованных элементов структуры СТО вне технологической зоны;

$A$  — множество отношений между элементами полной структуры СТО;  $A_B$  — множество отношений между элементами структуры СТО вне технологической зоны.

Если

$$Y = \{N, P, Q, S\} \quad (6)$$

есть множество элементов полной структуры СТО, а

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \quad (7)$$

является множеством отношений между элементами СТО, то структура СТО представляет собой множество, состоящее из  $Y$  и  $A$ :

$$Str = \{Y, A\}, \quad (8)$$

где  $Str$  — структура СТО.

Элементами структуры могут быть различные элементы в зависимости от того, на каком иерархическом уровне глубины технологии рассматривается структура. При этом множество  $Y$  определяется на основании замыкания подмножеств  $Y_T$  и  $Y_B$  в рекуррентные структурные группы.

Структура СТО представляет собой в общем случае совокупность элементов и отношений между ними. Структура СТО на  $i$ -м уровне глубины технологии представляет собой совокупность, упорядоченных множеств  $y_i$  и  $a_i$ , которую можно представить следующим образом:

$$Str_i = \{y_i, a_i\}, \quad (9)$$

где  $Str_i$  — структура СТО на  $i$ -ом уровне глубины технологии;  $y_i$  — множество элементов СТО на  $i$ -м уровне глубины технологии;  $a_i$  — множество отношений на множестве  $y_i$ .

Множества  $y_i$  и  $a_i$  имеют вид:

$$y_i = \{y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{iv_i}\}, \quad (10)$$

где  $y_{iv_i}$  —  $v_i$ -й элемент множества  $y_i$ ;

$$a_i = \{a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{iv_i}\}, \quad (11)$$

где  $a_{iv_i}$  —  $v_i$ -е отношение между элементами множества  $y_i$ .

Структуру СТО можно представить объединением двух её составляющих, а именно в пространственной технологической зоне и вне неё (вспомогательная зона), в соответствии с выражением

$$Str_i = Str_i^T \cup Str_i^B, \quad (12)$$

где  $Str_i^T$  — структура СТО на  $i$ -м уровне глубины технологии в пространственной технологической зоне;  $Str_i^B$  — структура СТО на  $i$ -м уровне глубины технологии вне пространственной технологической зоны.

В этом случае множества  $y_i$  и  $a_i$  можно записать:

$$y_i = y_{iT} \cup y_{iB}, \quad (13)$$

где  $y_{iT}$  — подмножество элементов множества  $y_i$ , размещённое в пространственной технологической зоне СТО на  $i$ -м уровне глубины технологии;  $y_{iB}$  — подмножество элементов (БТВ) множества  $y_i$ , размещённое вне пространственной технологической зоны СТО на  $i$ -м уровне глубины технологии;

$$a_i = a_{iT} \cup a_{iB}, \quad (14)$$

где  $a_{iT}$  — подмножество отношений множества  $a_i$ , действующее в подмножестве  $y_{iT}$ ;  $a_{iB}$  — подмножество отношений множества  $a_i$ , действующее в подмножестве  $y_{iB}$ .

Параметры подмножеств  $y_{iT}$  и  $a_{iT}$  можно определить на основании гомоморфного отображения элементов множеств  $i$ -го технологического подпроцесса на элементы подмножеств СТО на  $i$ -м уровне глубины технологии:

$$\varphi_1 : x_i \rightarrow y_{iT}, \quad (15)$$

$$\varphi_2 : e_i \rightarrow a_{iT}. \quad (16)$$

Множества элементов  $x_i$  и отношений  $e_T$  и подмножества элементов  $y_{iT}$  и отношений  $a_{iT}$  имеют между собой взаимно однозначное соответствие. Взаимно однозначное соответствие между двумя множествами, например  $x_i$  и  $y_{iT}$ , есть такое отображение множества  $x_i$  в множество  $y_{iT}$ , при

котором каждый элемент множества  $y_{iT}$  является образом одного и только одного элемента множества  $x_i$ . В связи с этим можно заключить, что параметры подмножеств  $y_{iT}$  и  $a_{iT}$  определены и соответствуют параметрам множеств структуры  $i$ -го технологического подпроцесса.

В общем виде структуру подмножеств  $y_{iT}$  и  $a_{iT}$  можно записать так:

$$Str_i^T = \{y_{iT}, a_{iT}\}. \quad (17)$$

Далее следует определить структуру СТО на  $i$ -м уровне глубины технологии вне технологической зоны. Для нахождения элементов этой структуры необходимо воспользоваться следующими выражениями:

$$\psi_1 : G_i(T_{Bi}) \rightarrow y_{iB}, \quad (18)$$

где  $\psi_1$  — отображение множеств;  $G_i(T_{Bi})$  — множество интервалов структуры СТО на  $i$ -м уровне глубины технологии вне технологической зоны в зависимости от величины вспомогательного времени  $T_{Bi}$ ;

$$\psi_2 : H(T_{Bi}) \rightarrow a_{iB}, \quad (19)$$

где  $\psi_2$  — отображение множеств;  $H_i(T_{Bi})$  — множество отношений на множестве  $G_i(T_{Bi})$ .

В этом случае структура СТО на  $i$ -м уровне глубины технологии вне технологической зоны будет иметь следующую математическую запись:

$$Str_i^B = \{y_{iB}, a_{iB}\}. \quad (20)$$

Полученное выражение (20) полностью определяет структуру СТО на  $i$ -ом уровне глубины технологии.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Представленная в работе объектная модель классификационных систем деталей машин, методов ОУО и СТО позволяет на основе объектно ориентированного подхода комплексно подходить к проектированию ТП изготовления деталей машин, в том числе деталей судовых агрегатов, работающих в сложных эксплуатационных условиях. При этом структура СТО может быть сопоставлена со структурой ТП, что даёт возможность разрабатывать или подбирать СТО в соответствии с операциями ТП на базе функционально ориентированных технологий машиностроения.

Дальнейшие исследования будут направлены на адаптацию основных положений ФОТ на производство и ремонт деталей судовых агрегатов, в частности судовых дизелей.

### Библиографический список

1. Костенко, А. В. Синтез структуры функционально-ориентированного процесса изготовления цилиндрических втулок на основе анализа работы судовых дизелей [Текст] / А. В. Костенко // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 176–186.
2. Базров, Б. М. Модульная технология в машиностроении [Текст] / Б. М. Базров. — М. : Машиностроение, 2001. — 368 с.
3. Костенко, А. В. Особенности классификации и представления деталей в функционально-ориентированной технологии машиностроения [Текст] / А. В. Костенко, А. Н. Михайлов, А. Н. Полетайкин // Механики XXI века. — 2019. — № 18. — С. 179–186.
4. Михайлов, А. Н. Особенности классификации и представления деталей в функционально-ориентированной технологии машиностроения [Текст] / А. Н. Михайлов, А. В. Костенко, А. Н. Полетайкин // Актуальные проблемы в машиностроении. — 2019. — Т. 6. — № 1–4. — С. 41–47.
5. Михайлов, А. Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий [Текст] / А. Н. Михайлов. — Донецк : ДонНТУ, 2009. — 346 с.
6. Кирсанов, В. В. Классификация лазеров по физико-техническим параметрам и степени опасности для биоты [Текст] / В. В. Кирсанов, Л. Ф. Миннеханова // XVI международная научная конференция, посвященная 15-летию реализации принципов Хартии Земли в Республике Татарстан : сб. тр. конф.. — Казань : Фолиант, 2016. — С. 278–284.



7. Михайлов, А. Н. Основы проектирования и автоматизации производственных процессов на базе технологий непрерывного действия [Текст] / А. Н. Михайлов. — Донецк : ДонНТУ, 2006. — 421 с.

© Костенко А. В.  
 © Михайлов А. Н.  
 © Матвиенко С. А.  
 © Лукичев А. В.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МСМО ДонНТУ Гусевым В. В.,  
 к.т.н., проф. каф. ТОМП ДонГТУ Зелинским А. Н.*

*Статья поступила в редакцию 11.02.20.*

**к.т.н. Костенко А. В.** (КамчатДТУ, м. Петропавловськ-Камчатський, РФ, andr13kost@list.ru),  
**д.т.н. Михайлов О. М., к.т.н. Матвиенко С. А., к.т.н. Лукичев О. В.** (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)  
**СТРУКТУРА ЗАСОБІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ФУНКЦІОНАЛЬНО  
 ОРІЄНТОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

*Наведено об'єктну модель класифікаційних систем деталей машин, методів оздоблювально-зміцнюючої обробки і засобів технологічного забезпечення. Засоби технологічного забезпечення представлено як комплекс засобів на базі об'єктно орієнтованого підходу у вигляді безлічі елементів повної структури засобів. Отримано рівняння, яке повністю визначає структуру засобів.*

**Ключові слова:** засоби технологічного забезпечення, функціонально орієнтована технологія, оздоблювально-зміцнююча обробка, класифікаційна схема, структура, об'єктна модель.

**PhD in Engineering Kostenko A. V.** (KamchatkaSTU, Petropavlovsk-Kamchatsky, the Russian Federation, andr13kost@list.ru ), **Doctor of Technical Sciences Mikhailov A. N.,**  
**PhD in Engineering Matvienko S. A., PhD in Engineering Lukichev A. V.** (DonNTU, Donetsk, DPR)  
**STRUCTURE OF TECHNOLOGICAL SUPPORT TOOLS IN FUNCTIONAL-ORIENTED  
 TECHNOLOGIES**

*The object model of classification systems of machine parts, methods of finishing and strengthening processing and technological support tools is given. Technological support tools are presented as a set of tools based on an object-oriented approach as a set of elements of the complete structure of tools. The obtained expression fully defines the structure of tools.*

**Key words:** technological support tools, functional-oriented technology, finishing and strengthening processing, classification scheme, structure, object model.

УДК 531.31.15+669

Мороз В. В.,  
к.ф.-м.н. Рубежанский В. И.,  
к.т.н. Левченко Э. П.,  
к.э.н. Зинченко А. М.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ НА ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ КУСКА АГЛОМЕРАТА В ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКЕ

Приведены результаты анализа влияния переменного коэффициента трения на закон движения куска агломерата в рабочей полости многостадийной одновалковой зубчатой дробилки с целью вертикального расширения камеры дробления. Показано, что снижение величины динамического коэффициента трения скольжения приводит к расширению области дробления.

**Ключевые слова:** многостадийная одновалковая зубчатая дробилка, коэффициент трения, закон движения, аналитический расчёт, сравнительный анализ.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Измельчение как часть промышленного дробления и подготовки товарного агломерата требует рассмотрения нескольких этапов, а именно его поступления в загрузочную зону, нагружения до разрушения, создания условий дополнительного дробления, предотвращения последующей повторной агломерации фрагментов и т. п.

В связи с перспективным направлением повышения эффективности работы одновалковых зубчатых дробилок за счёт создания в рабочей камере многостадийного наложения усилий, целесообразно изучение такого процесса [1–3].

Предполагается обеспечить подачу материала в верхнюю часть дробильно-измельчительной машины под действие консольных колосников [4], что позволяет максимально использовать типовую конструкцию, широко применяемую в производстве агломерата, путём минимального её усовершенствования. При этом видоизменяется лишь колосниковая решётка, в весовом и конструктивном эквиваленте составляющая незначительную долю (5–8 %) от общего конструктива. Это обеспечивает малые материальные затраты на модернизацию дробилки, сопоставимые с затратами на осуществление плановых и текущих ремон-

тов, что является привлекательным с точки зрения совершенствования конструкций, применяемых в агломерационном производстве одновалковых зубчатых дробилок.

Средний номинальный срок службы колосниковой решётки, набранной из отдельных элементов, составляет около 3-х месяцев, при этом она подлежит замене при планово-предупредительных ремонтах самой дробилки [5].

Из проведённых ранее [4] аналитических исследований найдено, что дифференциальное уравнение относительного движения куска агломерата (рис. 1) по передней поверхности зуба звёздочки ротора имеет вид

$$\ddot{x} + 2 \cdot \omega \cdot f \cdot \dot{x} - \omega^2 \cdot x = -g \cdot (\sin \omega \cdot t + f \cdot \cos \omega \cdot t), \quad (1)$$

где  $x$  — перемещение куска агломерата по наклонной лопасти звёздочки ротора;  $t$  — время его движения;  $\omega$  — угловая скорость вращения ротора;  $f$  — коэффициент трения.

Уравнение (1) в случае относительного покоя груза даёт зону (сектор) равновесия, определяемую уравнением

$$\sin \alpha_{1,2} = \frac{\omega^2 \cdot x \pm \sqrt{g^2 \cdot (1 + f^2) - \omega^4 \cdot x^2}}{g \cdot (1 + f^2)}. \quad (2)$$

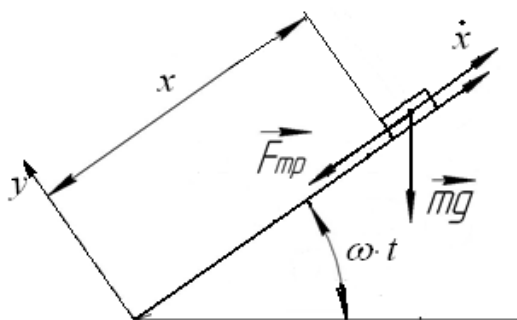


Рисунок 1 Расчётная схема движения

Зона относительного покоя куска агломерата в секторе дробления определяется углом  $\alpha = \alpha_1 + |\alpha_2|$ . Таким образом, размеры геометрических изменений при усовершенствовании камеры дробления зависят от угловой скорости вращения ротора и первоначального местоположения фрагмента дробимого материала. Отметим сразу, что изменение положения куска агломерата в результате его движения позволит прогнозировать конструктивные изменения в консольных колосниках.

