

ДОНБАССКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

*Выпуск 13 (56) 2019*



**Сборник  
научных трудов  
Донбасского государственного технического  
университета**

Сборник  
Выходит 1–4 раза в год  
Основан в июне 1999 г.  
Выпуск 13 (56) 2019

**Збірник наукових праць  
Донбаського державного технічного університету**

Збірник  
Виходить 1–4 рази на рік  
Заснований у червні 1999 р.  
Випуск 13 (56) 2019

**Collection of Scientific Papers of DonSTU**

Collection  
Publishing 1–4 times a year  
Founded in June 1999  
Issue 13 (56) 2019

Алчевск  
2019

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 13 (56) 2019

**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 29.03.2019)*

*Включён в наукометрическую базу данных РИНЦ*

Формат 60×84%.

Усл. печат. л. 17.

Заказ № 130.

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](mailto: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., и.о. ректора

**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.

Дрозд Г. Я. — д.т.н., проф.

Шолух Н. В. — д. арх., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомская С. А. — секретарь редакционной  
коллегии.

Для научных сотрудников, аспирантов,  
студентов высших учебных заведений.

**Язык издания:**

русский, украинский и английский

Компьютерная вёрстка и корректура  
*Исмаилова Л. М.*

© ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019

© Чернышова Н. В., художественное  
оформление обложки, 2019

**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

---

---

**НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ**

---

---

**GEOSCIENCES**



УДК 622.243.2

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

## РАЗВИТИЕ ЕДИНОЙ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ

*Дан краткий анализ существующих теорий прочности. На основе идеи проф. Н. Н. Давиденкова и проф. Я. Б. Фридмана путём сопряжения линейного паспорта прочности для разрывов (пинч-эффект) и нелинейного паспорта аналитической теории прочности при разрушении сдвигом развита единая теория прочности. Изучены особенности разрушения материалов при изменении вида напряжённо-деформированного состояния (НДС). Впервые предложено описание прочности нового класса материалов, обладающих биупругостью. Дан перечень явлений и процессов в геомеханике и горном деле, где проявляется пинч-эффект. Результаты исследований развивают теоретические основы прочности и разрушения деформируемого твёрдого тела.*

**Ключевые слова:** теория прочности, пинч-эффект, разрушение отрывом, разрушение сдвигом, паспорт прочности, геомеханика, горная порода, упругие постоянные, биупругость, параметр Надаи – Лодэ, схема Кармана, схема Беккера.

### 1 Актуальность и цель исследований

Проблема изучения закономерностей разрушения различных материалов и построения соответствующей теории прочности с давних пор привлекала внимание многих исследователей и учёных. Ей посвятили свои труды многие выдающиеся деятели науки: Галилео Галилей, Э. Мариотт, Ж. Понселе, Б. Сен-Венан и другие начиная с эпохи Возрождения и до наших дней [1].

Однако эту проблему всё ещё нельзя считать полностью решённой, и она требует интенсивного продолжения исследований, направленных на её углубление и обобщение. В частности, следует расширить существующий уровень знаний о закономерностях разрушения не только пластичных материалов (таких как металлы), но и материалов с хрупким поведением (типа горных пород, керамики и др.).

Известные гипотезы и теории прочности до сих пор нуждаются в системном анализе, сопоставлении с накопленными экспериментальными данными и определённом переосмыслении для развития наших представлений о сложных процессах разрушения различных материалов, в первую очередь тех из них, которым присущи не только пластичные, но и хрупкие свойства.

Следовательно, разработка теоретических основ расчёта условий разрушения различных материалов всё ещё остаётся актуальной проблемой для механики твёрдого деформируемого тела.

**Целью** исследования является создание единой (обобщённой) теории прочности на основе изучения закономерностей разрушения материалов (горных пород, материалов природного и искусственного происхождения) при различных видах напряжённо-деформированного состояния (НДС).

**Идея** работы состоит в учёте влияния на разрушение материалов проявлений пинч-эффекта, т. е. возникновения деформаций растяжения, и определении условий разрушения от трещин отрыва и сдвига на диаграмме О. Мора.

**Объектом** исследования являются прочностные показатели материалов при сложном НДС, **предмет** исследований — закономерности возникновения разрушения от разрывов (пинч-эффекта) при нагружении хрупких и пластичных материалов.

Исходя из этого, **задачами** исследования являются:

1) краткий анализ существующих теорий прочности и представлений о механизмах разрушения;

2) разработка математической модели разрушения с учётом влияния пинч-эффекта;

3) изучение закономерностей разрушения с учётом разнообразных механизмов зарождения и развития трещин сдвига и отрыва;

4) построение единой (обобщённой) теории прочности в виде паспорта прочности материала на диаграмме О. Мора;

5) изучение возможных практических приложений полученных результатов, рассмотрение прикладных задач горной геомеханики.

В настоящее время для объяснения разрушения материалов при действии внешних нагрузок были предложены различные теории прочности, в которых процессы разрушения объяснялись возникновением разрывных и сдвиговых трещин. Ещё Галилео Галилей к концу своей жизни (1642 г.) заложил основы теорий прочности. Далее, по мере накопления экспериментальных данных и развития техники, были предложены разные варианты теорий прочности. Рассмотрим их основные положения.

## 2 Краткий анализ теорий прочности

Развитию теорий прочности посвящены работы Сен-Венана, Мариотта, Ляме, Клебша, Баушингера, Бельтрами, Мизеса, Генки и других выдающихся механиков [1, 2]. Их идеи развивались, обобщались, экспериментально проверялись и были представлены в виде теорий прочности, которые впоследствии называли классическими.

Наиболее известны 4 классические теории прочности. Первая и вторая из них объясняют разрушение от трещин растяжения, а третья и четвертая — от трещин сдвига.

Для условий появления в теле разрывов были предложены две схожих гипотезы: наибольших **нормальных напряжений** (первая теория прочности) и наибольших линейных **деформаций** (вторая теория прочности).

Согласно **первой теории**, условия прочности выражены уравнениями (считая сжатие положительным):

при растяжении

$$\sigma_3 \geq -[\sigma_p]; \quad (1)$$

при сжатии

$$\sigma_1 \leq [\sigma_c], \quad (2)$$

где  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$  — максимальное и минимальное главные нормальные напряжения, действующие в рассматриваемой точке;

$[\sigma_p]$  и  $[\sigma_c]$  — допускаемые нормальные напряжения соответственно при одноосном растяжении ( $\sigma_3 \leq 0 = \sigma_2 = \sigma_1$ ) и сжатии ( $\sigma_1 \geq 0 = \sigma_2 = \sigma_3$ ).

Первую теорию прочности связывают с именем Галилея, предложившего исходную идею в середине XVII в., затем она была обоснована Ламе (1830 г.) и разработана Рэнкином (1888 г.). Эксперименты показали, что она даёт приемлемые результаты лишь при одноосном растяжении или сжатии материалов, но не подтверждается при объёмном их нагружении ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ ).

**Вторая** гипотеза прочности впервые была выдвинута Э. Мариоттом (1682 г.), применялась Ж. Понселе, впоследствии развита Б. Сен-Венаном в XIX в. и достаточно хорошо описывала разрушение материалов при прямом растяжении.

Согласно этой теории прочности, опасное состояние материала наступает тогда, когда наибольшее относительное удлинение ( $\varepsilon_1$  или  $\varepsilon_3$ ) достигает предельного значения  $[\varepsilon_c]$  или  $[\varepsilon_p]$ :

$$\begin{aligned} [\varepsilon_p] &= [\sigma_p] / E \geq |\varepsilon_3|; \\ [\varepsilon_c] &= [\sigma_c] / E \geq |\varepsilon_1|, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $[\varepsilon_p]$  — предельно допустимое относительное удлинение;  $[\sigma_p]$  — предел прочности материала на одноосное растяжение;  $E$  — модуль продольной упругости материала.

Если воспользоваться обобщённым законом Гука, уравнения прочности (3) мож-

но записать более удобно для использования при объёмных растяжении и сжатии:

$$\begin{aligned} [\sigma_p] &\geq |\sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2)|; \\ [\sigma_c] &\geq |\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3)|. \end{aligned} \quad (4)$$

Попытки применения второй теории прочности при сложном нагружении, т. е. при разном объёмном состоянии материала ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ ), были малоуспешны. Особенно разительные расхождения предсказаний этой теории с экспериментальными данными наблюдались при попытках её распространения для объёмного сжатия материалов. Поэтому со свойственной тому времени категоричностью, которая имела место из-за недостаточной изученности феномена разрушения, от второй теории прочности отказались и перестали применять в расчётной практике в начале прошлого века.

В настоящее время становится понятным, что вторую теорию прочности отвергли из-за попыток распространить её на сдвиговые механизмы разрушения материалов, где она неприменима. В то же время она вполне пригодна для описания разрушения материалов от растягивающих напряжений.

На смену первым двум теориям прочности пришли более сложные.

**Третья теория** прочности (наибольших касательных напряжений) была предложена французским физиком Кулоном в 1773 г. и подтверждена опытами Треска, Геста и других учёных и имеет вид

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq 2[\tau] = [\sigma_p] = [\sigma_c]. \quad (5)$$

**Четвёртая теория** (наибольшей удельной потенциальной энергии формоизменения) была разработана в 1904 г. Губером, в 1913 г. Мизесом и в 1924 г. Генки. Теория записывается уравнением

$$[\sigma] \geq 2^{-0,5} \sqrt{\sum_{i,j} (\sigma_i - \sigma_j)^2}, \quad (i, j = 1, 2, 3). \quad (6)$$

Эти теории прочности дают условия начала разрушения металлов и материалов с

пластическим поведением в предельной стадии, т. е. когда их угол внутреннего трения  $\rho$  весьма мал:

$$\rho = d\sigma_n / d\tau_{nt} \approx 0, \quad (7)$$

где  $\sigma_n$ ,  $\tau_{nt}$  — соответственно нормальное и касательное напряжения на площадке предельного сдвига с нормалью  $n$ .

Для материалов с хрупким поведением при разрушении, у которых угол внутреннего трения  $\rho > 0$ , эти теории оказались малоприменимыми.

**Пятая теория** прочности предельных напряжённых состояний предложена О. Мором (1900 г.) по аналогии с законом трения скольжения Кулона [3]. Согласно ей, разрушение наступает в зависимости от вида напряжённого состояния в данной точке, когда на некоторой площадке с нормалью  $n$  выполняется критическое соотношение между нормальным и касательным напряжениями  $\sigma_n$ ,  $\tau_{nt}$ :

$$\tau_{nt} \geq f(\sigma_n). \quad (8)$$

Теория О. Мора позволила вполне удовлетворительно описать разрушение материалов с помощью предельной огибающей наибольших кругов напряжений диаграммы Мора [1, 3]. Уравнение (8), по сути, является записью этой предельной кривой, которую часто называют паспортом прочности материала.

Вся проблема состояла в том, что осталось неизвестным, как теоретически доказать вид функции (8). Отсюда появилось множество гипотез и теорий, предлагающих разные виды записи условия разрушения (8) с использованием «уточняющих» предположений и основанных на всё более сложных алгебраических преобразованиях, обзор которых приведён в [1, 2].

Наконец, с появлением **аналитической теории прочности** [4] эта проблема была решена. Из рассмотрения физических процессов зарождения и роста сдвиговых трещин при нагружении получено семейство дифференциальных (а не алгебраиче-

ских) уравнений, и была теоретически доказана порождающая формула разрушения материала, т. е. формула паспорта прочности, в простейшем случае имеющей вид

$$\tau_{nt} \geq \tau_0 \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_0} + 1 \right)^\alpha, \quad (9)$$

где  $\alpha$ ,  $\sigma_0$ ,  $\tau_0$  — соответственно параметр хрупкости, когезия разрыва и когезия сдвига — постоянные материала, определяемые экспериментально.

Однако все теории прочности, основанные на идее О. Мора (8) оказались несостоятельными для описания процессов разрушения, связанных с так называемым пинч-эффектом.

### 3 Феномен пинч-эффекта при сжатии материалов

Явление разрушения при сжатии от появившихся трещин раскола при отсутствии растягивающих напряжений на площадке разрушения впервые обнаружил лауреат нобелевской премии Р. У. Бриджмен. Он описал ряд явлений, характерных для разрушения твёрдых тел при больших давлениях [5]. Одно из этих явлений, названное им пинч-эффектом, состоит в следующем. Сплошной цилиндр подвергали давлению, действующему только на наружную цилиндрическую поверхность; торцы же оставляли ненагруженными. Когда давление достигало некоторого предела, цилиндр обычно раскалывался перпендикулярно своей образующей на диски. Возникновение раскола было подобным разрушению каменных материалов при одноосном сжатии.

Явление откола при нагружении материала в условиях  $\sigma_3 \geq 0$  назовём феноменом **пинч-эффекта**.

Рассмотрим эти особенности разрушения породы. Для этого используем в качестве примера типичные результаты испытаний на одноосное сжатие стандартного образца сильвинита в лабораторных условиях под прессом [6]. Здесь мы сталкиваемся с особым типом разрушения, в котором при от-

сутствии растягивающих напряжений возникает продольный раскол образца породы под действием трещин разрыва (рис. 1).

Как следует из результатов испытаний, горные породы при одноосном сжатии начинают разрушаться путём появления и роста трещин откола, параллельных направлению приложения сжимающей нагрузки. Эти трещины буквально пронизывают тело образца, после чего образовавшиеся вертикальные отдельные столбцы, пластины и пр.) начинают руинным образом откалываться за счёт потери продольной устойчивости. Материал как бы вспучивается в поперечном направлении и на последних стадиях нагружения представляет собой сложную конструкцию вертикально ориентированных обломков.

Огромный накопленный экспериментальный материал при испытаниях на одноосное сжатие природных и искусственных материалов, а также поведение крупных каменных и бетонных конструкций при сжатии убедительно свидетельствует, что их разрушение происходит за счёт образования продольных трещин растяжения. На рисунке 2 представлена бетонная колонна, в ней отчётливо видны явно выраженные вертикальные трещины раскола различного раскрытия.

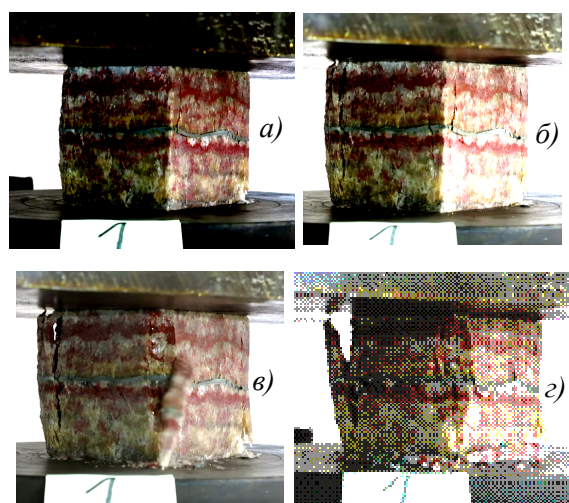


Рисунок 1 Последовательные этапы (а, б, в, г) разрушения образца сильвинита продольными трещинами разрыва при одноосном сжатии



Рисунок 2 Разрушение сжатой бетонной колонны продольными трещинами раскола

Нетрудно заметить подобие такого разрушения, вызванного пинч-эффектом: и здесь и там материал при сжатии раскалывается трещинами растяжения.

Эта особенность разрушения расколом вступает в противоречие с существующими представлениями о разрушении при сжатии, согласно которым главную роль должны играть деформации сдвига, как это наблюдается при сжатии металлов. Появление трещин растяжения при отсутствии растягивающих напряжений (и особенно при наличии сжимающих боковых напряжений, когда  $\sigma_3 \geq 0$ ) оставалось необъяснимым с позиций существующих третьей и четвертой теорий прочности.

Возникла проблема описания разрушения с учётом двух принципиально различных механизмов разрушения — разрыва и сдвига.

В простых случаях нагружения, например одноосных, показатели прочности определялись сравнительно легко. Однако при сложном напряжённом состоянии ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \neq 0$ ) всё значительно усложняется.

#### 4 Развитие единой теории прочности для биупругих материалов

Идея единой теории прочности была высказана в 1936 г. профессором Н. Н. Давиденковым и в дальнейшем развита профессором Я. Б. Фридманом [7, 8]. Она заключалась в объединении второй и третьей теории, чтобы описывать разрушение металлов при любом напряжённом состоянии как путём отрыва, так и сдвига.

Их исследованиями было показано, что существующие теории прочности нуждаются в дополнении, поскольку необходимо делать проверку на прочность материала при его разрушении по двум конкурирующим механизмам: либо от деформаций растяжения, ответственных за возникновение разрывов, либо от предельных деформаций сдвигов, вызывающих сдвиговые разрушения.

Чтобы произошло разрушение по любому из возможных механизмов (разрывом или сдвигом), необходимо выполнение первого или второго условия:

$$\begin{aligned} \nu(\sigma_1 + \sigma_2) - \sigma_3 &\geq [\sigma_p]; \\ (\sigma_1 - \sigma_3) &\geq [\sigma_c]. \end{aligned} \quad (10)$$

Я. Б. Фридман ввёл для твёрдого тела два прочностных параметра: сопротивление отрыву  $[\sigma_p]$  и сопротивление срезу  $[\tau]$ , а напряжённое состояние предложил описывать отношением касательного и нормального напряжений. Теория указывала на разный характер разрушения и условие перехода от пластичного разрушения к хрупкому при изменении схемы нагружения. Однако теория оказалась не вполне практичной, поскольку она являлась аддитивным объединением двух предыдущих теорий прочности, когда для проверки условий прочности вместо одного следует использовать два неравенства.

Предложенный критерий в виде отношения касательного и нормального напряжений на площадке разрушения не получил должного теоретического и экспериментального подтверждения и носит не-

сколько искусственный характер. Тем более спорным является не вполне обоснованное предложение применять в качестве критерия вида разрушения отношение  $\alpha = t_{\max}/S_{\max}^n$ , которое непригодно для более широкого класса материалов.

Уравнения (10) ориентированы на описание поведения металлов и по умолчанию предполагают, что материал однородный и его упругие показатели не зависят от знака приложенных напряжений. Однако для каменных и иных природных материалов зависимости будут существенно иными, поэтому теория нуждается в дальнейшем обобщении.

С этой целью используем вторую теорию прочности для расчёта условий появления расколов (пинч-эффекта) при произвольном объёмном НДС материала. В отличие от традиционного подхода, учтём, что хрупкие, каменные материалы (горные породы, керамика и пр.), как правило, имеют разные упругие константы при действии напряжений разных знаков. Следовательно, модули линейной упругости  $E_p, E_c$  и коэффициенты Пуассона  $\nu_p, \nu_c$  могут существенно различаться для растяжения и сжатия (индексы  $p$  или  $c$  соответственно). Проблема усложняется, поскольку необходимо учитывать разные упругие постоянные в зависимости от знака действующих в каждой точке материала напряжений.

Материалы с разными упругими показателями для различных знаков напряжений мы предлагаем назвать **биупругими**. Такие материалы довольно часто необходимо выделять в практических приложениях, когда приходится учитывать поля напряжений различных знаков.

Рассмотрим простейшую модель биупругого материала, представленную на рисунке 3. Характерной особенностью таких материалов является довольно резкое (дискретное) изменение численных значений упругих постоянных  $E_p, E_c$  и  $\nu_p, \nu_c$  нередко в несколько раз.

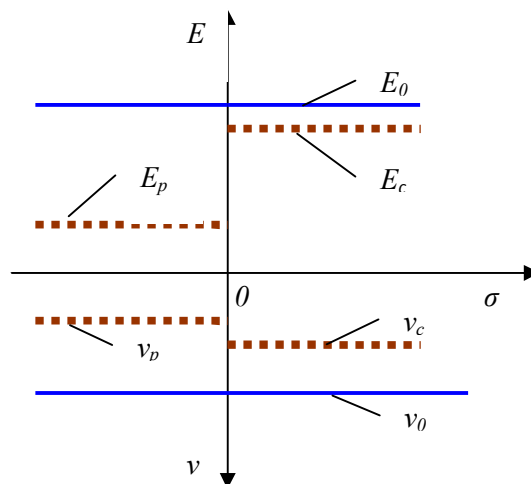


Рисунок 3 Математическая модель изменения упругих постоянных  $E_p, E_c$  и  $\nu_p, \nu_c$  у материалов, обладающих биупругостью

Пусть в упругом теле действует произвольное НДС с главными напряжениями  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ . Известный обобщённый закон Гука [9] запишем в новой трактовке для биупругих материалов:

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E_\sigma} [\sigma_i - \nu_\sigma (\sigma_j + \sigma_k)], \quad (11)$$

где  $(i, j, k = 1, 2, 3)$  — круговая перестановка индексов, а упругие постоянные подставляем по формулам

$$E_\sigma = \begin{vmatrix} E_p \\ E_c \end{vmatrix}; \quad \nu_\sigma = \begin{vmatrix} \nu_p \\ \nu_c \end{vmatrix}, \quad (12)$$

где  $E_\sigma, \nu_\sigma$  — индексированные постоянные, соответствующие напряжениям сжатия или растяжения в данной точке.

Определим возможность появления растягивающих деформаций при произвольном НДС с использованием главных напряжений. Из (11) согласно неравенствам  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  сразу следует, что это возможно лишь для  $0 \geq \varepsilon_2 \geq \varepsilon_3$ , откуда следуют два неравенства:

$$\begin{aligned} \nu_c (\sigma_2 + \sigma_1) &\geq \sigma_3; \\ \nu_c (\sigma_3 + \sigma_1) &\geq \sigma_2. \end{aligned} \quad (13)$$

Более вероятными являются растягивающие деформации из первого неравенства (13), которое следует рассматривать в первую очередь для суждения о появлении возможных разрывов в плоскости, нормальной к этим деформациям. Учтём к тому же возможность такого НДС, когда для большинства практически значимых состояний соблюдаются условия  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0$ , что позволяет записать

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E_p} - \frac{\nu_c}{E_c}(\sigma_2 + \sigma_1). \quad (14)$$

В случае, когда  $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , а материал является биупругим (обладает различием упругих постоянных при растяжении и сжатии), получим более сложную формулу для деформаций растяжения по направлению  $\sigma_3$ :

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E_p} - \frac{\nu_c}{E_c}\sigma_1 - \frac{\nu_p}{E_p}\sigma_2. \quad (15)$$

Для нахождения критического главного напряжения, при котором возникает пинч-эффект, воспользуемся принципом эквивалентности. Согласно ему, следует найти такое эквивалентное растягивающее напряжение  $\sigma_p$ , которое создаёт такую же деформацию растяжения по заданному направлению, как и фактически действующая НДС.

Определим предельную растягивающую деформацию, которая вызывает предельную раздвижку молекулярной решётки материала, приводящую к её разрыву. Для этого воспользуемся экспериментальными данными испытаний материала на прямое одноосное растяжение:

$$[\varepsilon_p] = [\sigma_p] / E_p, \quad (16)$$

где  $[\sigma_p]$  — показатель прочности породы на одноосное растяжение, Па;

$[\varepsilon_p]$  — предельная деформация растяжения, приводящая к разрыву материала по направлению  $\varepsilon_3$ .

Из (15) и (16) получаем искомое соотношение для определения предельного значения наибольшего напряжения сжатия  $\sigma_1$ , приводящего к деформации разрыва по направлению  $\varepsilon_3$  при условии  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0$ :

$$\begin{aligned} \varepsilon_3 &\leq -[\varepsilon_p], \\ [\sigma_3 - \nu_c(\sigma_2 + \sigma_1)] / E_c &\leq -[\sigma_p] / E_p. \end{aligned} \quad (17)$$

После преобразований получим окончательную формулу для определения максимального напряжения сжатия  $\sigma_1$ , вызывающего разрывы материала вдоль линии своего действия по направлению минимального главного напряжения  $\sigma_3$ :

$$\sigma_1 \geq \left\{ \sigma_3 + \frac{E_c}{E_p} [\sigma_p] \right\} \frac{1}{\nu_c} - \sigma_2. \quad (18)$$

Если среднее главное напряжение является растягивающим ( $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ), необходимо использовать формулу (14), что несколько изменяет полученную формулу (18), которая принимает вид

$$\sigma_1 \geq \left[ \frac{\sigma_3}{E_c} + \frac{[\sigma_p]}{E_p} - \nu_p \frac{\sigma_2}{E_p} \right] \frac{E_c}{\nu_c}. \quad (19)$$

Таким образом, формулы (18) и (19) позволяют найти условия проявления пинч-эффекта при любом НДС в точке нагруженного биупругого материала. Из них следует, что чем большими будут напряжения сжатия  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0$ , тем больше вероятность появления феномена пинч-эффекта в виде трещин раскола, нормальных к направлению минимального главного напряжения. Заметим, что разрывы могут возникать даже тогда, когда все напряжения будут сжимающими.

### 5 Единая теория прочности на паспорте О. Мора

Предложенные Н. Н. Давиденковым, а затем Я. Б. Фридманом варианты единой теории прочности позволяют судить о жё-

сткости нагружения и связанной с этим вероятности разрушения отрывом и сдвигом для металлов. Однако они неприменимы для многих материалов, в первую очередь для горных пород и природных материалов. Их разрушение нельзя характеризовать неизменными границами в виде пределов напряжений сдвигов  $t_{\max}$  и деформаций удлинения  $S''_{\max}$ .

Поэтому целесообразно построить единую теорию в виде паспорта прочности, охватывающего всё разнообразие возможных изменений НДС, который позволит предсказать не только характер разрушения — хрупкий или вязкий, — но и определить то предельное сочетание НДС, при котором происходит переход из одного состояния разрушения в другое. В том числе и для более сложной модели материалов, которым свойственна биупругость.

Чтобы учесть влияние промежуточного напряжения  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  на прочность при всём многообразии НДС материала, воспользуемся известным параметром Надаи – Лодэ [9]:

$$\mu = 2 \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} - 1. \quad (20)$$

Параметр отражает НДС обобщённого сжатия при  $\mu = 1$ , сдвига при  $\mu = 0$  и растяжения при  $\mu = -1$ , а также все промежуточные виды НДС, когда  $1 \geq \mu \geq -1$ .

Выразим из (20) значение промежуточного напряжения  $\sigma_2$  через  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ :

$$\sigma_2 = 0,5(\mu + 1)(\sigma_1 - \sigma_3) + \sigma_3. \quad (21)$$

Подставляя (21) в выражение (19), получим условие появления разрывов в главных напряжениях при разных значениях параметра  $\mu$  в области  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3$ :

$$\sigma_1 = \frac{2 - \nu(1 - \mu)}{(3 + \mu)\nu} \sigma_3 + \frac{2e}{(3 + \mu)\nu} [\sigma_p], \quad (22)$$

где  $e = E_c / E_p$  — соотношение модулей упругости при сжатии и растяжении для биупругого материала.

Уравнение паспорта прочности (22) на диаграмме О. Мора представляет собой прямолинейную огибающую наибольших предельных кругов напряжений. Угол наклона этой огибающей  $\rho_1 \geq 0$  (угол внутреннего трения) к оси нормальных напряжений  $\sigma$  можно определить после некоторых преобразований по формуле

$$\rho_1 = \arcsin \frac{A_1 - 1}{A_1 + 1}, \quad (23)$$

где введено обозначение

$$A_1 = \frac{2 - \nu(1 - \mu)}{(3 + \mu)\nu}. \quad (24)$$

Проанализируем условия существования и единственности полученного решения. Из физического смысла угла внутреннего трения  $\rho_1 \geq 0$  паспорта прочности, согласно (23), должно соблюдаться неравенство  $A_1 \geq 1$ . Данное условие, после подстановки и решения относительно коэффициента Пуассона, приводит к необходимости соблюдения тривиального для всех упругих материалов неравенства  $\nu \leq 0,5$  при любом возможном значении параметра Надаи – Лодэ  $-1 \leq \mu \leq 1$ . Следовательно, условие существования и единственности решения для уравнения паспорта прочности (22) доказано.

На рисунке 4 приведён единый паспорт прочности, где прямая 1 соответствует уравнению (22), а кривая 2 построена согласно аналитической теории прочности по уравнению (9).

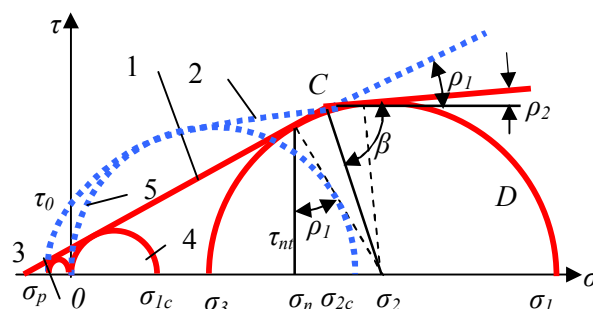


Рисунок 4 Построение единого паспорта прочности материала с учетом двух возможных механизмов разрушения

Пересечение паспортов прочности 1 и 2 выделяет две области под сплошными линиями на рисунке 4:

- область под линией 1 соответствует разрушению при сжатии за счёт образования трещин откола;
- область под кривой 2 определяет условия разрушения от предельных сдвигов по уравнению (9).

Те участки паспортов прочности 1 и 2, которые показаны пунктирными линиями, никогда не реализуются и с физической точки зрения являются фиктивными. Две линии 1 и 2 пересекаются, и их точка пересечения  $C$  показывает переход между двумя возможными механизмами разрушения трещинами отрыва или сдвига. Сопряжение этих двух линий происходит посредством предельного круга Мора  $D$ , для которого эти линии являются касательными. Точка пересечения  $C$  линий 1 и 2 оказывается, таким образом, вне предельного круга сопряжения  $D$ .

Обратим внимание на то, что показатели прочности на одноосное сжатие по механизму отрыва  $\sigma_{1c}$  (круг Мора 4) и механизму сдвига  $\sigma_{2c}$  (круг Мора 5) могут существенно различаться. На самом деле экспериментальные результаты при проведении испытаний на одноосное сжатие будут показывать промежуточные значения из-за трудности осуществления в чистом виде того или иного механизма разрушения.

Определим координаты  $\sigma_c$  и  $\tau_c$  точки пересечения  $C$  двух паспортов прочности 1 и 2. Для этого необходимо либо выполнить графическое построение по уравнениям (9) и (22), подобное приведённому на рисунке 4, либо совместно решить эти уравнения прочности. Координаты  $\sigma_c$  и  $\tau_c$  однозначно определяют положение круга сопряжения  $D$  на диаграмме О. Мора.

Для этого найдём углы наклона обеих ветвей паспорта прочности: угол ветви 1 мы определили ранее в виде (23), а угол ветви 2 найдём, продифференцировав уравнение прочности (9):

$$\rho_2 = \arctg \frac{\partial \sigma_n}{\partial \tau_n} = \frac{\sigma_p + \sigma_c}{\alpha \tau_c}, \quad (25)$$

где  $\sigma_c$  и  $\tau_c$  — координаты точки  $C$  пересечения двух ветвей паспорта единой прочности;

$\sigma_p$  — прочность на одноосное растяжение в аналитической теории прочности.

Теперь следует найти НДС материала, при котором происходит переход от одного типа разрушения к другому. Вначале определяем параметры круга сопряжения  $D$ , для чего из геометрических построений находим наклон биссектрисы острого угла пересечения в точке  $C$  обеих ветвей прочности:

$$\beta = 0,5(\pi - \rho_1 + \rho_2), \quad (25)$$

а её угол наклона  $\rho_c$  к оси  $\tau$  будет равен

$$\rho_c = \beta + \rho_1 - 0,5\pi. \quad (26)$$

В результате получаем радиус  $R$  круга  $D$ :

$$R_c = \tau_c / \cos \rho_c. \quad (27)$$

Напряжённое состояние, которое даёт круг  $D$ , оказывается равным

$$\begin{vmatrix} \sigma_{1c} \\ \sigma_{3c} \end{vmatrix} = \sigma_c + \tau_c \operatorname{tg} \rho_c + \begin{vmatrix} R \\ -R \end{vmatrix}. \quad (28)$$

Следовательно, все параметры переходного напряжённого состояния определены и можно перейти к анализу закономерностей, вытекающих из единой теории прочности.

### **6 Закономерности единой теории прочности**

Полученные замкнутые аналитические выражения позволяют оценить влияние основных параметров на закономерности разрушения различных материалов.

В первую очередь обратим внимание на то, что паспорт прочности при образовании трещин раскола существенно зависит от упругих постоянных материала и вида напряжённого состояния. Тот участок паспорта единой теории прочности, где реализуется разрушение сдвигом, наоборот, не зависит от этих параметров.

Таким образом, становится понятным, что многолетний спор о влиянии НДС на прочность породы получил неожиданное разрешение: приверженцы, казалось бы, противоположных точек зрения оказались и правы и неправы одновременно. На участке разрушения разрывом паспорт прочности зависит от параметра Надаи – Лодэ и поэтому будет представлен пучком параллельных прямых с переменными углами наклона. В области разрушения сдвигом все эти прямые переходят в единый паспорт прочности, представленный одной линией согласно зависимостям типа (9).

Введём обозначения для описания параметров, прямо или опосредовано влияющих на разрушение. В первую очередь следует опираться на определяемую путём лабораторных испытаний прочность на одноосное растяжение  $\sigma_{1p}$ , которая соответствует обычному растяжению, при этом параметр Надаи – Лодэ оказывается равным  $\mu = 1$ , а нагружение соответствует схеме Беккера.

Тогда прочность на всестороннее растяжение  $\sigma_{3p} = \sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \leq 0$  (истинная когезия разрыва) оказывается зависимой от коэффициента Пуассона  $\nu$  и равной

$$\sigma_{3p} = \sigma_{1p} / (1 - 2\nu). \quad (29)$$

Именно эта координата паспорта прочности — когезия отрыва — является исходной для всех линий (лучей) разрывной прочности.

Опуская громоздкие преобразования, приведём конечные формулы, позволяющие получить все необходимые параметры единого паспорта прочности.

Прочность на растяжение зависит от вида НДС  $\mu$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ :

$$\sigma_p(\mu, \nu) = \frac{2 \sin[\rho(\mu, \nu)]}{1 + \sin[\rho(\mu, \nu)]} \sigma_{1p}, \quad (30)$$

где  $\rho(\mu, \nu)$  — угол наклона линии прочности к оси нормальных напряжений диаграммы О. Мора:

$$\rho(\mu, \nu) = \arcsin \frac{A(\mu, \nu) - 1}{A(\mu, \nu) + 1}, \quad (31)$$

$$A(\mu, \nu) = \frac{2 - \nu(1 - \mu)}{(3 + \mu)\nu}. \quad (32)$$

Прочность на одноосное сжатие при разных значениях влияющих факторов (параметра Надаи – Лодэ  $\mu$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ ) следует определять по формуле

$$\sigma_c(\mu, \nu) = \frac{2 \sin[\rho(\mu, \nu)]}{1 - \sin[\rho(\mu, \nu)]} \sigma_{1p}. \quad (33)$$

Изучим влияние среднего напряжения на показатели прочности. Для определённости и наглядности проведём исследование изменения прочности у наиболее распространённой горной породы — алевролита — со следующими показателями [10]:

- прочность на одноосное сжатие  $\sigma_c = 22,5$  МПа и на растяжение  $\sigma_p = 5$  МПа;
- коэффициент Пуассона  $\nu = 0,25$ ;
- соотношение модулей упругости при сжатии и растяжении при наличии средней степени трещиноватости  $e = 1$  (однородная порода без проявлений биупругости);
- когезия отрыва  $\sigma_0 = \sigma_p = 5$  МПа и сдвига  $\tau_0 = 7$  МПа;
- параметр хрупкости  $\alpha = 0,3$ .

Построим для алевролита его паспорт прочности согласно приведённым выше зависимостям (29)–(33), дискретно меняя параметр Надаи – Лодэ  $\mu = (1, 0, -1)$ . Тогда когезия отрыва (прочность на всестороннее растяжение) равна

$$\begin{aligned} \sigma_{3p} &= \sigma_{1p} / (1 - 2\nu) = \\ &= 5 / (1 - 2 \cdot 0,25) = 10. \end{aligned} \quad (34)$$

Углы наклона линий (лучей) прочности к оси согласно (31)

$$\begin{vmatrix} \rho(1, \nu) \\ \rho(0, \nu) \\ \rho(-1, \nu) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 19,4 \\ 23,6 \\ 30 \end{vmatrix}, \text{ град.} \quad (35)$$

Прочности на растяжение при  $\sigma_1 = 0$  и сжатие при  $\sigma_3 = 0$  для разных  $\mu = (1, 0, -1)$  соответственно равны в МПа

$$\begin{vmatrix} \sigma_p(1, \nu) \\ \sigma_p(0, \nu) \\ \sigma_p(-1, \nu) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 5 \\ 5,7 \\ 6,7 \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} \sigma_c(1, \nu) \\ \sigma_c(0, \nu) \\ \sigma_c(-1, \nu) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 10 \\ 13,3 \\ 20 \end{vmatrix}. \quad (36)$$

Полученные значения единого паспорта прочности отражены на графиках рисунка 5, где выполнено наложение трёх линий (лучей) прочности, соответствующих НДС  $\mu = (1, 0, -1)$  и выходящих из единого центра, соответствующего прочности на всестороннее растяжение  $\sigma_{3p} = 10$  МПа.

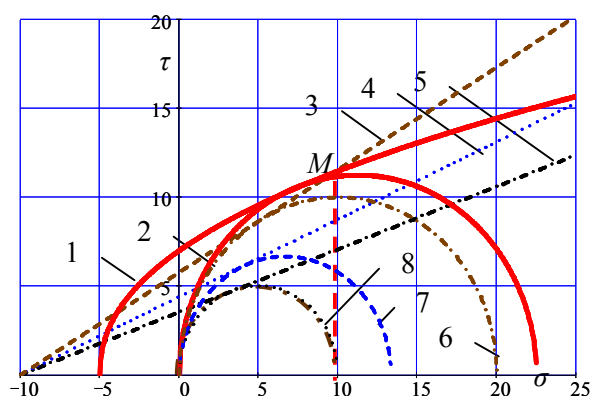


Рисунок 5 Зависимость единого паспорта прочности алеврита при разных значениях параметра Надаи – Лодэ  $\mu = (1, 0, -1)$

Сопоставим паспорт прочности 1 и соответствующую ему прочность на одноосное сжатие 2 (круг О. Мора), равную  $\sigma_c = 22,5$  МПа, с предельной линией 3, для которой круг 6 прочности на одноосное сжатие, равной  $\sigma_c(-1, \nu) = 20$  МПа. В обоих случаях нагружение соответствует схеме Кармана, когда  $\mu = -1$ . Как видим, разрушение происходит трещинами отрыва при меньшем значении прочности на сжатие.

Поскольку предельная линия 3 вплоть до точки  $M$  своего пересечения с паспортом 1 имеет меньшую ординату  $\tau_n$ , можно утверждать, что в этой области разрушение при

сжатии всегда будет происходить механизмом отрыва. Область отрыва при сжатии значительно расширяется с увеличением параметра Надаи – Лодэ, что видно по линиям 4 и 5, которым соответствуют  $\mu = (0, 1)$  и предельные круги напряжений 7 и 8 на одноосное сжатие  $\sigma_3 = 0$ . Особенно это касается условия нагружения материалов по схеме Беккера, когда НДС соответствует  $\mu = 1$ .

Для пород с большей прочностью, у которых параметр хрупкости  $\alpha > 0,5$  и паспорт прочности ближе к линейному, разрушение в стабиллометрах будет происходить в основном отрывом при нагружении не только по схеме Беккера  $\mu = 1$ , но и по схеме Кармана  $\mu = -1$ . Именно этот феномен наблюдал Бриджмен, впервые назвав его пинч-эффектом [5].

Отметим ряд качественных отличий, которые ранее считались антагонистическими противоречиями, а теперь объединены в единой теории прочности:

- Паспорт единой теории прочности материала состоит из двух сопряженных ветвей: линейного паспорта прочности от разрывов и нелинейного паспорта аналитической теории прочности для механизма сдвигового разрушения.

- Возникновение и интенсивность разрушения трещинами разрыва при сжатии зависят от упругих постоянных материала  $E$  и  $\nu$ , тогда как разрушение сдвигами от них не зависит. При этом для материалов с различными показателями упругости при сжатии и растяжении пришлось ввести понятие биупругости.

- Разрывы (дисторсии) в материале всегда перпендикулярны минимальному напряжению  $\sigma_3$ , а поверхность трещин сдвига коллинеарна среднему напряжению  $\sigma_2$ , и, как показано в [4], сдвиги часто опережаются по концам вторичными трещинами разрыва, формируя Z-образные структурные дефекты сплошности.

- После появления трещин разрыва при пинч-эффекте в условиях  $\sigma_3 \geq 0$  дальней-

шее их развитие происходит путём потери местной устойчивости тонких структурных элементов (пластин, столбиков и пр.) вследствие возникновения и роста вторичных трещин сдвига.

- Разрывные трещины при пинч-эффекте даже после своего возникновения не изменяют НДС материала, поскольку  $\sigma_3 \geq 0$ , тогда как сдвиговые трещины являются источником значительных концентраций НДС на своих концах и во всей нарушенной области.

- При своём возникновении и росте разрывы при пинч-эффекте и сдвиговые дилатации не являются конкурирующими и дополняют друг друга, возникая и развиваясь в разной последовательности: при пинч-эффекте первичны разрывы, а сдвиги вторичны, при первичном разрушении сдвигом от сжатия — наоборот.

- Если напряжение в результате динамического возрастания (взрыв) преодолевает оба порога прочности по разрыву и сдвигу, то ход разрушения неоднозначный и зависит от реологических параметров материала.

Важно отметить, что образование трещин разрыва в породах происходит не всегда, поскольку строго ограничено возможностью появления пинч-эффекта, т. е. только в тех породах, у которых соотношение показателей прочности на одноосное сжатие и растяжение удовлетворяет базовому неравенству  $[\sigma_c] \geq (3...10)[\sigma_p]$ , где числовые коэффициенты зависят от упругих постоянных и НДС породного массива.

Отсюда следует, что пинч-эффект не будет наблюдаться в пластичных породных материалах (глина, мергель, сталь и др.), если их не подвергнуть искусственному «охрупчиванию», например, для пластичных пород — глубокому охлаждению жидким азотом при специальных способах сооружения горных выработок.

После анализа особенностей зарождения и протекания многих физико-механических процессов, связанных с разрушением отрыва пород при их сжатии [11], можно заключить, что пинч-эффект имеет значи-

тельное, а иногда и определяющее влияние на ведение горных работ.

Поэтому после развития единой теории прочности следует ожидать пересмотра и обновления многих устоявшихся понятий и расчётных схем механики деформируемого твёрдого тела и геомеханики, связанных с разрушением материалов при проявлении пинч-эффекта в более широком диапазоне явлений и процессов.

Кратко перечислим основные явления и процессы в геомеханике и горном деле, где следует учитывать существенное влияние пинч-эффекта:

- механическое разрушение пород рабочими органами горных машин, вооружённых горным инструментом режущескалывающего, дробящего, раскалывающего или раздавливающего действия;

- динамическое спонтанное трещинообразование и выбросы пород и газа на открытых поверхностях массива горных пород при ведении проходческих и выемочных работ;

- образование трещин отрыва вдоль породных обнажений в боках и кровле подземных и открытых горных выработок, существенно осложняющее проявления горного давления;

- условия возникновения и распространения трещин разного типа в динамических полях напряжений, особенно при ведении взрывных работ различного назначения;

- процессы раскола кернов на диски («дискование») при керновом бурении в массиве горных пород как индикатор и предвестник горных ударов и выбросов;

- рост продольных трещин отрыва параллельно породным обнажениям бортов карьеров, что заметно снижает их устойчивость и влияет на показатели открытых разработок;

- явление отжима, раздавливания и осыпания краевой части угольного пласта или породных обнажений в забоях очистных и подготовительных выработок;

- динамические отколы породы от груди проходческих забоев при буровзрывном и комбайновом способе проведения горных выработок;

- разрушение трещинами раскола центрально и внецентренно сжатых бетонных, железобетонных и каменных конструкций;

- процессы трещинообразования при определении показателя прочности горных пород путём раздавливания керна «бразильским» методом;

- разнообразные способы по откалыванию и поверхностной обработке камня в промышленных и иных целях (каменоломни, работа инструмента скульптора и каменотёса, а в доисторическую эпоху — изготовление каменных ножей и стрел из кремния и обсидиана) и др.

Каждый из перечисленных физических горных процессов нуждается в самостоятельном исследовании с учётом влияния пинч-эффекта, что может существенно расширить границы нашего их понимания, объяснения, прогнозирования и возможного использования для повышения эффективности добычи сырьевых ресурсов и подземного строительства.

### Выводы

На основании проведённых исследований получены следующие результаты, имеющие научную новизну и практическую ценность:

1. Проведён краткий критический анализ существующих теорий прочности и показаны их основные недостатки.

2. В качестве исходной была принята идея проф. Н. Н. Давиденкова и Я. Б. Фридмана о необходимости создания единой теории прочности; эта теория была разработана для материалов с произвольными свойствами.

3. Единая теория прочности получена путём сопряжения двух механизмов разрушения: линейного паспорта прочности от разрывов и нелинейного паспорта аналитической теории прочности для механизма сдвигового разрушения.

4. Предложено описание прочности нового класса материалов, обладающих биупругостью.

5. Впервые разработан паспорт материалов с позиций единой теории прочности и с учётом феномена пинч-эффекта, открытого Бриджменом.

6. Изучены закономерности проявлений пинч-эффекта и впервые определены условия образования трещин раскола.

7. Указан обширный перечень явлений и процессов в геомеханике и горном деле, где следует учитывать существенное влияние пинч-эффекта.

В целом результаты исследования могут быть использованы для изучения практически важных вопросов технологии добычи и переработки сырьевых ресурсов в нефтяной и горной промышленности, а также будут полезны при подготовке инженеров и аспирантов горных специальностей.

### Библиографический список

1. Писаренко, Г. С. *Справочник по сопротивлению материалов [Текст]* / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. — К. : Дельта, 2008. — 813 с.
2. Лебедев, А. А. *Развитие теорий прочности в механике материалов [Текст]* / А. А. Лебедев. // *Проблемы прочности*. — 2010. — № 5 (10). — С. 127–146.
3. Работнов, Ю. Н. *Сопротивление материалов [Текст]* / Ю. Н. Работнов. — М. : Физматгиз, 1962. — 456 с.
4. Литвинский, Г. Г. *Аналитическая теория прочности горных пород и массивов [Текст]* / Г. Г. Литвинский. — Донецк : Норд-Пресс, 2008. — 207 с.
5. Бриджмен, П. У. *Физика высоких давлений [Текст]* / П. У. Бриджмен. — М. – Л. : ОНТИ, 1935. — 402 с.
6. *Испытание сильвинита [Электронный ресурс]*. — Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=TrTZXpYipyU>.
7. Давиденков, Н. Н. *Некоторые проблемы механики материалов [Текст]* : монография / Н. Н. Давиденков. — Л. : Лениздат, 1943. — 152 с.

8. Фридман, Я. Б. Механические свойства металлов. Часть 1. Деформация и разрушение [Текст] / Я. Б. Фридман. — М. : Машиностроение, 1972. — 472 с.
9. Лурье, А. И. Теория упругости [Текст] / А. И. Лурье. — М. : Наука, 1970. — 940 с.
10. Распределение и корреляция показателей физических свойств горных пород [Текст] : справочное пособие / М. М. Протодяконов, Р. И. Тедер, Е. И. Ильницкая и др. — М. : Недра, 1981. — 192 с.
11. Литвинский, Г. Г. Основы горной геомеханики. Т. 1. Механические свойства горных пород и массивов [Текст] / Г. Г. Литвинский. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — 312 с.

© Литвинский Г. Г.

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

Статья поступила в редакцию 13.03.19.

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

### **РОЗВИТОК ЄДИНОЇ ТЕОРІЇ МІЦНОСТІ І ЗАКОНОМІРНОСТІ РУЙНУВАННЯ**

Дано стислий аналіз існуючих теорій міцності. На основі ідеї проф. Н. Н. Давиденкова і проф. Я. Б. Фрідмана шляхом сполучення лінійного паспорту міцності для розривів (пінч-ефект) і нелінійного паспорту аналітичної теорії міцності при руйнуванні зрушенням розвинуто єдину теорію міцності. Вивчено особливості руйнування матеріалів при зміні виду напружено-деформованого стану (НДС). Вперше запропоновано опис міцності нового класу матеріалів, що мають біпружність. Дано перелік явищ і процесів в геомеханіці і гірській справі, де проявляється пінч-ефект. Результати дослідження розвивають теоретичні основи міцності і руйнування деформованого твердого тіла.

**Ключові слова:** теорія міцності, пінч-ефект, руйнування відривом, руйнування зсувом, паспорт міцності, геомеханіка, гірська порода, пружні постійні, біпружність, параметр Надаї – Лодє, схема Кармана, схема Беккера.

**Prof. Litvinsky G. G. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**

### **DEVELOPMENT OF A UNIFIED THEORY OF STRENGTH AND PATTERNS OF DESTRUCTION**

A brief analysis of the existing theories of strength is given. Based on the ideas of Professor V. V. Davidenkova and Professor J. B. Friedman developed the unified strength theory by pairing the linear strength passport for breaks (pinch-effect) and nonlinear passports of the analytical theory of strength at failure by shear. The features of material destruction while changing the type of stress-strain state (SSS) are studied. For the first time, a description of the strength of a new class of materials with bielasticity is proposed. An extensive list of phenomena and processes in geomechanics and mining, where the pinch effect is manifested, is given. The research results develop the theoretical foundations of the strength and fracture of a deformable solid.

**Key words:** theory of strength, pinch-effect, destruction by the stretch, destruction by the shear, passport strength, geomechanics, rocks, elastic constants, bielasticity, Nadai – Lode factor, Karman scheme, Becker scheme.

УДК 622.837

Маталкина Ю. А.  
(Дон ГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ПОДРАБОТАННОСТИ НА МАКСИМАЛЬНЫЕ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

*Установлена зависимость максимальных оседаний земной поверхности от степени подработанности, размеров межлавных целиков, глубины очистных работ.*

**Ключевые слова:** максимальные оседания, земная поверхность, степень подработанности, глубина подработки, зависимости, целик, «Правила подработки...».

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Проблема извлечения угля из-под застроенных территорий стоит остро в Донбассе и не только. Так как уголь является невозполнимым природным ресурсом, возникает вопрос максимально полного его извлечения из недр. Но, делая это неосмотрительно, под застроенными участками или природными объектами в итоге можно получить нарушение систем коммуникации, целостности сооружений или природных объектов, что может стать причиной аварийных ситуаций и пагубного воздействия на окружающую среду. По этой причине безопасная разработка угля под застроенными территориями и водными объектами является актуальной проблемой.

На данный момент деформации земной поверхности определяют трудоёмкими натурными маркшейдерскими наблюдениями или их расчётом по методике «Правил подработки...» [1]. Она позволяет определять сдвигения и деформации при глубинах до 1000 м и более с определённой погрешностью. С увеличением глубины подработки погрешность определения параметров сдвижений и деформаций и общая продолжительность процесса сдвижения увеличиваются, что, в свою очередь, делает натурные измерения более трудоёмкими и дорогостоящими.

Поэтому совершенствование методики расчёта ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности является актуальной практической и научной задачей.

**Постановка задачи.** Задачей исследований является установление зависимости величин ожидаемых максимальных оседаний земной поверхности от степени подработанности, размеров межлавных целиков и глубины подработки.

**Изложение материала и его результаты.** Одним из факторов, влияющих на величины ожидаемых максимальных оседаний земной поверхности  $\eta_m$ , являются коэффициенты  $N_1$ ,  $N_2$  [1] которые характеризуют степень подработанности земной поверхности соответственно вкрест и по простиранию пласта. Они зависят от отношений размеров выработанного пространства  $D_1$ ,  $D_2$  к глубине подработки  $H$  и поправок  $\Delta L$ :

$$N_1 = \sqrt{0,9 \left( \frac{D_1}{H} + \Delta L_n + \Delta L_s \right)}; \quad (1)$$

$$N_2 = \sqrt{0,9 \left( \frac{D_2}{H} + \Delta L_{np} + \Delta L_{onp} \right)}, \quad (2)$$

где  $D_1$ ,  $D_2$  — длины очистной выработки соответственно вкрест и по простиранию, м;  
 $\Delta L_n$ ,  $\Delta L_s$ ,  $\Delta L_{np}$ ,  $\Delta L_{onp}$  — поправки к относительной длине лавы за счёт целика со стороны падения, восстания, простирания и обратной простиранию пласта, значения которых приведены в «Правилах подработки...» [1].

Для исследования непосредственного влияния  $D/H$  остальные факторы, влияющие на максимальные оседания  $\eta_m$ , принимаем за постоянные: вынимаемая мощ-

ность пласта  $m=1$  м, угол падения  $\alpha=5^\circ$ ,  $D_1=2000$  м,  $l/H=0,4$ ,  $q_0=0,8$ .

Полученные из расчёта результаты сведены в таблицу 1, и по ним построены графики зависимости  $\eta_m$  от отношений  $D_2/H$  (рис. 1).

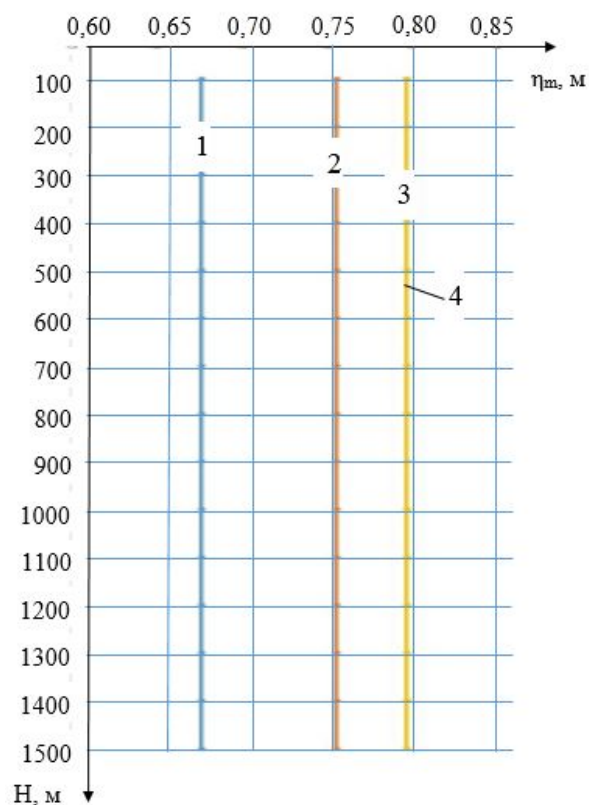
Вопрос влияния  $D_2/H$  на  $\eta_m/m$  был рассмотрен Б. А. Кодуновым в работе [2]. По результатам математического моделирования была установлена зависимость  $\eta_m$  от ширины выработанного пространства  $D$  к  $H$ .

Исследования формулы из «Правил...» [1], которая используется для вычисления максимальных оседаний при изменяющейся степени подработанности и остальных постоянных факторах, показали, что с увеличением глубины величины максимальных оседаний не изменяются. Это противоречит теории и общепринятым положениям [2–4] — с увеличением глубины разработки уменьшаются относительные величины максимальных оседаний земной поверхности.

Таблица 1

Зависимость ожидаемых максимальных оседаний земной поверхности  $\eta_m$  от глубины ( $H$ , м) при  $D_2/H=0,8$ ,  $D_2/H=1$ ,  $D_2/H=1,2$ ,  $D_2/H=1,4$  в соответствии с [1]

$H$ (м)	$\eta_m$			
	$D_2/H=0,8$	$D_2/H=1$	$D_2/H=1,2$	$D_2/H=1,4$
100	0,676	0,756	0,797	0,797
200	0,676	0,756	0,797	0,797
300	0,676	0,756	0,797	0,797
400	0,676	0,756	0,797	0,797
500	0,676	0,756	0,797	0,797
600	0,676	0,756	0,797	0,797
700	0,676	0,756	0,797	0,797
800	0,676	0,756	0,797	0,797
900	0,676	0,756	0,797	0,797
1000	0,676	0,756	0,797	0,797
1100	0,676	0,756	0,797	0,797
1200	0,676	0,756	0,797	0,797
1300	0,676	0,756	0,797	0,797
1400	0,676	0,756	0,797	0,797
1500	0,676	0,756	0,797	0,797



1 — при  $D_2/H=0,8$ ; 2 — при  $D_2/H=1$ ;  
3 — при  $D_2/H=1,2$ ; 4 — при  $D_2/H=1,4$

Рисунок 1 Зависимость ожидаемых максимальных оседаний земной поверхности  $\eta_m$  от глубины подработки ( $H$ , м)

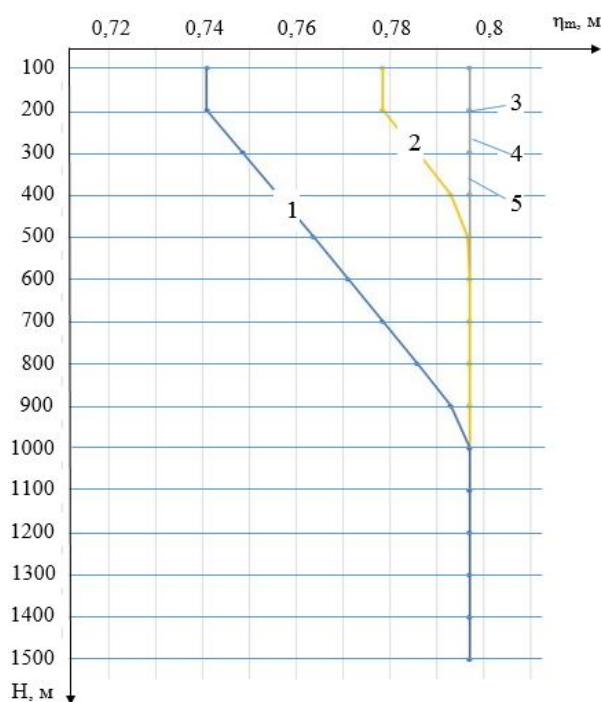
Для дальнейшего исследования  $\eta_m$  по методике [1] проанализируем такой фактор, как наличие межлавных целиков и их размеры. В зависимости  $l/H$  изменяются поправки к относительной длине лавы за счёт целика  $\Delta D$  в коэффициентах  $N_1$  и  $N_2$  [1]. По полученным результатам составлена таблица 2 и построен график (рис. 2).

Анализируя график зависимости (рис. 2), мы можем утверждать, что он не соответствует теории и общепринятым положениям, так как при значениях  $l/H=0$ ,  $l/H=0,2$ ,  $l/H=0,4$  максимальные оседания постоянны на любой глубине, а при  $l/H=0,6$  и  $0,8$   $\eta_m$  увеличиваются.

Следовательно, можно сделать вывод, что методика определения  $\eta_m$  нуждается в пересмотре и доработке.

Таблица 2  
Зависимость максимальных оседаний земной поверхности от глубины ( $H$ , м) при  $l/H=0$ ,  $l/H=0,2$ ,  $l/H=0,4$ ,  $l/H=0,6$ ,  $l/H=0,8$

$H$ (м)	$\eta_m$				
	$l/H=0,4$	$l/H=0$	$l/H=0,2$	$l/H=0,6$	$l/H=0,8$
100	0,797	0,797	0,797	0,778	0,741
200	0,797	0,797	0,797	0,778	0,741
300	0,797	0,797	0,797	0,786	0,748
400	0,797	0,797	0,797	0,793	0,756
500	0,797	0,797	0,797	0,797	0,764
600	0,797	0,797	0,797	0,797	0,771
700	0,797	0,797	0,797	0,797	0,778
800	0,797	0,797	0,797	0,797	0,786
900	0,797	0,797	0,797	0,797	0,793
1000	0,797	0,797	0,797	0,797	0,797
1100	0,797	0,797	0,797	0,797	0,797
1200	0,797	0,797	0,797	0,797	0,797
1300	0,797	0,797	0,797	0,797	0,797
1400	0,797	0,797	0,797	0,797	0,797
1500	0,797	0,797	0,797	0,797	0,797



1 — при  $l/H=0,8$ ; 2 —  $l/H=0,6$ ; 3 —  $l/H=0,4$ ;  
4 —  $l/H=0,2$ ; 5 —  $l/H=0$

Рисунок 2 Зависимость максимальных оседаний земной поверхности  $\eta_m$  от глубины подработки ( $H$ , м) и размера целика  $l$

Поэтому на данном этапе исследования предлагается использовать ту же формулу, как и в «Правилах...» [1], но с учётом коэффициента расслоения  $K_P$ :

$$\eta_m = q_0 \cdot m \cdot \cos \alpha \cdot N_1 \cdot N_2 - K_P \cdot H^2, \text{ м}, (3)$$

где  $q_0$  — относительная безразмерная величина максимального оседания, принимается в зависимости от марки угля и отношения мощности четвертичных отложений  $h$  к глубине разработки  $H$  по таблице А.1 [1];

$m$  — вынимаемая мощность пласта, м;

$\alpha$  — угол падения пласта, градус;

$K_P$  — коэффициент остаточных расслоений (разуплотнений) подработанной слоистой толщи горных пород, установленный на основе натуральных наблюдений В. Г. Ларченко [5], исследованиями Н. К. Клишина, О. Л. Кизиярова, М. С. Четверика и анализом результатов фактических оседаний земной поверхности при подработке на больших глубинах [6].

Данный коэффициент принимаем равным  $3 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{м}^2}$  в районе залегания антрацитов и  $2,5 \cdot 10^{-7} \frac{1}{\text{м}^2}$  в других регионах, в дальнейшем он требует уточнения по результатам натуральных наблюдений на больших глубинах.

С использованием тех же исходных данных ( $m=1$  м,  $\alpha=5^\circ$ ,  $D_1=2000$  м,  $l/H=0,4$ ,  $q_0=0,8$ ) вычислены величины  $\eta_m$  по формуле (3). По результатам расчётов составлены таблицы 3, 4 и построены графики (рис. 3, 4).

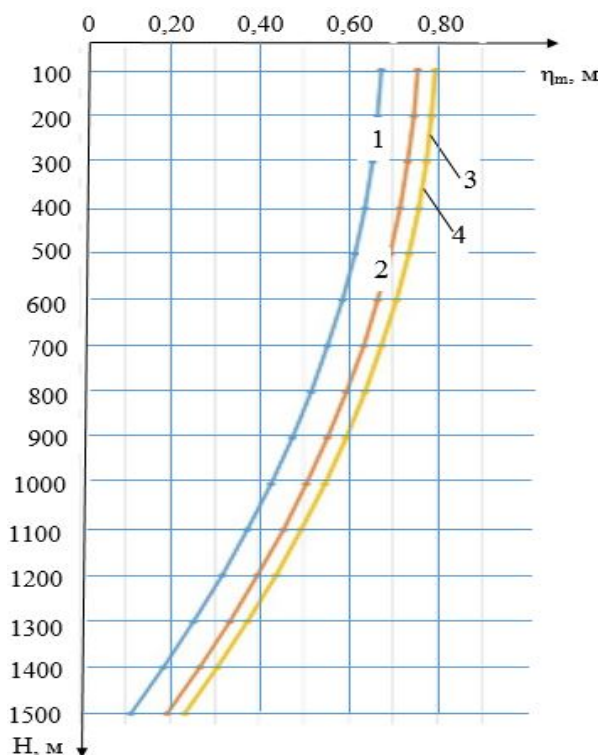
Рассмотрев полученные данные в таблицах 3, 4 и графики (рис. 3, 4) можно сделать вывод, что с увеличением глубины  $H$  максимальные оседания  $\eta_m$  уменьшаются, что соответствует теории. Так как с увеличением глубины увеличивается прочность пород, значит, соответственно теории, должны уменьшаться относительные максимальные оседания, что, собственно, и можно увидеть на графиках (рис. 3, 4).

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Таблица 3

Зависимость максимальных оседаний земной поверхности от глубины ( $H$ , м) с учётом  $Kp$  при  $D_2/H=0,8$ ,  $D_2/H=1$ ,  $D_2/H=1,2$ ,  $D_2/H=1,4$

$H$ (м)	$\eta_m$			
	$D_2/H=0,8$	$D_2/H=1$	$D_2/H=1,2$	$D_2/H=1,4$
100	0,674	0,754	0,794	0,794
200	0,666	0,746	0,787	0,787
300	0,654	0,734	0,774	0,774
400	0,636	0,716	0,757	0,757
500	0,614	0,694	0,734	0,734
600	0,586	0,666	0,707	0,707
700	0,554	0,634	0,674	0,674
800	0,516	0,596	0,637	0,637
900	0,474	0,554	0,594	0,594
1000	0,426	0,506	0,547	0,547
1100	0,374	0,454	0,494	0,494
1200	0,316	0,396	0,437	0,437
1300	0,254	0,334	0,374	0,374
1400	0,186	0,266	0,307	0,307
1500	0,114	0,194	0,234	0,234



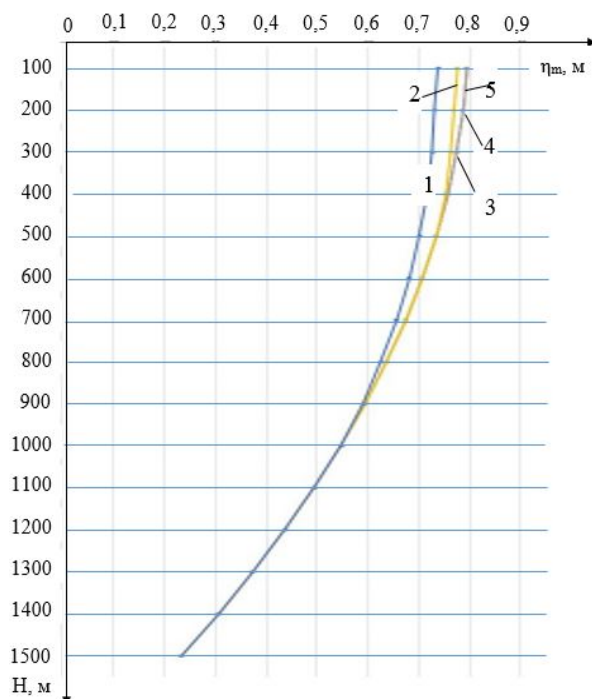
1 — при  $D_2/H=0,8$ ; 2 — при  $D_2/H=1$ ;  
3 — при  $D_2/H=1,2$ ; 4 — при  $D_2/H=1,4$

Рисунок 3 Зависимость ожидаемых максимальных оседаний земной поверхности  $\eta_m$  от глубины подработки ( $H$ , м) с учётом  $Kp$

Таблица 4

Зависимость максимальных оседаний земной поверхности от глубины ( $H$ , м) с учётом  $Kp$  при  $l/H=0$ ,  $l/H=0,2$ ,  $l/H=0,4$ ,  $l/H=0,6$ ,  $l/H=0,8$

$H$ (м)	$\eta_m$			
	$l/H=0,4$	$l/H=0$	$l/H=0,2$	$l/H=0,6$
100	0,794	0,794	0,794	0,776
200	0,787	0,787	0,787	0,768
300	0,774	0,774	0,774	0,763
400	0,757	0,757	0,757	0,753
500	0,734	0,734	0,734	0,734
600	0,707	0,707	0,707	0,707
700	0,674	0,674	0,674	0,674
800	0,637	0,637	0,637	0,637
900	0,594	0,594	0,594	0,594
1000	0,547	0,547	0,547	0,547
1100	0,494	0,494	0,494	0,494
1200	0,437	0,437	0,437	0,437
1300	0,374	0,374	0,374	0,374
1400	0,307	0,307	0,307	0,307
1500	0,234	0,234	0,234	0,234



1 — при  $l/H=0,8$ ; 2 — при  $l/H=0,6$ ; 3 — при  $l/H=0,4$ ;  
4 — при  $l/H=0,2$ ; 5 — при  $l/H=0$

Рисунок 4 Зависимость максимальных оседаний земной поверхности  $\eta_m$  от глубины подработки ( $H$ , м) и размера целика  $l$  по формуле (3)

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Проанализировав оба полученных графика и сравнив с предыдущими, можно сделать вывод: с увеличением глубины зависимость параметров процесса сдвижения земной поверхности изучена недостаточно, а иногда и противоречит теории и общепринятым положениям.

Например [1], судя по графикам (рис. 1, 2), максимальные оседания остаются постоянными на любой глубине подработки или же увеличиваются с увеличением глубины. Соответственно, существующая методика оп-

ределения максимальных ожидаемых деформаций нуждается в пересмотре и доработке.

Коэффициент остаточных расслоений  $K_R$ , который был использован в формуле (3), требует уточнений, но уже сейчас по графикам (рис. 3, 4) можно сказать, что он позволяет значительно увеличить точность расчёта ожидаемых максимальных оседаний.

В дальнейшем планируется исследование влияния глубины подработки на горизонтальные сдвижения и деформации земной поверхности.

### Библиографический список

1. ГСТУ 101.00159226.001-2003. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом [Текст]. — Введ. 2003-11-28. — К. : УкрНИИМИ НАН Украины, Минтопэнерго Украины. — 2004. — 128 с. — (Отраслевой стандарт Украины).
2. Кодунов, Б. А. Зависимость максимальных оседаний земной поверхности от размеров лавы и глубины разработки [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://ea.donntu.org/handle/123456789/6975>.
3. Ларченко, В. Г. Процесс сдвижений и деформаций подработанного массива горных пород [Текст] / В. Г. Ларченко // Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях : материалы 7-го Международного симпозиума. — Белгород : ВИОГЕМ, 2003. — С. 238–244.
4. Посыльный, Ю. В. Максимальные оседания земной поверхности в антрацитовых районах Донбасса [Текст] / Ю. В. Посыльный, А. А. Джулай, Е. А. Тетерин // Перспективы развития Восточного Донбасса : сб. науч. трудов ШИЮРГТУ (НПИ). — Новочеркасск : Набла, 2007. — С. 282–294.
5. Ларченко, В. Г. Максимальные оседания и деформации земной поверхности при подработке на больших глубинах [Текст] / В. Г. Ларченко, Е. В. Коваленко, Ю. А. Маталкина // Сб. научных трудов ДонГТУ. — 2018. — Вып. 3 (54). — С. 33–40.
6. Ларченко, В. Г. Влияние глубины разработки угольных пластов на окружающую среду [Текст] / В. Г. Ларченко, Е. В. Коваленко, Ю. А. Маталкина // Сборник трудов научной конференции «50 лет кафедре экологии и жизнедеятельности». — Алчевск, 2018. — С. 57–66.

© Маталкина Ю. А.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Леоновым А. А.,  
гл. маркшейдером шахты XIX съезда КПСС Чабан И. И.**

Статья поступила в редакцию 13.03.19.

**Маталкіна Ю. А.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТУПЕНЯ ПІДРОБКИ НА МАКСИМАЛЬНІ ОСІДАННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

Встановлено залежність максимальних осідань земної поверхні від ступеня підробки, розмірів міжлавлених ціліків, глибини очисних робіт.

**Ключові слова:** максимальні осідання, земна поверхня, ступінь підробки, глибина підробки, залежність, цілік, «Правила підробки...».

**Matalkina Yu. A.** (*DonSTU, Alchevsk, LPR*)

**STUDY OF INFLUENCE OF THE DEGREE OF UNDERMINING ON THE MAXIMUM EARTH CRUST SUBSIDENCE**

*The dependence of maximum earth crust subsidence from the degree of undermining, sizes of the wall pillars, the depth of the actual mining.*

**Key words:** *maximum subsidence, earth crust, degree of undermining, depth of undermining, dependences, pillar, "Mining rules..."*.

**МЕТАЛЛУРГИЯ  
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

---

---

**МЕТАЛУРГІЯ  
ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

---

---

**METALLURGY  
AND MATERIAL SCIENCES**



УДК 669.162.262

к.т.н. Русанов И. Ф.,  
к.ф.-м.н Русанова Н. И.

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, rusanova-2011@inbox.ru)

## ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОТКОСА НА СЕГРЕГАЦИЮ МАТЕРИАЛОВ ПО КРУПНОСТИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

*На основании экспериментальных данных сделана оценка влияния физических свойств материалов и условий формирования откоса (угла наклона образующей откоса, его протяжённости и высоты падения материалов на него). Приводится уравнение, описывающее влияние перечисленных факторов на показатель сегрегации.*

**Ключевые слова:** сегрегация, обобщённые характеристики сытового состава, средний размер кусков, коэффициент вариации размера кусков, условия формирования откоса, физические свойства материалов.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** В технологических процессах, происходящих с участием неоднородных по крупности сыпучих материалов, при их движении по откосу развивается сегрегация частиц различной крупности. В результате, как известно, крупность материала от вершины откоса к его подножию увеличивается. В агломерационном и доменном производствах необходимо не только учитывать проявление сегрегации, но и влиять на степень её развития для достижения высоких технико-экономических показателей процессов. Для оценки степени развития сегрегации предложены различные показатели [1–3 и др.]. Большинство из них позволяют делать оценку развития сегрегации в конкретных условиях. И только предложенный в работе [3] показатель позволяет оценить сегрегацию с учётом сытового состава материалов во всём его многообразии. При этом он не позволяет прогнозировать развитие сегрегации с учётом вида материала при изменении условий формирования откоса, таких как высота падения материала на откос, его протяжённость и угол наклона образующей откоса. В результате управление сегрегацией на откосе в технологических процессах затруднено и прогнозирование её развития в изменённых условиях формирования откоса невозможно.

**Постановка задачи.** В связи с изложенным выше в данной работе поставлена задача на основании опытных данных провести оценку влияния на сегрегацию условий формирования откоса и предложить зависимости, позволяющие управлять степенью её развития.

**Изложение материала и его результаты.** В работе [3] степень развития сегрегации материалов предложено характеризовать коэффициентом  $Z$ , численное значение которого изменяется от 0 до 1 и вычисляется по формуле

$$Z = A \cdot \bar{d}_n \cdot e^{-B \cdot \bar{d}_n}, \quad (1)$$

где  $\bar{d}_n$  — средний размер кусков материала, мм;  $A$  и  $B$  — коэффициенты, отражающие влияние на сегрегацию свойств материала как сыпучего тела и условий формирования откоса.

При рассмотрении движения материала по откосу обычно полагают, что отдельные куски либо скатываются, либо скользят по поверхности. Однако такой подход к движению материалов по поверхности откоса не совсем корректен. Связано это с тем, что, во-первых, движение отдельных кусков происходит в потоке материала и их скатывание и скольжение по поверхности в чистом виде затруднено, а во-вторых, из-за различия скорости движения кусков разного

размера отдельные куски движутся хаотически как в продольном, так и в поперечном направлении потока. Поэтому на распределение материалов по крупности на откосе определяющее влияние должно оказывать не столько кинематическое трение (трение качения и скольжения), возникающее в месте контакта движущихся кусков с неподвижной поверхностью откоса, сколько внутреннее трение, препятствующее движению отдельных кусков относительно друг друга.