Уравнение (1) при базовом варианте работы дробилки с угловой скоростью ротора  $n = 6$  об/мин ( $\omega = 0,6283 \text{ с}^{-1}$ ) и первоначальном расположении фрагмента агломерата от оси вращения на расстоянии  $x = 0,6 \text{ м}$  имеет аналитические решения при постоянном коэффициенте трения:

при  $f = 0,5$

$$x = -9,8186 \cdot e^{0,3883t} - 2,3493 \cdot e^{-1,0166t} + 7,4544 \cdot \sin(0,6283 \cdot t + 0,4852) + 9,9392 \cdot \cos(0,6283 \cdot t + 0,4852), \quad (3)$$

при  $f = 0,364$

$$x = -9,713 \cdot e^{0,4399t} - 0,585 \cdot e^{-0,8973t} + 9,5171 \cdot \sin(0,6283 \cdot t + 0,3718) + 7,9867 \cdot \cos(0,6283 \cdot t + 0,3718). \quad (4)$$

Выбор значений коэффициента трения тела агломерата с плоскостью зуба ротора продиктован известным в металлургии [6, 7] диапазоном его изменения:  $f = 0,5 \div 0,364$ .

Анализ результатов на основании выражений (3) и (4) показывает (табл. 1), что уменьшение значения коэффициента трения снижает скорость сползания куска агломерата к оси ротора, оставляя его в области дробления больший промежуток времени.

Однако сектор дробления ( $\alpha = 40,005^\circ$ ) при  $f = 0,364$  меньше, чем при  $f = 0,5$  ( $\alpha = 53,12^\circ$ ).

Важность изучения поведения агломерата определяется расширением рабочей зоны дробильной камеры с точки зрения получения готового продукта более однородного фракционного состава.

С учётом того, что коэффициент трения скольжения зависит [8] от относительной скорости соприкасающихся поверхностей, актуальной задачей является выявление степени влияния коэффициента трения на закон движения агломерата при подаче куска в верхнюю часть камеры дробления.

**Постановка задачи.** Задачей исследований является установление зависимости движения фрагмента агломерата от изменения коэффициента трения при транспортировании куска зубьями звёздочек ротора в расширенную по высоте рабочую камеру одновалковой зубчатой дробилки.

**Изложение материала и его результаты.** Для большинства материалов [8] коэффициент трения  $f$  уменьшается с ростом относительной скорости движения соприкасающихся поверхностей (рис. 2).

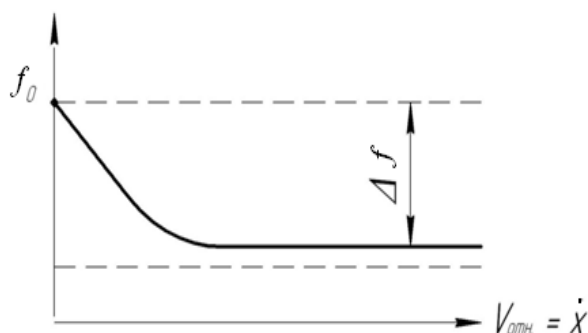


Рисунок 2 Изменение коэффициента трения в зависимости от скорости

Предположим, что изменение коэффициента  $f$  в зависимости от скорости движения куска реализуется в известных пределах  $f=0,5 \div 0,364$  на длине плоскости зуба звёздочки ротора.

Результаты таблицы 1 позволяют предположить следующую зависимость:

$$f = 0,364 + 0,136 \cdot e^{-|x|}. \quad (5)$$

Дифференциальное уравнение движения (1) в этом случае примет вид

$$\ddot{x} + 2 \cdot \omega \cdot \left( 0,364 + 0,136 \cdot e^{-|x|} \right) \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x = -g \cdot \left[ \begin{aligned} &(\sin \omega \cdot t + \alpha_1) + \left( 0,364 + 0,136 \cdot e^{-|x|} \right) \times \\ &\times \cos(\omega \cdot t + \alpha_1) \end{aligned} \right]. \quad (6)$$

Результаты численного решения нелинейного уравнения (6) приведены в таблице 1.

Аналитическое решение уравнения (1) позволяет выявить влияние условий ско-

рости вращения ротора на движение куска агломерата.

При  $n=12$  об/мин и коэффициенте трения  $f=0,5$  закон движения куска имеет вид

$$x = -1,9333 \cdot e^{0,7766 \cdot t} - 0,5594 \cdot e^{-2,0392 \cdot t} + 1,8637 \cdot \sin(1,2566 \cdot t + 0,5512) + 2,4849 \cdot \cos(1,2566 \cdot t + 0,5512). \quad (7)$$

Численные значения координаты груза и его скорости, полученные по закону (7), приведены в таблице 1.

На основании полученных расчётов схему многостадийной работы одновалковой дробилки можно представить в виде рисунка 3.

Введем рабочие понятия:

1. Рабочая область дробления — часть геометрической плоскости передней поверхности зуба, определяемая высотой консольных колосников, в которой происходит контакт куска агломерата с колосником.

2. Зона дробления — часть рабочей камеры, в которой происходит принудительное дробление.

Таблица 1

Значения координат, скорости куска агломерата и углов положения плоскости зуба в зависимости от времени

$n = 6$ об/мин					$n = 6$ об/мин; $f = 0,364 + 0,136 \cdot e^{- x }$			
$t, \text{ с}$	$x, \text{ м}$	$\dot{x}, \text{ м/с}$	$\varphi, ^\circ$	$f$	$x, \text{ м}$	$\dot{x}, \text{ м/с}$	$\varphi, ^\circ$	$f$
0	0,6	0	27,799	0,5	0,6	0	27,799	0,5
0,1	0,5577	−0,8603	31,399		0,5582	−0,8273	31,399	0,4235
0,2	0,4299	−2,2170	34,999		0,4619	−1,6210	34,999	0,3909
0,35	0,079	−3,3087	40,399		0,1314	−2,7869	40,399	0,3724
$n = 6$ об/мин					$n = 12$ об/мин			
0	0,6	0	21,302	0,3645	0,6	0	31,581	0,5
0,1	0,5657	−0,6746	24,902		0,5584	−0,8204	38,781	
0,2	0,4648	−1,3665	28,502		0,4368	−1,6038	45,982	
0,35	0,1793	−2,4363	33,902		−0,1063		56,181	

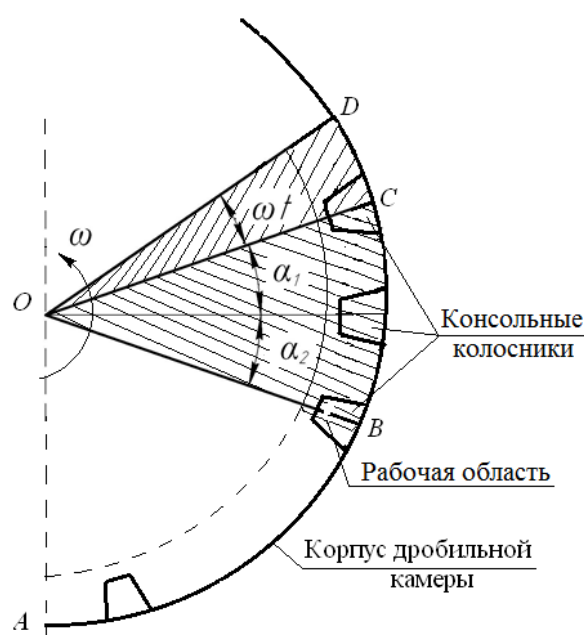


Рисунок 3 Схема многостадийной работы и зоны дробления

На рисунке 3 показаны:

1. Зона  $OAB$  — сектор, в котором фрагменты агломерата всегда попадут в рабочую область дробления.
2. Зона  $OBC$  — зона относительного покоя куска агломерата; фрагменты, оказавшиеся в рабочей области этой зоны, испытывают нагрузку дробления.
3. Зона  $OCD$  — зона расширения сектора  $OBC$ . Она зависит от ширины рабочей области и закона движения  $x(t)$  куска агломерата.

### Библиографический список

1. Мороз, В. В. Способ многостадийной обработки агломерата в одновалковой зубчатой дробилке [Текст] / В. В. Мороз, Э. П. Левченко, Н. А. Бондарь // Современная металлургия нового тысячелетия : сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. — Липецк : Изд-во Липецкого гос. техн. ун-та, 2016. — С. 271–275.
2. Мороз, В. В. Инновационный способ многостадийной обработки агломерационного спека в одновалковой зубчатой дробилке [Текст] / В. В. Мороз, Э. П. Левченко // Инновационные технологии в промышленности : образование, наука и производство : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — Уфа : Нефтегазовое дело, 2016. — С. 398–400.
3. Мороз, В. В. Анализ обеспечения возможностей организации многостадийной работы одновалковой зубчатой дробилки [Текст] / В. В. Мороз, В. И. Рубежанский, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. — Вып 5 (50). — С. 153–157.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Анализ результатов (табл. 1) позволяет сделать выводы.

При граничных значениях коэффициента трения  $f=0,5$  и  $f=0,364$  скорость скольжения куска агломерата к оси вращения ротора меньше, чем при  $f=0,364$ . Это замедление является предпочтительным для нахождения куска в рабочей области дробления. Такое замедление движения при меньших значениях коэффициента  $f$  объясняется влиянием переносной силы инерции по сравнению с силой трения, зависящей от кориолисовой силы инерции.

Эта тенденция сохраняется и при принятом законе изменения коэффициента трения в зависимости от скорости скольжения. Более того, сектор дробления  $OBC$  зависит только от начального значения коэффициента трения, а его расширения — от принятых конструктивных размеров высоты консольных колосников.

Увеличение частоты вращения ротора в два раза по сравнению с номинальной величиной не вызывает изменения величины зоны относительного покоя куска (она составляет  $53^{\circ}12'$ ), но её положение смещается в сторону вращения ротора, расширяя таким образом зону дробления.

В перспективе дальнейших исследований предполагается экспериментальная проверка полученных теоретических предпосылок.

4. Мороз, В. В. К вопросу многостадийной обработки материала в одновалковой зубчатой дробилке [Текст] / В. В. Мороз, В. И. Рубежанский, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — Вып. 15 (58). — С. 43–47.

5. Левченко, О. А. Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата [Текст] : монография / О. А. Левченко и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — 190 с.

6. Коротич, В. И. Теоретические основы технологий окучивания металлургического сырья. Агломерация [Текст] : учебное пособие / В. И. Коротич, Ю. А. Фролов, Л. И. Каплун. — Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2009. — 417 с.

7. Борискин, И. К. Интенсивная механическая обработка агломерата. Теория, оборудование, технология [Текст] / И. К. Борискин, Г. А. Арыков, А. Н. Пыриков. — М. : МИСИС, 1998. — 248 с.

8. Хайкин, С. Э. Физические основы механики [Текст] / С. Э. Хайкин. — М. : Наука, 1971. — 751 с.

© Мороз В. В.

© Рубежанский В. И.

© Левченко Э. П.

© Зинченко А. М.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.,  
нач. бюро агломерационного производства  
Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» Куценко Е. В.*

Статья поступила в редакцию 22.01.20.

**Мороз В. В., к.ф.-м.н. Рубежанский В. И., к.т.н. Левченко Е. П., к.е.н. Зинченко А. М.**  
(ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

#### **ВПЛИВ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ НА ЗАКОН РУХУ ШМАТКА АГЛОМЕРАТУ В ОДНОВАЛКОВІЙ ЗУБЧАСТІЙ ДРОБАРЦІ**

*Наведено результати аналізу впливу змінного коефіцієнта тертя на закон руху шматка агломерату в робочій порожнині багатостадійної одновалкової зубчастій дробарки з метою вертикального розширення камери дроблення. Показано, що зниження величини динамічного коефіцієнта тертя приводить до розширення області дроблення.*

**Ключові слова:** багатостадійна одновалкова зубчаста дробарка, коефіцієнт тертя, закон руху, аналітичний розрахунок, порівняльний аналіз.

**Moroz V. V., PhD in Physics and Mathematics Rubezhanskiy V. I.,  
PhD in Engineering Levchenko E. P., PhD in Economics Zinchenko A. M. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**  
**EFFECT OF FRICTION COEFFICIENT ON THE LAW OF MOTION OF A PIECE OF  
SINTER IN A SINGLE-ROLL CRUSHER**

*There have been given the results of analytical analysis of the influence of the variable friction coefficient on the law of motion of a piece of sinter in the working space of a multistage single-roll crusher for the vertical expansion of the crushing chamber. It is shown that a decrease in the value of the dynamic coefficient of sliding friction leads to an expansion of the crushing area.*

**Key words:** multistage single-roll crusher, friction coefficient, law of motion, analytical calculation, comparative analysis.

УДК 621.926.323

Власенко Д. А.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАХВАТА МАТЕРИАЛА РИФЛЁНЫМИ ВАЛКАМИ ВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКИ

*На основании третьего закона Ньютона предложена математическая модель процесса захвата материала верхними рифлёными валками четырёхвалковой дробилки при его измельчении. В результате аналитического обоснования получены зависимости, определяющие угол контакта с валиком наплавленной сетки, размер валика и угол между соседними рифлями на рабочей поверхности бандажа для обеспечения условия гарантированного захвата рифлёными верхними валками куска материала определённого фракционного состава при отсутствии эффекта его проскальзывания. Предложены рациональные размеры валиков и угла между центрами окружностей соседних рифлей на рабочей поверхности бандажа верхних валков дробилки ДЧГ 960×700 для производственных условий процесса измельчения твёрдого топлива в условиях подготовки шихтовых компонентов при производстве агломерата в агломерационном цехе Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» (Алчевский металлургический комбинат).*

**Ключевые слова:** измельчение, дробление, четырёхвалковая дробилка, валок, рифлёный валок, твёрдое топливо, фракция, условие захвата, размер валика, угол расположения рифлей.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Процессы фракционной подготовки материалов широко используются в различных отраслях человеческой деятельности, особенно в коксохимической промышленности, а также в металлургии чёрных и цветных металлов. В условиях металлургических и коксохимических предприятий процессы дробления и измельчения применяются для подготовки исходных шихтовых материалов, в том числе твёрдого топлива, путём дробления и измельчения сырья до необходимого фракционного состава.

Для реализации данных процессов используются различные типы дробильных машин, в том числе ударные роторные молотковые и четырёхвалковые дробилки. Однако молотковые дробилки уступают в эффективности диспергирования данного вида технологического сырья в показателях степени измельчения и энергоёмкости процесса, и на основании этого, а также из анализа производственного опыта для реализации измельчения твёрдого топлива предпочтение отдаётся именно валковым дробилкам [1–3].

При этом способы разрушения материала, применяемые в валковых дробилках, остаются относительно малоэффективными в плане энергозатрат и сопряжены со значительным износом рабочих органов дробильных машин [1–3]. Поэтому изучение и повышение эффективности дробильных машин с целью улучшения основных технико-экономических показателей самого процесса измельчения, а также увеличения срока службы рабочих органов и узлов дробилок является весьма актуальным и существенно сказывается на основных показателях агломерации шихтовых материалов в металлургическом производстве [1, 2].

**Постановка задач.** Задачами данного исследования являются математическое обоснование контактного взаимодействия куска дробимого материала при установившемся движении по рабочей поверхности бандажей верхних валков четырёхвалковой дробилки на основании третьего закона Ньютона, а также определение рациональных конструктивных параметров рифлёных бандажей верхних валков с целью повышения эффективности измель-

чения твёрдого топлива дробилками ДЧГ 960×700 в процессе фракционной подготовки шихтовых материалов в агломерационном цехе в условиях Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» (Алчевский металлургический комбинат).

**Изложение материала и его результаты.** Четырёхвалковые дробилки по конструкции представляют собой две пары валков, расположенных одна над другой, при этом их можно рассматривать как две двухвалковые дробилки, смонтированные в одном корпусе.

Для повышения эффективности процесса измельчения материала в данном типе дробильных машин верхние валки выполняют с рифлёной или зубчатой поверхностью, а нижнюю пару, как правило, оставляют гладкой. Этим достигается более высокая степень измельчения материала в дробилке в целом. Подобные конструктивные особенности дробильных машин применяются на агломерационных фабриках для измельчения кокса и угля большинства металлургических предприятий полного цикла.

Одним из основных показателей эффективности процесса дробления в валковых дробилках является угол захвата материала, который регламентирует максимально допустимый размер куска материала, загружаемого в рабочее пространство дробильной машины, в зависимости от конструктивно-технологических характеристик дробилки и фракционного состава сырья. При этом, используя гладкие валки, требуется соблюдать следующее условие [1, 3, 4]:

$$\alpha_1 = \arccos \left( \frac{R_{\delta} + 0,5b}{R_{\delta} + r_k} \right) \leq \gamma_{mp}, \quad (1)$$

где  $\alpha_1$  — угол захвата куска материала в рабочее пространство для гладких валков;  $R_{\delta}$  — радиус рабочей поверхности бандажа валка;  $r_k$  — условный радиус куска материала;  $b$  — межвалковый зазор (ширина выходной щели между валками);  $\gamma_{mp}$  — угол трения материала куска по

рабочей поверхности бандажа,  $\gamma_{mp} = \tan \mu$  (где  $\mu$  — коэффициент трения измельчаемого материала по материалу бандажа валка) [1, 3, 4].

Для гладких валков значение данного угла составляет, в зависимости от сырья, подвергаемого дроблению, приблизительно 16–24° [3, 4]. При таких значениях угла  $\alpha_1$  соотношение диаметров валка и куска дробимого материала при минимальном межвалковом зазоре составляет 20:1–10:1, что негативно сказывается на степени дробления материала [4] и существенно ограничивает его фракционный состав.

При этом максимальный диаметр измельчаемого куска определяется из условия [1, 3, 4]

$$r_{k_{\max}} = \frac{R_{\delta} + 0,5b - R_{\delta} \cos \mu}{\cos \mu}. \quad (2)$$

Повышения эффективности процесса измельчения каменно-рудных материалов в четырёхвалковой дробилке за счёт увеличения степени измельчения и возможности диспергирования более крупной фракции материала, а также снижения износа рабочей поверхности валков можно достигнуть, как указывалось выше, при использовании в комбинированной дробилке верхних валков с наплавленной сеткой, образующейся наплавленными продольными и поперечными выступающими валиками [5] определённого размера (рис. 1).

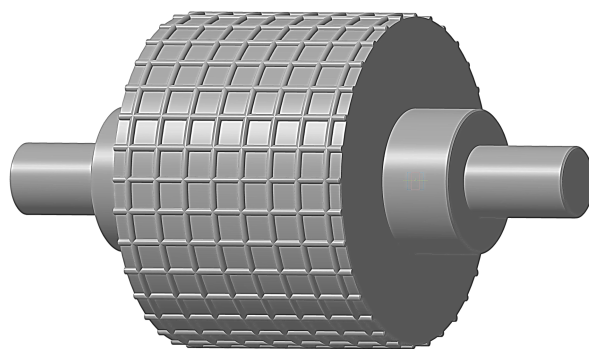


Рисунок 1 Трёхмерная модель рифлёного валка с наплавленной сеткой на рабочей поверхности бандажа



При этом в предшествующих исследованиях не уделялось достаточного внимания обоснованию процесса контактного взаимодействия с целью определения условий захвата куска дробимого материала рифлёными валками при его измельчении валковыми дробилками. Это не позволяло определить рациональные параметры валков наплавленной сетки для повышения эффективности работы четырёхвалковой дробилки с рифлёными верхними валками.

Для математического моделирования процесса контактного взаимодействия куска измельчаемого материала с рабочей поверхностью рифлёных бандажей валков четырёхвалковой дробилки в процессе дробления необходимо принять следующие допущения:

- материал измельчаемой частицы — однородный, сплошной, изотропный и физически линейный;
- отдельный кусок дробимого материала представляется в виде шара;
- контактирующие поверхности предполагаются совершенно гладкими;
- кусок материала при контакте с поверхностями рифлёных верхних валков воспринимает равнозначные нагрузки и не вращается относительно своей оси симметрии.

При определении основных конструктивных параметров валка с рифлёными бан-

дажами в процессе их взаимного контакта с куском измельчаемого материала при его движении относительно рабочей поверхности предложена математическая модель, основанная на третьем законе Ньютона (законе равенства действия и противодействия) [6]. Схематическое отображение данного процесса представлено на рисунке 2.

При таком виде контактного взаимодействия куска материала 3 с рабочей поверхностью рифлёного валка 1 захват будет осуществляться при условии равновесия действующих сил:

$$\bar{F}_{mp1} + \bar{F}_{mp2} + \bar{N}_1 + \bar{N}_2 = 0, \quad (3)$$

где  $\bar{F}_{mp1}$  — сила трения скольжения при контактом взаимодействии куска материала с рабочей поверхностью бандажа;  $\bar{F}_{mp2}$  — сила трения скольжения при контактом взаимодействии куска материала с рабочей поверхностью валика сетки 2;  $\bar{N}_1$  — сила нормальной реакции от силы тяжести куска в точке контакта с рабочей поверхностью бандажа;  $\bar{N}_2$  — сила нормальной реакции от силы тяжести куска в точке взаимодействия с рабочей поверхностью валика.

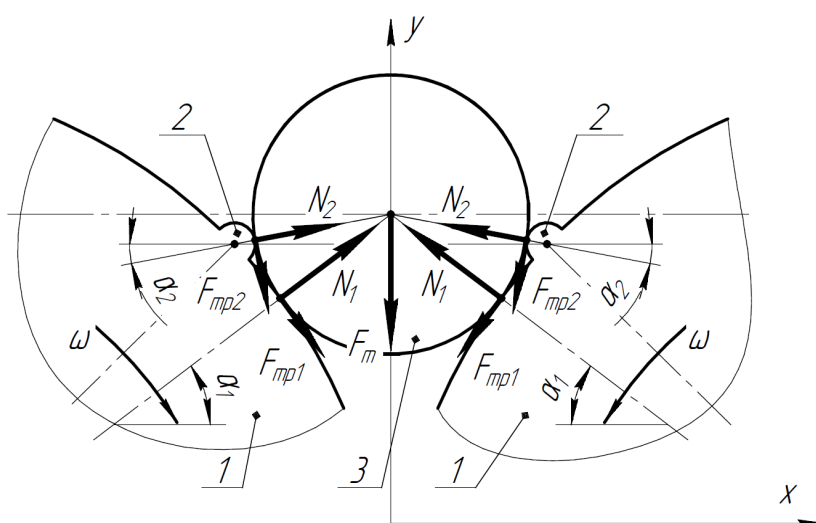


Рисунок 2 Расчетная схема для определения параметров контактного взаимодействия измельчаемого материала с рифлёными валками четырёхвалковой дробилки

Для определения силы нормальной реакции от силы тяжести куска в точке взаимодействия с рабочей поверхностью валика  $\bar{N}_2$  необходимо определить величину избыточной силы выталкивания при их контакте, возникающей при углах трения куска материала определённого размера, превышающего условия захвата (1), и, соответственно, необходимую для компенсации её в проекции на вертикальную ось у силу трения, захватывающую кусок в рабочее пространство дробилки.

Для этого проанализируем взаимодействие сил на основании расчётной схемы, представленной на рисунке 3.

В этом случае необходимая сила трения в проекции на вертикальную ось у  $F_{mp2}^y$  будет определяться как разница проекций и  $F_{mp1}^y F_{mp1}^y$  с учётом равенства проекций выталкивающей силы  $N_\mu^y$  и силы трения  $F_{тр\mu}^y$  при угле захвата, равном  $\mu$ , а также того, что сила трения при сохранении в первом приближении  $F_{mpi} = \mu N_i$ :

$$\begin{aligned} F_{mp2}^y &= N_1^y - N_\mu^y - F_{mp1}^y + F_{тр\mu}^y = \\ &= N_1 \sin \alpha_1 - N_\mu \sin \mu - \mu N_1 \cos \alpha_1 + \\ &\quad + \mu N_\mu \cos \mu, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $N_\mu$  — сила нормальной реакции от силы тяжести куска в точке контакта с рабочей поверхностью банджа при угле, значение которого равно коэффициенту трения  $\mu$ .

При этом сила нормальной реакции от силы тяжести куска в точке контакта с рабочей поверхностью банджа —  $N_1 = F_m \sin^{-1} \alpha_1$  (где  $F_m$  — сила тяжести куска материала). Тогда из зависимостей (2), (3) в проекции на вертикальную ось у можно определить необходимую силу трения для обеспечения условия захвата куска в рабочее пространство валков, равную по своей величине в этой проекции силе выталкивания, которая возникает при превышении условия (1) при дроблении материала крупной фракции:

$$N_2 = \frac{F_m ((\sin \alpha_1 - \sin \mu) + \mu (\cos \mu - \cos \alpha_1))}{\sin \alpha_1}. \quad (5)$$

При этом, если принять во внимание, что в первом приближении  $\tan \mu = \mu$ , а также с учётом закономерности (1) решение относительно переменной  $\alpha_2$  для определения зависимости требуемого угла между вектором выталкивающей силы, возникающей при контактном взаимодействии материала с поверхностью валика  $N_2$ , и перпендикуляром к вектору силы тяжести куска для обеспечения условия захвата принимает следующий вид:

$$\alpha_2 = \mu - \frac{\sin \alpha_1 - \sin \mu + \mu (\cos \mu - \cos \alpha_1)}{\sin \alpha_1}. \quad (6)$$

Для определения размера валика необходимо рассмотреть схему (рис. 4).