Из закона И. Ньютона коэффициент внутреннего трения равен

$$\mu = \frac{F_{тр}}{v} \cdot \frac{r}{S}, \quad (2)$$

где  $\mu$  — коэффициент внутреннего трения, Па·с;  $F_{тр}$  — сила внутреннего трения, Н;  $S$  — площадь соприкосновения, м<sup>2</sup>;  $r$  — расстояние между граничными плоскостями, м;  $v$  — относительная скорость граничных плоскостей среды, м/с. Для слоя сыпучих материалов площадь соприкосновения равна поверхности кусков и определяется по уравнению

$$S = S_0 \cdot (1 - \varepsilon), \quad (3)$$

где  $S_0$  — удельная поверхность кусков, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon$  — пористость слоя, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Расстояние же между граничными плоскостями для слоя пропорционально эквивалентному диаметру каналов:

$$r = \bar{d}_э = \bar{d} \cdot \frac{4\varepsilon}{k(1 - \varepsilon)}, \quad (4)$$

где  $k$  — коэффициент формы.

С учётом значений (3) и (4) для слоя уравнение (2) для движения сыпучих материалов принимает вид

$$\mu = \frac{F}{v} \cdot \frac{4 \cdot \bar{d}}{k \cdot S_0} \cdot \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)^2}. \quad (5)$$

Таким образом, коэффициент внутреннего трения для слоя сыпучего материала, согласно уравнению (5), пропорционален отношению пористости слоя к квадрату объёма, занятого кусками материала в слое:

$$\mu \propto \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)^2} = M, \quad (6)$$

где  $M$  — безразмерный комплексный параметр, характеризующий материал как сыпучую среду.

Пористость слоя  $\varepsilon$  пропорциональна соотношению насыпной  $\gamma_{нас}$  и кажущейся  $\gamma_{каж}$  плотностей и в то же время пропорциональна тангенсу угла естественного откоса материалов  $tg \alpha$  (по опытным данным эта связь характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,97). Тогда безразмерный параметр  $M$  через основные физические характеристики может быть вычислен по выражению

$$M = \left( \frac{\gamma_{нас}}{\gamma_{каж}} \right)^2 \cdot tg \alpha. \quad (7)$$

Безразмерный комплексный параметр  $M$  достаточно полно характеризует способность неоднородного сыпучего материала сегрегировать на откосе, и его величина оказывает влияние на коэффициент  $A$  уравнения (1). Как показал анализ опытных данных, коэффициент  $A$  и параметр  $M$  связаны линейно и их связь характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,997.

Изучение закономерностей влияния условий формирования откоса на сегрегацию материала проводили на установке и по методике, описанной в работе [3]. Исследования проводились с четырьмя материалами: агломерат, коксик, известняк и щебень. Основные физические характеристики этих материалов приведены в таблице.

Таблица

Физические характеристики исследованных материалов

Материалы	$\gamma_{нас}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\gamma_{каж}$ , кг/м <sup>3</sup>	$tg \alpha$	$\alpha$
Агломерат	1935	3858	0,70	35
Коксик	525	1000	0,78	38
Щебень	1313	2353	0,65	33
Известняк	1452	2469	0,63	32

Первоначально было исследовано влияние на развитие сегрегации угла наклона поверхности откоса к горизонту. Исследованию подвергались все четыре материала одинакового ситового состава, с одинаковыми обобщёнными характеристиками. Жёлобу при проведении исследований придавался угол наклона в 30, 35 и 40 градусов.

При углах наклона жёлоба 30 и 40 градусов наблюдалось соответственно нижнее и верхнее выклинивание материала. При нижнем выклинивании основная масса материала сосредотачивалась в верхней части жёлоба, а при верхнем — в нижней. Если при изучении влияния на сегрегацию исходного ситового состава агломерата масса материала во всех отсеках была примерно одинакова, то при выклинивании отношение масс материала в крайних зонах откоса было равно 3–5. Однако, как показала обработка полученных данных, и при выклинивании распределение материалов на откосе по крупности описывается установленными в работе [3] уравнениями. При этом ситовый состав материалов во всех отсеках подчинялся распределению Вейбулла.

Вместе с тем при прочих равных условиях степень развития сегрегации материала по крупности с увеличением угла наклона образующей откоса понижается, — показатель  $Z$  с увеличением угла откоса уменьшался во всех случаях (рис. 1).

Очевидно, такое изменение показателя сегрегации  $Z$  вызвано различным механизмом формирования слоя на откосе при нижнем и верхнем выклинивании материала.

Механизм формирования слоя на откосе при различных углах наклона жёлоба следующий.

В случае, когда угол наклона жёлоба меньше угла естественного откоса материалов ( $\beta=30^\circ$ ), их движение по жёлобу затруднено. При этом первые порции материала сосредотачиваются в месте его падения на жёлоб, образуя откос с углом наклона поверхности к горизонту, равным углу естественного откоса. В результате

последующие порции материала движутся уже не по поверхности жёлоба, а по поверхности материала. При этом создаются более благоприятные условия для развития сегрегации материала, и крупные куски сосредотачиваются в нижней части жёлоба. Согласно полученным данным, средняя крупность кусков материала у подножия откоса в 3–4 раза превышает его крупность в верхней части (рис. 2).

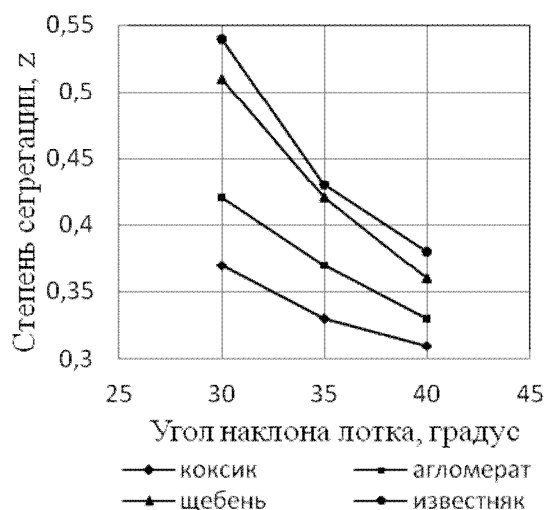


Рисунок 1 Зависимость показателя сегрегации от угла наклона жёлоба

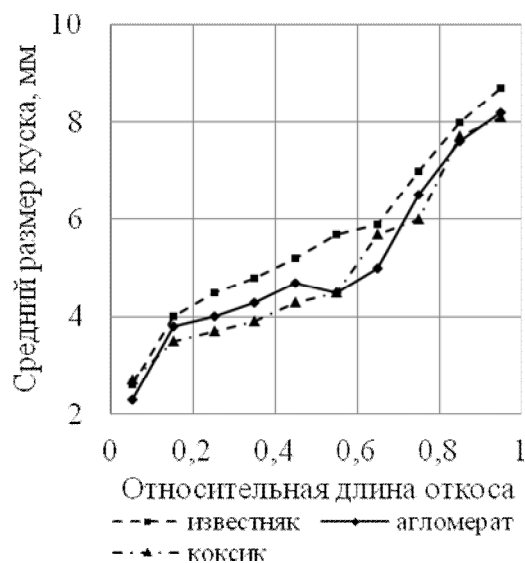


Рисунок 2 Изменение средней крупности материалов по длине откоса при нижнем выклинивании ( $\beta=30^\circ$ )

В случае, когда угол наклона жёлоба больше угла естественного откоса материалов ( $\beta=40^\circ$ ), весь материал первоначально сосредотачивается у подножия откоса и его средняя крупность только в 1,3–1,5 раза выше исходной средней крупности материала. Такое превышение средней крупности кусков у подножия откоса вызвано некоторым развитием сегрегации в объёме первых порций материала, ссыпающихся на жёлоб и частично сегрегацией крупных кусков при загрузке последующих порций материала. В целом по откосу крупность материалов при угле наклона жёлоба  $40^\circ$  распределена более равномерно, — средняя крупность материала у подножия откоса только в 2,5–2,8 раза выше, чем на его вершине (рис. 3).

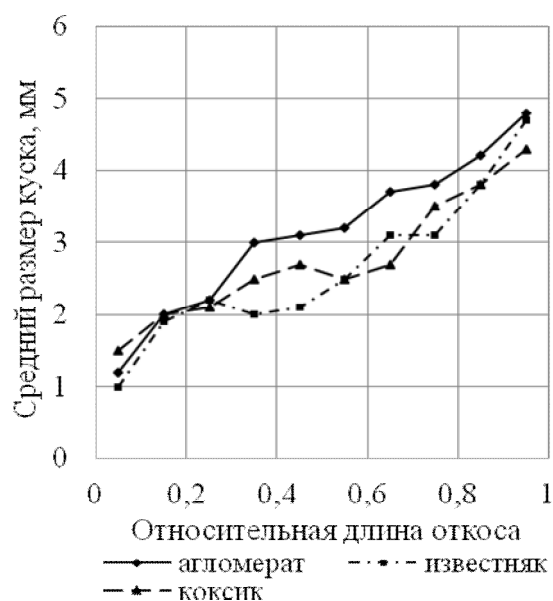


Рисунок 3 Изменение средней крупности материалов по длине откоса при верхнем выклинивании ( $\beta=40^\circ$ )

Влияние на развитие сегрегации неоднородного сыпучего материала протяжённости откоса, его второй важной характеристики, установлено по результатам изучения сегрегации агломератов различного ситового состава при протяжённости откоса (жёлоба) 50, 75 и 100 см и угле наклона жёлоба к горизонту  $35^\circ$ .

По результатам экспериментов установлено, что распределение отдельных фракций агломерата по длине откоса при различной длине жёлоба для всех рассмотренных вариантов ситового состава исследованных агломератов качественно одинаковое. Содержание мелочи (фракции крупностью меньше 1,5 мм) от подножия к вершине откоса во всех случаях возрастало с 0,2–2,0 % до 20–40 %, а содержание крупных кусков (крупностью более 10 мм) снижалось с 9–35 % до 0,8–2,1 %. В средних зонах откоса наблюдалось повышенное содержание промежуточных фракций.

Обработка экспериментальных данных показала, что установленные в предыдущих разделах закономерности сегрегации неоднородного сыпучего материала по откосу сохраняются и при изменении его протяжённости: во всех отсеках ситовый состав материала, так же как и в предыдущих опытах, согласуется с распределением Вейбулла. Распределение обобщённых характеристик ситового состава (среднего размера кусков  $\bar{d}$  и коэффициента вариации их размера  $\nu$ ) по откосу в зависимости от его протяжённости для одного из агломератов представлено соответственно на рисунках 4 и 5. Как видно, при увеличении крупности материалов к подножию их однородность возрастает.

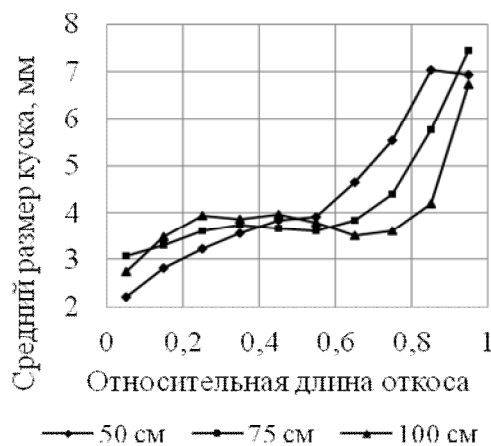


Рисунок 4 Изменение среднего размера кусков по длине откоса при разной его протяжённости

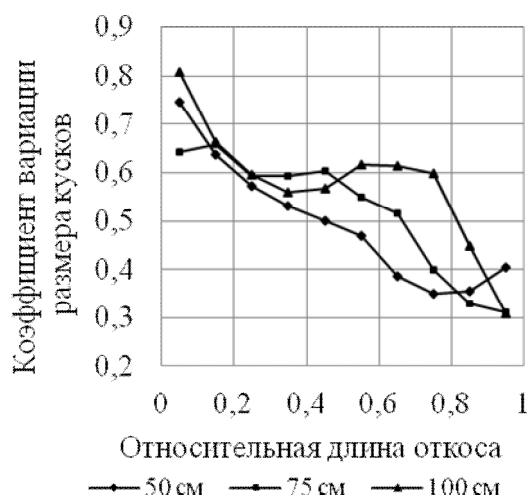


Рисунок 5 Изменение коэффициентов вариации размера кусков по длине откоса при разной его протяжённости

С увеличением длины жёлоба отношение средних размеров кусков в крайних зонах уменьшалось в 1,2–1,3 раза. Одновременно происходило и изменение отношения коэффициентов вариации размера кусков в этих же зонах: с увеличением длины жёлоба оно уменьшалось в 1,3–1,4 раза. При этом показатель развития сегрегации  $Z$  снижается.

Влияние на развитие сегрегации высоты падения материала на откос изучалось по распределению на откосе агломерата при длине жёлоба 50 см и угле его наклона к горизонту  $35^\circ$ . Высота падения агломерата на жёлоб в экспериментах изменялась от 6 см до 22 см с шагом 2 см.

При анализе экспериментальных данных установлено, что общие закономерности распределения материалов по крупности на откосе, изложенные выше, сохраняются и при изменении высоты падения потока. Однако с изменением высоты падения потока степень развития сегрегации материала изменяется.

Из сравнительного анализа полученных результатов следует, что при увеличении высоты падения материала на откос распределение отдельных фракций по его длине становится более равномерным. Если при высоте падения агломерата на от-

кос, равной 6 см, фракция крупностью менее 1,5 мм сосредоточена в верхней части откоса (33,4 % против 0,6 % у подножия), то при высоте падения материала 22 см наблюдается её значительное количество (около 5 %) и у подножия откоса. Крупные же фракции 5–10 и 10–15 мм при высоте падения агломерата 6 см сосредоточены у подножия откоса, — здесь их содержание почти в 8 раз выше, чем на вершине откоса. При увеличении высоты падения агломерата на откос до 22 см содержание крупных фракций у подножия снижается, а на вершине откоса возрастает. Содержание крупных фракций у подножия при этом только в 3,5 раза выше, чем на вершине откоса.

Перераспределение отдельных фракций по откосу, вызванное увеличением высоты падения материала на откос, приводит к изменению распределения по длине откоса обобщённых характеристик ситового состава агломерата. При небольшой ( $h=6$  см) высоте падения потока средняя крупность агломерата у подножия в 3,0 раза выше, чем на вершине откоса (рис. 6).

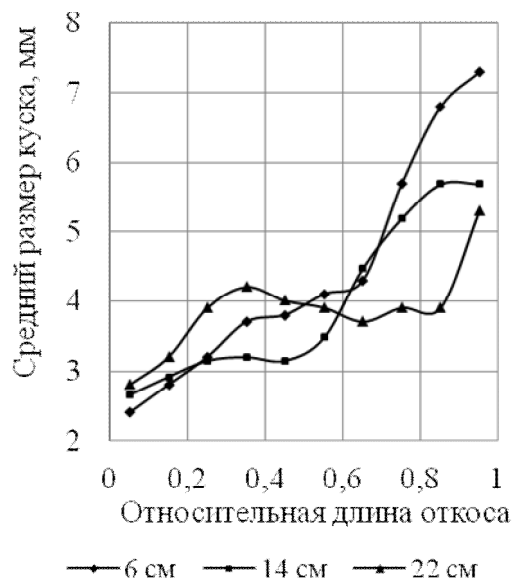


Рисунок 6 Изменение среднего размера кусков по длине откоса при разной высоте падения материала на откос

По мере увеличения высоты падения потока разница между средней крупностью агломерата в крайних зонах уменьшается, и при высоте падения  $h=22$  см крупность кусков у подножия только в 1,8 раза выше, чем на вершине откоса. Таким образом, с увеличением высоты падения потока на откос распределение агломерата по средней крупности кусков на откосе становится более равномерным.

Наблюдавшееся выравнивание ситового состава агломерата по длине откоса, по-видимому, вызвано следующим.

При увеличении высоты падения материала на откос (увеличении кинетической энергии потока) крупные куски частично задерживаются на его вершине и в результате распределяются по длине откоса более равномерно. В то же время часть мелочи верхней зоны в результате неупругого соударения с крупными кусками получает дополнительную энергию и перемещается к подножию откоса, также распределяясь по его длине более равномерно.

Значительное увеличение содержания мелочи в нижней части откоса приводит к повышению неоднородности материала у подножия (рис. 7). Коэффициент вариации размера кусков в нижней половине откоса при увеличении высоты падения потока в 3,5 раза возрастает в среднем в 1,2 раза и приближается к коэффициенту вариации размера кусков исходного ситового состава материала.

В результате количественной оценки степени развития сегрегации агломерата в зависимости от высоты его падения на откос установлено, что с увеличением высоты падения потока сегрегация материала существенно ослабевает. Так, по опытным данным показатель сегрегации  $Z$  при увеличении высоты падения потока в 3,5 раза (с 6 см до 22 см) уменьшился почти в 2 раза (с 0,37 до 0,19).

В целом в результате обработки опытных данных установлено, что взаимосвязь показателя сегрегации  $Z$  с параметрами откоса описывается уравнением вида

$$Z = a \cdot \bar{d}_n \cdot M \cdot \frac{1}{L_1} \cdot \exp(-b \cdot \bar{d}_n \cdot M \cdot \frac{1}{L_2}), \quad (8)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  — комплексные параметры, характеризующие условия формирования откоса, такие как угол наклона поверхности откоса  $\beta$ , его протяжённость  $l_{отк}$  и высота падения материала на откос  $h$ .

Для исследованных материалов и условий проведения опытов эти параметры определялись по уравнениям:

$$\begin{aligned} L_1 &= (\sin \beta)^4 \cdot l_{отк}^{1,5} \cdot (1 + 10h); \\ L_2 &= l_{отк} \cdot (\sin \beta)^2. \end{aligned} \quad (9)$$

При этом численные значения эмпирических коэффициентов  $a$  и  $b$  были соответственно равны 0,014 и 0,026. Анализ всех опытных данных (всего было проведено свыше 100 экспериментов) показал, что уравнение (8) удовлетворительно описывает зависимость показателя сегрегации  $Z$  от условий формирования откоса материалов и учитывает особенность сегрегации различных неоднородных сыпучих материалов. Теснота связи между показателями  $Z$ , рассчитанными по уравнению (8) и полученными в результате обработки соответствующих экспериментальных данных по всем опытам, характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,94.

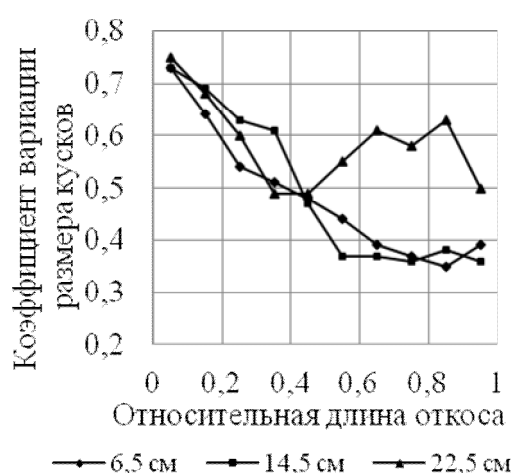


Рисунок 7 Изменение коэффициентов вариации размера кусков по длине откоса при разной высоте падения материала

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В результате проведённых исследований установлено, что на развитие сегрегации неоднородного сыпучего материала оказывают определённое влияние условия формирования откоса. При этом увеличение высоты падения материалов на откос, его протяжённости и угла наклона поверхности к горизонту препятствует развитию сегрегации, а их уменьшение, напротив, способствует развитию сегрегации материалов по крупности на

откосе. Установленные закономерности сегрегации позволяют разрабатывать мероприятия по совершенствованию технологических процессов с учётом влияния основных факторов на распределение материалов на откосе. В частности, полученные зависимости использовались для улучшения распределения шихты на агломашинах АМК. Для широкого использования этих зависимостей необходимо уточнить значения коэффициентов  $a$  и  $b$  уравнения (8) для конкретных условий.

### Библиографический список

1. Петрушов, С. Н. Регулирование сегрегации шихты при укладке на агломашину [Текст] / С. Н. Петрушов, В. А. Лебедев, Л. Ф. Михайлова, А. И. Капуста, Л. М. Рудаков // *Сталь*. — 1983. — № 6. — С. 6–8.
2. Фролов, Ю. А. Исследование сегрегации агломерационных шихт [Текст] / Ю. А. Фролов, С. Г. Братчиков, Е. Е. Заславский, В. Ш. Статников // *Сталь*. — 1974. — № 10. — С. 882–888.
3. Русяков, П. Г. Исследование закономерностей распределения неоднородного сыпучего материала по откосу [Текст] / П. Г. Русяков, И. Ф. Русанов, В. Г. Морозов // *Известия ВУЗов : Чёрная металлургия*. — 1985. — № 6. — С. 15–19.

© Русанов И. Ф.

© Русанова Н. И.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МЧМ ДонГТУ Куберским С. В., зам. нач. ККЦ по технологии филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» Швец Д. В.*

Статья поступила в редакцию 01.03.19.

**к.т.н. Русанов И. Ф., к.ф-м.н. Русанова Н. И. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)**  
**ВПЛИВ УМОВ ФОРМУВАННЯ УКОСУ НА СЕГРЕГАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ**  
**ЗА КРУПНІСТЮ НА ЙОГО ПОВЕРХНІ**

*На підставі експериментальних даних зроблено оцінку впливу фізичних властивостей матеріалів і умов формування укосу (кута нахилу утворюючої укосу, його довжини й висоти падіння матеріалів на нього). Наводиться рівняння, що описує вплив перелічених факторів на показник сегрегації.*

**Ключові слова:** сегрегація, узагальнені характеристики ситового складу, середній розмір шматків, коефіцієнт варіації розміру шматків, умови формування укосу, фізичні властивості матеріалів.

**PhD Rusanov I. F., PhD in Physics and Maths Rusanova N. I. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**  
**INFLUENCE OF SLOPE FORMATION CONDITIONS ON THE SEGREGATION OF**  
**MATERIALS BY SIZE OVER INCLINED SURFACE**

*Based on the experimental data, an assessment was made concerning the influence of physical properties of materials and the slope formation conditions (the angle of inclination of the forming slope, its length, and the height of the materials falling on the slope). An equation describing the effect of these factors on segregation is given.*

**Key words:** segregation, generalized characteristics of the sieve composition, average size of the pieces, size variation coefficient of the pieces, conditions for slope formation, physical properties of materials.

УДК 669.054.83

**Тюляев Д. В.**  
(Филиал № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС», г. Алчевск, ЛНР),  
к.т.н. Куберский С. В.,  
к.т.н. Проценко М. Ю.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

### АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЫЛИ

*Исследованы физико-химические свойства пыли, улавливаемой сухой конвертерной газоочисткой и аспирационными установками кислородно-конвертерного цеха на всех стадиях получения жидкой стали и подготовки её к непрерывной разливке. Предложены наиболее рациональные схемы утилизации конвертерной пыли и пути возвращения её в технологический передел.*

**Ключевые слова:** кислородный конвертер, эвакуация газов, сухая газоочистка, электрофильтр, аспирационная установка, пыль, химический и фракционный состав, рециклинг.

В настоящее время в металлургическом производстве существует две прямо противоположные тенденции. С одной стороны, запасы коксующихся углей неуклонно сокращаются, их цена постоянно растёт; уменьшается добыча природного железорудного сырья, увеличиваются затраты на его обогащение; практически не осваиваются новые месторождения; постоянно растут тарифы на энергоресурсы и железнодорожные перевозки. С другой стороны, возрастают накопленные десятилетиями отходы металлургического, горнодобывающего, машиностроительного и химического производств, а также топливно-энергетического комплекса, которые содержат значительные количества полезных элементов и в первую очередь железа.

Сегодня по объёму и содержанию полезных компонентов техногенные месторождения можно приравнять к месторождениям природных ископаемых. Кроме того, расположение этих отходов вблизи металлургических производств, а также то, что не требуется огромных затрат на их освоение, являются положительными факторами.

Конвертерное производство стали является одним из наиболее ресурсоёмких металлургических переделов и характеризуется образованием большого количества отходов производства, основную долю которых составляют шлаки, шламы и пыль.

Анализ физико-химических свойств этих отходов показывает, что они содержат достаточно большое количество компонентов, полезных не только для различных металлургических переделов, но и для других отраслей промышленности.

Поэтому возвращение этих компонентов в технологический процесс для полной или частичной замены традиционного сырья является важной научно-технической задачей. Особенно актуальными вопросы утилизации и повторного использования отходов являются в современных условиях, характеризующихся повышенным дефицитом основных сырьевых материалов, а также ухудшением экологической обстановки ввиду складирования и хранения различных техногенных материалов.

Эффективность решения данной проблемы зависит от двух основных составляющих. С одной стороны, переработка и утилизация отходов и использование их в виде относительно дешёвого металлургического сырья даст значительное снижение затрат на шихту, позволит повысить качество и конкурентоспособность продукции, а также снизить её себестоимость. С другой стороны, очистка целых регионов, где скопились огромные техногенные месторождения отходов, а также утилизация текущих накоплений отходов от вышеперечис-

ленных производств в итоге позволит решить актуальные экологические проблемы.

Поэтому цель данной работы заключалась в определении технологической ценности пыли, образующейся на различных этапах технологии получения жидкой стали.

На металлургических предприятиях с технологией сухой очистки конвертерных газов образуется много пыли, количество которой зависит от режимов продувки в конвертере, химического и гранулометрического составов шихтовых и шлакообразующих материалов и составляет 13–32 кг/т [1].

В работе [2] установлена зависимость количества пыли в конвертерных газах от метода проведения продувки, времени присадки извести и начала вспенивания шлака и показано, что меньше всего пыли выносятся в том случае, если шлак вспенивается примерно через 60 % времени от начала продувки и если присадки извести осуществляют несколькими порциями по её ходу. На крупность и состав пыли существенное влияние оказывает способ отвода газа из конвертера: при доступе воздуха и горении конвертерных газов или без доступа воздуха.

Масса металлических частиц в газах может достигать 1–1,5 % от садки плавильного агрегата.

В результате окисления  $\text{FeO}$  до  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  при отводе газов с дожиганием развиваются высокие температуры. Пылевидные частицы имеют чёрно-бурый цвет и различную крупность. Количество частиц размером меньше 0,5 мкм составляет примерно 20 %, 0,5–1 мкм — 65 % и >1 мкм — 15 % [2]. В ходе продувки химический состав пыли изменяется. При переработке низкофосфористых чугунов содержание железа в пыли возрастает с 50 до 70 %, содержание  $\text{CaO}$  находится в пределах 5–14 %,  $\text{SiO}_2$  — 0,7–3 %, фосфора — 0,16–0,3 %, серы — 0–0,12 %. Наибольшее количество пыли выделяется примерно в середине продувки. При отводе газов без доступа воздуха пылевые частицы имеют в основном серый цвет и более крупные размеры.

В кислородно-конвертерном цехе (ККЦ) филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС»

реализована технология сухой очистки газов, образующихся в процессе продувки стали в кислородных конвертерах (КК) комбинированного дутья. Продувка осуществляется без дожигания отходящих газов, с дожиганием  $\text{CO}$  на выходе из дымовой трубы — «на свече».

Главное преимущество сухой очистки состоит в том, что пыль улавливается в сухом виде, поэтому отпадает надобность в устройстве сложного шламового хозяйства. Для сухой электростатической очистки не требуется большого расхода электроэнергии. Сухие газы или продукты сгорания должны пройти предварительную обработку для повышения электрической проводимости пыли. Обработка заключается в повышении влажности газа увлажнением пыли и поддержании соответствующей температуры. Для увлажнения используется скруббер с форсунками тонкого распыливания [2]. Скруббер предназначен для снижения температуры конвертерного газа, предварительной очистки конвертерного газа от крупных частиц пыли, а также кондиционирования газов, поступающих в электростатический фильтр. Предварительно очищенный в скруббере газ по газоходу поступает в четырёхпольный электрофильтр. Электростатический фильтр (ЭСФ) предназначен для окончательной очистки отходящих конвертерных газов перед попаданием вжигающее устройство. Внутри электрофильтра параллельно ходу газа располагаются рамы с заземлёнными на корпус осадительными электродами, образующими проходы (коридоры), по которым движутся отходящие газы. По центру проходов между осадительными электродами подвешиваются на изоляторах коронирующие (разрядные) электроды. Каждая группа осадительных и коронирующих электродов образует отдельное электрическое поле [2]. В каждом поле электрофильтра установлены механизмы встряхивания осадительных и коронирующих электродов, которые обеспечивают утилизацию осевшей пыли из ЭСФ в бункер-накопитель для последующего её вывоза.

Помимо основной газоочистки имеется ряд аспирационных установок, обеспечивающих пылеулавливание на всех стадиях организации производства стали:

– установка очистки газа неорганизованных выбросов конвертеров № 1 и № 2 предназначена для улавливания, транспортировки и очистки пылегазовоздушной смеси, образующейся на разных стадиях технологического процесса производства стали в конвертерах № 1, № 2. Насыщенные пылью газы собираются вытяжными колпаками над конвертерами в зонах завалки лома, заливки чугуна, слива стали и барботажных стенов внепечной обработки стали;

– установка очистки газа отделения перелива, десульфурации чугуна и скачивания шлака предназначена для очистки пылегазовоздушной смеси, улавливаемой в зонах перелива чугуна из чугуновозных ковшей в заливочные ковши, десульфурации чугуна и скачивания шлака;

– установка очистки газа отделения подачи сыпучих и ферросплавов (ФС) предназначена для очистки запылённой пылегазовоздушной смеси, удаляемой от бункеров в местах загрузки, от укрытий в местах перегрузки и выгрузки сыпучих и ферросплавов в конвертеры и сталеразливочные ковши;

– установка очистки газа отделения хранения сыпучих и ферросплавов предназначена для очистки запылённой пылегазовоздушной смеси, удаляемой от укрытий мест перегрузки и выгрузки материалов участка хранения сыпучих и ферросплавов, а также узла грохочения извести;

– установка очистки газа агрегата ковш-печь (АКП) предназначена для очистки газов, поступающих из двух областей всасывания: первичного отходящего газа

из двух позиций АКП и запылённого воздуха, поступающего из установки подачи ферросплавов и легирующих присадок в ковши.

Очистка газа в первых двух установках осуществляется посредством двухрядного рукавного фильтра с импульсной регенерацией; в трёх последних установках — посредством рукавного фильтра с импульсной регенерацией. Удаление и транспортировка уловленной пыли из бункеров фильтра осуществляется системой механической транспортировки в сборный бункер-накопитель каждой установки.

Для определения технологической ценности пыли, образующейся на различных этапах производства жидкой стали были отобраны её пробы и проанализированы в центральной лаборатории и ККЦ с использованием стандартных методик и оборудования.

Удельное образование пыли в аспирационных установках ККЦ, а также её химический и фракционный составы представлены в таблицах 1–3.

Необходимо отметить, что большая часть пыли имеет размер до 0,4 мм, что способствует её рассеиванию ветром при хранении на открытых площадях. Кроме того, пыль практически не поддаётся смачиванию, что также усложняет её транспортировку и хранение. Поэтому даже простой перевод пыли в компактное состояние посредством спекания, брикетирования и т. д. обеспечивает значительный экологический эффект [2].

По состоянию на начало 2019 г. на шламоотвалах предприятия скопилось около 50 тыс. т пыли, полученной с аспирационных установок ККЦ. Доля и фракционный состав пыли со всех газоочисток (ГО) конвертерного цеха приведены на рисунке.

Таблица 1

Удельное образование пыли на различных участках технологии, кг/т

скруббер (крупная)	ЭСФ (мелкая)	неорганизованные выбросы КК	перелив и десульфурация чугуна	подача сыпучих и ФС к КК	выгрузка и хранение сыпучих и ФС	АКП
5,0–7,9	11,5–14,1	0,5–1,1	0,5–1,8	0,6–1,5	0,3–1,4	0,1–0,3

**МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

Таблица 2

Фракционный состав пыли, образующейся на различных участках технологии, %

Фракция пыли	скруббер (крупная фракция)	ЭСФ (мелкая фракция)	неорганизованные выбросы КК	перелив и десульфурация чугуна	подача сыпучих и ФС к КК	выгрузка и хранение сыпучих и ФС	АКП
<0,1 мм	9,6	20,7	18,8	2,5	10,1	4,9	17,9
0,1–0,2 мм	26	18	65,7	22,5	82,0	89,0	37,8
0,2–0,4 мм	44	41	12,2	68,2	7,5	4,7	35,6
0,4–0,5 мм	6	12	1,2	2,2	0,1	0,2	4,7
0,5–1,0 мм	12	8	1,5	3,2	0,1	0,5	3,2
1,0–1,6 мм	2	0,1	0,5	1,2	0,2	0,7	0,7
>1,6 мм	0,4	0,2	0,1	0,2	0	0	0,1

Таблица 3

Химический состав пыли, образуемой на различных участках технологии

Компонент пыли	Участок образования пыли и содержание в ней основных компонентов, %						
	скруббер (крупная фракция)	ЭСФ (мелкая фракция)	неорганизованные выбросы КК	перелив и десульфурация чугуна	подача сыпучих и ФС к КК	выгрузка и хранение сыпучих и ФС	АКП
Fe <sub>общ.</sub>	55,2	54,2	34,7	58,7			21,7
Fe <sub>мет.</sub>	25,8	6,8	1,1	1,7			0,7
FeO	28,0	19,3	8,0	9,6			2,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,0	46,8	39,1	70,9	5,4	3,9	28,2
SiO <sub>2</sub>	2,9	2,6	4,9	1,9	7,9	5,2	8,6
CaO	23,4	13,8	19,7	5,7	51,8	51,5	21,5
MgO	3,4	2,0	3,2	2,1	6,3	5,2	12,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5	0,4	1,7	0,4	3,2	3,6	3,9
MnO	0,4	0,6	0,8	0,2	8,9	3,4	5,3
TiO <sub>2</sub>	0,05	0,03	0,09	0,03	0,08	0,06	0,11
P	0,09	0,05	0,05	0,03	0,05	0,03	0,02
S	0,13	0,18	0,55	0,57			2,21
Zn	0,28	0,65	4,30	0,31			2,00
Pb	0,06	0,08	0,43	0,02			0,20
K <sub>2</sub> O	0,12	0,45	1,08	0,18	0,22	0,23	2,46
Na <sub>2</sub> O	0,21	0,41	0,76	0,18	0,28	0,31	2,92

Анализ представленных в таблицах 1–3 данных показывает, что удельное образование пыли с аспирационных установок ККЦ составляет 21,9–26,8 кг/т, а содержание общего железа в смеси пыли (с учётом удельного образования) находится в пределах 46,3–50,9 %.

Преимущества и недостатки пыли, образующейся на различных участках технологической цепочки производства жидкой стали, представлены в таблице 4.

На основании результатов химического анализа пыли можно условно разделить на две основные группы — железосодержащая

и известковая. В состав всей пыли, кроме участка сыпучих, входят цинк и свинец, содержание которых увеличивается с повышением доли лома в шихте конвертерной плавки и имеет тенденцию к накоплению [3].

По физическим характеристикам железосодержащую пыль можно использовать в агломерационном производстве. Однако ввод пыли в агломерационную шихту необходимо ограничивать, так как вторичное использование цинксодержащих материалов приводит к накоплению цинка в футеровке доменных печей и ускорению её разрушения [4]. Известковая пыль с участков выгрузки, хранения и транспортировки сыпучих и ферросплавов ввиду отсутствия цинка и свинца может быть использована для закладки в штабель.

Цинк и свинец, так или иначе, всегда содержатся в металлоломе — обязательной части шихты конвертерного производства, и внесение этих элементов в ходе рециклинга железосодержащей пыли не приведёт к существенному изменению хода конвертерной плавки [3]. Ввиду повышенного содержания  $MgO$  в пыли АКП и  $CaO$  в пыли газоочисток сыпучих рационально их использование (после придания компактной формы путём окомкования, брикетирования и т. д.) в качестве флюсующих добавок при выплавке стали.

Известковая пыль также может быть опробована для теплоизоляции зеркала чу-

гуна в заливочном ковше, а также стали в сталеразливочном ковше после обработки на АКП или в промежуточном ковше при разливке на МНЛЗ.

Таким образом, в результате проведённых исследований проанализированы образцы пыли, образующейся на основных участках технологической цепочки производства жидкой стали, определены её удельное количество, фракционный и химический состав, показаны основные преимущества и недостатки пыли различных источников образования, а также предложены рекомендации по утилизации и повторному использованию этого вида технологических отходов.

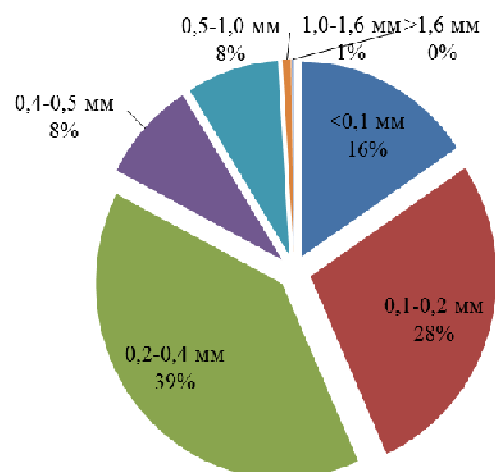


Рисунок Фракционный состав смеси пыли со всех ГО ККЦ

Таблица 4

Качественная характеристика пыли, образующейся на различных участках технологии

Технологический участок	Преимущества	Недостатки
скруббер (крупная фракция)	$Fe_{общ} > 55 \%$ , $Fe_{мет} > 25 \%$	$S=0,13 \%$ , $P=0,09 \%$ , $Zn=0,28 \%$ , $Pb=0,06 \%$
ЭСФ (мелкая фракция)	$Fe_{общ} \approx 55 \%$	$Fe_{мет} < 10 \%$ , $S=0,18 \%$ , $P=0,05 \%$ , $Zn=0,65 \%$ , $Pb=0,08 \%$
неорганизованные выбросы КК		$Fe_{мет} < 2 \%$ , $P=0,05 \%$ , $Zn=4,3 \%$ , $Pb=0,43 \%$
перелив и десульфурация чугуна	$Fe_{общ} > 55 \%$	$Fe_{мет} < 2 \%$ , $P=0,05 \%$ , $Zn=0,31 \%$
подача сыпучих и ФС к КК	$CaO \approx 50-55 \%$ , отсутствие $S$ , $Zn$ , $Pb$	$Fe$ ( $Fe_2O_3=3-6 \%$ )
выгрузка и хранение сыпучих и ФС		
АКП	$MgO > 12 \%$ , $CaO > 20 \%$	$S=2,2 \%$ , $Zn=2,0 \%$ , $Pb=0,2 \%$

С целью практической оценки возможности утилизации всей пыли газоочисток ККЦ планируется проведение опытных плавов и изучение:

– влияния введения брикетов/окатышей из железосодержащей пыли на технологи-

ческие параметры и химический состав продуктов конвертерной плавки;

– возможности использования известковой пыли в качестве теплоизолирующей смеси для сталеразливочных и промежуточных ковшей.