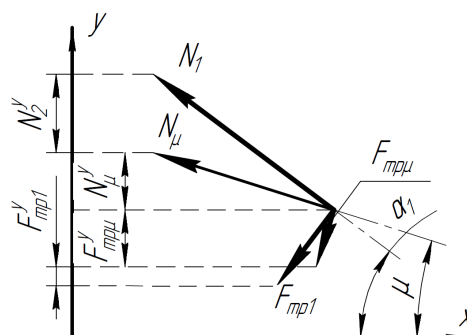


Рисунок 3 Расчётная схема определения компенсирующей силы трения для обеспечения условий захвата куска материала

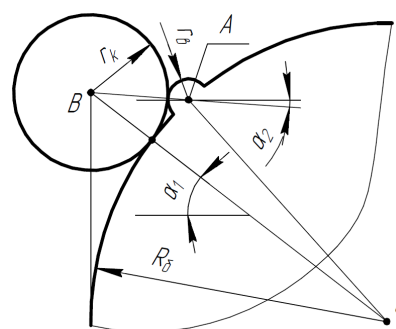


Рисунок 4 Расчётная схема для определения размеров валика

На основании вышеизложенного из треугольника  $OAB$ , отображённого на расчётной схеме (рис. 4), с учётом закономерностей (1), (5), (6) определяется необходимый радиус валиков  $r_6$  сетки, наплавляемой на рабочей поверхности бандажей верхних валков, для обеспечения условий захвата, а также про-

никновения дробимого сырья в рабочее пространство дробильной машины в процессе их контактного взаимодействия в зависимости от определённых конструктивно-технологических параметров четырёхвалковой дробилки с рифлёными валками при измельчении материала определённой фракции:

$$r_6 = (R_6 + r_k) \cos \left( \alpha_2 - \arccos \left( \frac{R_6 + 0,5b}{R_6 + r_k} \right) \right) - r_k -$$

$$-0,5 \sqrt{2R_6^2 - 2r_k^2 + \cos 2\alpha_2 (2R_6^2 + 4R_6(b - r_k) + b^2) - 4R_6r_k + \sin 2\alpha_2 (2R_6 + b) \sqrt{(2r_k - b)(4R_6 + b + 2r_k)}}. \quad (7)$$

При этом для обеспечения наиболее эффективного условия захвата загружаемого куска дробимого материала максимального размера необходимо исключить его проскальзывание за счёт одновременного контакта куска с поверхностью бандажа и двух соседних валиков наплавленной сетки на рабочей поверхности валика. Для этого рассмотрим схему — треугольник  $AOB$  (рис. 5).

Исходя из этого, угол между центрами окружностей соседних валиков сетки  $\beta_2$  определяется как

$$\beta_2 = 2 \arccos \left[ \frac{R_6^2 - \frac{r_p^2}{2} + r_k(R_6 - r_p)}{R_6(R_6 + r_k)} \right]. \quad (8)$$

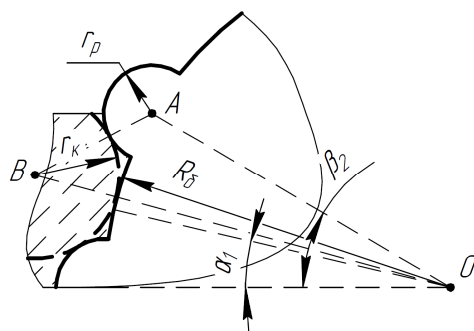


Рисунок 5 Схема обоснования угла между соседними валиками

На рисунке 6 отображены графические зависимости радиуса валика наплавляемой сетки на рабочую поверхность бандажа, необходимого для обеспечения условия захвата куска, от фракционного состава измельчаемого материала (для конструктивных параметров четырёхвалковой дробилки ДЧГ 960×700 [7]) в условиях необходимого межвалкового зазора, влияющего на угол захвата нижними гладкими валками (1) дробимых отсевов кокса, кокса холодного тушения, а также углей марок АО и АС (коэффициенты трения которых, в зависимости от формы поверхности и влажности материала, состояния поверхности бандажа валика, находятся в диапазоне 0,2–0,42 [3, 4]), обусловленного рекомендуемыми размерами измельчённой фракции, необходимой для обеспечения требуемых показателей агломерационного процесса шихтовых материалов, используемых в условиях современного доменного производства [8].

На основании вышеизложенных результатов исследования, а также исходя из условия, что радиус валика сетки, наплавляемой на верхних валках дробильной машины, не должен превышать радиус куска после реализации диспергирования в процессе первой стадии дробления, поступающего на нижние валки (из условия его захвата нижними гладкими валками [1]), максимальный размер фракции материала,

который возможно подавать в четырёхвалковую дробилку ДЧГ 960×700 с верхними рифлёными валками при наименьшем коэффициенте трения сырья по стали  $\mu = 0,2$ , составляет 0,18 м, при  $\mu = 0,3$  — 0,26 м. В то же время, из полученных расчётных данных установлено, что максимальная фракция измельчаемого кокса с коэффициентом трения  $\mu = 0,42$  может достигать 0,28 м.

На рисунке 7 представлены графические зависимости рекомендуемого угла между центрами окружностей соседних валков сетки вала от фракции измельчаемого материала для обеспечения наибольшей эффективной работы дробилки.

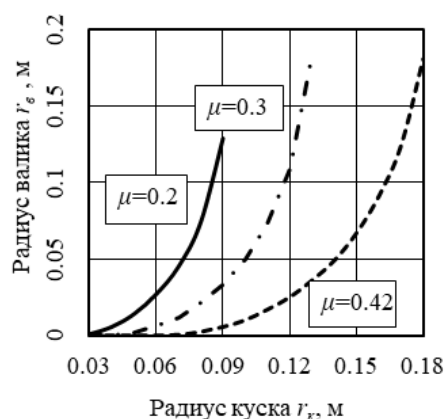


Рисунок 6 Графики зависимостей радиуса валика на поверхности бандажа от размеров дробимого материала

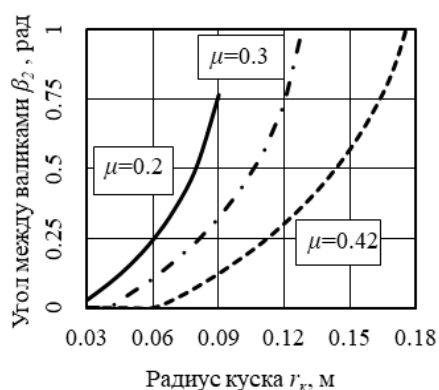


Рисунок 7 График зависимости угла между центрами соседних валков сетки вала от размеров материала

В условиях производства доменного агломерата в агломерационном цехе Филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» на участке фракционной подготовки шихтовых материалов измельчению подвергаются следующие виды твёрдого топлива: для применения в агломерационном процессе спекания — уголь марок АО и АС фракционным составом 0–50 мм, коксовая мелочь размерами 0–25 мм, а также для обеспечения потребностей участка глиномялки доменного цеха — кокс сухого тушения фракцией 0–140 мм.

В таблице представлены результаты сравнительного анализа основных параметров четырёхвалковой дробилки ДЧГ 960×700 при реализации процесса измельчения различных видов твёрдого топлива в условиях агломерационного производства с использованием гладких и рифлёных верхних валков, а также рекомендуемые значения конструктивных параметров рифлёного верхнего вала дробилки с учётом технологического коэффициента запаса, учитывающего отклонение формы, влажности и запылённости куска материала и т. д., значение которого задаётся в пределах 1,1–1,2.

Учитывая результаты, отображённые в таблице, можно утверждать, что для условий измельчения коксовой мелочи наплавка сетки на поверхность бандажа не требуется, так как даже с учётом коэффициента запаса угол захвата гладкими валками фактически равен значению коэффициента трения. При использовании в агломерационном процессе углей рекомендуется наплавлять на верхний валок сетку, состоящую из валков радиусом 3,9 мм. Для обеспечения требуемого помола кокса сухого тушения для производственных потребностей глиномялки необходима сетка радиусом 14,0 мм. Требуемый угол между центрами поперечных валков сетки: для обеспечения процесса дробления углей — 0,064 рад, при измельчении кокса сухого тушения — 0,191 рад.

Таблица

Технологические параметры процесса измельчения твёрдого топлива в четырёхвалковой дробилке и рекомендуемые конструктивные параметры рифлёных валков

Наименование параметра	Вид и фракция (мм) твёрдого топлива		
	Угли (–50)	Коксовая мелочь (–25)	Кокс сухого тушения (–140)
Наименьшее значение коэффициента трения материала по стали $\mu$	0,2	0,3	0,33
Требуемая фракция дроблёного материала после помола, мм	0–3	0–3	0–5
Угол $\alpha_1$ , рад	0,308	0,308	0,487
Угол $\alpha_2$ , рад	–0,16	0,272	–0,021
Радиус валика $r_g$ сетки, мм	3,9	0,02	14
Угол между центрами окружностей соседних валиков сетки $\beta_2$ , рад	0,064	0,004	0,191
Наибольший размер дробимого куска для гладких валков, м	0,032	0,058	0,086
Наибольший размер дробимого куска для рифлёных валков (с максимально возможным размером валика), м	0,16	0,24	0,28
Степень дробления	16,7	8,3	28

На основании полученных результатов исследования можно утверждать, что реализация рифлёных валков с определёнными конструктивными параметрами позволит использовать исходное сырьё большей фракции, снизить износ рабочих органов и повысить эффективность самого процесса измельчения каменно-рудных материалов, в том числе и твёрдого топлива, в четырёхвалковых дробилках. Однако применение рифлёных валков и более крупной фракции исходного сырья значительно повысит усилия, возникающие при разрушении материала при контакте с поверхностью валиков, что будет негативно сказываться на прочностных характеристиках вала, ресурсопригодности подшипниковых узлов, а также энергосиловых параметрах самого процесса измельчения материала в дробилке.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В ходе исследований разработана математическая модель процесса захвата материала рифлёными валками валковой дробилки.

Предложены закономерности для определения необходимого радиуса валиков

сетки, наплавляемой на рабочей поверхности бандажей верхних валков четырёхвалковой дробилки, для обеспечения условия захвата материала в процессе его дробления и угла между центрами окружностей соседних валиков сетки для максимально возможного снижения проскальзывания материала по рабочей поверхности бандажа и её степени износа.

Выявлено влияние данных конструктивных параметров на эффективность работы самой дробилки.

Предложены рациональные конструктивные параметры сетки рифлёного верхнего валика ДЧГ 960×700 для измельчения различных видов твёрдого топлива в условиях агломерационного цеха в Филиале № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС».

Дальнейшими перспективами в исследовании процесса дробления различных материалов в валковых дробилках с рифлёными валками являются математическое описание стадии разрушения материалов при контактном воздействии на него рабочей поверхности бандажа и валика сетки с использованием полученных в данной ра-

боте результатов моделирования, а также экспериментальное подтверждение выдвинутых предположений и исследование влияния конструктивных параметров вала

на основные технологические показатели процесса измельчения каменно-рудных материалов в валковых дробильных машинах.

### Библіографічний список

1. *Treatise on Process Metallurgy. Vol. 3. Industrial Processes [Text] / Editor in Chief S. Seetharaman. — Elsevier, 2014. — 1751 p.*
2. Власенко, Д. А. Комплексный анализ особенностей эксплуатации дробильно-измельчительного оборудования в агломерационном производстве [Текст] / Д. А. Власенко // *Инновационные перспективы Донбасса. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Донецк : ДонНТУ, 2019. — Т. 3 — С. 150–154.*
3. Клушанцев, Б. В. Дробилки. Конструкция, расчёт, особенности эксплуатации [Текст] / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек. — М. : Машиностроение, 1990. — 320 с.
4. Борщев, В. Я. Оборудование для измельчения материалов : дробилки и мельницы [Текст] / В. Я. Борщев. — Тамбов : изд-во ТГТУ, 2004. — 75 с.
5. Пат. 188107 Российская Федерация, МПК В02С 4/30 (2006.1). Валок четырёхвалковой дробилки / А. П. Жильцов, Г. А. Билан, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко, Р. С. Мележик ; заявитель и патентообладатель Липецкий гос. техн. ун-т. — № 2018134232 ; заявл. 27.09.18 ; опубл. 28.03.19, Бюл. № 10. — 3 с. : ил.
6. Тарг, С. М. Краткий курс теоретической механики [Текст] / С. М. Тарг. — М. : Высшая школа, 1995. — 416 с.
7. ПТИМ 229–ОА–030–7–2018. Техническое обслуживание и ремонт дробильного оборудования участка шихтоподготовки агломерационного цеха [Текст]. — Введ. 2018–29–01. — Алчевск : Филиал № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС», 2018. — 29 с.
8. Коротич, В. И. Агломерация рудных материалов [Текст] / В. И. Коротич, Ю. А. Фролов, Т. Н. Бездежский. — Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ–УПИ», 2003. — 400 с.

© Власенко Д. А.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А., к.т.н., доц. каф. МО ЛГТУ Харитоненко А. А.**

Статья поступила в редакцию 08.01.20.

**Власенко Д. О.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАХОПЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ РИФЛЕНИМИ ВАЛКАМИ ВАЛКОВОЇ ДРОБАРКИ

На підставі третього закону Ньютона запропоновано математичну модель процесу захоплення матеріалу верхніми рифленими валками чотиривалкової дробарки у процесі його подрібнення. В результаті аналітичного обґрунтування отримано залежності, що визначають кут контакту шматка з валиком напавленої сітки, розмір валика і кут між сусідніми рифлями на робочій поверхні бандажу для забезпечення умови гарантованого захоплення рифленими верхніми валками шматка матеріалу певного фракційного складу за відсутності ефекту його прослизання. Запропоновано раціональні розміри валиків і кута між центрами кіл сусідніх рифлів на робочій поверхні бандажу верхніх валків дробарки ДЧГ 960×700 для виробничих умов процесу подрібнення твердого палива в умовах підготовки шихтових компонентів при виробництві агломерату в агломераційному цеху Філії № 12 ЗАТ «ВНЕШТОРГСЕРВИС» (Алчевський металургійний комбінат).

**Ключові слова:** подрібнення, дроблення, чотиривалкова дробарка, валок, рифлений валок, тверде паливо, фракція, умова захоплення, розмір валика, кут розташування рифлів.