### Библиографический список

1. Santanur, K. R. *Evaluation of Dust Generated from Basic Oxygen Furnace Steel Making [Text]* / K. R. Santanur, Gautam Chattopadhyay & Asim K. Ray // *Journal of the Air & Waste Management Association*. — 1997. — 47 (6). — P. 716–721.
2. Бережинский, А. И. *Утилизация, охлаждение и очистка конвертерных газов [Текст]* / А. И. Бережинский, П. С. Хомутинников. — М. : Металлургия, 1967. — 216 с.
3. Mihok, L. *Recycling of oxygen converter flue dust into oxygen converter charge [Text]* / L. Mihok, D. Baricova // *Metalurgija* / — 2003. — 42 (4). — P. 271–275.
4. Меламуд, С. Г. *Разработка технологии переработки цинксодержащих пылей металлургического производства [Текст]* / С. Г. Меламуд, В. В. Шатилло, В. А. Мальцев, Б. П. Юрьев // *Сталь*. — 2012. — № 8. — С. 78–81.

© Тюляев Д. В.

© Куберский С. В.

© Проценко М. Ю.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М., зам. нач. ККЦ по технологии филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» Швец Д. В.**

Статья поступила в редакцию 04.03.19.

**Тюляев Д. В.** (Філія № 12 ЗАТ «ВНЕШТОРГСЕРВИС», м. Алчевськ, ЛНР),  
**к.т.н. Куберський С. В., к.т.н. Проценко М. Ю.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

### АНАЛІЗ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЦІННОСТІ КОНВЕРТЕРНОГО ПИЛУ

Досліджено фізико-хімічні властивості пилу, уловлюваного системою конвертерного газоочищення сухого типу і аспіраційними установками киснево-конвертерного цеху на усіх стадіях отримання рідкої сталі і підготовки її до безперервного розливання. Запропоновано найбільш раціональні схеми утилізації конвертерного пилу і шляхи повернення його в технологічний переділ.

**Ключові слова:** кисневий конвертер, евакуація газів, сухе газоочищення, електрофільтр, аспіраційна установка, пил, хімічний і фракційний склад, рециклінг.

**Tyulyaev D. V.** (Branch № 12 of CJSC “VNESHTORGSERVIS”, Alchevsk, LPR),  
**PhD Kuberskiy S. V., PhD Protsenko M. Yu.** (DonSTU, Alchevsk, LPR)

### ANALYSIS OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES AND TECHNOLOGICAL VALUE OF CONVERTER DUST

The physicochemical properties were investigated of the dust captured by dry converter gas cleaning plant and aspiration plants of the oxygen converter shop at all stages of producing liquid steel and preparing it for continuous casting. The most rational schemes for the recovery of converter dust and ways to return it to the technological process have been proposed.

**Key words:** oxygen converter, gas evacuation, dry gas cleaning, electro-filter, aspiration plant, dust, chemical and fractional composition, recycling.

УДК 669.187.2:536.24

к.т.н. Кухарев А. Л.  
(Стахановский учебно-научный институт  
ЛНУ им. В. Даля, г. Стаханов, ЛНР)

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В РАСПЛАВЕ МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПРИ УЧЁТЕ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ

*Приведена математическая модель и результаты численных исследований тепловых процессов в ванне расплава шестиэлектродной дуговой сталеплавильной печи ёмкостью 180 т при питании её постоянным током 80 кА. Для предложенной конструкции печи на основании анализа полученных графиков распределения скорости движения и температуры расплава показано, что электровихревые течения доминируют над естественной конвекцией, что обеспечивает удовлетворительные условия распределения температуры в объёме расплава.*

**Ключевые слова:** дуговая сталеплавильная печь, магнитная гидродинамика, теплоперенос.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Для современных электрометаллургических агрегатов, работающих с большим объёмом жидкого металла, одной из важнейших задач является эффективное перемешивание расплава, способствующее повышению интенсивности теплопереноса, а также его температурной и химической гомогенизации. Наряду с применением перемешивания расплава за счёт его продувки различными газами в настоящее время также используются электромагнитные способы перемешивания, основанные на различных магнитогидродинамических эффектах [1–3].

В работах [3, 4] показано, что для высокомошных многоэлектродных электропечных установок, в которых токи в электродах достигают 50–150 кА, для перемешивания целесообразно использовать электровихревые течения (ЭВТ), обусловленные взаимодействием протекающего в расплаве электрического тока с собственным магнитным полем.

Однако до настоящего времени большинство известных работ в области ЭВТ и теплообмена в расплаве печей было направлено на изучение процессов, протекающих в двух- и трёхэлектродных печах [1, 2, 5, 6]; в то же время процессы, протекающие в шестиэлектродных печах с различным расположением сводовых и

подовых электродов, всё ещё являются малоизученными [2, 3]. Также для интенсификации теплообмена при ЭВТ актуальными являются вопросы выбора рода питающего тока (постоянный ток, синусоидальный ток низкой частоты, ток сложной формы).

**Постановка задачи.** Задачей данной работы является разработка математической модели и численное исследование процессов теплопереноса в ванне расплава шестиэлектродной дуговой печи при её питании постоянным током с учётом электровихревых и естественно-конвективных течений.

**Изложение материала и его результаты.** В работах [3, 4] предлагается усовершенствованная конструкция дуговой печи, которая отличается от обычных трёхэлектродных печей тем, что дополнительно содержит три подовых электрода, причём угол между смежными осями сводовых и подовых электродов составляет 60°. Такая компоновка электродов в ванне, как показано в работе [7], при питании постоянным током или током низкой частоты (0,01–1 Гц) обеспечивает подавление скин-эффекта и улучшение равномерности распределения электромагнитных сил (сил Лоренца) в расплаве.

В качестве объекта моделирования была принята дуговая сталеплавильная печь с ванной цилиндросфероконической формы

ёмкостью 180 т. Геометрическая модель и профиль ванны представлены на рисунке 1. Там же указаны основные геометрические размеры ванны.

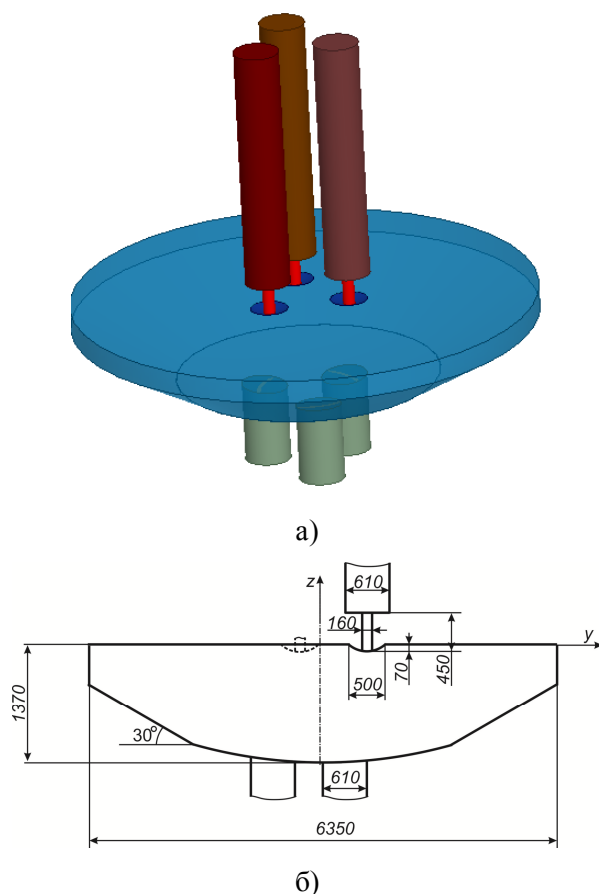


Рисунок 1 Геометрическая модель ванны печи:  
а) общий вид; б) профиль ванны  
в направлении оси  $Y$

При построении модели считалось, что весь металл находится в расплавленном состоянии (заключительный период плавки), поэтому влияние футеровки на теплоперенос не учитывалось. Электрические дуги представлялись в модели однородными цилиндрическими проводниками, располагаемыми в центрах поперечного сечения соответствующих сводовых электродов. Также предполагалось наличие вогнутых менисков в области расплава под электрическими дугами. Шлаковый слой в модели не учитывался, электроды и дуги учитывались только при расчёте электро-

магнитного поля [7]. В гидродинамических и тепловых расчётах влияние электрических дуг учитывалось посредством введения соответствующих граничных условий в области менисков. Расчёт проводился в пакете Ansys, расчётная сетка для ванны печи состояла из 1,5 млн тетрагональных элементов, причём дополнительное сгущение сетки было выполнено в области сводовых и подовых электродов.

При разработке математической модели в качестве основного допущения принято безындукционное магнитогидродинамическое приближение, при котором рассматриваемые процессы описываются системой уравнений магнитной гидродинамики [2, 5, 6], при этом не учитываются химические реакции, а среды в пределах выделенных зон считаются однородными, изотропными и немагнитными. Также не учитывается перенос магнитного поля потоком электропроводной жидкости, что позволяет производить электромагнитные и гидродинамические расчёты отдельно [2, 5]. Ввиду различных особенностей ведения технологического процесса в печах на данном этапе не учитывался теплообмен между шлаком и расплавом, а также влияние топливно-кислородных горелок. Так как при предварительных оценках для режима электровихревого течения расплава критерий Рейнольдса составляет величину порядка  $10^4$ – $10^5$ , для описания турбулентности используем  $k-\varepsilon$ -модель, которая при её относительной простоте обеспечивает наиболее близкие к экспериментальным данным распределения скоростей [2, 5, 6]. При принятых допущениях базовые уравнения модели имеют вид:

– уравнение энергии:

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = -\rho C_p (\vec{v} \cdot \nabla T) + \lambda \nabla^2 T + Q; \quad (1)$$

– уравнение Навье – Стокса:

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla p + \eta \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g} + \vec{F}; \quad (2)$$

– уравнение неразрывности потока:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0; \quad (3)$$

– уравнения  $k - \varepsilon$ -модели турбулентности:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} k) = \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}; \quad (5)$$

– уравнение Колмогорова – Прандтля:

$$\eta_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad (6)$$

– уравнение для турбулентной теплопроводности:

$$\lambda_T = \frac{C_p \eta_T}{Pr_T}; \quad (7)$$

– уравнение состояния для описания зависимости плотности от температуры:

$$\rho = \rho_0 (1 - \beta(T - T_0)), \quad (8)$$

где переменные модели:  $\vec{v}$  — скорость движения расплава, м/с;  $p$  — давление, Па;  $T$  — температура, К;  $\eta_s = \eta + \eta_T$  — эффективный коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $\lambda_s = \lambda + \lambda_T$  — эффективный коэффициент теплопроводности расплава, Вт/(м·К);  $k$  — турбулентная кинетическая энергия, м<sup>2</sup>с<sup>-2</sup>;  $\varepsilon$  — диссипация кинетической энергии турбулентности, м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>;  $G_k$  — специфическая генерация турбулентности от средних градиентов скорости;  $G_b$  — специфическая генерация турбулентности от силы Архимеда;  $C_{3\varepsilon}$  — коэффициент, зависящий от направлений потока и гравитационной силы. Силы Лоренца в расплаве  $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$  и плотность джоулевого нагрева  $Q = |\vec{J}|^2 / \sigma$  определялись на основании расчёта электромагнитного поля при силе тока в электродах 80 кА [7], а характеристики электрических дуг — на основании численного решения уравнения Эленбааса – Геллера [8].

Постоянные параметры модели, определяемые свойствами расплава жидкой стали и постоянными модели турбулентности, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Постоянные параметры модели

Параметр	Обозначение	Единица измерения	Значение
Плотность	$\rho_0$	кг/м <sup>3</sup>	6900
Характерная температура	$T_0$	К	1900
Коэффициент динамической вязкости	$\eta$	Па·С	0,007
Коэффициент молекулярной теплопроводности	$\lambda$	Вт/(м·К)	35
Теплоёмкость	$C_p$	Дж/(кг·К)	792
Коэффициент объёмного расширения	$\beta$	К <sup>-1</sup>	0,00014
Турбулентное число Прандтля	$Pr_T$		0,85
Постоянные модели турбулентности	$C_{1\varepsilon}$		1,44
	$C_{2\varepsilon}$		1,92
	$C_\mu$		0,09
	$\sigma_\varepsilon$		1,0
	$\sigma_k$		1,44

В нашем случае моделирование гидродинамических и тепловых процессов проводилось совместно, при этом использовались граничные условия (ГУ), приведённые в таблице 2. Отметим, что в мощных дуговых печах в ходе плавки формируют шлаковый слой, покрывающий верхнюю поверхность расплава; таким образом, на этой поверхности применялось условие теплоизолированности.

Следует отметить, что по сравнению с имеющимися моделями [2, 5, 6] предложенная модель за счёт наложения соответствующих граничных условий и учёта гравитационных сил более точно описывает тепловые режимы работы в расплаве дуговых печей. Верификация данной модели

выполнена путём сопоставления результатов расчёта с данными экспериментов, полученных на разработанной нами многоэлектродной установке [9], а также на экспериментальной установке в Объединённом институте высоких температур РАН [5]. Отмечено удовлетворительное качественное и количественное совпадение результатов расчёта скорости течения и температуры, причём среднее отклонение экспериментальных данных от расчётных не превышает 9 %.

На основании уравнения энергии (1) теплоперенос в расплаве осуществляется за счёт конвекции, эффективной теплопроводности и выделения джоулевой теплоты. Рассмотрим эти эффекты.

Таблица 2

Граничные условия

Наименование поверхности	Накладываемые ГУ	
	Гидродинамические	Тепловые
Нижняя и боковая стенки ванны	Условие прилипания: $v=0$	Условие первого рода $T_z=1900$ К
Области менисков электрических дуг	Условие прилипания: $v=0$	Условие второго рода $q_z=6,43 \cdot 10^7$ Вт/м <sup>2</sup> [8]
Верхняя поверхность расплава	Условие прилипания: $v=0$	Условие теплоизолированности: $q_z=0$

Результаты моделирования конвективных течений в отдельных сечениях ванны приведены на рисунке 2, где чёрными сплошными линиями показаны линии циркуляции расплава (линии тока), а стрелками — векторы скорости.

Как видно из рисунков, поле скорости в расплаве достаточно сложное. В зоне под электрическими дугами формируются мощные струи расплава, направленные под углом приблизительно 20° (относительно осей электрических дуг) к подине печи (рис. 2, а). Ширина этих струй в средней по глубине части ванны составляет около 800 мм. Максимальная скорость в струе расплава достигает 2,1 м/с. В нижней части ванны расплав растекается к периферии со скоростями 0,2–0,5 м/с. Далее

расплав медленно ( $v < 0,2$  м/с) поднимается на поверхность на участке приблизительно 1900 мм от оси ванны и направляется к соответствующей области дуги, где вновь вовлекается электромагнитными силами вглубь ванны. Обозначим это течение как первый контур циркуляции расплава.

В областях между электрическими дугами формируются восходящие вихревые потоки с максимальной скоростью вблизи подовых электродов (0,5–0,7 м/с). Ширина струи восходящего течения в средней части ванны составляет около 1200 мм. Отчётливо наблюдается второй контур циркуляции, в котором расплав вблизи оси ванны движется вверх, а на поверхности медленно растекается к периферии.

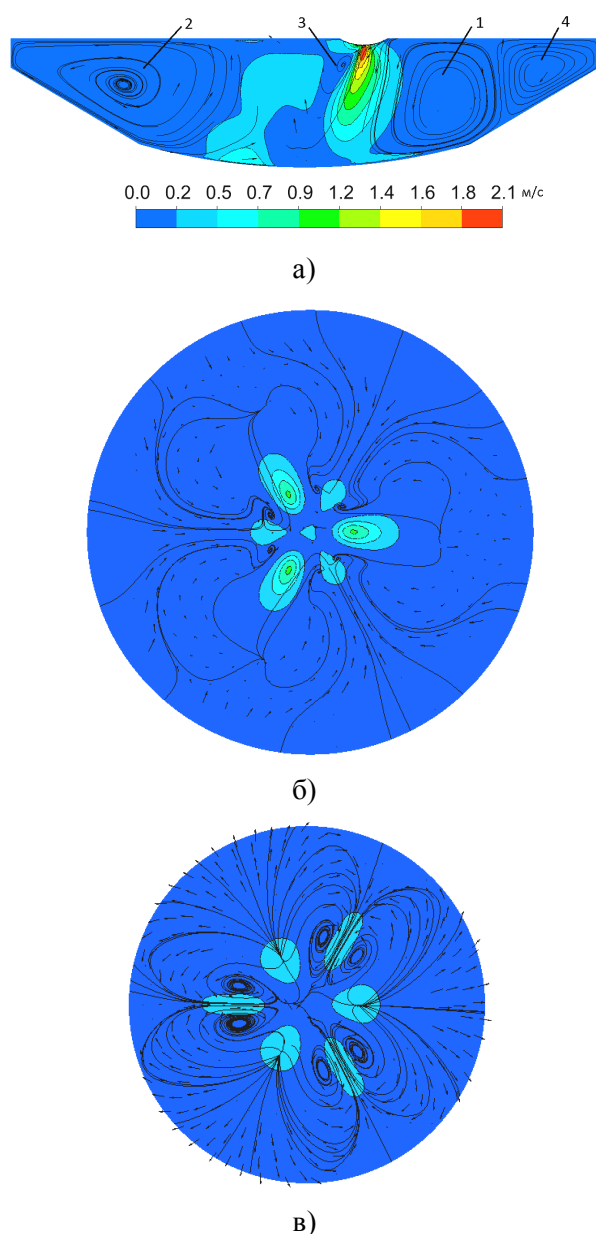


Рисунок 2 Распределение скорости:  
 а) в вертикальном сечении (вдоль оси  $Y$ );  
 б) в горизонтальном сечении при  $Z = -715$  мм;  
 в) в горизонтальном сечении при  $Z = -1120$  мм;

Кроме того, в районе пятна дуги между первым и вторым контуром имеется малый вихрь, движущийся в противоположную сторону относительно первого контура циркуляции (рис. 2, а). Под электрической дугой течение в этом контуре направлено вниз, но уже примерно в середине ванны оно разворачивается вверх под действием течения второго вихря. На поверхности

расплава его движение направлено от электрических дуг к центру ванны с максимальной скоростью около 0,5–1 м/с непосредственно под мениском дуги.

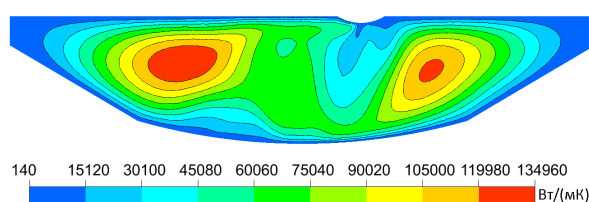
Вблизи боковой стенки печи (рис. 2, а, справа) также имеется четвёртый контур циркуляции расплава, движущийся в противоположную сторону относительно первого контура, в котором скорости циркуляции  $v < 0,2$  м/с.

Кроме вихревых структур, циркулирующих в вертикальных сечениях, обнаружено три пары горизонтальных вихрей, циркулирующих в областях над подовыми электродами (рис. 2, в). Причём эти пары горизонтальных вихрей вытянуты вдоль линий, соединяющих центр ванны и оси подовых электродов.

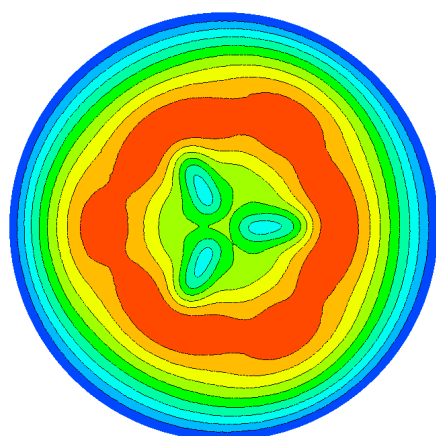
Следует отметить, что при принятых ГУ сопоставление расчётов, выполненных с учётом и без учёта гравитационных сил, показало, что естественная конвекция не оказывает существенного влияния на характер течения расплава в центральной области ванны. В основном учёт сил гравитации проявляется в некотором увеличении скорости восходящего потока второго контура (приблизительно на 5–15 %) и появлении четвёртого контура циркуляции вблизи боковой стенки.

При анализе графиков распределения эффективной теплопроводности (рис. 3) показано, что её значения зависят от степени завихренности потока, количественной мерой которой служит ротор скорости.

Как видно из рисунка 3,а, максимумы эффективной теплопроводности находятся вблизи центров первого и второго контура циркуляции, при этом максимальные значения  $\lambda_e$  составляют около 135000 Вт/(м·К). Таким образом, на этих участках эффективная теплопроводность превышает молекулярную более чем в 3000 раз. Из рисунка 3,б также видно, что область высоких значений эффективной теплопроводности формируется за электродами вдоль окружности с диаметром около 1400 мм, что также способствует эффективному теплопереносу.



а)



б)

Рисунок 3 Распределение эффективной теплопроводности:

- а) в вертикальном сечении (вдоль оси  $Y$ );  
б) в горизонтальном сечении при  $Z = -715$  мм

Что касается джоулева тепловыделения, то ввиду его малых значений ( $\sim 1 \cdot 10^5$  Вт на ванну) оно не оказывает на теплоперенос существенного значения, что обусловлено достаточно большой удельной проводимостью расплава стали [7].

Результаты моделирования распределения температуры в отдельных сечениях ванны приведены на рисунках 4 и 5.

Как видно из рисунков, в ванне печи можно выделить две области, отличающиеся диапазоном температур. Первая область — это зона воздействия электрических дуг на расплав (рис. 4), в которых температуры достигают 4800 К за счёт воздействия плазмы дуги, причём высокие температуры расположены на участках менисков, обращённых к периферии ванны, что, по всей видимости, обусловлено худшими условиями теплообмена на этих участках. В центральной части менисков значения температуры составляют 2900–2600 К.

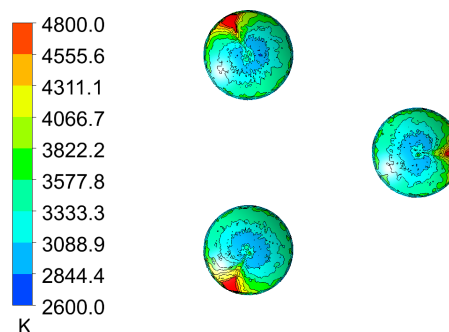
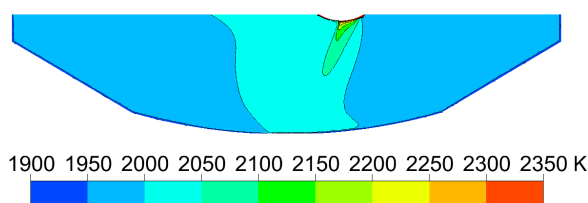
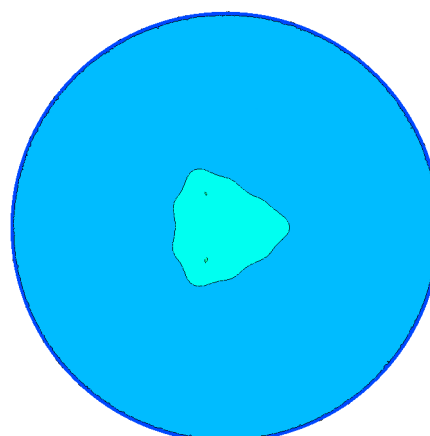


Рисунок 4 Распределение температуры в областях воздействия электрических дуг на расплав



а)



б)

Рисунок 5 Распределение температуры в сечениях ванны:

- а) в вертикальном сечении (вдоль оси  $Y$ );  
б) в горизонтальном сечении при  $Z = -715$  мм

В остальной части расплава значения температур составляют от 2350 К до 1900 К. Из рисунка 5,а видно, что наибольшие значения температур находятся в центре ванны под электрическими дугами и обусловлены движением расплава по описанным ранее траекториям. Чётко наблюдается вынос температуры струёй перегретого рас-

плава от электрической дуги вглубь ванны. Далее тепловая энергия электрических дуг рассеивается при движении расплава вдоль линий скорости. Минимальная температура характерна для участков, непосредственно находящихся вблизи боковых стенок ванны, т. е. в зонах с низкой скоростью движения расплава. Отметим, что в основной области ванны перегрев расплава относительно температуры стенки составляет приблизительно 50 К и выше.

В горизонтальном сечении (рис. 5, б), находящемся приблизительно в средней по глубине части ванны печи, разность средней температуры в сечении и температуры стенки  $\Delta T_{cp}$  не превышает 75 К.

Для анализа процессов теплопереноса и температурной гомогенизации расплава произведена численная оценка некоторых интегральных показателей и некоторых критериев подобия, приведённых в таблице 3.

Коэффициент вариации температуры в объёме расплава определялся соотношением

$$\kappa_{var} = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - T_{cp})^2}}{T_{cp}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где  $T_i$  — температура в  $i$ -м элементе расчётной сетки, К;  $N$  — количество элементов расчётной сетки;  $T_{cp}$  — средняя по объёму температура расплава, К, которая рассчитывается путём деления суммы произведения температуры элемента и объёма элемента на общий объём ванны  $V_{\theta}$ :

$$T_{cp} = \frac{1}{V_{\theta}} \sum_{i=1}^N T_i V_i. \quad (10)$$

Аналогично данной формуле рассчитывались соответствующие усреднённые по объёму показатели теплообмена, которые сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Показатели теплопереноса в объёме расплава

Параметр	Значение
Средняя по объёму ванны температура, $T_{cp}$ , К	1976
Стандартное отклонение температуры, К	117
Коэффициент вариации температуры, $\kappa_{var}$ , %	6
Средняя по объёму эффективная теплопроводность, $\lambda_{\varepsilon, cp}$ , Вт/(м·К)	52506
Среднее число $Nu_{cp}$ в горизонтальном сечении (при $Z=-715$ мм)	332
Среднее число $Re_{cp}$ в горизонтальном сечении (при $Z=-715$ мм)	$9 \cdot 10^4$

Оценка интенсивности конвективного теплопереноса производилась по числу Нуссельта  $Nu_{cp}$ , которое определялось исходя из усреднённого коэффициента теплоотдачи ( $\alpha_{cp} = q_{cp} / \Delta T_{cp}$ ) в среднем горизонтальном сечении (при  $Z=-715$  мм):

$$Nu_{cp} = \frac{1}{S} \frac{L_0}{\Delta T_{cp}} \sum_{i=1}^N q_i S_i, \quad (11)$$

где  $S$  — площадь данного поперечного сечения ванны, м<sup>2</sup>;  $L_0$  — характерный размер, м (принят равным глубине ванны);  $q_i$  — плотность теплового потока в  $i$ -м эле-

менте расчётной сетки, Вт/м<sup>2</sup>;  $S_i$  — площадь  $i$ -го элемента в расчётном сечении.

Из таблицы 3 видно, что коэффициент вариации температуры составляет около 6 %, что подтверждает удовлетворительные условия протекания процесса теплопереноса в ванне печи при использовании ЭВТ. Средняя по объёму эффективная теплопроводность более чем в 1000 раз превышает молекулярную. Также рассчитанные тепловые потоки в сечениях ванны близки по порядку к значениям, полученным для условий барботажа ванны при продувке кислородом [10].

**Выводы и направления дальнейших исследований.** Показаны перспективы использования ЭВТ в мощных многоэлектродных дуговых печах, основным преимуществом которых является интенсивное перемещение вглубь ванны высокотемпературных

зон, образующихся в областях электрических дуг. Перспективой дальнейших исследований является поиск рациональных конструктивных параметров печей и параметров электромагнитных воздействий, обеспечивающих наилучшие условия тепломассообмена.

### Библиографический список

1. Крикент, И. В. Численное исследование гидродинамики расплава в установке ковш–печь постоянного тока [Текст] / И. В. Крикент, С. Е. Самохвалов, Д. Ю. Кабаков // Современная электрометаллургия. — 2014. — № 3. — С. 45–49.
2. Недопекин, Ф. В. Моделирование гидродинамических и теплофизических процессов в сталеплавильных печах постоянного тока [Текст] / Ф. В. Недопекин, О. В. Казак, А. Н. Семко. — Донецк : ДонНУ, 2014. — 315 с.
3. Кухарев, А. Л. Принципы повышения интенсивности тепломассообмена в жидких средах дуговых многоэлектродных печей [Текст] / А. Л. Кухарев, В. В. Белоусов // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. — 2018. — № 2. — С. 82–91.
4. Пат. 119279. Україна, МПК<sup>7</sup> H05B 7/144, F27D 11/10 Система електроживлення багатоелектродної дугової печі / заявник та патентовласник О. Л. Кухарев, А. О. Ковальчук. — № u201700825 ; заявл. 30.01.2017 ; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. — 6 с.
5. Ивочкин, Ю. П. Исследование механизмов термодинамических и МГД процессов с жидкометаллическими рабочими телами [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук : 01.04.14 / Ивочкин Юрий Петрович ; Объединённый институт высоких температур РАН. — М., 2015. — 407 с.
6. Смирнов, С. А. Математическое моделирование электромагнитного перемешивания жидкой стали в дуговой печи постоянного тока [Текст] / С. А. Смирнов, В. В. Калаев, С. М. Нехамин // Теплофизика высоких температур. — 2010. — № 1. — С. 74–83.
7. Кухарев, А. Л. Электромагнитное поле в ванне многоэлектродной печи [Текст] / А. Л. Кухарев // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля. — 2018. — № 5 (11). — С. 247–251.
8. Кухарев, А. Л. Расчёт параметров электрической дуги в электропечных установках для производства стали и ферросплавов [Текст] / А. Л. Кухарев, К. А. Корсунов, С. Н. Сергиенко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2017. — Вып. № 5 (48). — С. 52–57.
9. Кухарев, А. Л. Экспериментальная многоэлектродная установка для исследования энергетических процессов в токопроводящих расплавах [Текст] / А. Л. Кухарев, В. В. Петренко // Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении. — 2018. — № 4 (25). — С. 64–71.
10. Меркер, Э. Э. Энергосбережение при выплавке стали в дуговых печах [Текст] / Э. Э. Меркер, А. И. Кочетов, Д. А. Харламов. — Старый Оскол : ТНТ, 2009. — 296 с.

© Кухарев А. Л.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МЧМ ДонГТУ Куберским С. В.  
к.т.н., доц., зав. каф. ГЭиТС СУНИГОТ ЛНУ им. В. Даля Петровым А. Г.**

Статья поступила в редакцию 25.02.19.

к.т.н. Кухарев О. Л. (СННІГОТ ЛНУ ім. В. Даля, м. Стаханов, ЛНР)

**ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕНОСЕННЯ У РОЗПЛАВІ  
БАГАТОЕЛЕКТРОДНОЇ ДУГОВОЇ ПЕЧІ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОВИХРОВИХ  
ТЕЧІЙ**

*Розроблено математичну модель теплових і магнітогідродинамічних процесів у розплаві шестиелектродної дугової печі ємністю 180 т при її живленні постійним струмом 80 кА. Для запропонованої конструкції печі на підставі аналізу отриманих графіків розподілу швидкості руху і температури розплаву показано, що електровихрові течії домінують над природною конвекцією та забезпечують задовільні умови розподілу температури.*

**Ключові слова:** дугова сталетопна піч, магнітна гідродинаміка, теплоперенесення.

PhD Kukharev A. L. (SESIMET LNU after V. Dahl, Stakhanov, LPR)

**NUMERICAL STUDY OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN THE MELT IN A MULTI-ELECTRODE ARC FURNACE CONSIDERING EDDY CURRENT FLOWS**

*A mathematical model was developed for thermal and magnetohydrodynamic processes in a melt in a six-electrode arc furnace with 180 tons capacity with DC power supply 80 kA. For the proposed furnace design, based on the analysis of the obtained graphs for the flow velocity and melt temperature distribution, it is shown that eddy currents dominate natural convection providing adequate conditions for temperature distribution in the melt volume.*

**Key words:** arc steel-melting furnace, magnetic hydrodynamics, heat transfer.

УДК 669.162.262

к.т.н. Русанов И. Ф.,  
к.т.н. Куберский С. В.,  
Лупанов Д. В.

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, rusanova-2011@inbox.ru)

## ОЦЕНКА УСЛОВИЙ СПЕКАНИЯ АГЛОМЕРАТА У БОРТОВ СПЕКАТЕЛЬНЫХ ТЕЛЕЖЕК КОНВЕЙЕРНЫХ АГЛОМАШИН

На основании экспериментальных данных сделана оценка газодинамических параметров слоя шихты и особенностей теплообмена в нём по ширине агломашины. Показано, что у бортов спекательных тележек формируется слой крупной и однородной шихты, что приводит к увеличенной скорости движения газа в этой части агломерационной машины. Неравномерность распределения шихты по ширине машины и повышенная газопроницаемость слоя у бортов тележек приводят к изменению теплового баланса процесса спекания. В результате агломерат спекается при температуре на 100–200°C меньше требуемой для получения качественного сырья.

**Ключевые слова:** газодинамика, средний размер кусков, коэффициент вариации размера кусков, температура спекания, качество агломерата.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Общеизвестно, что условия спекания агломерата на современных агломерационных машинах по их ширине неодинаковы: около бортов спекательных тележек располагается шихта с повышенной газопроницаемостью, что приводит к повышению скорости движения газа и снижению температуры, при которой спекается агломерат в этой зоне. Однако причины и их качественное и количественное влияние на процесс агломерации изучены недостаточно полно. В связи с этим разработка методов улучшения условий спекания агломерата у бортов спекательных тележек производится интуитивно. Для обоснованного же выбора методов воздействия на ход спекания у бортов тележек необходимо дальнейшее изучение газодинамики и теплообмена в этой части машины.

**Постановка задачи.** В работе поставлена следующая задача: на основании опытных данных оценить газодинамические условия спекания агломерата по ширине агломашины и обосновать образование агломерата пониженного качества у бортов спекательных тележек.

**Изложение материала и его результаты.** Загрузка шихты на современные агло-

мерационные машины производится системой, состоящей из челнокового распределителя шихты, промежуточного бункера, барабанного питателя и загрузочного лотка. Шихта из барабана-окомкователя выдаётся на челноковый распределитель, который равномерно загружает её в промежуточный бункер над агломашиной. Выдача шихты из промежуточного бункера и укладка её на спекательные тележки производится с помощью барабанного питателя и загрузочного лотка.

При такой системе загрузки шихты на агломашину имеет место развитие сегрегации шихты не только по высоте слоя, но и по ширине спекательной тележки. Как установили авторы работы [1] при проведении исследований на аглофабрике комбината «Запорожсталь», в центральной части спекательной тележки сосредотачиваются в большей степени мелкие фракции шихты крупностью 3,5–6,0 и 0–3,5 мм. Крупные фракции размером более 6,0 мм в значительном количестве сосредоточены у бортов тележек. Их содержание в шихте при бортовой зоны составляет 40 % и более. Такое распределение шихты по крупности приводит к тому, что содержание  $Fe_{общ}$  в шихте у бортов выше, а содержание угле-

рода ниже, чем в основной массе шихты. Основность шихты по ширине спекательной тележки изменяется так же, как и содержание углерода в шихте, — у бортов она ниже, чем в остальной части. По данным авторов, содержание железа в крупных фракциях в 1,14 раза выше, содержание углерода в 3–5 раз ниже, а индекс основности в 2–7 раз ниже, чем в мелких.

В результате проведенных исследований на аглофабрике НКГОКа авторами работы [2] также установлено, что средне-массовый диаметр кусков шихты у бортов в 1,1–1,3 раза выше, чем в основной массе. Изменение содержания углерода в шихте и индекса основности, по данным авторов, аналогично описанному выше.

Такое распределение материалов приводит к тому, что в прибортовой зоне слой имеет повышенную газопроницаемость при низком содержании углерода в нём.

К тому же на газодинамическое сопротивление слоя в прибортовой зоне оказывает влияние так называемый пристеночный эффект. Суть его заключается в том, что газопроницаемость слоя полифракционных материалов около стен значительно выше, чем слоёв, удалённых от стен. В результате повышенной газопроницаемости прибортового слоя шихты (его ширина составляет 50–100 мм, или 2–4 % от общей ширины спекаемого слоя) скорость движения воздуха и газов в нём в 1,2–1,5 раза выше средней скорости их движения во всём слое. При такой скорости газов условия протекания всех физико-химических и тепловых процессов далеки от оптимальных. В результате спечённый агломерат прибортовой зоны имеет низкое качество [3].

Повышенная газопроницаемость слоя шихты приводит к нерациональному использованию просасываемого воздуха. Поэтому значительное количество этого воздуха относят к вредным прососам. На действующих агломерационных машинах они составляют 40–60 % от общего количества газов, отсасываемых эксгаустером. Значительную часть общего количества просо-

сов составляют прососы через слой шихты, лежащей у бортов спекательных тележек. По нашим оценкам они составляют примерно 15–20 %.