**Vlasenko D. A.** (*DonSTU, Alchevsk, LPR*)

**MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF MATERIAL CAPTURE BY FLUTED ROLLS OF A ROLL CRUSHER**

*Based on Newton's third law, a mathematical model of the process of material capture by the upper fluted rolls of a four-roll crusher during its grinding is proposed. As a result of analytical justification the dependences defining the contact angle of a piece with the roll of padding mesh, roll size and the angle between the neighboring ruffles on the operating tyre surface to ensure the conditions for guaranteed capture by the upper fluted rolls the piece of material of a certain fractional composition in the absence of its slipping effect were obtained. There have been proposed the optimal sizes of rolls and angle between the circle centers of neighboring ruffles on the operating tyre surface of the upper rolls crusher ДЧГ 960×700 for the operating conditions of grinding process of solid fuels in preparing burden components in the production of sinter in sintering plant of Branch № 12 of CJSC "VNESHTORGSERVIS" (Alchevsk Iron and Steel Works).*

**Key words:** grinding, crushing, four-roll crusher, roll, fluted roll, solid fuel, fraction, capture condition, roll size, angle of ruffles.

**ТРЕБОВАНИЯ**  
**к рукописям научных статей в сборник научных трудов**  
**Государственного образовательного учреждения**  
**высшего профессионального образования**  
**Луганской Народной Республики**  
**«Донбасский государственный технический университет»**

Научные статьи, предоставляемые в редакцию, должны соответствовать требованиям ВАК МОН ДНР (Приложение 1 к правилам формирования в уведомительном порядке перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (п. 4)) и базовым издательским стандартам по оформлению статей по ГОСТ 7.5–98 «Журналы, сборники, информационные издания».

Сборник научных трудов издаётся не менее 8 раз в 2 года. Сборник формирует информационный отдел: 94204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16, ДонГТУ; тел./факс: (06442) 2-68-87, e-mail: [info@dstu.education](mailto:info@dstu.education) (тема: для редакции сборника научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ»); секретарь редакционной коллегии Скомская Светлана Анатольевна.

Сборник содержит следующие разделы: «Науки о земле», «Металлургия и материаловедение», «Машиностроение и машиноведение», «Строительство и архитектура».

Представляемые в статье материалы должны быть актуальными, отвечать новым достижениям науки и техники, иметь практическую значимость, соответствовать направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

Название статьи должно быть лаконичным и понятным, включать в себя объект и предмет исследований, иметь прямое отношение к области исследований и её результатам.

Обязательные элементы статьи:

- 1) постановка проблемы, обоснование её актуальности;
- 2) анализ последних исследований и публикаций по данной проблеме, вскрытие их недостатков и противоречий;
- 3) выделение не решённых ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;
- 4) формулирование цели, идеи, объекта и предмета исследований, постановка задач исследований;
- 5) описание и обоснование принятой методики исследований;
- 6) изложение основного материала теоретических и (или) экспериментальных исследований с обоснованием достоверности полученных научных результатов;
- 7) выводы о научной новизне и практической ценности результатов, направление дальнейших исследований.

По решению редколлегии в каждом номере сборника может быть опубликовано не более одной статьи обзорного характера, включающей большую часть рекомендованных выше основных элементов.

Редакция оставляет за собой право отклонять рукописи обзорного и компилятивного характера с нечётко сформулированными научными результатами, новизна и достоверность которых недостаточно обоснованы.

Результаты работы не должны предоставляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, несоблюдение действующих стандартов и недостоверность приведённых в статье данных полностью несут авторы статьи.



Статья должна сопровождаться:

- внутренней и внешней рецензиями;
- лицензионным договором с автором(и).

Текст статьи предоставляется на электронном носителе и в печатном виде, сопроводительная документация только в печатном виде.

Рекомендуемое количество авторов статьи — до 3-х человек. При необходимости, по решению редколлегии, количество авторов может быть увеличено до 5-ти.

Языки предоставления статей: русский, английский, украинский.

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Текст рукописи статьи от 5 до 10 страниц в книжной ориентации на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) с полями: верхнее, нижнее — 27 мм; левое, правое — 24 мм. Различать колонтитулы чётных и нечётных страниц: от края до верхнего колонтитула — 2 см; от края до нижнего колонтитула — 2 см. Страницы не нумеруются. Рукопись статьи оформляется с применением редактора **MS Word в формате, полностью совместимом с Word 97–2003**: шрифт — Times New Roman, размер — 12 пт, интервал — одинарный, выравнивание — по ширине, абзацный отступ — 0,5 см.

Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **активирована**. Весь материал подаётся в чёрно-белом оформлении (без градиентов серого или цветовой палитры).

**Не допускается** использование списков (маркированных и нумерованных) и элементов «Надпись». **Запрещено использование стилей!**

### *Оформление статей*

Статья подаётся отдельным файлом «*Статья.doc*».

УДК проставляется вверху, выравнивание по левому краю, шрифт полужирный, без абзацного отступа. УДК можно определить самостоятельно с помощью классификатора <https://teacode.com/online/udc>. Проверить корректность расшифровки известного УДК можно здесь — <http://scs.viniti.ru/udc/Default.aspx>.

Через один интервал — учёная степень, фамилия, инициалы, разделённые пробелом. С новой строки в круглых скобках через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. Шрифт полужирный, курсив, выравнивание по правому краю, без абзацного отступа.

С новой строки — название статьи. Выравнивание по центру, шрифт Arial, полужирный, видоизменение — все прописные, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца — 12 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. **Не допускается** набор всего названия заглавными буквами (Caps Lock).

С новой строки — краткая аннотация на языке публикации: размер шрифта — 11 пт, курсив. В аннотации сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

После аннотации с новой строки — ключевые слова (6–8 слов на языке статьи), курсивом, размером 11 пт, интервал после абзаца — «Авто». Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

С новой строки — текст статьи в **две колонки** одинаковой ширины, промежуток между колонками — 0,5 см.

Слова «рисунок» и «таблица» при упоминаниях в тексте пишутся полностью (пример: «... на рисунке 2 ...»), а в ссылках в конце предложения — сокращённо в скобках (примеры: «... схема инвертора (рис. 2).», «... получены экспериментальные данные (табл. 4).»).

После текста статьи полужирным шрифтом размером 11 пт располагается заголовок «Библиографический список»: интервал перед абзацем — 12 пт, после абзаца — 8 пт, выравнивание по левому краю.

Библиографический список оформляется согласно ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления» размером 11 пт, курсивом и должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Рекомендованное количество ссылок — не более восьми источников с датой их издания не ранее чем 20 лет назад.

Через один интервал — учёная степень, фамилия, инициалы, полное название организации, название статьи, аннотации и ключевые слова на оставшемся языке из двух (русский, украинский), размером шрифта 11 пт.

Учёная степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. В круглых скобках курсивом через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора.

С новой строки, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю — название статьи заглавными буквами.

С новой строки — краткая аннотация курсивом.

С новой строки — ключевые слова курсивом. Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

### **Оформление аннотаций отдельным файлом**

Аннотация и ключевые слова дополнительно подаются на двух языках (русский, украинский) отдельным файлом «*Аннотация.doc*», размером шрифта 11 пт.

Учёная степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. В круглых скобках курсивом через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. С новой строки, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю — название статьи заглавными буквами.

С новой строки — краткая аннотация курсивом.

С новой строки — ключевые слова курсивом. Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

**Не допускается** внедрение в текст аннотации объектов (формул, рисунков и т. д.).

### **Оформление рефератов отдельным файлом**

Реферат подаётся на двух языках (русский, украинский) отдельным файлом «*Реферат.doc*»: размер шрифта — 11 пт, без абзацного отступа, выравнивание — по левому краю. Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **выключена**.

Фамилия, имя, отчество оформляются полужирным шрифтом.

С новой строки — учёная степень, должность.

С новой строки — название подразделения.

С новой строки через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора.

Через интервал повторить данные для каждого автора.

Через интервал — название статьи (полужирным начертанием).

Через интервал — текст реферата. Реферат объёмом от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель, методика, результаты, научная новизна, практическая значимость. Фразы «Цель.», «Методика.», «Результаты.», «Научная новизна.», «Практическая значимость.» (на русском языке), «Мета.», «Методика.», «Результати.», «Наукова новизна.», «Практична значущість.» (на украинском языке), «Aim.», «Technique.», «Results.», «Scientific novelty.», «Practical significance.» (на английском языке) размещаются с новой строки и выделяются полужирным начертанием. Реферат не должен повторять название статьи.

**Не допускается** внедрение в текст реферата объектов (формул, рисунков, и т. д.).

### **Рисунки**

Рисунки вставляются в текст единым объектом и могут быть представлены:

– *растровыми форматами* — gif, tiff, jpg, bmp и им подобными (качество 300 dpi);

– векторными форматами — emf, wmf (графики, диаграммы).

Рисунки, выполненные в программах Corel, CAD, Word и др., переводятся в один из описанных выше форматов, предпочтительно векторный.

Графический материал следует располагать непосредственно после текста, в котором он упоминается впервые, или на следующей странице. Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте и нанесены слева направо, сверху вниз. Перед рисунком интервал 12 пт. Выравнивание по центру, ширина в одну колонку (большие рисунки располагают на ширину страницы вверх или вниз). Рисунки размещают в тексте (не в таблицах), обтекание рисунка — «в тексте». Все рисунки подаются дополнительно отдельными файлами.

Допускается размещение пояснительных данных под иллюстрацией (подрисуночный текст) с выравниванием по центру, без абзацного отступа, размером 10 пт.

Под каждым рисунком (подрисуночным текстом) располагается надпись в формате «Рисунок № Название» с выравниванием по центру без абзацного отступа, интервалом перед и после абзаца — «Авто», размером шрифта 11 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. Статья не должна заканчиваться рисунком. Рекомендуются, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема статьи.

### Формулы

Абзац, содержащий формулы, должен иметь следующие параметры: выравнивание по левому краю, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца 6 пт, позиции табуляции — 3,93 см по центру (для расположения формулы) и 7,85 см по правому краю (для расположения номера формулы). Формулы целиком (включая размерности) выполняются с помощью редактора формул **Microsoft Equation 3** или **MathType** математическим стилем, обычное начертание шрифта (нормальный), со следующими размерами:

Full (обычный).....	12 pt
Subscript/Superscript (крупный индекс) .....	9 pt
Sub-Subscript/Superscript (мелкий индекс) .....	7 pt
Symbol (крупный символ).....	14 pt
Sub-Symbol (мелкий символ).....	12 pt
Формат .....	по центру
Междустрочный интервал .....	200 %

**Недопустимо** масштабирование и размещение формул в табличном формате. В одном блоке формулы, попадающем на границу колонок, допускается только одна строка (многострочные формулы разбиваются на блоки). Упоминание элементов формул в тексте статьи также выполняется в редакторе формул.

### Таблицы

Все таблицы располагаются после упоминания в тексте и должны иметь нумерационный заголовок и название (размер шрифта 11 пт). Нумерационный заголовок (*Таблица 1*) выравнивается по правому краю над таблицей, курсив, интервал перед абзацем — 12 пт. С новой строки помещают название выравниванием по центру, без абзацного отступа, с запретом автоматического переноса слов в абзаце; интервал после абзаца — 6 пт.

Таблица выравнивается по центру контейнера, в книжной ориентации, шириной в 1 колонку (большие таблицы располагаются на ширину страницы вверх или вниз). Текст в таблице оформляется размером шрифта 11 пт или 12 пт без абзацного отступа. **Не допускается** заливка ячеек таблицы цветом. **Запрещается** располагать таблицу в альбомной ориентации. После таблицы отступается один интервал.

**СОДЕРЖАНИЕ****НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

<i>Литвинский Г. Г.</i> ПАСПОРТ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ: СТАТИКА И КИНЕТИКА .....	5
<i>Зубков В. Е., Кизияров О. Л., Левченко Э. П., Псюк В. В.</i> ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛОВ В БЛОКИРОВАННОМ ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ .....	18
<i>Науменко В. Г.</i> РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКИНЕТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ В ПРОЦЕССАХ ОБОГАЩЕНИЯ .....	22
<i>Поповский В. Н., Чебан В. Г.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЁТА КОЛИЧЕСТВА ВОЗДУХА ДЛЯ ПРОВЕТРИВАНИЯ МЕХАНИЗИРОВАННЫХ ЛАВ КРУТОГО ПАДЕНИЯ .....	27
<i>Кулакова С. И., Павлов В. И.</i> СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ПОВЫШЕНИИ НАГРУЗКИ НА ОЧИСТНОЙ ЗАБОЙ .....	35
<i>Кладко В. И.</i> АНАЛИЗ УСЛОВИЙ СООРУЖЕНИЯ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК НА ШАХТЕ «САМСОНОВСКАЯ-ЗАПАДНАЯ» .....	42
<i>Мальшиева Н. Н.</i> ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕНИ ВСТУПЛЕНИЯ В РАБОТУ ОХРАННОГО СООРУЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОДДЕРЖАНИЯ ВЫРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ ШАХТЫ «РАССВЕТ-1» ...	50

**МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

<i>Куберский С. В.</i> РЕАЛИЗАЦИЯ СТРАТЕГИИ СОЗДАНИЯ МИКРО- И МИНИ-ЗАВОДОВ В УСЛОВИЯХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ .....	61
<i>Куберский С. В., Коваленко О. А., Мурга Е. В., Мурга С. В.</i> ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНОГО УПРОЧНЕНИЯ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ИЗДЕЛИЙ ИЗ СТАЛИ И СПЛАВОВ .....	71
<i>Денищенко П. Н., Макаганюк А. С.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕРПОВИДНОСТИ РАСКАТА ПРИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ С УЧЁТОМ УШИРЕНИЯ .....	77

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

<i>Карапетян С. Х., Псюк В. В.</i> К ПОСТРОЕНИЮ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ БЕТОНА ИЗ ОПЫТА НА ВНЕЦЕНТРЕННОЕ СЖАТИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СТОЕК ПРИ ОДНОКРАТНЫХ И ПОВТОРНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ .....	87
<i>Усенко В. Н.</i> ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕКРЁСТНО-БАЛОЧНЫХ СИСТЕМ ПОКРЫТИЙ С ГИБКИМИ ЗАТЯЖКАМИ В НЕСКОЛЬКИХ УРОВНЯХ .....	93

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

<i>Корнеев С. В., Доброногова В. Ю., Долгих В. П., Захаров О. В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ANSYS WORKBENCH НАПРЯЖЁННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЗИНОТКАНЕВОЙ КОНВЕЙЕРНОЙ ЛЕНТЫ С МЕХАНИЧЕСКИМ СТЫКОМ ПРИ ИЗГИБЕ НА ОБВОДНЫХ БАРАБАНАХ .....	101
--	-----

<i>Костенко А. В., Михайлов А. Н., Матвиенко С. А., Лукичев А. В.</i> СТРУКТУРА СРЕДСТВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ФУНКЦИОНАЛЬНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ .....	110
<i>Мороз В. В., Рубежанский В. И., Левченко Э. П., Зинченко А. М.</i> ВЛИЯНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ НА ЗАКОН ДВИЖЕНИЯ КУСКА АГЛОМЕРАТА В ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКЕ .....	117
<i>Власенко Д. А.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАХВАТА МАТЕРИАЛА РИФЛЁНЫМИ ВАЛКАМИ ВАЛКОВОЙ ДРОБИЛКИ .....	122

**ЗМІСТ****НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ**

<i>Литвинський Г. Г.</i> ПАСПОРТ СТІЙКОСТІ ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ: СТАТИКА І КІНЕТИКА .....	5
<i>Зубков В. Є., Кізіяров О. Л., Левченко Е. П., Псюк В. В.</i> ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ЗБАГАЧЕННЯ МІНЕРАЛІВ У БЛОКОВАНОМУ ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ .....	18
<i>Науменко В. Г.</i> РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОКІНЕТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДОВУГІЛЬНИХ СУСПЕНЗІЙ В ПРОЦЕСАХ ЗБАГАЧЕННЯ .....	22
<i>Поповський В. М., Чебан В. Г.</i> ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ КІЛЬКОСТІ ПОВІТРЯ ДЛЯ ПРОВІТРЮВАННЯ МЕХАНІЗОВАНИХ ЛАВ КРУТОГО ПАДІННЯ .....	27
<i>Кулакова С. І., Павлов В. І.</i> СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ МЕТАНОВИДІЛЕННЯ ПРИ ПІДВИЩЕННІ НАВАНТАЖЕННЯ НА ОЧИСНИЙ ВИБІЙ .....	35
<i>Кладко В. І.</i> АНАЛІЗ УМОВ СПОРУДЖЕННЯ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК НА ШАХТІ «САМСОНІВСЬКА-ЗАХІДНА» .....	42
<i>Малишева Н. М.</i> ВПЛИВ ЧАСУ ВСТУПУ В РОБОТУ ОХОРОННОЇ СПОРУДИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПІДТРИМАННЯ ВИРОБКИ В УМОВАХ ШАХТИ «РАССВЕТ-1» .....	50

**МЕТАЛУРГІЯ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

<i>Куберський С. В.</i> РЕАЛІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЇ СТВОРЕННЯ МІКРО- І МІНІ-ЗАВОДІВ В УМОВАХ МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ РОСІЇ .....	61
<i>Куберський С. В., Коваленко О. О., Мурга О. В., Мурга С. В.</i> ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛАЗЕРНОГО ЗМІЩЕННЯ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ВИРОБІВ ЗІ СТАЛІ ТА СПЛАВІВ .....	71
<i>Денищенко П. Н., Макаганюк О. С.</i> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕРПОПОДІБНОСТІ РОЗКАТУ ПРИ ТОВСТОЛИСТОВІЙ ПРОКАТЦІ З УРАХУВАННЯМ РОЗШИРЕННЯ .....	77

**БУДІВНИЦТВО ТА АРХІТЕКТУРА**

<i>Карапетян С. Х., Псюк В. В.</i> ДО ПОБУДОВИ ДІАГРАМ ДЕФОРМУВАННЯ БЕТОНУ З ДОСЛІДУ НА ПОЗАЦЕНТРОВЕ СТИСНЕННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ СТОЯКІВ ПРИ ОДНОРАЗОВИХ ТА ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ .....	87
<i>Усенко В. М.</i> ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕХРЕСНО-БАЛКОВИХ СИСТЕМ ПОКРИТТІВ З ГНУЧКИМИ ЗАТЯЖКАМИ У КІЛЬКОХ РІВНЯХ .....	93

**МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАШИНОЗНАВСТВО**

<i>Корнєєв С. В., Доброногова В. Ю., Долгих В. П., Захаров О. В.</i> МОДЕЛЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ANSYS WORKBENCH НАПРУЖЕНО- ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ГУМОВОТКАНИННОЇ КОНВЕЄРНОЇ СТРІЧКИ З МЕХАНІЧНИМ СТИКОМ ПРИ ЗГИНАННІ НА ОБВІДНИХ БАРАБАНАХ .....	101
--	-----

<i>Костенко А. В., Михайлов О. М., Матвієнко С. А., Лукічов О. В.</i> СТРУКТУРА ЗАСОБІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ФУНКЦІОНАЛЬНО ОРІЄНТОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ .....	110
<i>Мороз В. В., Рубежанський В. І., Левченко Е. П., Зинченко А. М.</i> ВПЛИВ КОЕФІЦІЄНТА ТЕРТЯ НА ЗАКОН РУХУ ШМАТКА АГЛОМЕРАТУ В ОДНОВАЛКОВІЙ ЗУБЧАСТІЙ ДРОБАРЦІ .....	117
<i>Власенко Д. О.</i> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАХОПЛЕННЯ МАТЕРІАЛУ РИФЛЕНИМИ ВАЛКАМИ ВАЛКОВОЇ ДРОБАРКИ .....	122



**CONTENT****GEOSCIENCES**

<i>Litvinsky G. G.</i> PASSPORT OF THE STABILITY OF MINE WORKING: STATICS AND KINETICS .....	5
<i>Zubkov V. E., Kiziyarov O. L., Levchenko E. P., Psiuk V. V.</i> PHYSICAL BASIS OF MINERAL DRESSING IN A BLOCKED FLUIDIZED BED .....	18
<i>Naumenko V. G.</i> REGULATION OF ELECTROKINETIC PROPERTIES OF COAL-WATER SLURRY IN TREATMENT PROCESSES .....	22
<i>Popovskiy V. N., Cheban V. G.</i> IMPROVING THE METHOD FOR CALCULATING THE AMOUNT OF AIR TO VENTILATE MECHANIZED STEEP-DROP LONGWALL .....	27
<i>Kulakova S. I., Pavlov V. I.</i> SPECTRAL ANALYSIS OF THE METHANE RELEASE PROCESS WHEN THE LOAD ON THE BREAKAGE FACE INCREASE .....	35
<i>Kladko V. I.</i> ANALYSIS OF CONDITIONS FOR THE CONSTRUCTION OF MINE WORKING AT THE "SAMSONOVSKAYA-ZAPADNAYA" MINE .....	42
<i>Malysheva N. N.</i> INFLUENCE OF TIME OF PILLAR ENTRY INTO SERVICE ON THE EFFICIENCY MAINTENANCE OF WORKING IN MINE "RASSVET-1" .....	50

**METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES**

<i>Kuberskiy S. V.</i> IMPLEMENTATION OF THE STRATEGY FOR CREATING MICRO- AND MINI-PLANTS IN CONDITIONS OF METALLURGICAL COMPLEX OF RUSSIA .....	61
<i>Kuberskiy S. V., Kovalenko O. A., Murga E. V., Murga S. V.</i> INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF LASER HARDENING ON WEAR RESISTANCE OF STEEL AND ALLOY PRODUCTS .....	71
<i>Denishchenko P. N., Makaganiuk A. S.</i> MATHEMATICAL MODELING OF THE HOT-ROLLED BREAKDOWN CAMBER DURING THICK-SHEET ROLLING TAKING INTO ACCOUNT THE BROADENING .....	77

**CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE**

<i>Karapetyan S. Kh., Psiuk V. V.</i> TO CONSTRUCT DIAGRAMS OF CONCRETE DEFORMATION FROM THE EXPERIENCE OF THE OFF-CENTER COMPRESSION OF REINFORCED CONCRETE PROPS UNDER SINGLE AND REPEATED LOADS .....	87
<i>Usenko V. N.</i> NUMERICAL INVESTIGATION AND DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF CROSS-BEAM COATING SYSTEMS WITH FLEXIBLE TIE-BARS AT SEVERAL LEVELS .....	93

**MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE**

<i>Korneev S. V., Dobronogova V. Yu., Dolgikh V. P., Zakharov O. V.</i> ANSYS WORKBENCH MODELING OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A FABRIC-PLY BELT WITH A MECHANICAL JOINT UNDER BENDING ON RETURN PULLEYS .....	101
<i>Kostenko A. V., Mikhailov A. N., Matvienko S. A., Lukichev A. V.</i> STRUCTURE OF TECHNOLOGICAL SUPPORT TOOLS IN FUNCTIONAL-ORIENTED TECHNOLOGIES .....	110

<i>Moroz V. V., Rubezhanskiy V. I., Levchenko E. P., Zinchenko A. M.</i> EFFECT OF FRICTION COEFFICIENT ON THE LAW OF MOTION OF A PIECE OF SINTER IN A SINGLE-ROLL CRUSHER .....	117
<i>Vlasenko D. A.</i> MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF MATERIAL CAPTURE BY FLUTED ROLLS OF A ROLL CRUSHER .....	122

## СОДЕРЖАНИЕ СБОРНИКА НАУЧНЫХ ТРУДОВ ДонГТУ ЗА 2019 г.

Раздел, название, автор	Номер	Стр.
<b>НАУКИ О ЗЕМЛЕ</b>		
<i>Бабиюк Г. В., Доценко О. Г.</i> Шахтные исследования структурно-механических особенностей массива обрушенных пород	14 (57)	12
<i>Денисенко В. П., Безбородов В. А.</i> Зональность выделения шахтных газов на поверхность горных отводов закрытых угольных шахт	17 (60)	24
<i>Касьян Н. Н., Петренко Ю. А., Касьяненко А. Л.</i> Исследование влияния прочного слоя в составе пород почвы выработки на её устойчивость	14 (57)	5
<i>Кизияров О. Л., Заев В. В., Бизянов Е. Е.</i> Геомеханическое обоснование параметров скважинной разгрузки подготовительных выработок глубоких шахт	17 (60)	32
<i>Ларченко В. Г., Коваленко Е. В., Маталкина Ю. А.</i> Совершенствование методики расчёта ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности при добыче угля	15 (58)	20
<i>Леонов А. А.</i> Лабораторные исследования параметров распорно-податливой крепи	16 (59)	5
<i>Леонов А. А.</i> Лабораторные исследования узлов податливости рамной крепи из спецпрофиля	14 (57)	19
<i>Литвинский Г. Г.</i> Горная крепь: эволюция развития и критерии технической эффективности	15 (58)	5
<i>Литвинский Г. Г.</i> Развитие единой теории прочности и закономерности разрушения	13 (56)	5
<i>Литвинский Г. Г.</i> Шахтная трубобетонная стойка (СТБ)	17 (60)	5
<i>Маталкина Ю. А.</i> Исследование влияния степени подработанности на максимальные оседания земной поверхности	13 (56)	19
<i>Полозов Ю. А., Лазебник А. Ю.</i> Способ изоляции аварийных контрольно-стволовых скважин при сооружении вертикальных стволов на калийных месторождениях	17 (60)	17
<i>Сиидов В. Н., Гришко Н. В.</i> Усовершенствование методики определения степени уплотнения обрушенных пород	16 (59)	15
<i>Хоружая Н. В., Доценко О. Г.</i> Сравнение методики наблюдений за оседаниями земной поверхности с помощью традиционной и короткой наблюдательных станций	14 (57)	28
<b>МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ</b>		
<i>Бабанин А. Я., Пономаренко А. Г., Первухин Д. В.</i> Структурно-химическое состояние образующихся неметаллических включений в зависимости от последовательности присадки раскислителей	16 (59)	33
<i>Белов Б. Ф., Бабанин А. Я., Пономаренко А. Г., Абакумов И. А.</i> Классификация сплавов силикокальция и механизм рафинирования стали	17 (60)	63
<i>Еронько С. П., Ткачев М. Ю., Пономаренко А. Г.</i> Разработка конструкции и оценка технологических нагрузок новой системы выгрузки шахтной обжиговой печи	17 (60)	43
<i>Жижкина Н. А.</i> Совершенствование технологии термической обработки массивных валков	15 (58)	36
<i>Куберский С. В.</i> Актуальность создания микрозаводов в структуре металлургического комплекса Народных Республик Донбасса	17 (60)	52