Пониженное содержание углерода в прибортовом слое и увеличенное количество воздуха, просасываемого через этот слой, приводят к изменению теплового баланса процесса спекания агломерата. В приходной части баланса уменьшается количество тепла, выделяемого при сгорании топлива. В расходной части баланса увеличивается количество тепла, уносимого отходящими газами. В результате слой получает меньше тепла, чем необходимо для получения качественного агломерата.

Согласно теории и основным закономерностям спекания агломерата производительность аглоустановки при постоянном вакууме практически полностью определяется газопроницаемостью агломерируемого слоя, которая в первую очередь зависит от гранулометрического состава окомкованной шихты. Как отмечалось выше, гранулометрический состав шихты как по ширине агломашины, так и по высоте слоя неодинаков. Распределение отдельных фракций по поперечному сечению слоя шихты определяется, с одной стороны, исходным ситовым составом шихты, с другой — конструкцией и режимом работы загрузочного устройства. На разных аглофабриках условия формирования слоя на агломашине различны, что затрудняет оценку газодинамики спекания агломерата в конкретных условиях с использованием установленных к настоящему времени закономерностей.

С целью исследования распределения отдельных фракций шихты по поперечному сечению её слоя на агломашине Алчевского меткомбината отбирались пробы из пяти отсеков шириной 200 мм. Центры бортовых отсеков располагались на расстоянии 100 мм от бортов, центр отсека, расположенного посередине, совпадал с продольной осью машины, а центры двух отсеков отстояли от бортов тележки на 700 мм. Отбор проб производился специальным пробоот-

борником, конструкция которого позволяла делить отобранную из отсека пробу на четыре равные части по высоте слоя. Каждая проба рассеивалась на ситах с размером квадратной ячейки 3, 4, 5, 10 и 15 мм. По результатам рассева четырёх проб одного отсека рассчитывался общий ситовый состав шихты в отсеке. Всего было проведено четыре таких исследования, в результате которых было сделано 80 рассевов шихты.

Для всех отобранных проб шихты, в соответствии с рекомендациями авторов работы [4], рассчитывались обобщённые характеристики ситового состава всех проб: средний размер кусков материала и коэффициент вариации размера кусков. Вычисления проводились по функции распределения Вейбулла, описывающей данный ситовый состав. При этом средний размер кусков материала определял его среднюю крупность, а коэффициент вариации размера кусков — его однородность. На рисунках 1 и 2 приведены кривые, показывающие изменение вычисленных обобщённых характеристик ситового состава по ширине агломашины.

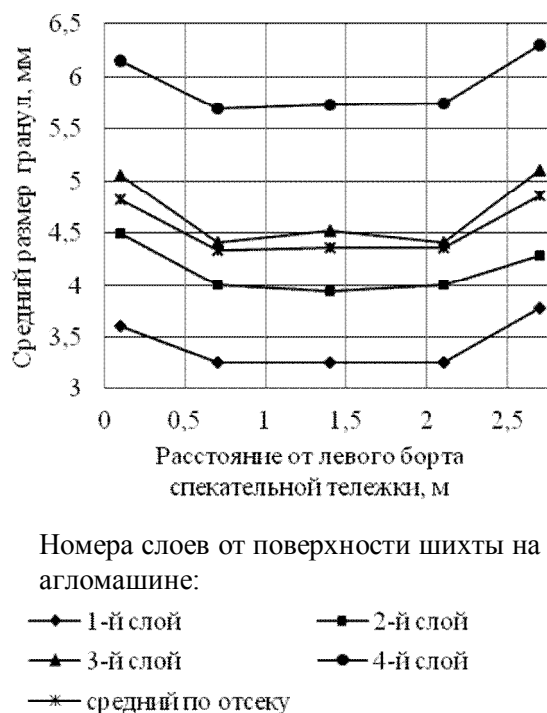


Рисунок 1 Изменение среднего размера гранул шихты по высоте и ширине агломашины

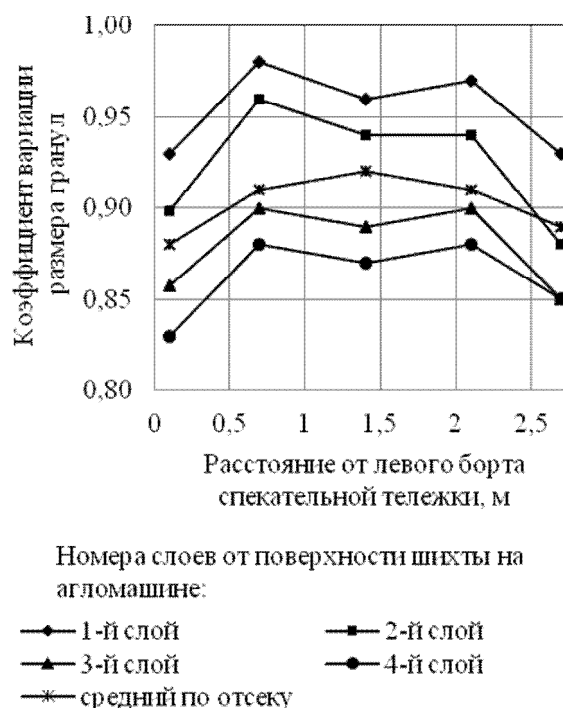


Рисунок 2 Изменение коэффициента вариации размера гранул шихты по высоте и ширине агломашины

Как следует из анализа графиков рисунка 1, средний размер гранул во всех отсеках от поверхности шихты к колосниковой решётке возрастал. Это явилось проявлением сегрегации шихты по высоте слоя при её загрузке на агломашину.

В то же время разница между средними размерами гранул в верхнем и нижнем слоях по ширине машины неодинакова. В центральной части машины средний размер гранул в нижнем слое возрос в 1,74–1,77 раза, а у бортов — в 1,67–1,71 раза. Отмеченная закономерность является следствием того, что у бортов средний размер гранул выше, чем в центральной части машины, и здесь сегрегация развита в меньшей степени.

По полученным данным средний размер гранул у бортов тележки на всех горизонтах больше, чем в центральных отсеках, в среднем в 1,1 раза.

Приведённые на рисунке 2 кривые изменения коэффициента вариации размера гранул по ширине машины, а также для различных слоёв шихты от её поверхности

показывают, что чем ниже расположен слой шихты, тем он более однороден по крупности. Коэффициент вариации размера гранул в верхних слоях равен 0,93–0,98, а в нижних — 0,83–0,87. Из анализа полученных данных также следует, что у бортов спекательных тележек формируется слой более однородный по крупности, чем в остальной части агломашины, — коэффициент вариации размера гранул в этой зоне на 0,03–0,05 меньше.

В целом проведённые эксперименты показывают, что слой шихты, расположенный около бортов, имеет повышенную среднюю крупность и он более однороден по крупности гранул. Такой слой имеет пониженное газодинамическое сопротивление.

На рисунке 3 приведены кривые, характеризующие распределение скоростей движения газа по ширине спекательной тележки, вычисленные по изложенной в работе [5] методике и полученные прямым замером анемометром во время проведения исследований при вакууме 6,6 кПа.

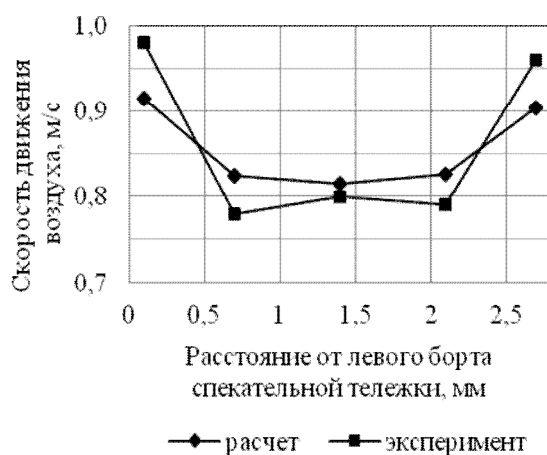


Рисунок 3 Распределение скоростей движения воздуха по ширине агломашины

Анализ приведённых кривых показывает, что в результате расположения у бортов тележек крупной и однородной шихты скорость движения воздуха в этих зонах значительно выше, чем в остальной части агломашины. По расчётным данным здесь скорость выше на 12–15 %, а по опытным дан-

ным — на 20–25 %. Такое расхождение вызвано тем, что при расчёте не учитывалось проявление пристеночного эффекта, при котором воздух у стен проходит с большей скоростью из-за того, что каналы здесь с одной стороны имеют гладкую поверхность.

Неравномерность распределения шихты по крупности по ширине агломашины приводит к перераспределению топлива в различных зонах слоя. Связано это с тем, что, как установлено во многих исследованиях, содержание топлива (углерода) в гранулах разного размера не одинаково. В мелких гранулах размером до 5 мм сосредоточено около 60–70 % всего углерода шихты. Обработкой данных из научной литературы и данных, полученных авторами, установлено, что распределение углерода по гранулам при общем его содержании в шихте, равном около 4 %, удовлетворительно описывается уравнением

$$C_{gp} = C_{ших} \cdot \left( \frac{14,8}{d} + 0,7 \right), \quad (1)$$

где  $C_{gp}$  и  $C_{ших}$  — содержание углерода в гранулах размером  $d$  и в шихте соответственно, %.

Теснота связи величин  $C_{gp}$  и  $C_{ших}$  характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,97.

Проведённые на основе уравнения (1) расчёты позволили оценить влияние ситового состава шихты на распределение углерода в слое по высоте загрузки её на агломашину в центральной части и у бортов спекательных тележек. Расчётное распределение углерода представлено на рисунке 4.

Как следует из анализа полученных данных, разница между содержанием углерода у бортов спекательных тележек по всей высоте слоя на 0,15–0,20 % меньше, чем в центральной части.

Простой расчёт показывает, что в слой у каждого борта спекательной тележки шириной 0,2 м от горения топлива вносится на 300–350 кДж тепла меньше, чем в такой же слой остальной её части.

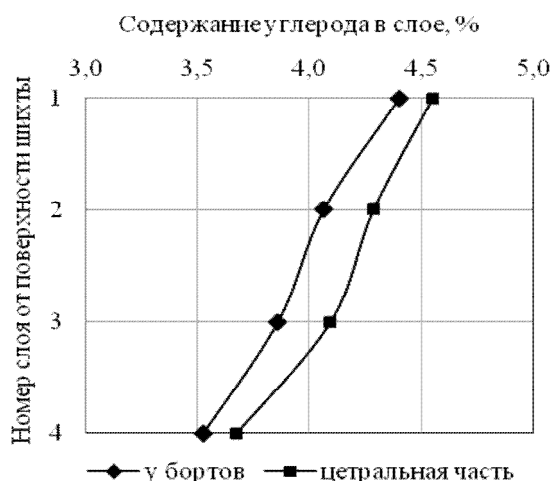


Рисунок 4 Распределение углерода по высоте слоя шихты на агломашине

Такое уменьшение прихода тепла практически не влияет на максимальную температуру спекания — она может снизиться всего на 3–4 °С.

В то же время на значение максимальной температуры в слое оказывает влияние скорость фильтрации воздуха.

Механизм этого влияния следующий.

В верхней ступени теплообмена, где происходит нагрев воздуха и за счёт охлаждения спека, при увеличении скорости просасывания воздуха он нагревается в меньшей степени и, соответственно, в зону горения приносит меньше тепла. Это приводит к снижению температуры в зоне горения.

В нижней ступени теплообмена происходит передача тепла от газов шихте. Уве-

личение скорости фильтрации воздуха приводит здесь к распространению тепловой волны вглубь слоя. В результате уровень максимальных температур на разных горизонтах слоя снижается.

В результате проведенных расчётов и лабораторных спеканий установлено, что максимальная температура в слое у бортов спекательных тележек на 100–200 °С ниже оптимальной для получения качественного агломерата.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** В результате проведённых экспериментов и расчётов установлено, что скорость движения воздуха у бортов спекательных тележек на 15–20 % выше, чем в центральной части агломашины. Вызвано это тем, что у бортов располагается более крупная и однородная шихта. Перераспределение при этом углерода не приводит к снижению максимальной температуры спекания. Однако увеличение скорости фильтрации воздуха через слой приводит к снижению максимальной температуры в слое на всех горизонтах на 100–200 °С. Такое снижение температуры не позволяет спекать у бортов качественный агломерат.

Проведённая оценка условий спекания агломерата у бортов спекательных тележек позволит в дальнейшем обосновывать те или иные мероприятия, направленные на повышение качества агломерата.

### Библиографический список

1. Кравец, Ю. С. Повышение качества агломерата за счёт улучшения условий загрузки агломашин [Текст] / Ю. С. Кравец, Ю. П. Исаенко, А. А. Вовк, П. М. Челгий, Б. А. Лифшиц, А. М. Локтев // *Металлургия и коксохимия*. — 1977. — Выпуск 53. — С. 14–19.
2. Вовк, А. А. Изучение распределения гранул окомкованной шихты при загрузке на спекательные тележки [Текст] / А. А. Вовк, П. М. Челгий, В. Е. Шешетов, В. П. Маймур, В. Д. Кучукаенко // *Металлургия и коксохимия*. — 1982. — Выпуск 75. — С. 8–11.
3. Петрушов, С. Н. Спекание агломерата с вводом в прибортовой слой чугуновой стружки [Текст] / С. Н. Петрушов, И. Ф. Русанов, С. В. Куберский, Д. В. Лупанов // *Сборник научн. трудов ДонГТУ*. — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — Выпуск 34. — С. 99–105.
4. Русаков, П. Г. Обобщённые характеристики ситового состава неоднородного сыпучего материала [Текст] / П. Г. Русаков, И. Ф. Русанов // *Заводская лаборатория*. — 1990. — № 2. — С. 68–69.

5. Русанов, И. Ф. Влияние гранулометрического состава полифракционного сыпучего материала на газодинамическое сопротивление слоя [Текст] / И. Ф. Русанов, Н. И. Русанова // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — № 47. — С. 69–73.

© Русанов И. Ф.

© Куберский С. В.

© Лупанов Д. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиМ ДонГТУ Денищенко П. Н.,  
зам. нач. ККЦ по технологии филиала № 12 ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» Швец Д. В.**

Статья поступила в редакцию 01.03.19.

**к.т.н. Русанов И. Ф., к.т.н. Куберский С. В., Лупанов Д. В. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)  
ОЦІНКА УМОВ СПІКАННЯ АГЛОМЕРАТУ БІЛЯ БОРТІВ СПІКАЛЬНИХ ВІЗКІВ  
КОНВЕЄРНИХ АГЛОМАШИН**

На підставі експериментальних даних зроблено оцінку газодинамічних параметрів шару шихти і особливостей теплообміну в ньому по ширині агломашини. Показано, що біля бортів спікальних візків формується шар крупної та однорідної шихти, що приводить до збільшеної швидкості руху газу в цій частині агломераційної машини. Нерівномірність розподілу шихти по ширині машини і підвищена газопроникність шару біля бортів візків приводять до зміни теплового балансу процесу спікання. У результаті агломерат спікається при температурі на 100–200 °С менше необхідної для одержання якісного агломерату.

**Ключові слова:** газодинаміка, середній розмір шматків, коефіцієнт варіації розміру шматків, температура спікання, якість агломерату.

**PhD Rusanov I. F., PhD Kuberskiy S. V., Lupanov D. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)  
ASSESSMENT OF THE AGGLOMERATE SINTERING CONDITIONS AT THE SIDE  
SURFACE OF PELLET CARS OF THE CONVEYOR SINTERING MACHINE**

Based on the experimental data, the gas-dynamic parameters of the charge layer and the heat transfer characteristics in it across the width of the sintering machine were assessed. It has been shown that a coarse and homogeneous charge layer is formed near the side surfaces of pellet cars resulting in an increased gas velocity in this part of the sintering machine. The uneven distribution of the charge across the width of the machine and the increased gas permeability of the layer at the sides of the cars lead to a variation in the heat balance of sintering process. As a result, the agglomerate is sintered at a temperature 100–200 °C less than is required to obtain high-quality sinter.

**Key words:** gas dynamics, average size of grains, coefficient of grain size variation, sintering temperature, sinter quality.

**СТРОИТЕЛЬСТВО  
И АРХИТЕКТУРА**

---

---

**БУДІВНИЦТВО  
І АРХІТЕКТУРА**

---

---

**CIVIL ENGINEERING  
AND ARCHITECTURE**



УДК 622.844:847.556

д.т.н. Дрозд Г. Я.

(ИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, drozd.g@mail.ru)

## ШАХТНЫЕ ВОДЫ КАК ФАКТОР РИСКА ТЕХНОГЕННОЙ КАТАСТРОФЫ ДЛЯ ДОНБАССА

*Рассмотрены риски затопления шахт Центрального Донбасса, вызванного повышением уровня грунтовых вод, что создаёт угрозу разрушения зданий и сооружений и отравления поверхностных и подземных вод. Проанализировано в историческом контексте качество воды источников Донбасса. Рассмотрены примеры деформации поверхности территории региона и её влияние на аварийность трубопроводных инженерных сетей. Выполнен прогноз развития ситуации в регионе вследствие подтопления и оценены масштаб и характер потенциальной природно-техногенной катастрофы.*

**Ключевые слова:** шахтные воды, качество воды, подтопление, просадка грунтов, авария, экологическая и техногенная катастрофа.

Интернет и средства массовой информации уже более года пестрят заголовками типа «Экологический Армагеддон в Донбассе», «Шансы украинцев на выживание», «Последствия затопления шахт в Донбассе», «Грозит ли Донбассу экологическая катастрофа», «Зона отчуждения — Донбасс» и т. п. Суть всех публикаций сводится к вызванным военными действиями в Донбассе стагнации экономики, закрытию и затоплению шахт, что по мнению всевозможных экспертов грозит региону техногенной катастрофой и появлением более 2,5 миллионов так называемых экологических беженцев [1–5].

Так грозит ли Донбассу экологическая катастрофа? Совсем не риторический вопрос стал предметом не только переживания для местных жителей, споров учёных и экологов, но и политических спекуляций. И даже частью информационной войны против ДНР, ЛНР и России.

Экологи и политики с украинской стороны предрекают катастрофу, выходящую далеко за пределы одного региона. Чуть ли не второй Чернобыль. Даже американский Госдепартамент озаботился проблемой и обратился к России с требованием повлиять на власти республик.

В общем, массивированный информационный поток, вылившийся на жителей Ук-

раины и Донбасса, попал на благодатную почву. К тому же по времени эта шумиха совпала с «делом Скрипалей» и «применением химоружия против детей в Сирии». Наверное, не случайное совпадение... Попробуем непредвзято разобраться в сложившейся ситуации.

**Введение.** На протяжении последних пяти лет в Донбассе социальные вопросы общества и боевые действия формируют экологическую обстановку региона. Влияние этих факторов на природную среду и его долгосрочные последствия могут найти отражение во всех её компонентах, в том числе на здоровье ныне живущих и последующих поколений людей. О развитии событий можно судить пока по малозаметным проявлениям, но они ещё покажут свою значимость в ближайшем будущем. Негативные последствия пока не реализованы, но продолжение боевых действий и политическое и управленческо-техническое бездействие увеличивают вероятность отрицательных сценариев для региона. Риски техногенных аварий и экологических катастроф при этом возрастают многократно.

**Актуальность проблемы.** Площадь неподконтрольной Украине территории республик ДНР и ЛНР составляет 17235 км<sup>2</sup>, т. е. 32 % общей площади территории Донецкой и Луганской области в 53200 км<sup>2</sup> (площадь Лу-

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

ганской области 26683 м<sup>2</sup>, площадь Донецкой области 26592 км<sup>2</sup>). Население территории — около 3,5 млн человек.

В Донбассе находятся более 900 крупных промышленных предприятий, в том числе 140 каменноугольных рудников, 40 металлургических заводов, 7 тепловых электростанций, а также 177 химически опасных производств, на 113 из которых используются радиоактивные материалы (рис. 1).

С экологической точки зрения наиболее опасной является угольная промышленность — 222 шахты, многие из которых истощились и больше не разрабатываются. Кроме того, по территории региона проложены трубопроводы общей протяженностью 1230 км, по которым осуществляется поставка нефти, газа и аммиака. По оценкам, к 2002 году в Донбассе скопилось 10 млрд т

промышленных отходов, что соответствует 320000 т на кв. км. Стоит учесть ещё и более 2500 мест нелегальной добычи угля, которые в Украине называют «копанками».

Сегодня в Донбассе 222 шахты: 33 — на территории, подконтрольной Украине, и 189 под контролем самопровозглашённых республик. В процессе затопления находится 39 шахт, эксплуатируются 99, в стадии ликвидации — 70 и 14 объектов в режиме водоотлива. По данным экспертов, до половины шахт на неподконтрольной Украине территории из числа затопляемых затоплены от 50 до 100 %. В центральном районе Донбасса во многих местах произошёл подъём шахтных вод к поверхности с подтоплением городов и посёлков, а также загрязнение и потеря собственных источников пресной питьевой воды (рис. 2).



Рисунок 1 Карта-схема Донбасса



Рисунок 2 Результат затопления шахт

Угольные шахты бывают трёх видов: горизонтальные (в основном в горных районах), вертикальные и наклонные. В Донбассе преобладают вертикальные и наклонные шахты. Многие шахты уже выработаны, то есть запас угля там исчерпан. Оставляют в шахтах только «цельники» — цельные пласты угля, которые не дают просесть выработкам. После отработки шахты консервируют, что зачастую ведёт к их затоплению, когда перестаёт работать водоотлив. Как правило, на закрытых шахтах, работающих в режиме водоотлива, оставляют нижнюю по уровню шахту. Именно в её выработки стекают все шахтные и грунтовые воды. Откачивают воду в шахтах поразному. В основном происходит это в несколько этапов. В глубоких вертикальных шахтах воду откачивают вначале с самого глубокого участка. Средняя глубина донбасских шахт — 700–1000 метров. Глубины делятся на горизонты. С водозаборника тысячного горизонта воду откачивают на семисотый, затем выше, пока вода не поднимется на нулевой горизонт — поверхность. Там вода поступает в шахтные отстойники, где проходит очистку. Затем её сбрасывают в водоёмы и реки. В некоторых шахтах воду откачивают сразу на поверхность (рис. 3).

Если воду не откачивать, существует несколько вероятных последствий.

**Следствие 1: отравление питьевой воды.** Кроме того, шахтные воды могут заражать реки и почву. Ведь вода в шахтной выработке насыщается различными химическими элементами. Химикаты могут попадать в ближайшие колодцы питьевой воды, отравлять рыбу и водоёмы. Если в затопленных шахтах хранились ядовитые вещества, ситуация ещё хуже.

**Следствие 2: провалы грунта.** Главная опасность — подтопление ближайших посёлков, а также размыв почвы, что может привести к оползням и обрушению строений. Фундамент зданий в районе шахты или выхода воды на поверхность может быть разрушен, что приведёт к обрушению строения. В худшем варианте здания вообще могут уйти под землю, если вода вымоет пустоты в грунте.

**Следствие 3: взрывы метана.** Метан, вытесняемый из почвы поднимающейся водой, выходит на поверхность, или, что хуже, скапливается в подвалах жилых домов, погребах и прочих углублениях, где может взорваться или кого-нибудь отравить.

Проблема современного и будущего экологического состояния Донбасса, вызванная подземными шахтными водами региона, является крайне актуальной.

**Цель работы** — анализ и оценка существующего положения и потенциальных рисков от затопления шахт региона.



Рисунок 3 Откачка шахтной воды на поверхность или в отстойник

### Результаты и их обсуждение.

**1. Влияние шахтных вод на водоисточники.** В последнее столетие окружающая среда Восточного Донбасса подвергалась интенсивному антропогенному влиянию, которое существенно нарушило природный энерго-массоперенос, что связано преимущественно с деятельностью угледобывающего и углеперерабатывающего комплексов. Интенсивные потоки загрязнения формируются в природных водах. Например, в 60-е годы из угольных шахт региона откачивалось 75 млн м<sup>3</sup>/год вод, с которыми на поверхность поступало 270 тыс. т растворённых веществ (в том числе сульфат-иона 131 и железа 0,1 тыс. т). В настоящее время объём шахтных вод, несмотря на закрытие большинства шахт, составил 78 млн м<sup>3</sup>/год и вынос растворённых веществ достиг 411 тыс. т (SO<sub>4</sub> — 211 и Fe — 6,5 тыс. т) [6].

Изменение химического состава подземных вод в Шахтинском районе ДНР в период 1960-х годов и настоящего времени приведено в таблице 1. В 50–60 гг. обобщение выполнено по результатам анализов

вод 180 источников и колодцев, а в настоящее время — по результатам 233 анализов вод. Изменения наглядно видны при сравнении средних значений: минерализация (М) увеличилась в 1,5 раза за счёт роста содержания большинства компонентов, что свидетельствует о существенном развитии процессов загрязнения грунтовых вод в Шахтинском угленосном районе.

*Пресные воды питьевого назначения.* Основным источником питьевого водоснабжения для городов, входящих в состав Донецкой области, являются воды реки Северский Донец, поступающие через канал «Северский Донец – Донбасс». Имеющее место в некоторых городах использование месторождений подземных вод как альтернативных источников воды более высокого качества не является определяющим. Малые реки области несут непомерно высокую техногенную нагрузку. Значительное количество их находится на пределе потенциала самовосстановления, а некоторые, протекая по зонам высокого загрязнения почв и грунтовых вод, фактически выполняют функции коллекторов сточных вод.

Таблица 1

Химический состав подземных вод Шахтинского района, мг/л

Период 1960-х годов							
pH, ед.	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	Ca	Mg	Na	Минерализация
7,2	374	679	118	166	65	231	1566
Период 2007–2009 гг.							
7,2	345	869	435	209	87	444	2315

Река Северский Донец проходит через зону войны в Донбассе, впадает в российский Дон и дальше — в Азовское море. Она питает водой миллионы людей, но по её руслу как раз и проходит линия фронта, а её течение пополняют шахтные воды с закрытых шахт, отходы производств и сбросы канализации городов. Всё это течёт в Россию. При этом из-за войны система мониторинга с обеих сторон — Украины и России — практически не работает.

Наличие на берегах реки Северский Донец большого количества источников сбросов создаёт возможность возникновения неконтролируемых превышений концентрации загрязняющих веществ в поверхностных водах, несмотря на существующий контроль, осуществляемый лабораториями очистных сооружений. Данные о химическом составе проб питьевой воды из различных водоводов г. Донецка приведены в таблице 2 [7, 8].

*Подземные воды.* Приоритетным направлением при определении источников питьевого водоснабжения в Украине является максимальное использование подземных природных вод с глубинных горизонтов, казалось бы, хорошо защищённых от всех видов загрязнений, поэтому приведём оценку их экологического состояния.

В системе Государственного областного коммунального предприятия (ГОКП) «Вода Донбасса» эксплуатируется 67 подземных источников водоснабжения. В соответствии с отчётом о результатах санитарно-эпидемиологической оценки подземных водозаборов большинство источников имеют повышенное солесодержание, обуслов-

ленное природным составом воды. Отдельные источники не соответствуют нормативным требованиям по таким показателям, как железо, нитраты, фтор, марганец. Данные о химическом составе воды из подземных водозаборов приведены в таблице 3.

По показателям, указанным в таблице 3, а также по уровню общей минерализации (до 3500 мг/дм<sup>3</sup>) и общей жёсткости (35 мг-экв/дм<sup>3</sup>) качество воды приведённых подземных водозаборов не соответствовало требованиям ГОСТ 2874–82 «Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль качества» ещё 10 лет назад. Однако следует отметить, что, учитывая нехватку питьевой воды достаточного качества и отсутствие альтернативных источников подачи воды, было позволено временно использовать подземные источники водоснабжения с отклонениями показателей качества воды по ГОСТ 2874–82 [8].

Результаты оценки качества воды водисточников в 2017–2018 гг. организациями «Вода Донбасса» и «Лугансквода» показали следующее. В части населённых пунктов (14 %) питьевая вода из системы централизованного водоснабжения по микробиологическим показателям соответствует Государственным нормам и правилам «Гигиенические требования к питьевой воде, предназначенной для потребления человеком» (ГСанПиН, далее 2.2.4–171–10). В то же время почти повсюду питьевая вода по физико-химическим показателям, в частности по минеральному составу и некоторым другим ингредиентам, превышает установленные нормативы (табл. 4) [9].

Таблица 2

Химический состав (мг/л) проб питьевой воды из различных водоводов г. Донецка

Cl <sup>-</sup>	NH <sub>3</sub>	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Fe	Cu	Zn	Pb	F <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca	Mg
1,78	0,05	4,8	282,3	0,05	0,02	0,1	0,01	0,23	281	96,2	34

Таблица 3

Максимальные концентрации основных неорганических загрязняющих веществ в воде из подземных водозаборов, эксплуатируемых ГОКП «Вода Донбасса»

Fe <sup>3+</sup>	Нитраты	Хлориды	Сульфаты	F	Mn
4,3 мг/дм <sup>3</sup>	145 мг/дм <sup>3</sup>	1440 мг/дм <sup>3</sup>	1790 мг/дм <sup>3</sup>	4,3 мг/дм <sup>3</sup>	0,3 мг/дм <sup>3</sup>

Таблица 4

Качество воды на 86 % водозаборов в Донбассе

Показатель, ед. изм.	Требования СанПиН 2.2.4-171-10	Факт
Жёсткость, ммоль/дм <sup>3</sup>	7	9,9–26,1
Сульфаты, мг/дм <sup>3</sup>	250	278–892
Хлориды, мг/дм <sup>3</sup>	250	280–833
Сухой остаток, мг/дм <sup>3</sup>	1000	273–2668
Железо, мг/дм <sup>3</sup>	0,2	0,241–2,0

Таким образом, шахтные воды региона действительно оказывают влияние на водозаборы питьевой воды. Для доведения качества воды до санитарно-гигиенических требований необходимо строительство обезжелезивающих установок и станций локальной доочистки. Была разработана программа доведения качества питьевой воды до требований ГСанПиН 2.2.4-171-10 ориентировочной стоимостью **23206016 тыс. руб., или 40,8 руб. на м<sup>3</sup> добываемой воды. Таких средств ни у республик, ни у инвесторов не нашлось, и проблема остаётся нерешённой.**

## 2. Подтопление шахтными водами

Территория Донбасса — особенная. Влияние шахтных подработок учтено в ряде нормативных документов [10], поэтому строительство и эксплуатация объектов осуществляется под контролем маркшейдерских служб.

Проводимые ныне инструментальные наблюдения интенсивности нарастания

темпов проседания грунта не внушают оптимизма. В результате длительного периода угледобычи происходят практически необратимые техногенные изменения состояния горного массива. Иллюстрацией этому являются данные длительных наблюдений за состоянием территории шахтного поля, где проходит канал «Северский Донец – Донбасс» (рис. 4).

Среднее годовое оседание реперов за 43 года составило 71 мм (максимальные оседания — на 200 мм в 1964 г., минимальные — на 21 мм в 1982 г.). Среднемесячное оседание равно 7 мм, что характеризует в целом плавный процесс. Характер графика на рисунке 4 свидетельствует о большой неравномерности процесса просадки. Трасса канала длиной 132 км с 1958 года просела местами на 3,1–3,2 м (рис. 5). Для защиты от вредного влияния горных подработок между анкерными опорами установлены сальниковые компенсаторы, позволяющие компенсировать деформации ±500 мм.

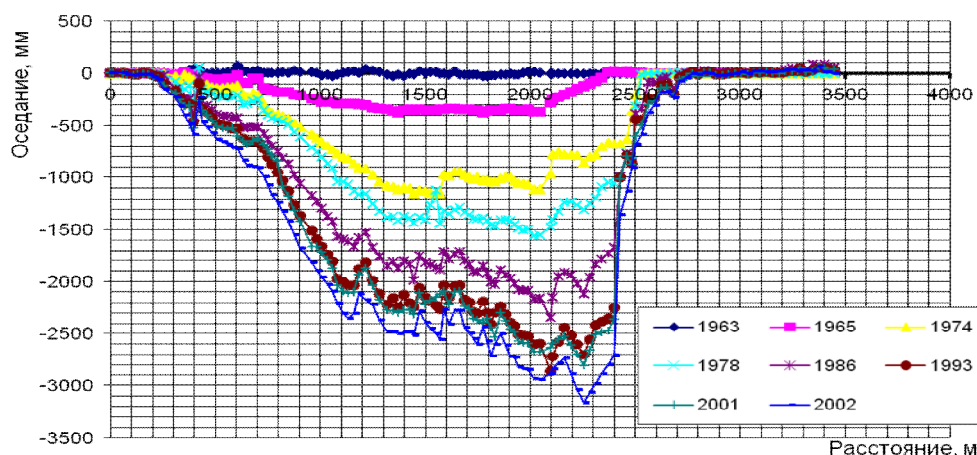


Рисунок 4 Графики оседания реперов канала «Северский Донец – Донбасс» за 40 лет подработки [по 11]



Рисунок 5 Общий вид дюкерного участка канала «Северский Донец – Донбасс» на поле шахты им. Ленина

Эксперты утверждают, что обнаружили около шести тысяч точек, где просадка поверхности составляет 80 мм в год, причём среди них есть точки, где провалы идут со скоростью 30 см в год и более [4]. Так, в двух городах Луганской области — Суходольске и Червонограде — на жилых улицах, застроенных девятиэтажными зданиями, определяются проседания в 120 и 200 мм в год. Эта ситуация — технологическая катастрофа, при которой в обозримом будущем могут начать рваться подземные коммуникации и идти трещины по домам (рис. 6, а). Также зоной существенного проседания поверхности являются отдельные участки в северной части Донца и городах Ясиноватая, Макеевка и Шахтерск (Донецкой области).

Бессистемное затопление шахт в результате несоблюдения надлежащего режима откачки шахтных вод в большинстве угледобывающих предприятий Центрального Донбасса способно вызвать резкое ухудшение гидрогеологической обстановки [3, 5]. Уровень воды в депрессионных

воронках постепенно будет восстанавливаться до статических величин. Избыточное увлажнение глинистых сланцев приведёт к потере ими структурной прочности вследствие тиксотропного эффекта. Они начнут размягчаться до состояния глиняной суспензии. Давление вымещающих пород будет выдавливать пластичную глину через трещины и пути миграции воды. Результатом станет осадка толщи пород и образование мульд сдвижения на поверхности (рис. 6, б). Оседание земной поверхности местами может достигнуть 3–4 м с образованием уступов до 0,8–1,2 м и разрушением всех попавших на них объектов и сооружений (рис. 7). Мульды сдвижения, имеющие замкнутый контур, будут затоплены. Образуются заболоченные участки поверхности в отметках ниже статического уровня воды.

При наблюдении за состоянием территории Алчевско-Стахановской и Горловско-Енакиевской агломераций в 2003 и 2016 годах на их территориях регистрировалось образование уступов (рис. 8).



Рисунок 6 Мутьды, как причины разрушения зданий и сооружений



Рисунок 7 Образование уступа вследствие просадки грунта



Рисунок 8 Гистограмма распределения уступов по высоте

Стабильное во времени уступообразование не даёт оснований утверждать, что процесс вызван именно подтоплением территории.

Образование уступов как свидетельство деформации земной поверхности должно сопровождаться повреждением трубопроводных коммуникаций. На балансе предприятий «Вода Донбасса» и «Луганскво-

да» находится примерно 6000+2000 км наружных водопроводных сетей. Прослеживая динамику аварийности трубопроводных сооружений довоенного и военного периодов (рис. 9), можно констатировать, что воздействие затопления шахт не оказало заметного влияния на их эксплуатационную работоспособность.

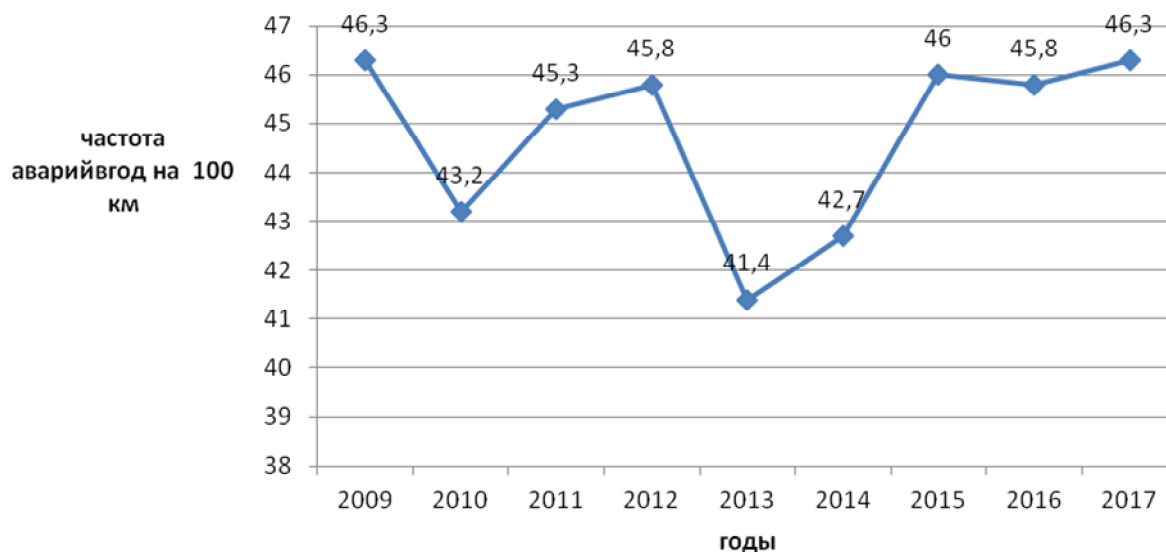


Рисунок 9 Динамика аварийности водопроводных коммуникаций в Донбассе

**Вода — разрушительный фактор.** Донецкий кряж — полоса возвышенностей высотой до 370 м, протянувшаяся с севера на юг примерно посередине Донецкой и Луганской областей. И так уж получилось, что линия боевого разграничения буквально повторяет геологический изгиб Донецкого кряжа. Подконтрольные Украине территории Донбасса находятся на 100–150 м ниже зоны разграничения, а города Бахмут (бывший Артёмовск) и Соледар находятся буквально в 30–35 км от линии активных боестолкновений. Город Соледар расположен на высоте 100 м над уровнем моря, в то время как соседние города расположены на 120–200 м выше, то есть в случае наличия под этими городами скопления подземных вод вся эта жидкость под наклоном устремится вниз — к Соледару. В окрестностях города с незапамятных времён добывали соль. За столетия соле-

добычи под городом образовались полости-пустоты высотой 30–35 м.

Они никак не раскреплены, то есть соль держит сама себя. В пласте соли, толщина которого составляет 40–50 м, комбайнами вынимали середину в 30 м высотой. И всё. Ширина выемки обычно составляет 14–15 м, затем оставляют целик и рядом бьют новую выработку. Соляные столбы и крыша из соли на них толщиной 10 м держат на себе 300 м грунта и город. Общая протяжённость выработок — более 200 км.

В итоге площадь пустоты под городом намного больше самого города, и Соледар сейчас напоминает своего рода летающий остров: он парит на соляной подушке над выработками, которые образованы в результате многолетней добычи соли. А её, по подсчётам специалистов, изъяли свыше 280 млн тонн. Объём пустоты под городом — более 110 млн м<sup>3</sup> (рис. 10 [4]).



Рисунок 10 Соляные выработки

Рядом с Соледаром и Бахмутом находится город Горловка, расположенный на вершине главной антиклинали Донбасса на высоте 295–310 м над уровнем моря. Все горные породы залегают под крутым углом от Горловки крыльями в разные стороны.

Все шахты Горловки сегодня затоплены, но, поскольку соседние города лежат ниже, вода здесь никогда не выйдет на поверхность, а вместе с грунтовыми водами и водой от естественных осадков будет сливаться из Горловки по направлению падения пластов, формируя подземные реки.

Спад одного крыла начинается от шахты им. Гагарина на г. Торецк, и именно с этого города начинается так называемая Торецкая котловина; спад второго крыла тянется от г. Енакиево на г. Кировск, и оба спада сливают воду на так называемую Бахмутскую котловину, над которой и расположены города Бахмут и Соледар, под которыми находятся соляные пустоты высотой в десятки метров.

Получается, подземные воды из затопленных шахт городов Горловки и Торецка (бывший Дзержинск) сейчас просачиваются на г. Бахмут, где меловые породы и гипс, которые тоже становятся мягче от воды, вымываются и дальше под углом стремятся под г. Соледар. Под г. Бахмутом мно-

го пустот и выработок: там есть выработки от добычи соли, гипса и мела. Именно в меловых отложениях есть карстовые пустоты, способные формировать подземные озёра, накапливая воду длительное время.

С другой стороны этой «чаши» расположены города Енакиево и Кировск, чьи шахты вследствие боёв также оказались затопленными. И снова-таки вода с них будет просачиваться под г. Соледар, так как падение горных пород ведёт именно в этом направлении и оба они на 100 м выше города. Соль — очень крепкий минерал, соляные столбы держат на себе десятки квадратных километров г. Бахмута и г. Соледара, но перед водой они бессильны. Накопление воды ведёт к образованию подземных рек, а последние, естественно, текут туда, куда уклон, который расположен в сторону Бахмутской котловины. Соляные столбы перед подземной рекой устоят несколько часов. Неизвестно, сколько воды уже скопилось и сколько выработок они уже подмыли.

В 2014 году в Пермском крае Российской Федерации буквально мгновенно огромный провал поглотил часть дачного поселка. В пропасть рухнули деревья, дома. И только каким-то чудом в месте провала не было людей (рис. 11).



Рисунок 11 Провал дачного посёлка в Соликамске [4]

Причиной провала стало подтопление шахты «Уралкалия». Несмотря на систему гидрозакладки и мощные пласты глины, которые защищали соль от проникновения воды, добыча соли в промышленном масштабе создала трещинки, по которым вода стала проникать в подземные полости, пустоты и накапливаться между слоями пород. В результате размыва слабых пород в слоях глины образовались подземные озёра. В какой-то момент они промыли себе дорогу и в выработке действующей шахты. Произошло подтопление. Уже через два дня после подтопления шахты произошёл провал грунта на расстоянии почти 4 км от неё, то есть вода за день промыла себе путь в 4 км к старым заброшенным выработкам и объединила их в большую полость, что и привело к обрушению. Всего за три месяца провал увеличился в 4 раза. В Пермском крае возле Соликамска никто не предполагал возможности провала поверхности, и он стал полной неожиданностью. Но там объёмы добычи и выработок были в сотни раз меньше, а на поверхности стоял пустующий и заброшенный дачный посёлок. Над Бахмутской котловиной множество посёлков и два довольно крупных города — Бахмут и Соледар, и в общей сложности над пустотами соляных выработок сейчас проживает более 100 тыс. человек. Масштаб возможной трагедии может быть невероятным.

**Вытеснение метана из почвы** шахтными водами пока не регистрируется.

### 3. Оценка техногенных опасностей и рисков в Донбассе

За 200 лет истории индустриального освоения территории Донбасса добыто до 12 млрд куб. м угля и пород, объём созданных горных выработок превышает 8 млрд куб. м, а площадь нарушенных в результате техногенной деятельности территорий достигает 15 тыс. кв. км. При подъёме уровней минерализованных подземных вод до критических глубин менее 3 м от поверхности ускорится процесс дополнительного осаднения и горизонтальных сдвигов поверхности, что приведёт к опасной деформации и разрушению жилых и промышленных комплексов, нефте- и газопроводов, коммунальных сетей, участков железных дорог, других объектов критической инфраструктуры.

На примере повреждения некоторых объектов оценим последствия подъёма шахтных вод в регионе.

**3.1. Верхнекальмиусская фильтровальная станция (ВФС)** расположена на южной окраине г. Ясиноватой. На её территории в резервуарах под давлением хранится более **300 т сжиженного хлора**, который используют для очистки воды. В случае его утечки возникнет серьёзный риск для здоровья людей. Согласно оцен-

ке, в худшем случае катастрофа может затронуть **400 тыс. людей**.

**3.2. Донецкая фильтровальная станция (ДФС)** находится на линии фронта между городами Авдеевкой и Ясиноватой. На её территории хранится 9000 л сжиженного хлора. В случае его утечки возникнет серьёзный риск для здоровья людей, находящихся в радиусе 200 м от хранилища (в зависимости от погодных условий и объёма утечки) может пострадать до **30000 людей**.

**3.3. Горловская фильтровальная станция № 2** расположена к западу от города Горловка; от работы этого объекта зависит водоснабжение более **2 млн человек**.

**3.4. Никитовский ртутный комбинат.** Здесь ртуть добывали в течение нескольких десятилетий, это опасный с экологической точки зрения объект. На сегодняшний день здесь имеются пять заброшенных ртутных шахт глубиной от 40 до 180 м и отвал пустой породы. Если допустить, что вода поднимется до этих отметок и как-то выйдет на поверхность, она попадёт в Северский Донец — и можем получить катастрофу, сравнимую с Чернобылем.

**3.5. Дзержинский фенольный завод.** В посёлке Новгородское, расположенном в 35 км к северу от Донецка, находится Дзержинский фенольный завод, где применяются нафталин, фенол и другие токсичные вещества. Фенол — токсичное вещество, также известное под названиями карболовая кислота, гидроксibenзол и моногидроксibenзол. Оно легко воспламеняется, имеет высокую коррозионную активность и резкий приторно-сладкий запах. Фенол быстро усваивается вне зависимости от того, каким путём попадает в организм человека, и вызывает симптомы общего отравления. Там же расположен шламонакопитель с 400 куб. м отходов фенольного и нафталинового производства. Дамба шламонакопителя частично повреждена в результате обстрелов. Повреждён трубопровод, через который ведётся откачка воды, и в настоящее время уро-

вень жидкости в накопителе достиг критической отметки. Результатами подтопления могут стать схождение ядовитого слевого потока, образование токсичного облака, заражение реки Кривой Торец, гибель людей. Под угрозой экологической катастрофы находятся в первую очередь посёлки Новгородское и Нелеповка с населением 13 тысяч человек.

**3.6. Луганская тепловая электрическая станция**, расположенная к северо-востоку от Луганска, обеспечивает электроэнергией более 1 млн человек. На электростанциях хранится значительный объём полихлорированных дифенилов, которые в случае попадания в окружающую среду вызовут загрязнение почвы и воды.

**3.7. Шахта «Юный коммунар»** в городе Юнокоммунаровске, что в сорока километрах от Донецка. Известной на весь мир она стала после ядерного эксперимента, проведённого в 1979 году на глубине 903 метра. Образовавшуюся в результате ядерного взрыва капсулу — объект «Кливаж» — теперь поглотит вода, что не исключает обширного радиоактивного заражения территории.

**3.8. Углегорская тепловая электростанция** — потенциально опасный объект, расположенный к северо-западу от посёлка Новолуганского. С 2015 года по электростанции нанесено более 100 артиллерийских ударов, в результате чего она сильно пострадала. Если подача энергии к жилым районам и промышленным предприятиям прекратится, местные жители останутся без отопления и электричества; кроме того, обесточенным окажется горно-шахтное оборудование и насосные станции. Это приведёт к заполнению шахт водой и попаданию загрязняющих веществ в окружающую среду.

**3.9. Полигон в селе Фугаровка.** Наиболее экологически опасным объектом Луганской области является единственный специализированный полигон для размещения твёрдых промышленных отходов химических предприятий Лисичанско-

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Рубежанского региона, площадь которого составляет около 40,12 га, где накоплено 98 % опасных отходов всей области. По неизвестным причинам объёмы накопления всех отходов на территории Луганской области, подконтрольной украинским властям, в сравнении с 2015 годом уменьшились почти на 16 млн 184 тыс. т. При развитии неблагоприятного сценария по подтоплению территорий шахтными водами с

одновременным поднятием уровня грунтовых вод токсичные отходы полигона вызовут экологическую катастрофу не только в регионе, но и на территории РФ через реки Северский Донец, Дон и Азовское море [12].

В случае самого негативного развития событий в регионе может произойти масштабная техноприродная катастрофа, характеристика которой в соответствии с [13] представлена в таблице 5.

Таблица 5

## Техноприродные опасности и риски Донбасса

Уровень и признак выделения	Классификационная группа риска
1. Генезис	Техноприродный
2. Среда развития	Инженерно-геологический, инженерно-гидрологический
3. Механизм	Подтопление территорий, техногенные сдвиги, смещения, загрязнение воды
4. Масштаб	Региональный, межгосударственный
5. Характер влияния	Перманентный
6. Полнота учёта	Суммарный (от нескольких опасностей)
7. Форма проявления	Территориальный
8. Сфера фиксации	Социальный, вещественный, экономический, экологический
9. Форма выражения	Комбинированный
10. Уровень предупреждения	Частично предупреждённый
11. Индивидуальный риск, чел/год	Очень большой ( $10^{-5}$ )
12. Экономический риск (тыс. руб./га · год)	Очень высокий (100–200)

**Оптимистическое заключение и выводы.** Опасность затопления шахт несколько преувеличена. Шахты Донбасса в XX веке затапливались неоднократно: в двадцатых годах четверть шахт региона была затоплена. А в период второй мировой войны почти все угледобывающие предприятия были разрушены. Когда нацисты отходили с Донбасса, то разрушали вентиляционные стволы и топили выработки. Однако после освобождения Донбасса воду из шахт откачали и продолжили добывать уголь. Горные инженеры перед затоплением рассчитывают время, за которое вода наполнит выработки и когда начнёт выходить на поверхность. В среднем, если перестать откачивать воду, шахта затопится за несколько лет. Время вы-

хода воды на поверхность составляет от 2 до 23 лет. Опасность в том, что зачастую невозможно предугадать, где именно вода выйдет на поверхность, если шахту затопили не по правилам.

Сложившаяся в 2014–2015 годах ситуация с упадком угледобывающей сферы в связи с боевыми действиями для Луганщины не нова.

За годы оккупации немецко-фашистскими войсками (1941–1943 гг.) угольная промышленность была практически уничтожена. Все шахты были взорваны и затоплены, уничтожена инфраструктура, практически полностью отсутствовали квалифицированные специалисты. Всего в угольной промышленности было разрушено 314 шахт союзного и 213 местного под-

чинения, общая ежегодная добыча угля которых составляла почти 40 млн тонн, сожжено и разрушено 2558 производственных сооружений.

Общая сумма убытков, нанесённых народному хозяйству, в отрасли по Ворошиловградской области составила около 17 млрд рублей.

Как и сегодня, многочисленные скептики утверждали: восстановить угольную промышленность Донбасса нереально. Так, в американской прессе неоднократно публиковалось мнение «объективных наблюдателей», утверждавших, что «Донбасс омертвел на столетие».

При этом уже через неделю после освобождения Ворошиловграда (22 февраля 1943 года) Государственным Комитетом Оборона СССР принято постановление «О восстановлении угольных шахт Донбасса», предусматривающее безотлагательные меры для обеспечения Донбасса квалифицированной рабочей силой, инженерно-техническими работниками, оборудованием и продовольствием.

В течение первого года восстановительных работ из затопленных шахт было откачано более 60 миллионов кубических метров воды (всего для возрождения всех шахт необходимо было откачать 585 млн м<sup>3</sup> воды).

Оправдался и расчёт на использование на первых порах мелких шахт. Оснащённые относительно несложным оборудованием, они давали более 70 % добываемого угля (более 2,5 млн тонн в год).

Учитывая схожесть ситуации, с которой столкнулась Луганская Народная Республика в 2014 году, была использована аналогичная стратегия восстановления и развития угольной промышленности.

Так, параллельно с осушением, восстановлением и запуском крупных шахт, пострадавших от агрессии вооружённых сил Украины, в Республике начали работу «малые шахты». Это позволило не только наполнить бюджет за счёт налогов и сборов новых предприятий и предоставить гражданам рабочие места, но и обеспечить

контроль за деятельностью таких недропользователей, усилить борьбу с незаконной добычей полезных ископаемых — «копанками», выведя эту, часто проблемную, область экономики из тени. Так, по данным Министерства топлива и угольной промышленности Луганской Народной Республики, уже в мае 2017 года в законном поле работу осуществляли 55 субъектов. Ещё более 150 подали соответствующие документы для регистрации.

Несмотря на тяжёлую военную, политическую и экономическую ситуацию, уделено значительное внимание поддержанию на безопасном уровне гидродинамической обстановки в регионе. Помимо работ по осушению затопленных шахт, для обеспечения безаварийного режима работы водоотливных комплексов и борьбы с подтоплением территорий распоряжением Совета Министров Луганской Народной Республики от 17.04.2015 года № 02–05/83/15 создано Государственное унитарное предприятие ЛНР «Углеструктуризация». На сегодня оно обеспечивает работу водоотливных комплексов ранее ликвидированных шахт им. П. Л. Войкова, «Славносербская» (участок бывшей ш. «Романовская»), «Никанор», им. В. Володарского, «Ворошиловская», «Центральная», им. С. Тюленина, им. Ф. П. Лютикова, «Брянковская», обеспечивая общий водоотлив в объёме более 38 млн м<sup>3</sup>/год (это 50 % довоенного объёма). Указанные работы ведутся за счёт бюджета Республики. Для 10-ти шахт ДНР, которые закрываются (им. Калинина, им. Ленина (Горловка), «Булавинская», «Ольховатская», «Красный Профинтер», «Красный Октябрь» (Енакиев) и др.) построено 6 водоотливных комплексов.

Немаловажным фактором является и то, что, невзирая на военную агрессию и экономическую блокаду Украины, Республики сохранили самое важное — желание сохранять угледобывающую сферу экономики, решать возникающие проблемные вопросы и привлекать для этого грамотных специалистов.

**Выводы:**

1. Нестабильная социально-экономическая ситуация в регионе, вызванная военным противостоянием, привела к массовому затоплению шахт Центрального Донбасса, что является угрозой развития опасных экологических последствий.

2. Из возможных негативных последствий реализовано в полной мере одно — ухудшилось качество поверхностных и подземных вод, что требует серьезных финансовых затрат на доведение их качества до приемлемого санитарно-гигиенического уровня.

4. Малоаметные проявления деформации поверхности территории пока не связа-

ны с подъёмом уровня шахтных вод, а носят характер естественного проседания толщи пород над выработанными горизонтами.

5. Несмотря на военное противостояние, угольные предприятия Республик осуществляют водоотлив примерно половины доведенных объёмов шахтных вод. На подконтрольной Украине части территории Донбасса экономическая ситуация осложняет полноценную откачку воды из расположенных там шахт. В случае увеличения притока шахтных вод в сроки примерно от 2 до 20 лет в регионе возможно развитие самого неблагоприятного сценария — масштабной природно-техногенной катастрофы.

**Библиографический список**

1. Чем грозит затопление шахт на Донбассе [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dnews.dn.ua/news/629661>.
2. Зона отчуждения — Донбасс [Электронный ресурс] // Громадское. — Режим доступа: [https://ru.hromadske.ua/special/zona\\_otchuzhdeniya\\_donbass](https://ru.hromadske.ua/special/zona_otchuzhdeniya_donbass).
3. Техногенные последствия закрытия угольных шахт Украины [Текст]: монография / под ред.: Ю. Н. Гавриленко, В. Н. Ермакова. — Донецк: НОРД-ПРЕСС, 2004. — 631 с.
4. И войны не надо: на Донбассе может «утонуть» целый город [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [raportikon.org/articles/94299-i-voyny-ne-nado-na](http://raportikon.org/articles/94299-i-voyny-ne-nado-na).
5. Донбассу грозит техногенная катастрофа [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://newizv.ru>.
6. Марковский, Ю. Е. Экспресс-контроль параметров качества питьевой воды [Текст] / Ю. Е. Марковский // Наукові праці Донецького національного технічного університету. — Донецьк, 2003. — Вип. 58. — С. 94–100.
7. Марковский, Ю. Е. Экологическое состояние природных вод Донбасса [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://confcontact.com>2008oktInet\\_tezi/gg\\_markovsky.php](https://confcontact.com>2008oktInet_tezi/gg_markovsky.php).
8. Гавришин, А. И. О формировании химического состава подземных вод в Шахтинском угленосном районе Восточного Донбасса [Текст] / А. И. Гавришин, В. Е. Борисова, Е. С. Торопова // Успехи современного естествознания. — 2016. — № 5. — С. 111–115.
9. Оценка рисков КП «Попаснянский водоканал»: отчёт КППРВ [Текст]. — Донецк, 2017. — 61 с.
10. СНиП 2.01.09–91. Здания и сооружения на подрабатываемых территориях и просадочных почвах [Текст]. — Введ. 1992-01-01. — М.: Стройиздат, 1992. — 32 с.
11. Грабар, О. В. Дослідження впливу підробки територій на втрати води в техногенних регіонах та вибір оптимальних технологій поповнення втрат [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01 / Грабар Олена Вікторівна. — Донецьк: ДНУ, 2010. — 20 с.
12. Дрозд, Г. Я. Состояние природно-урбанизированной среды территории Луганщины под управлением временной военно-политической администрации как проявление экоцида [Текст] / Г. Я. Дрозд, М. Ю. Хвортова // Вестник Луганского государственного университета им. В. Даля. — 2018. — № 8 (14). — Луганск: ЛНУ. — С. 63–76.
13. Рудько, Г. І. Моніторинг процесонебезпечних територій та розрахунок ризику техноприродних аварій і катастроф [Текст] / Г. І. Рудько, Є. О. Яковлев, О. Л. Рагозин. — К.: Товариство «Знання» України, 1997. — 79 с.

© Дрозд Г. Я.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., директором Института строительства, архитектуры и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Андрейчуком Н. Д., к.т.н., доц., и. о. зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В.*

*Статья поступила в редакцию 05.03.19.*

**д.т.н. Дрозд Г. Я.** (ІБА і ЖКГ ЛНУ ім. В. Даля, м. Луганськ, ЛНР, drozd.g@mail.ru)

### **ШАХТНІ ВОДИ ЯК ФАКТОР РИЗИКУ ТЕХНОГЕННІЙ КАТАСТРОФИ ДЛЯ ДОНБАСУ**

*Розглянуто ризики затоплення шахт Центрального Донбасу, яке викликане підвищенням рівня ґрунтових вод, що створює загрозу руйнування будівель і споруд та отруєння поверхневих і підземних вод. Проаналізовано в історичному контексті якості води джерел Донбасу. Розглянуто приклади деформації поверхні території регіону і її вплив на аварійність трубопровідних інженерних мереж. Виконано прогноз розвитку ситуації в регіоні внаслідок підтоплення і оцінено масштаб і характер потенційної природно-техногенної катастрофи.*

**Ключові слова:** шахтні води, якість води, підтоплення, просідання ґрунтів, аварія, екологічна та техногенна катастрофа.

**Doctor of Tech. Sc. Drozd G. Ya.** (IBA and HCS LNU after V. Dahl, Lugansk, LPR, drozd.g@mail.ru)

### **MINE WATER AS A RISK FACTOR OF TECHNOLOGICAL DISASTER FOR THE DONBASS**

*There have been studied the risks of flooding of mines of the Central Donbass. Flooding causes rising in the groundwater level, which poses a threat of destruction of buildings and structures and poisoning of surface and groundwater. The water quality of the Donbass water sources is analyzed in the historical context. The examples of deformation of the region surface and its impact on the accident rate of pipeline engineering networks are considered. The expected development was made for the situation in the region due to flooding and the scale and nature of potential anthropogenic disaster were assessed.*

**Key words:** mine water, water quality, flooding, subsidence, accident, environmental and technological disaster.

УДК 666.965:541.183

к.т.н. Мартынова В. Б.  
(ДонНАСА, г. Макеевка, ДНР, [vitalina-martynova@rambler.ru](mailto:vitalina-martynova@rambler.ru)),  
Парамонова А. В.  
(ЛНАУ, г. Луганск, ЛНР, [nastya-paramonova95@yandex.ru](mailto:nastya-paramonova95@yandex.ru))

## ВЛИЯНИЕ РАСХОДА МОДИФИКАТОРА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОБЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ

*Разработан оптимальный состав модифицированного газобетона неавтоклавного твердения по расходу модификатора «Арт-Конкрет». Установлено, что при расходе модификатора 0,5 % от массы цемента и  $V/T=0,36$  смеси обеспечивается марка по средней плотности образцов модифицированного газобетона D500, предел прочности при сжатии 1,5 МПа, коэффициент теплопроводности  $\lambda=0,122$  Вт/м·°С.*

**Ключевые слова:** ячеистый бетон, неавтоклавный газобетон, модифицированные добавки, пластификатор, оптимизация, физико-механические свойства.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Большое значение в строительной индустрии уделяется использованию материалов с повышенными теплозащитными свойствами. Один из наиболее эффективных современных строительных материалов в жилищном домостроении — газобетон. Газобетон является оптимальным материалом в современном многоэтажном и высотном каркасном строительстве, поскольку обладает такими показателями, как: энергосбережение, низкая масса бетонных блоков, простота их обработки, а также комфортность возводимого жилья. Изделия из газобетона обладают широким диапазоном типоразмеров, что позволяет возводить здания практически любой сложности и конфигурации [3].

Согласно современным требованиям к строительным материалам, стеновые блоки из газобетона — это искусственный материал, который позволяет возводить однослойные стеновые ограждения, при этом обеспечиваются нормы по сопротивлению теплопередаче без дополнительного утепления.

Современная технология бетона основывается на создании высококачественного искусственного каменного материала, который характеризуется высокой дисперсностью, низкой дефектностью и постоянством структуры. Благодаря введе-

нию в структуру различных модифицирующих добавок, создаются различные по назначению бетоны.

Использование различных модификаторов (добавок) позволит усовершенствовать структуру газобетонной матрицы, получить эффективные газобетоны с повышенными физическими и механическими свойствами [5].

**Постановка задачи.** Задачей экспериментальных исследований является разработка оптимального состава модифицированного газобетона неавтоклавного твердения по расходу модификатора «Арт-Конкрет» (Республика Беларусь) при обеспечении образцов газобетона марки по средней плотности D500 и пределу прочности при сжатии не менее 1,4 МПа после тепловлажностной обработки (ТВО).

**Изложение материала и его результаты.** При проведении экспериментальной части исследований в качестве вяжущего вещества применялся портландцемент ПЦ 500 Д0 (ОАО «Новоросцемент», г. Новороссийск), в качестве заполнителя использовали оолитовый песок с модулем крупности  $M_k=1,83$  (рис. 1). Алюминиевая пудра ПАП-1 использовалась в качестве газообразователя. Модификатор — пластифицирующая добавка «Арт-Конкрет» (рис. 2).



Рисунок 1 Заполнитель — оолитовый песок



Рисунок 2 Модификатор — пластифицирующая добавка «Арт-Конкрит»

Расход материалов на  $1\text{ м}^3$  газобетона с расчётной средней плотностью  $500\text{ кг/м}^3$  рассчитан согласно СН-277-80 [1]. Диаметр расплыва смеси по Суттарду составил  $d_{\text{рас}}=34\text{ см}$ .

Физико-механические свойства газобетона определяли в соответствии со стандартными методами. Предел прочности на сжатие определяли на образцах — кубиках с размером ребра  $100\text{ мм}$  — в соответствии с ГОСТ 10180-90 [4]. Коэффициент теплопроводности газобетона определялся на установке для определения теплопроводности строительных материалов и изделий «МИТ-1» (рис. 3).

Ранее в работах представлены исследования по оптимизации состава газобетонной смеси на карбонатном сырье с расчётной средней плотностью  $530\text{ кг/м}^3$  по кри-

терию пластической прочности смеси (не менее  $20\text{ кПа}$ ). Использовался полный двухфакторный эксперимент. Расчёты осуществлялись в программе MathCAD [7].

С целью увеличения прочностных показателей газобетона D500 оптимального состава в бетонную матрицу вводится модификатор, в качестве которого используется пластифицирующая добавка, обеспечивающая длительную сохранность подвижности смеси при формировании ячеистой структуры, что достигается с набором пластической прочности и процессом вспучивания газобетонного сырца [2]. Известно, что эффективность добавки определяется выбором оптимального количества дозировки и составом, а также с учётом условий применения, выбором цемента и других компонентов газобетонной смеси. Многообразие этих компонентов и их химическое взаимодействие с образованием трёх разделов фаз (Т-Ж-Г) в цементных системах, вводимые добавки создают ситуацию несовместимости процессов [6].

Поэтому одной из главных задач исследования является оптимизация расхода модификатора по категориям средней плотности (не более  $\rho_{\text{ср}}=530\text{ кг/м}^3$ ) и предела прочности при сжатии образцов газобетона после ТВО (не менее  $R_{\text{сж}}=1,4\text{ МПа}$ ). На рисунке 4 показан расход модификатора и его влияние на водотвёрдое отношение газобетонной смеси при постоянном диаметре расплыва по Суттарду.



Рисунок 3 Измерительный прибор «МИТ-1»

По сравнению с контрольной смесью, водотвёрдое отношение смеси снижается от 12,2–34,7 % с увеличением модификатора. Следует отметить, что водотвёрдое отношение снижается и приводит к увеличению предела прочности при сжатии образцов от 1,26–2,79 МПа по сравнению с контрольным образцом газобетона (рис. 5).

Увеличение прочностных показателей связано с тем, что пластифицирующая до-

бавка увеличивает соотношение размеров контактного слоя и расстояние между зёрнами при низком цементно-водном отношении смеси. Это влияние положительно сказывается на прочностных показателях газобетона. Однако на сырцах с расходом модификатора от 0,6 % и выше наблюдается неравномерное формирование ячеистой структуры по высоте сечения, что отображено на рисунке 6.

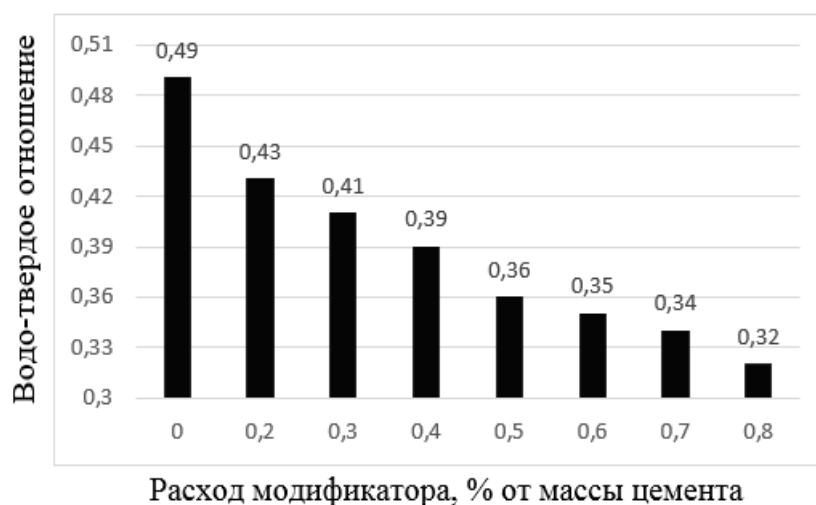


Рисунок 4 График зависимости водотвёрдого (В/Т) отношения газобетонной смеси от расхода модификатора

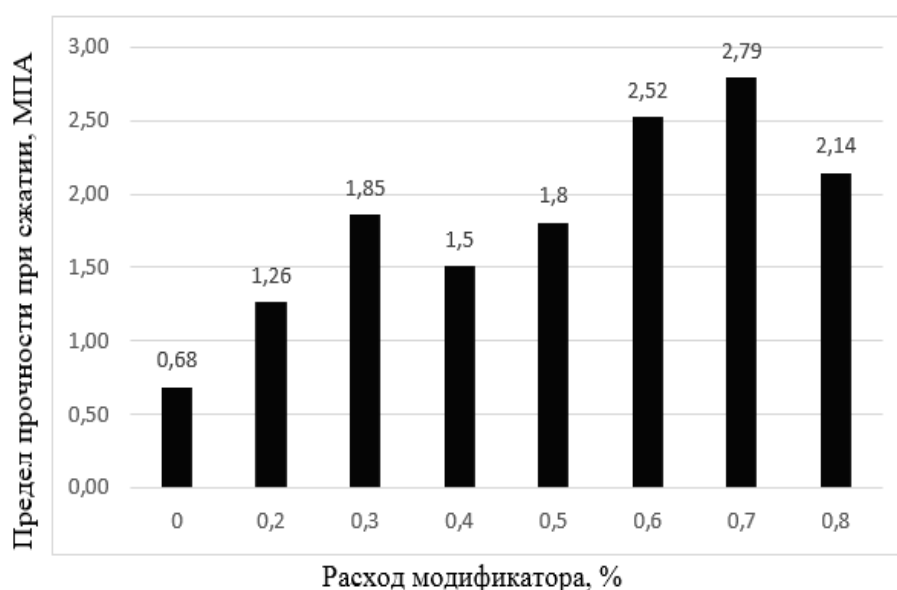
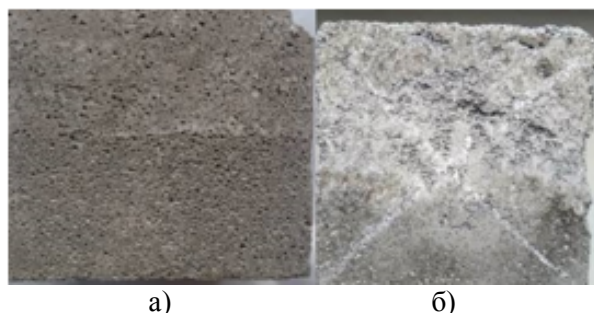


Рисунок 5 График зависимости предела прочности при сжатии образцов газобетона после тепловлажностной обработки от расхода модификатора

## СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА



а — образец газобетона с расходом модификатора 0,5 %; б — образец газобетона с расходом модификатора 0,8 %.

Рисунок 6 Образцы газобетона D500

Расход модификатора снижает водотвёрдое отношение, но при этом увеличивается средняя плотность образцов, что видно в таблице 1. Свободная вода в газобетонной матрице также является порами и пустотами. Поэтому особый интерес представляет определение оптимального соотношения между расходом модификатора 0,5 % и водотвёрдым отношением газобетонной смеси при обеспечении средней плотности не более  $530 \text{ кг/м}^3$  и предела прочности при сжатии не менее 1,4 МПа после ТВО. Физико-механические свойства газобетона в зависимости от диаметра расплыва по Суттарду представлены в таблице 2.

Таблица 1

Изменение средней плотности образцов газобетона от расхода модификатора

Наименование показателя	Расход модификатора, %							
	0 (контрольный образец)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Средняя плотность, $\rho$ , $\text{кг/м}^3$	525	610	664	654	658	666	655	543

Таблица 2

Физико-механические свойства газобетона в зависимости от диаметра расплыва по Суттарду

Наименование показателя образцов газобетона	Диаметр расплыва по Суттарду, см		
	36	38	40
Средняя плотность, $\rho$ , $\text{кг/м}^3$	525	610	664
Предел прочности при сжатии, $R_{сж}$ , МПа	1,5	1,46	1,46

**По результатам исследования можно сделать следующие выводы:** установлено, что оптимальная дозировка модификатора (0,5 % от массы цемента) и В/Т=0,36 газобетонной смеси соответствуют преде-

лу прочности при сжатии 1,5 МПа, после ТВО и марки по средней плотности D500 газобетона.

Коэффициент теплопроводности составил  $\lambda=0,122 \text{ Вт/м}\cdot^\circ\text{C}$ .

### Библиографический список

1. Кривицкий, М. Я. Ячеистые бетоны [Текст] / М. Я. Кривицкий, Н. И. Левин, В. В. Макаричев. — М. : Стройиздат, 1972. — 138 с.
2. Явруян, Х. С. Влияние некоторых рецептурно-технологических факторов на свойства неавтоклавного газобетона [Текст] / Х. С. Явруян, М. Г. Холодняк, А. И. Шуйский, С. А. Стельмах, Е. М. Щербань // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 4 (38). — С. 93.
3. СН 277–80. Инструкция по изготовлению изделий из ячеистого бетона [Текст]. — М. : Стройиздат, 1981. — 20 с.

4. ГОСТ 10180–90 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам [Текст] : взамен ГОСТ 10180–78. — Введ. 1991-01-01. — М. : Стандартинформ, 2006. — 32 с.
5. Производство ячеистобетонных изделий : теория и практика [Текст] / Н. П. Сажнев, В. Н. Гончарик, Г. С. Горнашевич, Л. В. Соколовский. — Мн. : Стринко, 1999. — 284 с.
6. Воробьев, Х. С. Регулирование скорости вспучивания и размеров газовых пор при производстве изделий из ячеистого бетона [Текст] / Х. С. Воробьев, Г. М. Гофман // Строительные материалы. — 1980. — № 3. — С. 20.
7. Дядюн, Ю. Ю. Модифицированный газобетон неавтоклавного твердения на основе карбонатного сырья с повышенными физико-механическими свойствами [Текст] / Ю. Ю. Дядюн, Д. М. Сокол, В. Б. Мартынова // Молодёжные инновации : сборник статей. — М. : НИМГСУ, 2018. — С. 128–135.

© Мартынова В. Б.© Парамонова А. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц., и. о. зав. каф. СК ДонГТУ Псюком В. В.,  
к.т.н., доц., зав. каф. СК ЛНАУ Матвеевым В. П.**

Статья поступила в редакцию 01.03.19.

**к.т.н. Мартинова В. Б.** (ДонНАБА, м. Макіївка, ДНР),  
**Парамонова А. В.** (ЛНАУ, м. Луганськ, ЛНР)

#### **ВПЛИВ ВИТРАТИ МОДИФІКАТОРА НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГАЗОБЕТОНУ НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДІННЯ**

Розроблено оптимальний склад модифікованого газобетону неавтоклавного твердіння за витратою модифікатора «Арт-Конкріт». Встановлено, що при витраті модифікатора 0,5 % від маси цементу і  $B/T=0,36$  суміші забезпечується марка за середньою щільністю зразків модифікованого газобетону D500, межа міцності при стисненні 1,5 МПа, коефіцієнт теплопровідності  $\lambda=0,122$  Вт/м·°С.

**Ключові слова:** ніздрюватий бетон, неавтоклавний газобетон, модифіковані добавки, пластифікатор, оптимізація, фізико-механічні властивості.

**PhD Martunova V. B.** (DonNABA, Makeyevka, DPR), **Paramonova A. V.** (LNAU, Lugansk, LPR)  
**INFLUENCE OF THE FLOW MODIFIER ON PHYSICAL AND MECHANICAL  
PROPERTIES OF AERATED CONCRETE OF THE NON-AUTOCCLAVED HARDENING**

The optimal composition of D500 grade foam concrete with the use of carbonate raw materials by the flow of modified additive "Art-Concrete" was developed. It was found out that the optimal gauging of the modifier is 0.5 % of cement weight and  $B/T=0.36$  of the aerated concrete mixture, corresponds to the compressive strength of 1.5 MPa, after the TVO and grade by the average density of D500 aerated concrete.

**Key words:** cellular concrete, non-autoclaved aerated concrete, modified additives, plasticizer, optimization, physical and mechanical properties.



**МАШИНОСТРОЕНИЕ  
И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

---

**МАШИНОБУДУВАННЯ  
ТА МАШИНОЗНАВСТВО**

---

**MECHANICAL ENGINEERING  
AND MACHINE SCIENCE**



УДК 622.647.2

д.т.н. Корнеев С. В.,  
к.т.н. Доброногова В. Ю.,  
Долгих В. П.