Раздел, название, автор	Номер	Стр.
<i>Куберский С. В., Проценко М. Ю., Воронько М. И., Белан И. А.</i> Использование метода дугового глубинного восстановления для извлечения кремния из песка в железоуглеродистые расплавы	14 (57)	37
<i>Кухарев А. Л.</i> Численное исследование процессов теплопереноса в расплаве многоэлектродной дуговой печи при учёте электровихревых течений	13 (56)	40
<i>Мороз В. В., Рубежанский В. И., Левченко Э. П.</i> К вопросу многостадийной обработки материала в одновалковой зубчатой дробилке	15 (58)	43
<i>Русанов И. Ф., Куберский С. В., Лупанов Д. В.</i> Оценка условий спекания агломерата у бортов спекательных тележек конвейерных агломаши	13 (56)	49
<i>Русанов И. Ф., Куберский С. В., Лупанов Д. В., Кумпан В. Н.</i> Особенности спекания агломерата у стенок спекательных агрегатов при введении в слой металлического железа	14 (57)	46
<i>Русанов И. Ф., Русанова Н. И.</i> Влияние условий формирования откоса на сегрегацию материалов по крупности на его поверхности	13 (56)	27
<i>Рябичева Л. А., Коробко Т. Б., Бабич И. Н.</i> Влияние скорости деформации на напряжённо-деформированное состояние порошковых пористых заготовок при РКУ-прессовании	16 (59)	25
<i>Снитко С. А., Руденко Е. А., Пилипенко В. В.</i> Исследование технологических возможностей процесса редуцирования сляба по ширине в установке типа «триплет»	15 (58)	29
<i>Тюляев Д. В., Куберский С. В., Пономаренко А. Г., Тюляев А. В.</i> Анализ влияния добавок агломерата в конвертерную шихту на износ периклазоуглеродистой футеровки	16 (59)	39
<i>Тюляев Д. В., Куберский С. В., Проценко М. Ю.</i> Анализ физико-химических свойств и технологической ценности конвертерной пыли	13 (56)	34
<i>Филатов М. А., Левченко Э. П., Карпук И. А., Зубков В. Е., Кащеев А. В.</i> Электромагнитный способ измельчения материалов и его применение для пробоприготовления в агломерационном производстве	16 (59)	47
<b>СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА</b>		
<i>Бондарчук В. В., Глушкина И. К.</i> Актуальность реновации недействующих угольных шахт на примере Донбасского региона	15 (58)	51
<i>Будзило Е. Е., Горовая Н. А.</i> К вопросу качественного проведения отделочных работ (на примере обследования окраски металлических конструкций копра шахты им. С. Тютенина ГУП ЛНР «Углереструктуризация»	16 (59)	55
<i>Вишторский Е. М., Назарова А. В., Сороканич С. В.</i> Оптимизация рецептурно-технологических параметров пенобетона нормального твердения с использованием математического трёхфакторного планированного эксперимента	14 (57)	71
<i>Долголаптев В. М.</i> Прочностные характеристики растворов на основе доменных шлаков Алчевского металлургического комбината	17 (60)	81
<i>Дрозд Г. Я.</i> Шахтные воды как фактор риска техногенной катастрофы для Донбасса	13 (56)	57
<i>Дрозд Г. Я., Хвортова М. Ю.</i> К вопросу оценки технического состояния строительных объектов в условиях поражающих факторов	14 (57)	55
<i>Емец Е. В., Никишина И. А., Коняшкина О. А.</i> Исследование устойчивости грунтового массива, расположенного вблизи откосов	15 (58)	61

Раздел, название, автор	Номер	Стр.
<i>Мартынова В. Б., Парамонова А. В.</i> Влияние расхода модификатора на физико-механические свойства газобетона неавтоклавного твердения	13 (56)	73
<i>Николаева Е. К., Гречишкина Е. В.</i> Термомодернизация наружных стен лабораторного корпуса ДонГТУ	16 (59)	61
<i>Псюк В. В., Никишина И. А.</i> Усиление и правка стальных конструкций из труб квадратного сечения с применением сварки	17 (60)	73
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ</b>		
<i>Афошин А. А.</i> Влияние скорости на геометрические размеры изделий при 3D-печати по FDM-технологии	15 (58)	113
<i>Вишневский Д. А.</i> Влияние человеческого фактора на надёжность металлургического и машиностроительного оборудования	15 (58)	87
<i>Вишневский Д. А.</i> Исследование распределения несчастных случаев в кузнечно-прессовом производстве по видам полученных травм	13 (56)	111
<i>Власенко Д. А., Долгих В. П.</i> Моделирование ударного взаимодействия рабочих органов с дробимым материалом в молотковой дробилке	13 (56)	124
<i>Власенко Д. А., Левченко Э. П.</i> Математическое моделирование взаимодействия молотков с материалом в зоне колосниковой решётки молотковой дробилки	17 (60)	119
<i>Еронько С. П., Ткачев М. Ю., Ковалева О. А.</i> Разработка и экспериментальные исследования гидравлических летучих ножниц для резки тонкостенных труб	17 (60)	89
<i>Еронько С. П., Ткачёв М. Ю., Понамарёва Е. А., Сидоров В. А., Ошовская Е. В.</i> Оценка интенсивности поглощения упругих волн огнеупорами ковшового затвора в процессе вибрационного воздействия	16 (59)	69
<i>Жильцов А. П., Челядина А. Л.</i> Исследование нагрузочных параметров элементов привода моталок технологических агрегатов в условиях производства холоднокатаных полос	16 (59)	99
<i>Калюжный С. В., Мокрицкий М. И., Молочек А. В., Бабкин В. А.</i> Реконструкция электропривода механизма перемещения мостовых кранов Алчевского металлургического комбината	14 (57)	81
<i>Калюжный С. В., Харченко Д. А.</i> Оригинальная конструкция токопараметрического преобразователя для электроприводов мостового крана	14 (57)	88
<i>Карпук И. А., Юрьев С. А.</i> Применение радиального течения воздушного потока для охлаждения СВЧ-плазмотрона	15 (58)	94
<i>Корнеев С. В., Доброногова В. Ю., Долгих В. П.</i> Моделирование реальных нагрузок в шахтных ленточных конвейерах на основе уточнённого тягового расчёта	13 (56)	81
<i>Корнеев С. В., Доброногова В. Ю., Долгих В. П.</i> Обоснование скоростного режима шахтных ленточных конвейеров с применением специальной методики уточнённого тягового расчёта	15 (58)	71
<i>Кучма С. Н., Стародубов С. Ю.</i> Повышение технико-экономических показателей термомеханической обработки эливарных сплавов	16 (59)	92
<i>Павлиненко О. И., Власенко Д. А., Левченко Э. П.</i> Аналитические приёмы обоснования основных параметров процесса раскалывания стальной дроби стеснённым ударом	15 (58)	106
<i>Спичак Ю. Н., Пипкин Ю. В.</i> Оценка методов проектирования станочных приспособлений с позиции повышения точности и эффективности конструкций	13 (56)	100
<i>Спорняк В. Г., Левченко Э. П.</i> Направления перспективного использования двухступенчатого малогабаритного универсального измельчителя	17 (60)	113

Раздел, название, автор	Номер	Стр.
<i>Спорняк В. Г., Левченко Э. П., Левченко О. А., Карпук И. А.</i> Обоснование основных параметров вертикального режущего-ударного измельчителя	15 (58)	99
<i>Тумин А. Н., Ткачёв Р. Ю., Еронько С. П., Замота Т. Н.</i> Способ регулирования скорости вращения гидропривода центробежно-ударной дробильно-измельчительной машины	13 (56)	117
<i>Ульяницкий В. Н., Петров П. А., Орлов А. А.</i> Влияние состояния режущего инструмента ножниц на силовые параметры и качество реза проката	17 (60)	105
<i>Ульяницкий В. Н., Петров П. А., Ульяницкая О. В., Билан Г. А.</i> Анализ эффективности методов повышения стойкости и долговечности режущего инструмента ножниц прокатного производства	15 (58)	78
<i>Ульяницкий В. Н., Петров П. А., Ульяницкая О. В., Еронько С. П.</i> Оценка изношенных характеристик рабочих инструментов валково-тарельчатых мельниц для приготовления пылеугольного топлива	13 (56)	91
<i>Харитоненко А. А., Жильцов А. П.</i> Анализ и усовершенствование методов технического обслуживания и ремонтов оборудования в металлургическом производстве	17 (60)	98
<i>Чебан В. Г., Зубков В. Е., Шаповалов В. И.</i> Мембранный аппарат с клинообразными напорными каналами	16 (59)	85
<i>Шаповалов В. И., Чекалов А. Н., Лавренчук К. П., Стародубов С. Ю.</i> Дополнительное устройство для обработки поверхностей с РК-профилем в цикле работы токарно-револьверных автоматов	16 (59)	78

## THE CONTENTS OF THE COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS OF DonSTU IN 2019

Section, title, author	No.	P.
<b>GEOSCIENCES</b>		
<i>Babiyuk G. V., Dotsenko O. G.</i> Underground investigations of structural and mechanical features of the rock mass caving	14 (57)	12
<i>Denisenko V. P., Bezborodov V. A.</i> Zoning of colliery gas release to the surface of mine takes of the closed coal mines	17 (60)	24
<i>Kasyan N. N., Petrenko Yu. A., Kasyanenko A. L.</i> Research of the influence of a hard layer in floor rocks composition on its resistance	14 (57)	5
<i>Khoruzhaia N. V., Dotsenko O. G.</i> Comparison of the observing technique of the earth's crust subsidence using the traditional and short observation station	14 (57)	28
<i>Kiziyarov O. L., Zayev V. V., Bizianov E. E.</i> Geomechanical substantiation of the parameters of well relieving the preliminary development in deep mines	17 (60)	32
<i>Larchenko V. G., Kovalenko E. V., Matalkina Yu. A.</i> Improvement of design procedure of the expected shifts and earth crust deformations during coal mining	15 (58)	20
<i>Leonov A. A.</i> Laboratory researches of the parameters of spacer-pliable support	16 (59)	5
<i>Leonov A. A.</i> Laboratory studies of yielding joints of special profile frame support	14 (57)	19
<i>Litvinsky G. G.</i> Development of a unified theory of strength and patterns of destruction	13 (56)	5
<i>Litvinsky G. G.</i> Mine pipe-concrete strut (SPC)	17 (60)	5
<i>Litvinsky G. G.</i> Mine support: evolution of development and criteria of technical efficiency	15 (58)	5
<i>Matalkina Yu. A.</i> Study of influence of the degree of undermining on the maximum earth crust subsidence	13 (56)	19
<i>Polozov Yu. A., Lazebnik A. Yu.</i> Method of isolation the emergency pilot holes in the construction of vertical shafts in potash deposits	17 (60)	17
<i>Siidov V. N., Grishko N. V.</i> Improvement of the methodology for determining the degree of rock compaction	16 (59)	15
<b>METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES</b>		
<i>Babanin A. Ya., Ponomarenko A. G., Pervukhin D. V.</i> Structural and chemical state of the forming non-metallic inclusions depending on sequence of adding of deoxidizers	16 (59)	33
<i>Belov B. F., Babanin A. Ya., Ponomarenko A. G., Abakumov I. A.</i> Classification of silico-calcium alloys and mechanism of steel refining	17 (60)	63
<i>Eron'ko S. P., Tkachov M. Yu., Ponomarenko A. G.</i> Design engineering and assessment of process loads of the new unloading system of the roasting shaft furnace	17 (60)	43
<i>Filatov M. A., Levchenko E. P., Karpuk I. A., Zubkov V. E., Kashcheev A. V.</i> Electro-magnetic method of grinding materials and its using for sample preparation in sintering	16 (59)	47
<i>Kuberskiy S. V.</i> Actuality of building the micro-plants in the metallurgical complex of the People's Republics of Donbass	17 (60)	52
<i>Kuberskiy S. V., Protsenko M. Yu., Voron'ko M. I., Belan I. A.</i> Using the method of arc depth reduction to extract silicon from sand into iron-carbon melts	14 (57)	37
<i>Kukharev A. L.</i> Numerical study of heat transfer processes in the melt in a multi-electrode arc furnace considering eddy current flows	13 (56)	40
<i>Moroz V. V., Rubzhanskiy V. I., Levchenko E. P.</i> The question of multistage material processing in a single roll crusher	15 (58)	43