(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, [linercos@mail.ru](mailto:linercos@mail.ru))

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАЛЬНЫХ НАГРУЗОК В ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРАХ НА ОСНОВЕ УТОЧНЁННОГО ТЯГОВОГО РАСЧЁТА

*Приведён алгоритм имитационного моделирования работы шахтных ленточных конвейеров для определения сопротивлений движению ленты, а затем и нагрузок в приводе на основе уточнённой методики тягового расчёта с учётом параметров случайного углепотока.*

**Ключевые слова:** ленточный конвейер, имитационное моделирование, уточнённый тяговый расчёт, углепоток.

### Проблема и её связь с научными и практическими задачами.

На этапах проектирования и эксплуатации шахтных ленточных конвейеров необходимо ответить на вопрос, насколько эффективным является регулирование скорости и (или) натяжения тягового органа (ТО) конвейера при поступлении на него реального грузопотока.

Типовая методика тягового расчёта конвейеров [1], основывающаяся на установленных экспериментально нормативных интегральных коэффициентах сопротивления движению тягового органа, не позволяет ответить на данный вопрос адекватно, так как не отражает влияния скорости конвейера и натяжений ленты на сопротивление движению ТО, а следовательно, и на энергопотребление.

Известны работы [2, 3 и др.], в которых с различных позиций исследуются локальные сопротивления движению ТО  $W_j$ , возникающие при прохождении лентой с грузом отдельных  $j$ -х роlikоопор,  $j=1, 2, \dots, j_{\max}$ . В работе [2] приводятся алгоритм и результаты расчёта  $W_j$ , в основу которого положено компьютерное моделирование напряжённо-деформированного состояния элементов системы «груз–лента–роlikоопоры». Полученные регрессионные зависимости  $W_j$  от таких, в принципе, управляемых факторов, как погонная масса груза на ленте  $\rho$ , натяжение ленты  $S$  и скорость  $v$ , хорошо согла-

суются с результатами экспериментальных исследований [3].

Установленный факт заметного влияния на сопротивления движению  $W_j$  величин  $\rho$ ,  $S$  и особенно  $v$  послужил стимулом к разработке уточнённой методики тягового расчёта [4], которая в отличие от типовой методики [1] позволяет подходить к расчёту дифференцированно, учитывая влияние указанных выше факторов, а также геометрических параметров и физико-механических свойств элементов системы «груз–лента–роlikоопоры».

Для расчёта реальных сопротивлений движению ТО и нагрузок в приводе в каждом конкретном случае эксплуатации конвейера при тех или иных режимных параметрах уточнённая методика должна быть дополнена алгоритмами загрузки конвейера реальным грузопотоком, а также регулирования скорости и (или) натяжения.

Реализации реального  $\Delta t$ -углепотока  $Q(t_1, \Delta t)$ , где  $t_1$  — машинное время работы конвейера,  $\Delta t$  — мерный интервал времени, обычно определяются по методу имитационного моделирования [1, 5, 6]. Однако при моделировании углепотока, поступающего на отдельно взятый конвейер шахтной транспортной системы, перерывы в поступлении груза не согласовываются во времени и по продолжительности с перерывами в работе конвейера. Это, как правило, приводит к заниженным значени-

ям расчётных нагрузок в приводе конвейера. Очевидно, необходимо исключать перерывы в работе конвейера из перерывов в поступлении углепотока, рассматривая, таким образом, работу конвейера в течение машинного времени.

**Постановка задачи.** Задачей исследования является разработка алгоритма имитационного моделирования работы шахтных ленточных конвейеров для определения сопротивлений движению ленты, а затем и нагрузок в приводе на основе уточнённой методики тягового расчёта с учётом случайного характера углепотока.

**Изложение материала и его результаты.** Суть моделирования заключается в имитации процесса перемещения грузопотока по конвейеру, т. е. его загрузки при поступлении на него  $\Delta t$ -углепотока  $Q(t_1, \Delta t)$ . Для этого вначале принимается некоторый интервал квантования времени  $\tau$ ,  $\tau < \Delta t$ ,  $\Delta t$  кратно  $\tau$ . Машинное время работы конвейера представляется в виде последовательности целых чисел  $k=0, 1, 2, \dots, k_{max}$ , соответствующих моментам времени  $k\tau$ , а все имитируемые величины, в том числе входящий минутный грузопоток и его функция готовности, — в виде временных рядов соответственно  $q_k$  и  $Y_k$ .

Параметры грузопотока принимаются на основании известных опытных и экспериментальных данных, уточняемых в процессе эксплуатации конвейера.

Нормально распределённый с экспоненциальной корреляционной функцией непрерывный углепоток имитируется по методу авторегрессии [5].

Законы распределения импульсов и пауз поступающего на конвейер грузопотока на оси машинного времени, которые принимаются в качестве исходной информации для имитации грузопотока, можно определить в результате моделирования системы «выемочные машины–подземный транспорт–подъём» в целом или опытным путём. Имея статистики, характеризующие отдельно работу конвейера в течение его рабочего времени и поступающего на него

углепотока, можно определить среднее значение продолжительности пауз в поступлении груза на работающий конвейер  $\bar{t}_{1п}$ , т. е. на оси его машинного времени:

$$\bar{t}_{1п} = \frac{r\bar{t}_{п} - m\bar{\tau}_{п}}{s} = \frac{r\bar{t}_{п} - m\bar{\tau}_{п}}{r - p_0m}, \quad (1)$$

где  $\bar{t}_{п}$  и  $\bar{\tau}_{п}$  — средние значения импульсов и пауз в поступлении груза, определяемые в течение рабочего времени;  $\bar{t}_{п}$  и  $\bar{\tau}_{п}$  — средние значения наработки на отказ и времени восстановления конвейера;  $r$  — число пауз в поступающем на конвейер грузопотоке, в том числе по причине остановки конвейера, в течение достаточно продолжительного времени  $T$ ,  $r = T/(\bar{t}_{п} + \bar{\tau}_{п})$ ;  $m$  — число пауз в работе конвейера за то же время  $T$ ,  $m = T/(\bar{\tau}_{п} + \bar{\tau}_{п})$ ;  $p_0$  — вероятность полного совпадения пауз в работе конвейера с соответствующими паузами поступающего грузопотока, т. е. вероятность одновременной остановки конвейера и прекращения поступления на него груза, а также немедленного поступления груза при возобновлении работы конвейера;  $s$  — число пауз в поступлении груза за время  $T$  на работающий конвейер.

Если паузы в поступлении груза на конвейер на оси машинного времени подчиняются экспоненциальному закону распределения, то параметр закона распределения  $v_1 = 1/\bar{t}_{1п}$ .

Для имитации функции готовности грузопотока  $Y_k$  в течение машинного времени конвейера можно воспользоваться формулой [6] (в нашей редакции):

$$Y_k = Y_{k-1} \left( \frac{1}{2} \frac{y_k - \alpha}{|y_k - \alpha|} + \frac{1}{2} \right) + [1 - Y_{k-1}] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1}{2} \frac{y_k - \beta}{|y_k - \beta|} + \frac{1}{2} \right) \right], \quad (2)$$

где  $y_k$  — реализация случайной величины, равномерно распределённой в интервале  $[0, 1]$ ;  $\alpha$  — вероятность перехода от

состояния  $Y_{k-1}=1$  к состоянию  $Y_k=0$ ;  $\beta$  — вероятность перехода от состояния  $Y_{k-1}=0$  к состоянию  $Y_k=1$ . При экспоненциальном законе распределения величин  $t_n$  и  $t_n$  [7]

$$\alpha = 1 - \exp[-\tau/\bar{t}_n]; \beta = 1 - \exp[-\tau/\bar{t}_n].$$

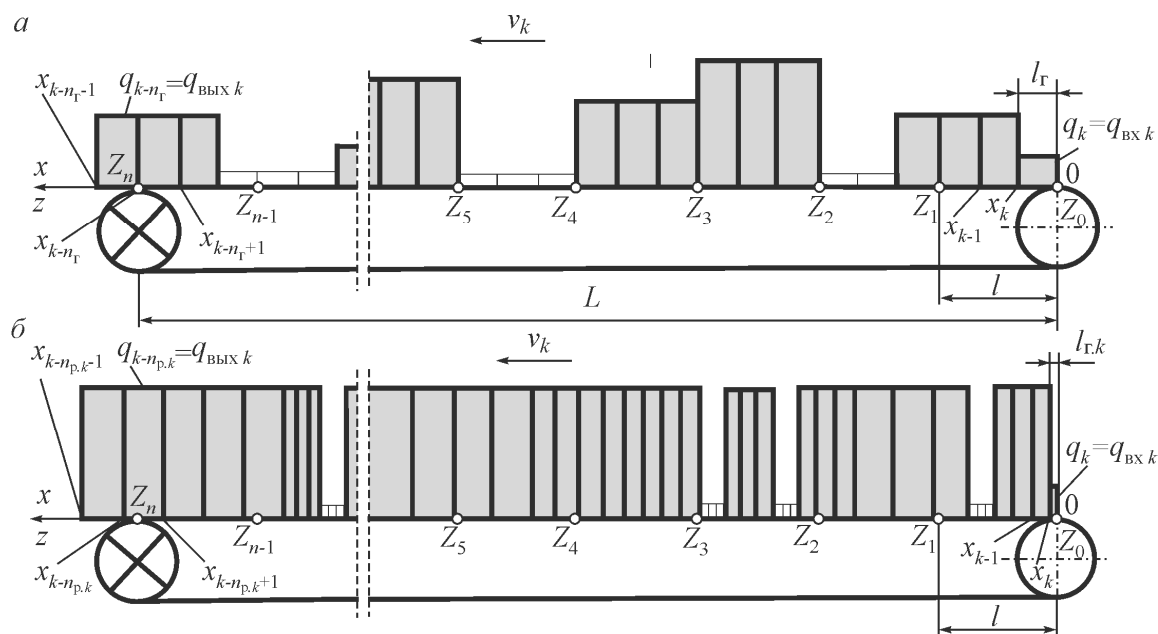
Применение формулы (2) позволяет существенно упростить алгоритм моделирования  $Y_k$ .

Расчётная схема, приведённая на рисунке 1, отражает процесс загрузки ленточного конвейера для случаев нерегулируемой и регулируемой скорости. При ре-

гулировании скорости погонная масса груза на конвейере поддерживается на уровне допустимого значения  $\rho_{\text{доп}}$ .

Совпадающие оси координат  $x$  и  $z$ , начало которых находится на хвостовом приводе, направлены к головному приводу.

Грузовая ветвь конвейера разбивается на участки длиной  $l$  каждый,  $l=v_n\Delta t$ , где  $v_n$  — номинальная скорость конвейера. Отсчёт участков ведётся от хвостового привода. Координаты концов  $i$ -х участков ленты  $Z_i=il$ ,  $i=1, 2, \dots, n$ , где  $n=L/l$ ,  $L$  — длина конвейера.



а — скорость не регулируется, б — скорость регулируется

Рисунок 1 Расчётная схема загрузки конвейера

Положение груза определяется на оси  $x$ . В каждый момент времени  $k$  порция поступившего на конвейер груза  $q_k$  занимает на конвейере вдоль оси  $x$  участок длиной  $l_{\Gamma k}=v_k\tau$ , где  $v_k$  — текущее значение скорости конвейера, среднее за время  $\Delta t$ . При этом все остальные порции груза  $q_{k-u}$ , поступившие на конвейер в предшествующие моменты времени  $k-u$ ,  $u=1, 2, \dots$ , смещаются по оси  $x$  к пункту разгрузки на величину  $l_{\Gamma k}$ .

Координаты концов участков груза, соответствующих порциям груза  $q_k$  и  $q_{k-u}$ , определяются из выражения

$$\begin{cases} x_{k+1} = 0; \\ x_{k-u} = x_{k-u+1} + l_{\Gamma k}, \quad u = 0, 1, \dots, n_{\Gamma} - 1, \end{cases} \quad (3)$$

где  $n_{\Gamma}$  — максимальное число контролируемых участков груза на оси  $x$ ,  $n_{\Gamma}=L/v_n\tau$  при постоянной скорости конвейера и  $n_{\Gamma}=L/v_{\min}\tau$  — при регулируемой,  $v_{\min}$  — наименьшая скорость конвейера, устанавливаемая по условию охлаждения приводного двигателя, обычно  $v_{\min}=0,1v_n$ .

В каждый  $k$ -й момент времени на конвейере находится при постоянной скоро-

сти  $n_r$ , а при регулируемой скорости — некоторое число  $n_{p,k}$  участков груза.

Количество груза, находящегося на  $i$ -м участке конвейера в  $k$ -й момент времени, (см. рис. 1):

$$G_{i,k} = \sum_{u=1}^{u_{\max}} g_{i,k-u}, \quad (4)$$

где  $g_{i,k-u}$  — часть порции груза  $q_{k-u}$ , поступившего на конвейер в  $k-u$ -й момент времени, которая в  $k$ -й момент времени приходится на  $i$ -й участок конвейера.

Учитывая, что  $l_{r,k} < l$ , получим

$$g_{i,k-u} = \begin{cases} q_{k-u}, & \text{если } x_{k-u} \leq Z_i \text{ и } x_{k-u+1} \geq Z_{i-1}; \\ q_{k-u} (Z_i - x_{k-u+1}) / (x_{k-u} - x_{k-u+1}), & \\ \text{если } x_{k-u} > Z_i \text{ и } x_{k-u+1} < Z_i; \\ q_{k-u} (x_{k-u} - Z_{i-1}) / (x_{k-u} - x_{k-u+1}), & \\ \text{если } x_{k-u} > Z_{i-1} \text{ и } x_{k-u+1} < Z_{i-1}; \\ 0, & \text{если } x_{k-u} \leq Z_{i-1} \text{ или } x_{k-u+1} \geq Z_i. \end{cases} \quad (5)$$

Количество груза на конвейере в  $k$ -й момент времени

$$G_k = \sum_{i=1}^n G_{i,k}. \quad (6)$$

В общем случае значение сходящего с конвейера грузопотока

$$q_{\text{вых},k} = G_{k-1} + q_{\text{вх},k} - G_k. \quad (7)$$

Сопротивление движению ТО с грузом  $W_k$  в  $k$ -й момент времени согласно методике уточнённого тягового расчёта [5] определяется по формуле

$$W_k = S_{c,k} + W_{\Pi} + \sum_{j=1}^{j_{\max}} [W_{j,k}(v_k, \rho_{j,k}, S_{j,k}) + gl_{p,r}(\rho_{j,k} + \rho_0)\sin\beta + W_{\text{вр},j,k}], \quad (8)$$

где  $S_{c,k}$  — натяжение ТО на сбегавшей ветви конвейера;  $W_{\Pi}$  — сопротивление движению порожняковой ветви конвейера;  $W_{j,k}(v_k, \rho_{j,k}, S_{j,k})$  — сопротивление движению ленты на  $j$ -й роликоопоре от деформирования ленты и груза;  $\rho_{j,k}$  — погонная масса груза, приходящегося на  $j$ -ю ролико-

опору;  $S_{j,k}$  — натяжение ТО на  $j$ -й роликоопоре;  $l_{p,r}$  — расстояние между роликоопорами грузовой ветви конвейера;  $\rho_0$  — погонная масса ТО;  $\beta$  — угол установки конвейера ( $\beta > 0$  — при транспортировании груза вверх,  $\beta < 0$  — при транспортировании вниз);  $W_{\text{вр},j,k}(v_k, \rho_{j,k})$  — сопротивление вращению роликов  $j$ -й роликоопоры.

Если для конкретного конвейера известна зависимость коэффициента сопротивления движению ТО с грузом от деформаций, то

$$W_k = S_{c,k} + W_{\Pi} + \sum_{i=1}^n [g_{i,k} w_{i,k}(v_k, \rho_{i,k}, S_{i,k}) \cos\beta + g(G_{i,k} + \rho_0 l) \sin\beta + W_{\text{вр},i,k}], \quad (9)$$

где  $w_{i,k}(v_k, \rho_{i,k}, S_{i,k})$  — текущее значение коэффициента сопротивления движению от деформирования ленты и груза на  $i$ -м участке ТО;  $\rho_{i,k}$ ,  $S_{i,k}$  — средние значения погонной массы груза и натяжения ленты на  $i$ -м участке ТО,  $\rho_{i,k} = G_{i,k} / l$ ;  $W_{\text{вр},i,k}$  — суммарное сопротивление вращению роликов роликоопор на  $i$ -ом участке ТО.

Мощность привода

$$N_k = v_k W_k / 10^3 \eta, \quad (10)$$

где  $\eta$  — КПД привода.

Блок-схема моделирования реальных нагрузок шахтных конвейеров представлена на рисунке 2.

В качестве примера приводятся результаты моделирования процесса загрузки участкового конвейера 1Л800Д, оснащённого лентой ЕР-800/4-5+2 и роликоопорами ГЖ80-108-30, полученные для следующих исходных данных: математическое ожидание непрерывного забойного минутного углеспотока — 3,41 т/мин; дисперсия — 2 т<sup>2</sup>/мин<sup>2</sup>; математические ожидания длительностей поступления и отсутствия груза соответственно 5 и 7 мин, интервал дискретизации времени  $\tau$  — 5 с,  $k_{\max} = 10^4$ ; номинальная скорость конвейера — 2 м/с.

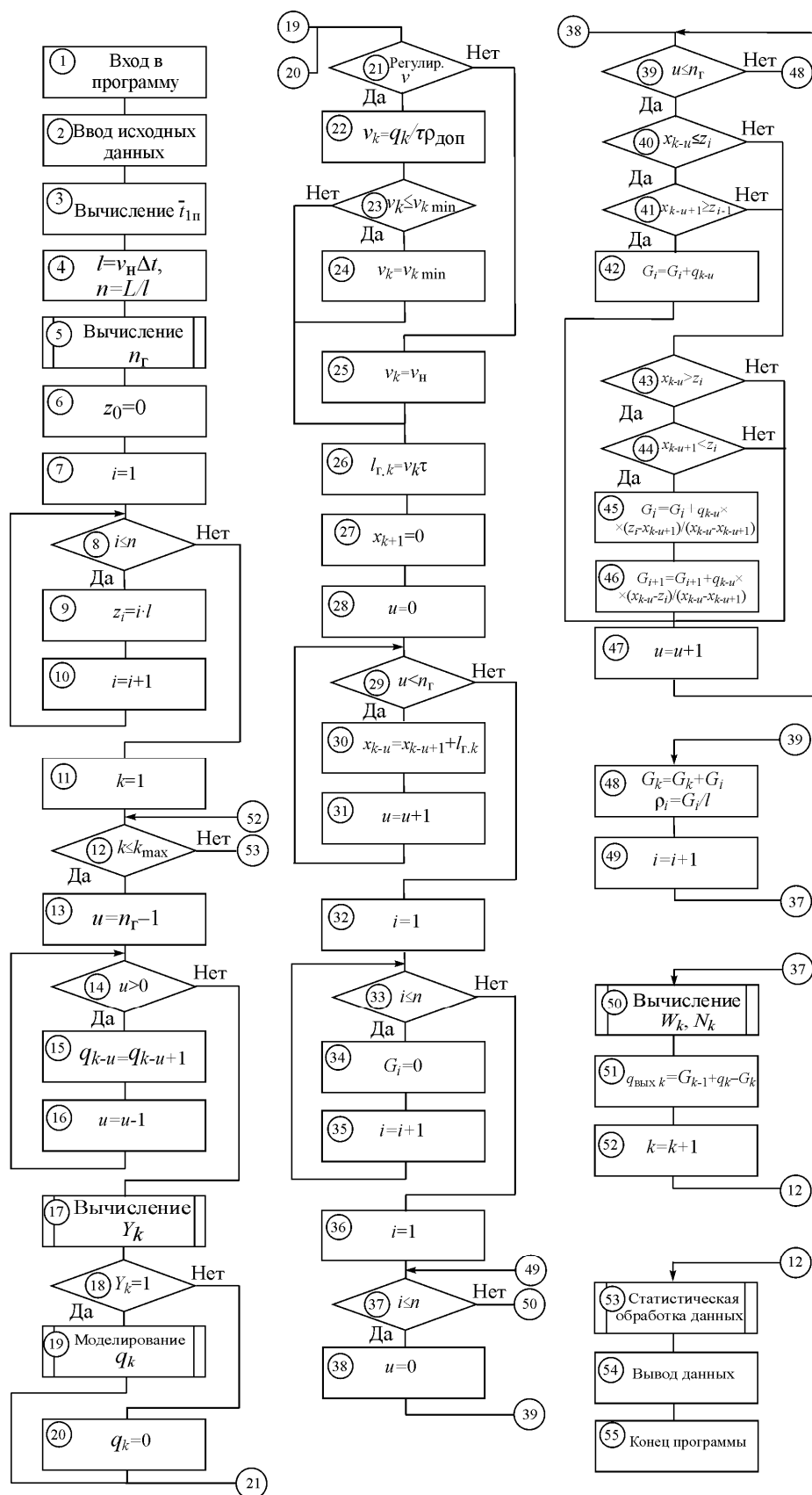


Рисунок 2 Блок-схема моделирования нагрузок в конвейере

Рассматриваются два режима работы конвейера: 1) скорость не регулируется; 2) скорость регулируется,  $v_k = f(q_k)$ .

При расчёте по уточнённой методике для данного конвейера коэффициенты  $w_{ik}(v_k, \rho_{ik}, S_{ik})$  определяются по одной из формул [4]:

– при регулировании скорости ( $\rho = \rho_{\text{доп}}$ ):

$$w_{ik}(S_{ik}, v_{ik}) = 0,019 - 9,3 \cdot 10^{-4} S_{ik} + 1,18 \cdot 10^{-2} v_{ik} - 6,6 \cdot 10^{-6} S_{ik} v_{ik} + 1,5 \cdot 10^{-6} S_{ik}^2 + 7 \cdot 10^{-4} v_{ik}^2; \quad (11)$$

– при регулировании натяжения ( $v_k = v_n$ ):

$$w_{ik}(S_{ik}, \rho_{ik}) = 0,034 - 1,7 \cdot 10^{-3} S_{ik} + 3,4 \cdot 10^{-4} \rho_{ik} + 2 \cdot 10^{-6} S_{ik} \rho_{ik} + 2,5 \cdot 10^{-5} S_{ik}^2 - 2 \cdot 10^{-6} \rho_{ik}^2. \quad (12)$$

Для сравнения также определяются сопротивление движению ТО по формулам типовой методики [1]:

$$W_k = W_{x.x} + G_k (w_n \cos \beta + \sin \beta), \quad (13)$$

где  $W_{x.x}$  — сопротивление движению ТО в режиме холостого хода,  $W_{x.x} = L(2\rho_0 + \rho_{p.n} + \rho_{p.v})w_n \cos \beta$ ;  $\rho_{p.n}$  и  $\rho_{p.v}$  — приведённая погонная масса нижней и верхней роликоопор;  $w_n$  — нормативный коэффициент сопротивления движению ТО.

Фрагменты диаграмм временных рядов  $v_k$ ,  $W_k$  и  $N_k$ , полученных по уточнённой методике и по формулам типовой методи-

ки при  $v = v_n$  и при  $v_k = f(q_k)$ , представлены на рисунках 3 и 4.

На диаграммах наблюдаются характерные участки увеличения  $W_k$ , соответствующие загрузке конвейера, и снижения  $W_k$  при его разгрузке и одновременном прекращении поступления на конвейер груза.

В результате статистической обработки полученного массива данных построены гистограммы распределения случайных величин  $W$  и  $N$  (рис. 5), а также получены приведённые в таблице средние значения  $\bar{v}$ ,  $\bar{W}$ ,  $\bar{N}$  и стандартные отклонения  $s_v$ ,  $s_W$  и  $s_N$ .

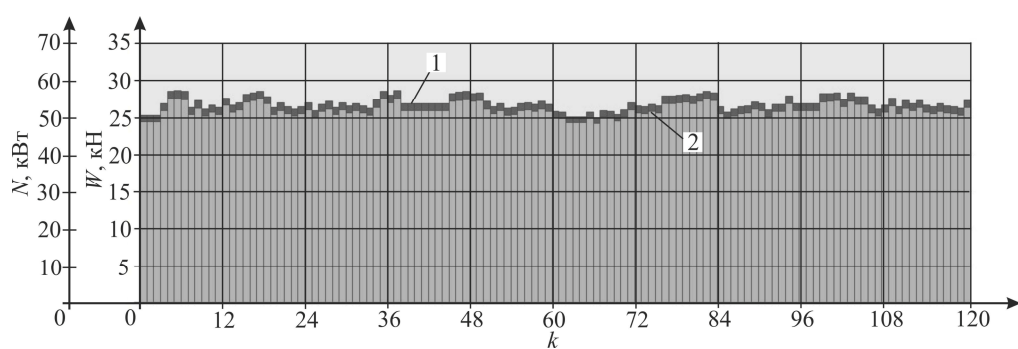
При номинальной скорости конвейера текущие значения  $W_k$  и  $N_k$ , полученные по уточнённой методике, несколько меньше соответствующих значений, рассчитываемых по формулам типовой методики. Средние значения отличаются на 2,5 %. Столь незначительное расхождение результатов расчётов объясняется тем, что применяемый в типовой методике нормативный коэффициент сопротивления движению ТО определён опытным путём для условий, близких к заданным, и поэтому обеспечивает достаточно высокую точность расчётов по типовой методике. Одновременно это также указывает на правильность расчётов по уточнённой методике.

Также мало отличаются по внешнему виду гистограммы (см. рис. 5 и 6) случайных величин  $W$  и  $N$ , реализации которых имитировались с применением типовой и уточнённой методик.

Таблица

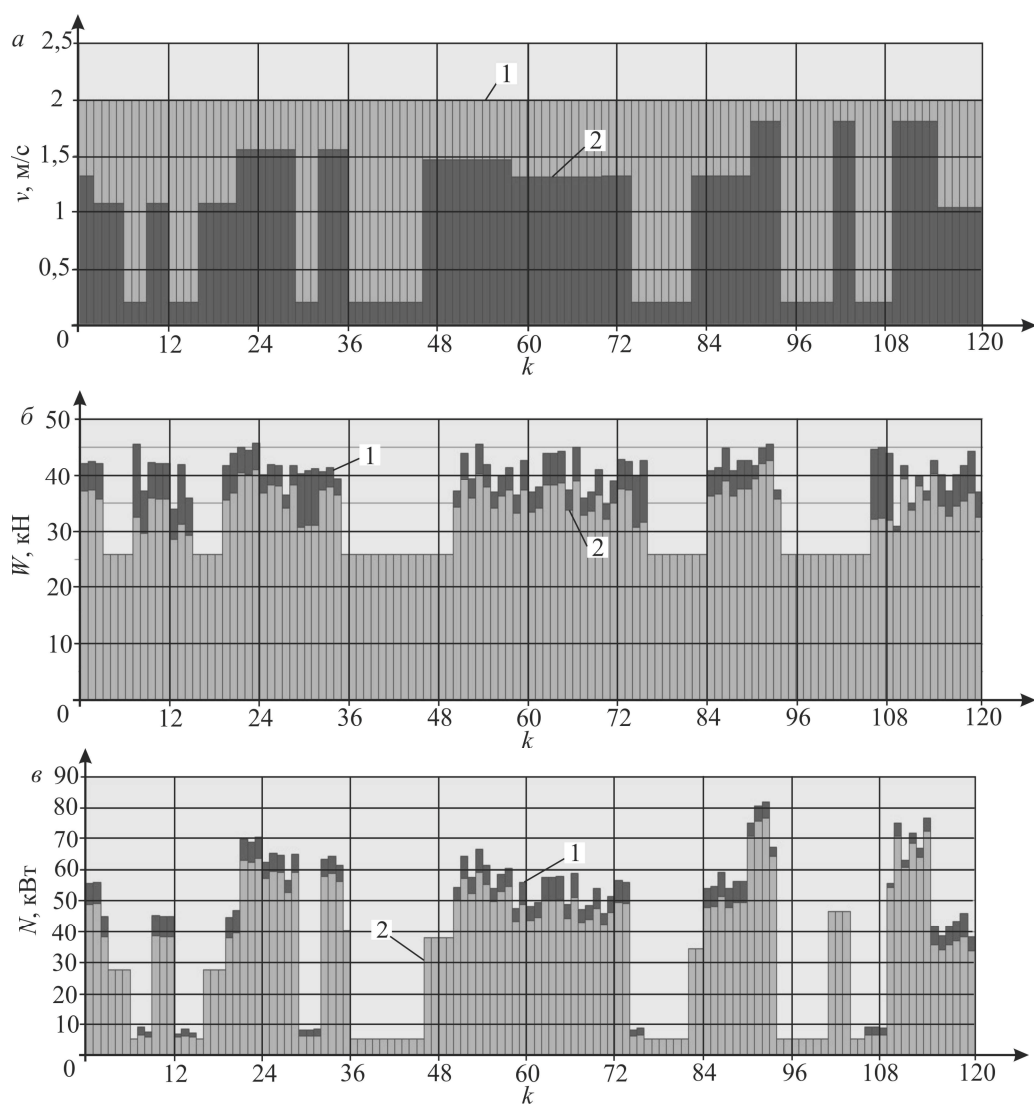
Статистики случайных величин  $v$ ,  $W$ ,  $N$ 

Статистики	$v_k = v_n$		$v_k = f(q_k)$	
	Тип. методика	Уточн. методика	Тип. методика	Уточн. методика
$\bar{v}$ , м/с	2	2	1,17	1,17
$s_v$ , м/с	0	0	0,57	0,57
$\bar{W}$ , кН	36,9	36,1	36,1	27,7
$s_W$ , кН	0,92	0,84	2,1	3,3
$\bar{N}$ , кВт	73,9	72,3	44,6	34,7
$s_N$ , кВт	1,85	1,69	16,9	15



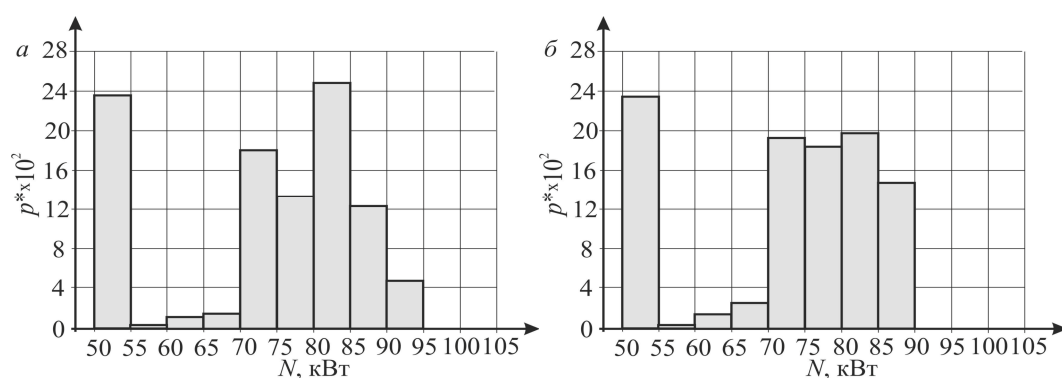
1 — расчёт по формулам типовой методики; 2 — расчёт по уточнённой методике

Рисунок 3 Фрагменты диаграмм сопротивления движению тягового органа  $W_k$  и потребляемой приводом мощности  $N_k$  при  $v_k=v_H$

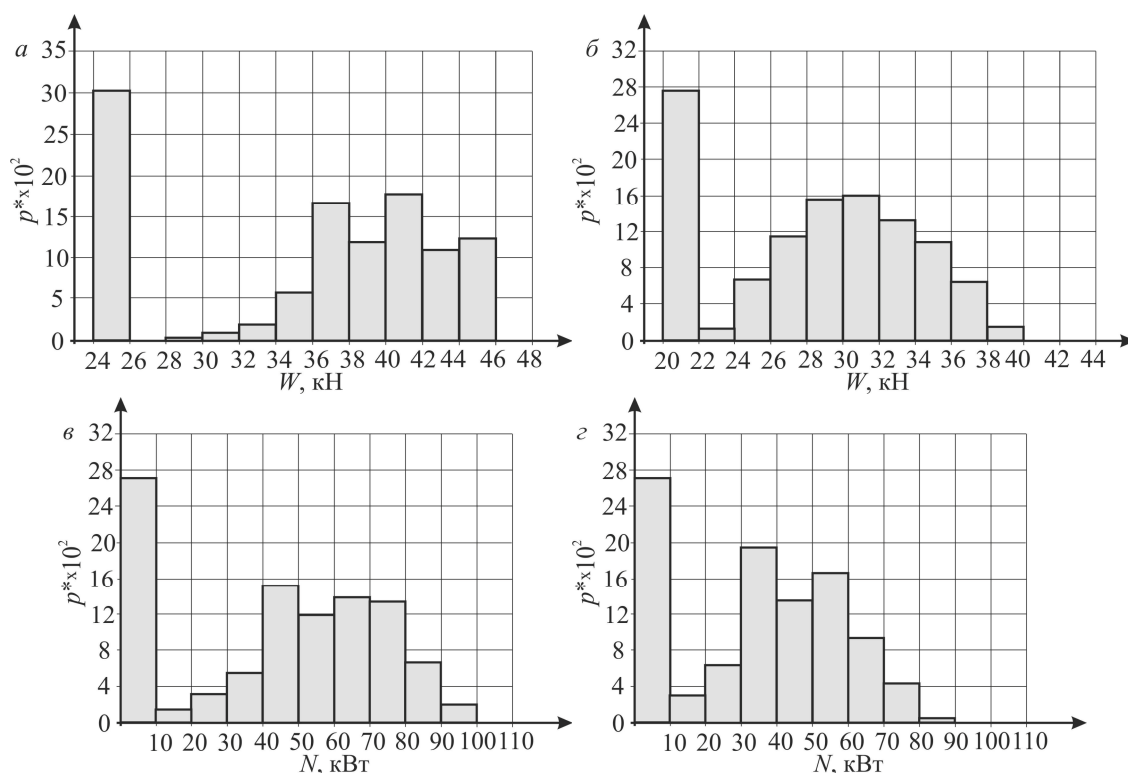


1 — расчёт по формулам типовой методики; 2 — расчёт по уточнённой методике

Рисунок 4 Фрагменты диаграмм регулируемой скорости  $v_k$  (а), сопротивлений движению тягового органа  $W_k$  (б) и потребляемой приводом мощности  $N_k$  (в) при  $v_k=f(q_k)$



а — расчёт по типовой методике; б — расчёт по уточнённой методике

Рисунок 5 Гистограммы сопротивления движению  $W$  тягового органа конвейера 1Л800Д при  $v=v_n=\text{const}$ 

а и в — расчёт по типовой методике; б и г — расчёт по уточнённой методике

Рисунок 6 Гистограммы сопротивления  $W_k$  движению тягового органа конвейера 1Л800Д и мощности  $N_k$  в случае регулируемой скорости

При регулировании скорости её значения изменяются в зависимости от значений поступающего на конвейер минутного грузопотока в пределах от 0,2 до 2,2 м/с при среднем значении 1,17 м/с. В течение одной минуты машинного времени значения скорости  $v_k$  остаются неизменными. На практике

возможно более тонкое регулирование скорости, основанное на показаниях конвейерных весов, следующих с интервалом времени меньше одной минуты. В этом случае для моделирования работы конвейера необходимо знать статистики и корреляционную функцию внутриминутных углепотоков.

Средние значения  $\bar{W}$ ,  $\bar{N}$ , полученные по уточнённой методике, чувствительной к изменению прежде всего скорости, меньше соответствующих значений, полученных по формулам типовой методики, на 23,1 и 22,1 %. Расчёт  $N_k$  при регулировании скорости, проведённый с помощью уточнённой методики, позволяет выявить и учесть не только прямое влияние  $v_k$  (см. формулу (10)), но также дополнительные эффекты, обусловленные зависимостью реальных значений  $W_k$  от скорости и натяжения ТО.

Значительное расхождение результатов моделирования загрузки конвейера с регулируемой скоростью, полученных по обеим методикам, указывает на преимущества уточнённой методики и позволяет рекомендовать её при моделировании нагрузок в конвейере и обосновании законов управ-

ления скоростью конвейера и (или) натяжением ТО для снижения энергопотребления и увеличения долговечности ТО.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Разработан алгоритм имитационного моделирования работы шахтных ленточных конвейеров для определения сопротивлений движению ленты, а затем и нагрузок в приводе на основе уточнённой методики тягового расчёта, позволяющей учитывать влияние скорости и натяжений ТО на сопротивления его движению. Предлагаемый алгоритм моделирования загрузки конвейеров является эффективным инструментом для обоснования режимов управления скоростью конвейера и (или) натяжением ТО с учётом реальных шахтных углетоктов.

### Библиографический список

1. Инструкция по использованию специализированной программы «Конвейерный транспорт» для расчётов нагрузок действующих и вновь вводимых конвейерных линий [Текст]. — М. : ИГД им. А. А. Скочинского, 1981. — 95 с.
2. Корнеев, С. В. Сопротивление движению конвейерной ленты, возникающее при прохождении роlikоопоры [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих // Новые технологии. Горное оборудование и электромеханика. — М., 2015. — № 9. — С. 20–25.
3. Харченко, В. И. Рационализация геометрических параметров линейных роlikоопор ленточных конвейеров общего назначения на стадии конструирования [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06 / Харченко Валерий Иванович. — М. : ВНИИПТМАШ, 1994. — 248 с.
4. Корнеев, С. В. Методика тягового расчёта шахтных ленточных конвейеров на основе компьютерного моделирования сопротивлений движению тягового органа [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих // Изв. вузов. Горный журнал. — 2016. — № 3. — С. 81–89.
5. Корнеев, С. В. Опыт моделирования забойных углетоктов [Текст] / С. В. Корнеев, В. П. Долгих, В. Ю. Доброногова // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2018. — № 52. — С. 21–28.
6. Заика, В. Т. Влияние регулируемого привода на грузопотоки и энергоэффективность системы шахтного конвейерного транспорта [Текст] / В. Т. Заика, Ю. Т. Разумный, В. Н. Прокуда // Науковий вісник Національного гірничого університету. — 2015. — № 3. — С. 82–88.
7. Кариман, С. А. Моделирование и оптимизация производственных процессов при добыче угля [Текст] / С. А. Кариман, А. В. Брайцев, В. М. Шрамко. — М. : Недра, 1975. — 135 с.