Section, title, author	No.	P.
<i>Rusanov I. F., Kuberskiy S. V., Lupanov D. V.</i> Assessment of the agglomerate sintering conditions at the side surface of pellet cars of the conveyor sintering machine	13 (56)	49
<i>Rusanov I. F., Kuberskiy S. V., Lupanov D. V., Kumpan V. N.</i> Features of sintering at the walls of sintering units while introducing into the layer of metallic iron	14 (57)	46
<i>Rusanov I. F., Rusanova N. I.</i> Influence of slope formation conditions on the segregation of materials by size over inclined surface	13 (56)	27
<i>Ryabicheva L. A., Korobko T. B., Babich I. N.</i> Effect of deformation rate on the stress-strain state of powder porous blanks during equal channel angular pressing (ECAP)	16 (59)	25
<i>Snitko S. A., Rudenko E. A., Pilipenko V. V.</i> Studying the technological possibilities of the slab width reduction process in the “triplet” type unit	15 (58)	29
<i>Tiuliaev D. V., Kuberskiy S. V., Ponomarenko A. G., Tiuliaev A. V.</i> Analyzing the influence of sinter additives to converter mixture on wear of the periclase-carbonaceous lining	16 (59)	39
<i>Tyulyaev D. V., Kuberskiy S. V., Protsenko M. Yu.</i> Analysis of physical and chemical properties and technological value of converter dust	13 (56)	34
<i>Zhyzhkina N. A.</i> Improvement of heat treatment technology of massive rolls	15 (58)	36
<b>CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE</b>		
<i>Bondarchuk V. V., Glushkina I. K.</i> Relevance of renovation of non-operating coal mines on the example of the Donbass region	15 (58)	51
<i>Budzilo E. E., Gorovaia N. A.</i> The question of qualitative finishing work (on the example of surveying the painting of metal structures of pithead drainage of mine named after S. Tyulenin SUE LPR “Uglerestrukturizatsia”)	16 (59)	55
<i>Dolgolaptev V. M.</i> Strength characteristics of solutions based on blast furnace slag of Alchevsk Iron-and-Steel Works	17 (60)	81
<i>Drozd G. Ya.</i> Mine water as a risk factor of technological disaster for the Donbass	13 (56)	57
<i>Drozd G. Ya., Khvorotova M. Yu.</i> Matter of assessment the technical state of construction sites under damage effects	14 (57)	55
<i>Emets E. V., Nikishina I. A., Koniashkina O. A.</i> Investigation of soil mass stability nearby slopes	15 (58)	61
<i>Martunova V. B., Paramonova A. V.</i> Influence of the flow modifier on physical and mechanical properties of aerated concrete of the non-autoclaved hardening	13 (56)	73
<i>Nikolaieva E. K., Grechishkina E. V.</i> Thermomodernization of the outer walls of the laboratory building of DonSTU	16 (59)	61
<i>Psiuk V. V., Nikishina I. A.</i> Strengthening and straightening of steel structures made of square tubes using welding	17 (60)	73
<i>Vishtorsky E. M., Nazarova A. V., Sorokanich S. V.</i> Optimization of prescription-technological parameters of the foam concrete of normal hardening with the use of mathematical three-factor planned experiment	14 (57)	71
<b>MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE</b>		
<i>Afoshin A. A.</i> Rate influence on geometric dimensions of product at 3D-printing on FDM-technology	15 (58)	113
<i>Cheban V. G., Zubkov V. E., Shapovalov V. I.</i> Membrane apparatus with wedge-shaped pressure channels	16 (59)	85
<i>Eron'ko S. P., Tkachov M. Yu., Kovaleva O. A.</i> Development and experimental researches of hydraulic flying shears for cutting thin-walled pipes	17 (60)	89



Section, title, author	No.	P.
<i>Eron'ko S. P., Tkachov M. Yu., Ponamaryova E. A., Sidorov V. A., Oshovskaya E. V.</i> Assessments for the intensity of absorption of elastic waves by ladle slide refractories during vibration impact	16 (59)	69
<i>Kaluzhniy S. V., Kharchenko D. A.</i> Original design of current-parametric converter for electrical drive of the overhead crane	14 (57)	88
<i>Kaluzhniy S. V., Mokritskiy M. I., Molochek A. V., Babkin B. A.</i> Reconstruction of the electrical drive of mechanism of the overhead travelling cranes of Alchevsk Iron-and-Steel Works	14 (57)	81
<i>Karpuk I. A., Yuryev S. A.</i> Using of radial airflow for microwave plasma torch cooling	15 (58)	94
<i>Kharitonenko A. A., Zhiltsov A. P.</i> Analyzing and improvement of methods of maintenance and repair of equipment in metallurgical production	17 (60)	98
<i>Korneev S. V., Dobronogova V. Yu., Dolgikh V. P.</i> Justification of the rate mode of mine belt conveyors using a special technique of refined traction calculation	15 (58)	71
<i>Korneiev S. V., Dobronogova V. Yu., Dolgikh V. P.</i> Modeling of the actual loading in the mine belt conveyors basing on the refined traction calculation	13 (56)	81
<i>Kuchma S. N., Starodubov S. Yu.</i> Increasing of technical and economic indicators of thermomechanical treatment of elinvar alloys	16 (59)	92
<i>Pavlinenko O. I., Vlasenko D. A., Levchenko E. P.</i> Analytical techniques of substantiation of the main process variables of steel shot cleaving by constrained stroke	15 (58)	106
<i>Shapovalov V. I., Chekalov A. N., Lavrenchuk K. P., Starodubov S. Yu.</i> Add-on device for surface treatment with ec-profile in the cycle of automatic turret lathes	16 (59)	78
<i>Spichak Yu. N., Pipkin Yu. V.</i> Assessing the design methods of the workholding tools to improve the accuracy and efficiency of the designs	13 (56)	100
<i>Sporniak V. G., Levchenko E. P.</i> Directions of perspective use of two-stage small-sized universal crusher	17 (60)	113
<i>Sporniak V. G., Levchenko E. P., Levchenko O. A., Karpuk I. A.</i> Substantiation of the main parameters of the vertical cutting and impact crusher	15 (58)	99
<i>Tumin A. N., Tkachyov R. Yu., Eron'ko S. P., Zamota T. N.</i> Method of adjusting the rotational speed of the hydraulic centrifugal impact crusher	13 (56)	117
<i>Ul'yanitskiy V. N., Petrov P. A., Orlov A. A.</i> Influence of state of shear cutting tool on the power settings and quality of roll stock cutting	17 (60)	105
<i>Ul'yanitskiy V. N., Petrov P. A., Ul'yanitskaia O. V., Bilan G. A.</i> Analyzing the efficiency of methods to enhance the resistance and durability of the rolling shear cutting tool	15 (58)	78
<i>Ul'yanitskiy V. N., Petrov P. A., Ul'yanitskaia O. V., Eron'ko S. P.</i> Assessment of wear characteristics of operating tools of the roller-plate mills for the pulverized coal fuel preparation	13 (56)	91
<i>Vishnevskiy D. A.</i> Influence of human factor on reliability of the metallurgical and mechanical-engineering equipment	15 (58)	87
<i>Vishnevskiy D. A.</i> Investigation the accidents distribution in the press-forging production by types of injuries	13 (56)	111
<i>Vlasenko D. A., Dolgikh V. P.</i> Modeling of impact interaction between the operating elements and crushing material in hammer crusher	13 (56)	124
<i>Vlasenko D. A., Levchenko E. P.</i> Mathematical modeling of interaction of hammers with material in the area of fire grate of hammer crusher	70 (60)	119
<i>Zhiltsov A. P., Cheliadina A. L.</i> Studying the load parameters of the drive elements of recoilers of technological units under the conditions of cold-rolled strips production	16 (59)	99

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

**Збірник наукових праць  
Донбаського державного  
технічного університету**

**Збірник**

Випуск 18 (61) 2020

**Засновник:**  
**Донбаський державний технічний  
університет**

*Свідоцтво Міністерства інформації,  
друку і масових комунікацій ЛНУ  
про державну реєстрацію засобу масової  
інформації МІ-СГР ПП 000003  
від 05.02.2016*

*Наказом Міністерства освіти і науки Донецької  
Народної Республіки від 2 травня 2017 р. № 464  
збірник наукових праць включений до Переліку  
рецензованих наукових видань, в яких повинні  
бути опубліковані основні наукові результати  
дисертацій на здобуття наукового ступеня  
кандидата наук, на здобуття наукового ступеня  
доктора наук, затвердженого наказом  
Міністерства освіти і науки Донецької Народної  
Республіки від 1 листопада 2016 р. № 1134, згідно  
з додатком 1*

*Наказом МОН ЛНУ № 911-ОД від 10.10.2018  
збірник наукових праць ДонДТУ внесений до  
Переліку рецензованих наукових видань, в яких  
повинні бути опубліковані основні наукові  
результати дисертацій на здобуття наукового  
ступеня кандидата наук, на здобуття наукового  
ступеня доктора наук, затверджений наказом  
Міністерства освіти і науки Луганської Народної  
Республіки від 15 травня 2018 р. № 477-ОД*

*Рекомендовано вченою радою  
ДООЗ ВПО ЛНУ «ДонДТУ»  
(Протокол № 8 від 27.03.2020)*

*Включений до наукометричної бази даних РІНЦ*

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>  
Ум. друк. арк. 18,5  
Зам. № 120  
Наклад 100 пр.

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

Адреса редакції, видавця  
та виготовлювача:  
ДООЗ ВПО ЛНУ  
«Донбаський державний технічний університет»  
пр. Леніна, 16, м. Алчевськ, ЛНУ, 94204.  
E-mail: [info@dstu.edu](mailto:info@dstu.edu)  
Web-site: <http://www.dstu.edu>

ВИДАВНИЧО-ПОЛІГРАФІЧНИЙ ЦЕНТР,  
ауд. 2113, т./факс 2-58-59

Свідоцтво про державну реєстрацію видавця,  
виготовлювача

і розповсюджувача засобу масової інформації  
МІ-СГР ВД 000055 від 05.02.2016

**Головний редактор**

Зінченко А. М. — к.е.н., ректор

**Заступник головного редактора**

Куберський С. В. — к.т.н., проф.

**Редакційна колегія:**

Литвинський Г. Г. — д.т.н., проф.

Фінкельштейн З. Л. — д.т.н., проф.

Корнєєв С. В. — д.т.н., проф.

Леонов А. О. — к.т.н., доц.

Харламов Ю. А. — д.т.н., проф.

Ульяницький В. Н. — к.т.н., проф.

Зелінський А. М. — к.т.н., проф.

Должиков В. В. — к.т.н., доц.

Денищенко П. М. — к.т.н., доц.

Андрійчук М. Д. — д.т.н., проф.

Пілагов М. В. — д.т.н., проф.

Шолух М. В. — д. арх., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомська С. А. — секретар редакційної колегії

Для наукових співробітників, аспірантів,  
студентів вищих навчальних закладів.

**Мова видання:**

російська, українська та англійська

Комп'ютерна верстка і коректура  
*Ісмаїлова Л. М.*

© ДООЗ ВПО ЛНУ «ДонДТУ», 2020

© Чернишова Н. В., художнє  
оформлення обкладинки, 2020

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

**Collection of scientific papers  
of Donbass State Technical University**

**Collection**

Issue 18 (61) 2020

**Establisher:  
Donbass State Technical University**

*Certificate of the Ministry of Information,  
Press and Mass Communication of the LPR  
for mass media registration  
MI-SGR PI 000003  
dated 05.02.2016*

*By order of the Department of Education and Science  
of the Donetsk People's Republic of 2 May 2017  
№ 464 the Collection of scientific papers is being  
offered in the list of peer-reviewed scientific editions  
with required publications of the main scientific PhD  
and Doctor's thesis results, approved by an order of  
the Department of Education and Science of  
the Donetsk People's Republic of 1 November 2016  
№ 1134, according to annex 1*

*By order of the Department of Education and Science  
of the Lugansk People's Republic № 911-OD  
of 10.10.2018 the Collection of scientific papers of  
DonSTU is being offered in the list of peer-reviewed  
scientific editions with required publications of the  
main scientific PhD and Doctor's thesis results,  
approved by an order of the Department of Education  
and Science of the Lugansk People's Republic  
of 15 May 2018 № 477-OD*

*Recommended by academic council  
of SEI HPE "DonSTU"  
(Record № 8 dated 27.03.2020)*

*Added to scientometrical database of RSCI*

Format 60×84½  
Conventional printed sheet 18,5  
Order № 120  
Circulation 100 copies  
Publishing office is not responsible for material  
content giving by author for publishing  
Address of editorial office, publishing and  
establishing: Donbass State Technical University  
Lenin avenue, 16, Alchevsk, LPR  
94204  
e-mail: [info@dstu.education](mailto:info@dstu.education)  
web-site: <http://www.dstu.education>

**PUBLISHING AND PRINTING  
CENTER**  
room 2113, tel/fax 2-58-59  
Certificate of State registration for mass media  
publisher, owner and distributor  
MI-SGR ID 0000055 dated 05.02.2016

**Editor-in-chief**

Zinchenko A. M. — PhD in Economics, Rector

**Deputy Editor-in-chief**

Kuberskyi S. V. — PhD in Engineering, Prof.

**Editorial board:**

Litvinskiy G. G. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Finkelstein Z. L. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Korneev S. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Leonov A. A. — PhD in Engineering, Asst. Prof.

Kharlamov Yu. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Ul'ianitskiy V. N. — PhD in Engineering, Prof.

Zelinskiy A. N. — PhD in Engineering, Prof.

Dolzhikov V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.

Denischenko P. N. — PhD in Engineering, Asst. Prof.

Andriychuk N. D. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Pilavov M. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.

Sholukh N. V. — Doctor of Arch., Prof.

Bondarchuk V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.

Psiuk V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.

Skomskaya S. A. — secretary to the editorial board

For research scientists, PhD seekers, students of  
higher educational institutions.

**Issue language:**

Russian, Ukrainian, English

Computer layout and proofreading

*Ismailova L. M.*

© SEI HPE "DonSTU", 2020

© Chernyshova N. V., graphic cover  
design, 2020