© Корнеев С. В.

© Доброногова В. Ю.

© Долгих В. П.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.,  
к.т.н., доц., и. о. зав. каф. ГЭиТС ЛНУ им. В. Даля Петровым А. Г.

Статья поступила в редакцию 12.02.19.

**д.т.н. Корнєєв С. В., к.т.н. Доброногова В. Ю., Долгих В. П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)**  
**МОДЕЛЮВАННЯ РЕАЛЬНИХ НАВАНТАЖЕНЬ В ШАХТНИХ СТРІЧКОВИХ**  
**КОНВЕЄРАХ НА ОСНОВІ УТОЧНЕНОГО ТЯГОВОГО РОЗРАХУНКУ**

*Наведено алгоритм імітаційного моделювання роботи шахтних стрічкових конвеєрів для визначення опорів руху стрічки, а потім і навантажень в приводі на основі уточненої методики тягового розрахунку з урахуванням параметрів випадкового вуглепотіку.*

**Ключові слова:** стрічковий конвеєр, імітаційне моделювання, уточнений тяговий розрахунок, вуглепотік.

**Doctor of Tech. Sc. Korneiev S. V., PhD Dobronogova V. Yu., Dolgikh V. P. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**  
**MODELING OF THE ACTUAL LOADING IN THE MINE BELT CONVEYORS BASING ON**  
**THE REFINED TRACTION CALCULATION**

*There has been given the algorithm of simulation modeling of mine belt conveyors to determine the resistance to the belt motion, and then loading in the drive basing on the refined technique of traction calculation taking into account the parameters of random coal flow.*

**Key words:** belt conveyor, simulation modeling, refined traction calculation, coal flow.

УДК 621.926.3/8

к.т.н. Ульяницкий В. Н.,  
к.т.н. Петров П. А.,  
к.э.н. Ульяницкая О. В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР),  
д.т.н. Еронько С. П.  
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

### ОЦЕНКА ИЗНОСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ ИНСТРУМЕНТОВ ВАЛКОВО-ТАРЕЛЬЧАТЫХ МЕЛЬНИЦ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

*В статье рассмотрены вопросы комплексной оценки показателей износных характеристик (параметров) рабочих инструментов — бандажей и сегментов — мельниц для приготовления пылеугольного топлива.*

**Ключевые слова:** мельница, размольный валок, размольный стол, бандаж, сегмент, износ, пылеугольное топливо.

Высокие энергетические затраты в металлургическом производстве обусловили поиск направлений снижения потребления дорогостоящих природного газа и кокса в доменной плавке [1, 2]. Многочисленные научные исследования и производственный опыт сошлись во мнении, что на данном этапе развития доменного производства наиболее эффективным альтернативным энергоносителем является пылеугольное топливо (ПУТ) [3, 4]. Для приготовления ПУТ используют измельчительные устройства нескольких типов и конструктивных конфигураций, получивших объединяющее название — валковые мельницы. Принципиальное их отличие заключается в кинематике силовой цепи главного привода, числе и геометрической форме измельчающих элементов машины [5, 6].

Однако процесс измельчения углей лубой из мельниц осуществляется одинаково — путём раздавливания и частичного истирания размольными инструментами.

Важнейшей эксплуатационной характеристикой углеразмольных установок является величина износа рабочей поверхности размольного инструмента — валков и столов. У большинства современных мельниц измельчительные элементы имеют сборную конструкцию: валки бандажированные, а столы

сегментированные. Именно бандажи валков и сегменты стола соприкасаются с измельчаемым материалом. Их рабочие поверхности изнашиваются, и при достижении нормативной величины износа бандажи и сегменты комплектно извлекаются из мельницы для реновации или отправки в металлолом.

Длительность рабочей компании размазывающих элементов валковых мельниц зависит от нескольких факторов, главными из которых являются абразивные свойства измельчаемого материала (в нашем случае углей) и противоизносные характеристики металла бандажей и сегментов [7]. По данным [8] наибольшую относительную износостойкость имеют легированные стали с повышенной твёрдостью. Проверка этого положения на различных сплавах и сталях [9] подтвердила, что зависимость относительной износостойкости от твёрдости сплава имеет прямолинейный характер.

Кроме того, на условия работы мельниц оказывают влияние неоднородности качества углей, исходная сегрегация и влажность, тонина (тонкость) помола ПУТ, обуславливающая надёжное зажигание и полное сгорание его в факеле на выходе из фурмы доменной печи.

Знание износных характеристик (интенсивность износа и его абсолютная величина)

на) позволяет обслуживающему персоналу комплекса приготовления ПУТ установить оптимальный режим работы мельницы, определиться с периодичностью диагностирования (замеров) износа рабочих поверхностей измельчающего инструмента, снизить эксплуатационные расходы по замене изношенных бандажей и сегментов.

Целью статьи является определение износных характеристик рабочего инструмента вертикальных валково-тарельчатых мельниц MPS 3070 ВК и MPS 3550 ВК, приобретённых ПАО «Алчевский металлургический комбинат» у немецкой фирмы-изготовителя Pfeiffer AG (г. Кайзерслаутерн).

В этих мельницах приводными являются столы, чем обусловлена более простая кинематика главного привода машины. Мелющие холостые валки вращаются вокруг своих горизонтальных осей за счёт приводного усилия от стола через посредство измельчаемого угля. Три стационарных мелющих валка перемещаются в рабочей желобчатой поверхности медленно движущегося помольного стола. Положение валков на столе мельницы представлено на рисунках 1 и 2.

Как уже отмечалось, бандаж валков и сегменты стола, как наиболее изнашиваемые детали размольных элементов мельницы, выполнены съёмными.

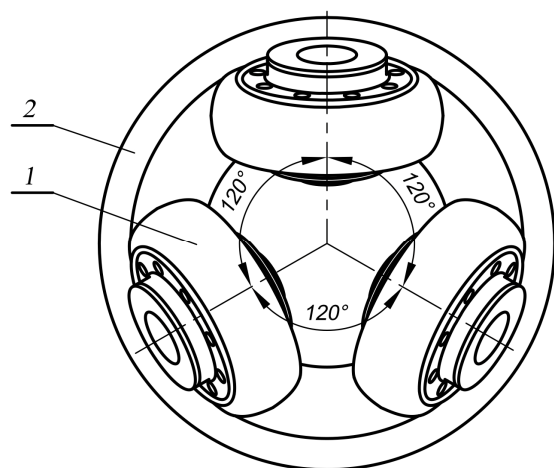


Рисунок 1 Схема расположения измельчающих элементов машины:  
1 — размольный валок; 2 — размольная плита (стол)

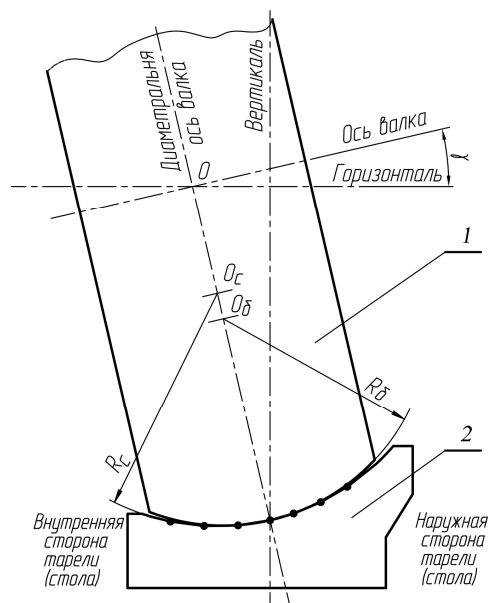


Рисунок 2 Схема расположения контактных рабочих поверхностей бандаж валка (1) и сегмента стола (2) мельницы:

$R_\delta$ ,  $R_\epsilon$  — конструктивные радиусы образующих рабочих поверхностей бандаж и сегмента;  $\gamma$  — угол наклона оси валка относительно горизонтали перед запуском мельницы в работу

Этим обеспечивается доступность комплектной их замены новыми или отправки на восстановление.

Бандаж и сегменты изготовлены способом литья из легированного износостойкого высокохромистого чугуна марки 300Cr15Mo3, химический состав которого представлен в таблице 1.

Корпус валка, на который насаживается бандаж, изготовлен из конструкционной стали.

Соединение бандаж с корпусом валка осуществляется клеммовым креплением. Сегменты (а их 13 по окружности стола) располагаются в кольцевом гнезде и закрепляются клеммовым соединением.

Конструкции бандаж и сегмента мельницы MPS 3070 ВК приведены на рисунках 3 и 4.

К числу износных характеристик относят потерю собственного веса рабочим органом мельницы в процессе измельчения материала.

Таблица 1

Химический состав материала мелющих элементов бандажей и сегментов

Наименование химического элемента	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	S	P
Содержание, %	2,62	0,89	0,25	15,6	2,41	0,65	0,057	0,017	0,011

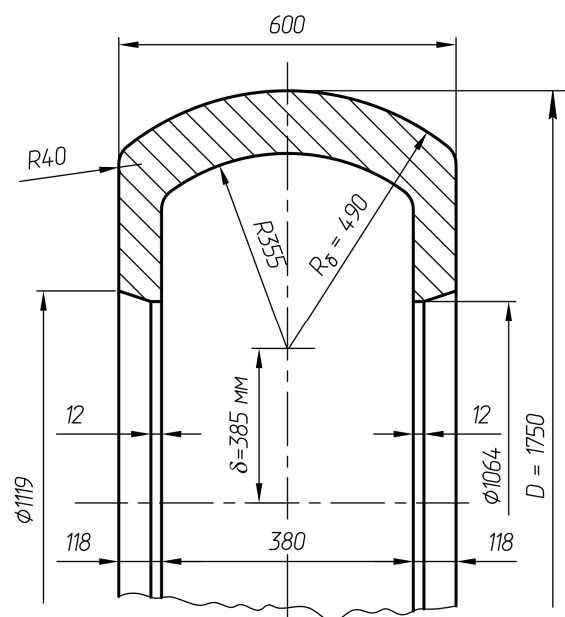


Рисунок 3 Конструкция бандаж размольного валка

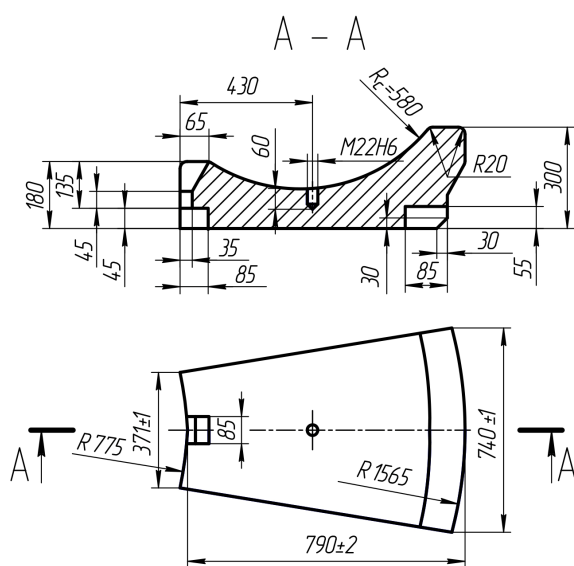


Рисунок 4 Конструкция сегмента размольного стола

Для определения показателя потери веса бандажими и сегментами мельницы MPS 3070 ВК в условиях ПАО «АМК» воспользовались двумя методами.

Первый — достаточно простой и точный — это взвешивание инструмента после вывода из эксплуатации на замену новым или реставрацию. Демонтированные бандажии и сегменты подвергались тщательной очистке от остатков пылеугольной среды, обрабатывались подогретым сжатым воздухом и взвешивались на электронных весах участка весового хозяйства комбината. Результаты такого исследования представлены в таблице 2.

Первоначальный вес штатных новых инструментов составлял: бандаж — 4100 кг, сегмента — 545 кг. Собственно, после измельчения 196 тыс. т угольной массы вес бандаж составил 3500 кг, а сегмента — 429,6 кг. Таким образом, абсолютный износный показатель (потеря веса) составил: бандаж — 600 кг (14,6 % первоначального веса), сегмента — 115,4 кг (21,2 %), суммарный показатель всех (3 бандажии и 13 сегментов) рабочих элементов достиг 3300 кг (17,0 %).

Из относительных показателей износа наиболее информативным является потеря веса инструмента относительно количества (массы) обработанного угля. Для удобства сравнения принято пользоваться размерностью кг/тыс. т.

Относительный показатель позволяет эксплуатационной службе, имея базу накопленных данных, диагностировать (контролировать) техническое состояние рабочих элементов и намечать сроки вывода дефектных бандажии и сегментов мельницы на реставрацию.

Таблица 2

Показатели измерения износа (мм) в контрольных точках бандажа и сегмента

Время эксплуатации с момента пуска, часов	Измельчено угольной шихты, тыс. т	Износные показатели				
		Первоначальный вес нового изделия, кг	Абсолютная износная потеря веса, кг	Относительные потери		
				относительно первоначального веса, кг/кг	относительно массы измельчённого угля, кг/тыс. т	за час эксплуатации, кг/час
4387	196	Бандажи валков				
		4100*	600	0,146	3,06	0,137
		12300**	1800		9,18	0,410
		Сегменты стола				
		545*	115,4	0,212	0,588	0,026
		7085**	1500,2		7,644	0,342
		Суммарные (бандажей и сегментов) показатели				
		19385	3300,2	0,170	16,824	0,752

\* — показатель одного изделия

\*\* — показатель комплекта изделий в машине

Временной показатель потери веса (кг/час) недостаточно информативен, поскольку продолжительность работы мельницы, из-за возможных непредвиденных обстоятельств, меньше календарного времени.

Обслуживающему персоналу желательно иметь возможность определять износный показатель по потере веса в любой момент эксплуатационного периода.

В этом случае уместен аналитический метод, позволяющий по данным замера абсолютного износа в контрольных точках на маркировочных линиях рассчитывать все составляющие износных характеристик: площадь износа, объём изношенной части инструмента, а по нему — потерю веса бандажом и сегментом.

Известные предельные потери веса обуславливают полные издержки восстановления изношенных поверхностей рабочего инструмента (если оно экономически обосновано) и влияют на эксплуатационные показатели мельницы.

В качестве примера рассмотрим аналитические зависимости, определяющие износные характеристики бандажа размольного вала.

Потерю веса  $G_{\text{пи}}$  рабочим инструментом при износе определяем по формуле

$$G_{\text{и}} = V_{\text{и}} \cdot \rho, \quad (1)$$

где  $V_{\text{и}}$  — объём изношенной части;

$\rho$  — объёмная масса металла размольного инструмента.

Величину объёма изношенной части находим по зависимости

$$V_{\text{и}} = S_{\text{и}} \cdot h_{\text{и}}, \quad (2)$$

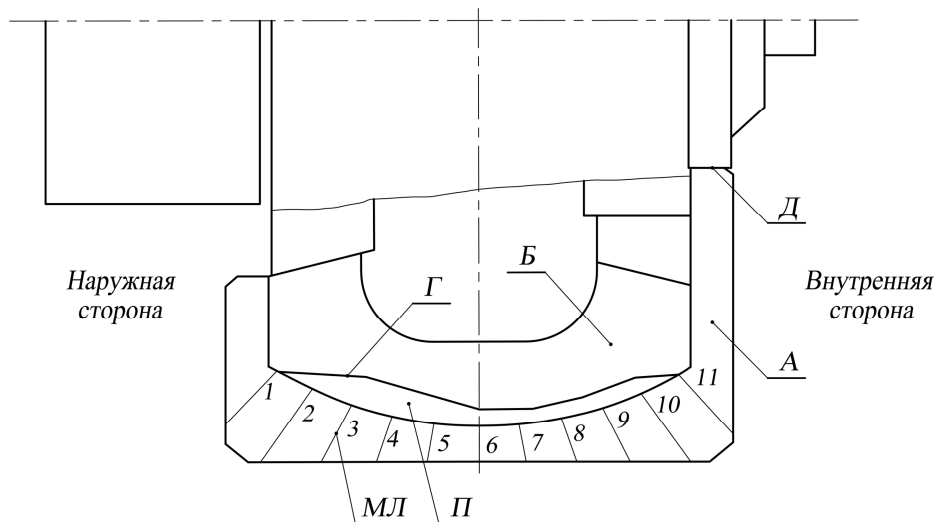
где  $S_{\text{и}}$  — площадь износа рабочей поверхности бандажа в радиальном сечении;

$h_{\text{и}}$  — длина (протяжённость) износа рабочей части бандажа в окружном направлении. Для нашего случая — длина окружности, проходящая через центр тяжести площади износа.

Для определения величины  $S_{\text{и}}$  применим графоаналитический метод, поскольку строго теоретически рассчитать площадь износа бандажа с достаточной точностью затруднительно из-за её близкой к серповидности формы.

На основании данных замеров радиального износа в контрольных точках на маркировочных линиях (МЛ) с помощью шаблона (рис. 5) выполнено графическое изображение границы фронта износа рабочей поверхности бандажа.

Получение достоверных расчётных показателей обусловило необходимость выполнить графическое изображение поверхности износа на миллиметровой бумаге в масштабе 1:1. Для наглядности уменьшенная копия дана на рисунке 6.



А — шаблон; Б — бандаж; Г — граница износа; ПК — проектный контур рабочей поверхности бандажа; П — площадь износа; МЛ — маркировочная линия; Д — упор для шаблона; 1, 2, 3 ... 11 — контрольные точки замеров радиального износа на МЛ

Рисунок 5 Схема измерения износа рабочей поверхности бандажа мелющего вала с помощью шаблона

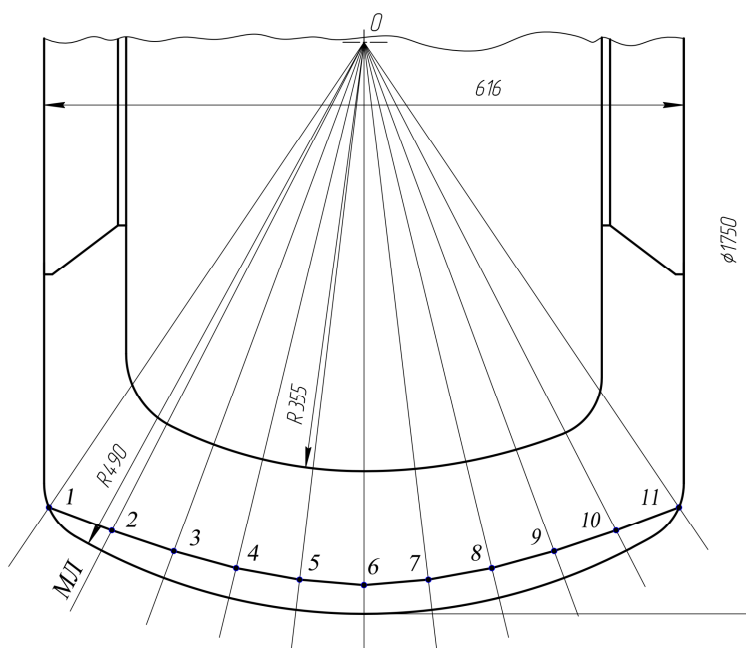


Рисунок 6 Графическое построение радиального износа рабочей поверхности бандажей: МЛ — маркировочные линии; 1, 2, 3 ... 11 — контрольные точки

Далее поверхность износа разбивалась между маркировочными линиями на 10 элементарных участков, 8 из которых по форме близки к прямоугольнику или трапеции, концевые — к треугольнику (рис. 6).

Площадь износа рабочей поверхности с внешней стороны бандажа ограничена контуром проектной кривой радиуса  $R$ , а граница глубины ( $\Gamma$ ) износа — некоторой слегка волнообразной линией, характеризующейся неравномерностью износа, зафиксированного в контрольных точках. Результаты замера величины абсолютного радиального износа рабочей поверхности бандажа перед его заменой занесены в таблицу 3.

Для расчёта площади износа элементарного участка (рис. 7) приняли его форму близкой к трапеции, в которой нижнее основание обозначено  $l_{n_i}$ , верхнее —  $l_{b_i}$ , боковые стороны —  $\Delta R_i$  и  $\Delta R_{i+1}$  ( $\Delta R_{i-1}$ ). В соответствии с графическим построением  $l_{n_i}$  представляет собой дугу длиной  $\approx 70$  мм для всех участков. На формирование величины  $l_{b_i}$  оказывают влияние соседние показатели износа  $\Delta R_i$  и  $\Delta R_{i+1}$  ( $\Delta R_{i-1}$ ), являющиеся боковыми сторонами трапеции (рис. 7). Величина угла  $\beta \approx 10^\circ$  обусловлена расположением маркировочных линий на шаблоне.

Принятое допущение замены фактической формы площади элементарного участка близким к трапеции вносит незначительную погрешность в результаты расчёта, о чём свидетельствует сопоставление величин, определённых экспериментально, и расчётных (см. табл. 4).

Расчёт площади износа элементарного участка выполнен по формуле:

для трапеции

$$S_i = \frac{l_{n_i} + l_{b_i}}{2} \cdot \frac{\Delta R_i + \Delta R_{i+1}}{2}, \quad (3)$$

для треугольника

$$S_i = \frac{1}{2} l_{b_i} \cdot \Delta R_i. \quad (4)$$

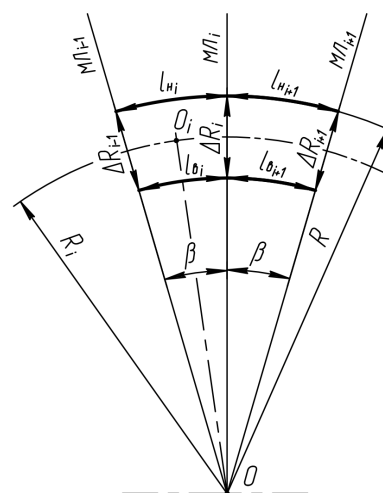
Объём износа элементарного участка бандажа представляет собой кольцевую фигуру и определяется по формуле

$$V_i = S_i \cdot C_i, \quad (5)$$

где  $V_i$  — объём износа  $i$ -го участка,  $\text{мм}^3$ ;

$S_i$  — величина площади износа  $i$ -го участка,  $\text{мм}^2$ ;

$C_i$  — длина окружности центра тяжести площади  $i$ -го элементарного участка.



$O_i$  — центр тяжести площади элементарного участка;  $R_i$  — радиус положения точки  $O_i$  относительно точки  $O$

Рисунок 7 Схема выделенного элементарного участка изношенной поверхности бандажа

Таблица 3

Данные замера радиального износа бандажа валка

Время эксплуатации с момента запуска в работу, часов	Измельчено, тыс. тонн	Радиальный износ бандажа, $\Delta R_i$ , мм										
		Номера контрольных точек на маркировочных линиях										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4387	196	0	11	17	23	27	30	27	18	15	12	0

В соответствии с построением  $C_i$  является длиной окружности, проходящей через центр тяжести  $O_i$  элементарной площади износа (см. рис. 7):  $C_i = \pi \cdot D_i$ , где  $D_i$  — диаметр окружности  $C_i$  по точке  $O_i$ .

С учётом конструктивных параметров бандажа диаметр окружности  $D_i$  составит (см. рисунки 7 и 3)

$$D_i = 2R_i + 2\delta. \quad (6)$$

Тогда

$$C_i = 2\pi(R_i + \delta). \quad (7)$$

С учётом формул (3), (4), (7) получим объёмы  $i$ -тых колец, имеющих сечение:

трапецевидных площадок износа

$$V_i = \left( \frac{ln_i + lb_i}{2} \cdot \frac{\Delta R_i + \Delta R_{i+1}}{2} \right) \cdot 2\pi(R_i + \delta); \quad (8)$$

концевых (треугольных) площадок износа

$$V_i = lb_i \cdot \Delta R_i \cdot \pi(R_i + \delta). \quad (9)$$

Определяем потери веса по формуле

$$G_i = V_i \cdot \rho. \quad (10)$$

Обычно для чёрных металлов объёмная масса  $\rho = 7500 \dots 8750 \text{ кг/м}^3$ , в расчётах принимали  $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ .

Достоверность полученных характеристик износа зависит от точности замера радиального износа рабочей поверхности бандажа с помощью шаблона и точности графоаналитического метода определения площади износа бандажа.

Для большей достоверности полученных результатов оценки износных характеристик бандажа, величину элементарных площадок радиального износа (см. рис. 7) замеряли с помощью планиметра полярного модели ПП-2к.

Данные величин износа рабочей поверхности бандажа валково-тарельчатой мельницы MPS 3070 BK по десяти ( $n=10$ ) элементарным участкам, полученные аналитическим расчётом и с помощью планиметра, представлены в таблице 4.

В аналитических расчётах использованы геометрические параметры конструкции бандажа:  $D=1750 \text{ мм}$ ,  $R_\delta=490 \text{ мм}$ ,  $\delta=385 \text{ мм}$  (см. рис. 3).

Таблица 4

Данные экспериментальных ( $\Delta R_i$ ,  $R_i$ ,  $ln_i$ ,  $lb_i$ ,  $S_{\text{пп}}$ ) и расчетных ( $D_i$ ,  $C_i$ ,  $S_i$ ,  $V_i$ ,  $G_i$ ) величин износа рабочей поверхности бандажа валково-тарельчатой мельницы MPS 3070 BK

$n$	$\Delta R_i$	$R_i$	$ln_i$	$lb_i$	$S_i$	$D_i$	$C_i$	$S_i$	$V_i$ $\times 10^6$	$G_i$	$\frac{(S_i - S_{\text{пп}})}{S_{\text{пп}}}$
—	мм	мм	мм	мм	мм <sup>2</sup>	мм	мм	мм <sup>2</sup>	мм <sup>3</sup>	кг	%
1	11	479	0	63	679	1749	5492	698,25	3,84	30,1	2,84
2	17	473	70	68	1053	1742	5470	966	5,28	41,49	-8,26
3	23	467	70	67	1444	1730	5433	1370	7,44	58,43	-5,12
4	27	463	70	65	1738	1720	5400	1687,5	9,11	71,54	-2,91
5	30	460	70	64	1994	1713	5379	1909,5	10,3	80,63	-4,24
6	27	463	70	64	1980	1713	5379	1909,5	10,3	80,62	-3,56
7	18	472	70	67	1660	1725	5417	1581,25	8,35	65,53	-4,74
8	15	475	70	67	1292	1735	5448	1198,75	6,53	51,27	-7,22
9	12	480	70	68	1018	1745	5479	962,5	4,73	37,1	-5,45
10	10	480	0	68	628	1743	5498	631,75	3,47	27,26	0,60
					13486			12915		543,98	

— экспериментальные,

— расчётные значения

Сопоставительный анализ данных таблицы 4 свидетельствует о том, что величины площади износа рабочей поверхности бандажа в радиальном сечении, полученные аналитическим расчётом на основе графоаналитического метода и измеренные планиметром, отличаются в среднем на 4,5 %. Разброс граничных показателей по всем десяти элементарным участкам составил пределы 0,6...8,26 %. Величина суммарной площади износа, соответственно, составила:  $S_i=12915 \text{ мм}^2$ ,  $S_{\text{ип}}=13486 \text{ мм}^2$ , т. е. результат, измеренный планиметром, на 4,2 % более достоверен.

Однако использование в практических целях способа измерения площади износа планиметром маловероятно. Благодаря своей более высокой достоверности он применим в экспериментальном исследовании, когда требуется системный анализ факторов и показателей, обуславливающих процесс изнашивания рабочего инструмента. Для механослужбы участка приготовления ПУТ целесообразно использовать графоаналитический метод определения износных характеристик бандажа валка мельницы.

#### Выводы.

1. Основными факторами, обуславливающими износ рабочих поверхностей

бандажей и сегментов мельниц, являются: абразивные свойства измельчаемых углей, исходные размеры (кусковатость) шихты и конечного продукта (тонина помола), механические параметры материала мелющих инструментов, количество переработанной угольной массы.

2. Исследование методов оценки износных характеристик бандажей валка и сегментов стола даёт основание использовать наиболее доступный для механослужбы способ ориентировочного контроля состояния рабочей поверхности — устанавливать величину износа по количеству измельчённого угля за определённый период работы мельницы. Такой приём удобен тем, что не требует остановки машины для снятия показаний на маркировочных линиях и уменьшает риск внеплановых простоев оборудования.

3. Контрольные измерения необходимы только тогда, когда показатель износа по количеству тонн измельчённого угля приблизиться к предельно допустимой величине — 70 мм, установленной изготовителем мельницы. В этом случае будет приниматься решение о возможности дальнейшей эксплуатации рабочих инструментов или вывода их в реставрацию.

#### Библиографический список

1. Мороз, А. Я. Использование энергоносителей в производстве продукции на металлургических и коксохимических предприятиях Донецкой области в 2011 году [Текст] / А. Я. Мороз, И. Т. Резниченко, С. Н. Тупилко // Металлургические процессы и оборудование. — Донецк, 2012. — № 1 — С. 12–16.
2. Новохатский, А. М. Проблемы замены кокса альтернативными видами топлива и пути их решения [Текст] : монография / А. М. Новохатский, А. В. Карпов. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 182 с.
3. Alternate Carbon Sources for Sintering of Iron Ore (Acasos) / Roland Pietruck [ets]. — Luxembourg Office of the European Union, 2013. — 71 p.
4. Ульяницкий, В. Н. Особенности эксплуатации валковых мельниц для приготовления пылеугольного топлива [Текст] / В. Н. Ульяницкий, П. А. Петров, О. В. Ульяницкая, Р. Ю. Коробов // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. — № 7 (50). — С. 146–152.
5. ГОСТ Р 55853–2013. Мельницы валковые среднеходные. Типы, основные параметры, технические требования [Текст]. — Введ. 2013-22-11. — М. : Стандартинформ, 2014. — 13 с.
6. Ульяницкий, В. Н. Анализ конструктивных особенностей и функциональных возможностей мельниц для приготовления пылеугольного топлива [Текст] / В. Н. Ульяницкий, А. М. Новохатский, П. А. Петров // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — № 9 (52). — С. 105–114.

7. Клушанцев, Б. В. Дробилки. Конструкция, расчёт, особенности эксплуатации [Текст] / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек. — М. : Машиностроение, 1990. — 320 с. : ил.
8. Хрущов, М. М. Исследование изнашивания металлов [Текст] / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев. — М. : Изд-во АН СССР, 1960. — 352 с.
9. Волковинский, В. А. Мельницы-вентиляторы [Текст] / В. А. Волковинский, К. Ф. Роддатис, А. А. Харламов ; под общ. ред. проф. К. Ф. Роддатиса. — М. : Энергия, 1971. — 288 с.

© Ульяницкий В. Н.

© Петров П. А.

© Ульяницкая О. В.

© Еронько С. П.

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

*Статья поступила в редакцию 11.01.19.*

**к.т.н. Ульяницкий В. Н., к.т.н. Петров П. О., к.е.н. Ульяницкая О. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР), д.т.н. Еронько С. П. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)**

#### **ОЦІНКА ЗНОСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОБОЧИХ ІНСТРУМЕНТІВ ВАЛКОВО-ТАРІЛЧАСТИХ МЛИНІВ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА**

*У статті розглянуто питання комплексної оцінки показників зносних характеристик (параметрів) робочих інструментів — бандажів і сегментів — млинів для приготування пиловугільного палива.*

**Ключові слова:** млин, розмольний валок, розмольний стіл, бандаж, сегмент, знос, пиловугільне паливо.

**PhD Ulianitskiy V. N., PhD Petrov P. A., PhD Ulianitskaia O. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR),  
Doctor of Tech. Sc. Eron'ko S. P. (DonNTU, Donetsk, DPR)**

#### **ASSESSMENT OF WEAR CHARACTERISTICS OF OPERATING TOOLS OF THE ROLLER-PLATE MILLS FOR THE PULVERIZED COAL FUEL PREPARATION**

*The article deals with the issues of a full assessment of indicators of wear characteristics (parameters) of operating tools — sleeves and segments — mills for the pulverized coal preparation.*

**Key words:** mill, grinding roll, grinding table, sleeve, segment, wear, pulverized coal fuel.

УДК 62-229.3:621.91

д.т.н. Спичак Ю. Н.,  
Пипкин Ю. В.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ОЦЕНКА МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ С ПОЗИЦИИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ

*В статье приведён анализ методов, применяющихся в машиностроении для проектирования станочных приспособлений. Методы проектирования рассмотрены в виде последовательности этапов с учётом повышения эффективности конструкций приспособлений и процесса проектирования. В качестве критерия эффективности предложен показатель относительной точности механической обработки, на основе которого рассмотрена принципиальная схема оперативной диагностики с применением имитационной модели.*

**Ключевые слова:** станочные приспособления, проектирование, эффективность, точность механической обработки, диагностика, имитационная модель, погрешность зажима.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Роль станочных приспособлений (СП) в современном машиностроительном производстве по-прежнему остаётся существенной. Это подтверждается существованием развитой международной инфраструктуры по изготовлению конструкций различных станочных приспособлений, которая отражена в ресурсах сети Интернет. Фирмы BISON, J-LOC™, kKURT, XL Machinery Sales Inc., Carr Lane Manufacturing Co., Vektek производят широкий ассортимент высокоточных быстродействующих механизированных станочных приспособлений, в большей части переналаживаемых. При этом только компания RÖHM (Германия), ежегодный оборот которой составляет около 175 млн евро, изготавливает более 16 тыс. разновидностей зажимных приспособлений [1]. Для отечественного машиностроения, имеющего свои традиции в организации технологической подготовки производства, в работах Корсакова В. С., Вардашкина Б. Н., Антонюка В. Е., Коваленко А. В., Полякова Д. И. и других отмечалось, что трудовые затраты на проектирование и изготовление оснастки и инструмента могут составлять до 70–80 % трудовых затрат на постановку новых изделий в производство, себестоимость тех-

нологической оснастки составляет в себестоимости машиностроительной продукции до 10–15 %, затраты на изготовление и приобретение оснастки — до 15–20 % от стоимости оборудования, до 90 % организационно-технологических мероприятий, направленных на обеспечение роста производительности труда станочников, связано с изменением конструкции или изготовлением новых видов инструмента и приспособлений.

В условиях, когда существенным фактором стратегического развития государства становится технологическая независимость машиностроения и конкурентоспособность станкостроения [2], задача оснащения технологических процессов станочными приспособлениями передового технического уровня требует развития и совершенствования существующей методики проектирования.

**Постановка задачи.** В справочнике под редакцией Вардашкина Б. Н. эффективность применения СП характеризуется положительной разностью между экономией, полученной от эксплуатации приспособления, и затратами на его создание (включая проектирование, изготовление, сборку, наладку или приобретение, обслуживание). Для обеспечения целей дальнейшего развития СП актуальным является рассмотрение совокупности известных мето-

дов проектирования их конструкций в контексте обеспечения эффективности. Анализ и выработка критериев оценки методов обеспечения эффективности конструкций станочных приспособлений и являются *задачами* данного исследования.

**Этапы развития методов повышения эффективности СП.** В целом все методы повышения эффективности СП можно разбить на две группы: *методы получения экономии ресурсов в процессе эксплуатации и методы сокращения затрат на создание конструкции.*

Однако, рассматривая различные методы технологической подготовки производства, связанные с СП, необходимо учитывать, что в условиях текущей производственной обстановки задачи повышения эффективности находятся во взаимосвязи между собой. Так, например, увеличивая точность обработки деталей на черновых операциях путём повышения точности изготовления приспособления и уменьшения погрешности установки можно обеспечить сокращение длительности технологического цикла, ликвидировав промежуточные операции технологического процесса. Но при этом возрастут затраты на проектирование, изготовление и наладку СП. Для уменьшения погрешности установки заготовки также возможны несколько вариантов решения: либо снижение сил резания, что может привести к потере производительности обработки, либо усложнение схемы зажима заготовки, что кроме потери производительности может повлечь за собой дополнительные затраты на проектирование, возможно потребуются исследование конструкции, следовательно, стоимость СП в целом повысится. Уменьшение металлоёмкости СП может привести к снижению его жёсткости, т. е. экономия на материале приведёт к потере точности и производительности обработки. По существу, решение одной задачи технологического совершенства конструкции СП приводит через некоторое время (обусловленное протяжённостью горизонтальных и вертикальных связей управления в структуре пред-

приятия) к возникновению новых задач или задач повышения уровня качества уже принятых решений.

Анализ работ по СП в ретроспективе с начала 30-х годов прошлого века до сегодняшнего времени показал, что основные задачи повышения эффективности СП, решаемые при проектировании, и методы их решения можно представить последовательностью, включающей в себя несколько этапов (рис. 1).

Сравнивая работы начала XX века с работами начала XXI века можно видеть, что основными задачами, которые решаются применением СП, остаются *технологические задачи повышения точности и увеличения производительности механической обработки.*

На первом этапе формирования уровня технологической оснащённости предприятий решение основных задач приводит к формированию множества вариантов конструкций (в виде компоновок, чертежей), в котором каждый отдельный элемент обеспечивает эффективность за счёт повышения производительности механической обработки, причём не столько за счёт интенсификации режимов обработки, сколько за счёт изменения структуры технологической операции и технологического процесса в целом (устранение операций разметки и выверки заготовки, упрощение установки и т. п.). Резервы повышения производительности механической обработки на этом этапе существенны, особенно при снижении вспомогательного времени. В работах Митрофанова С. П. по организации групповой обработки отмечалось, что в мелкосерийном и крупносерийном производстве машинное время составляет 30–50 % и 47–65 % соответственно, а вспомогательное — 25–29 % и 19–17 %. Для различных групп станков основное и вспомогательное время может составлять в операционном времени от 18 % до 45 %. При этом доля вспомогательного времени на установку, закрепление и снятие детали может составлять от 9 % до 45 % общего вспомогательного времени.

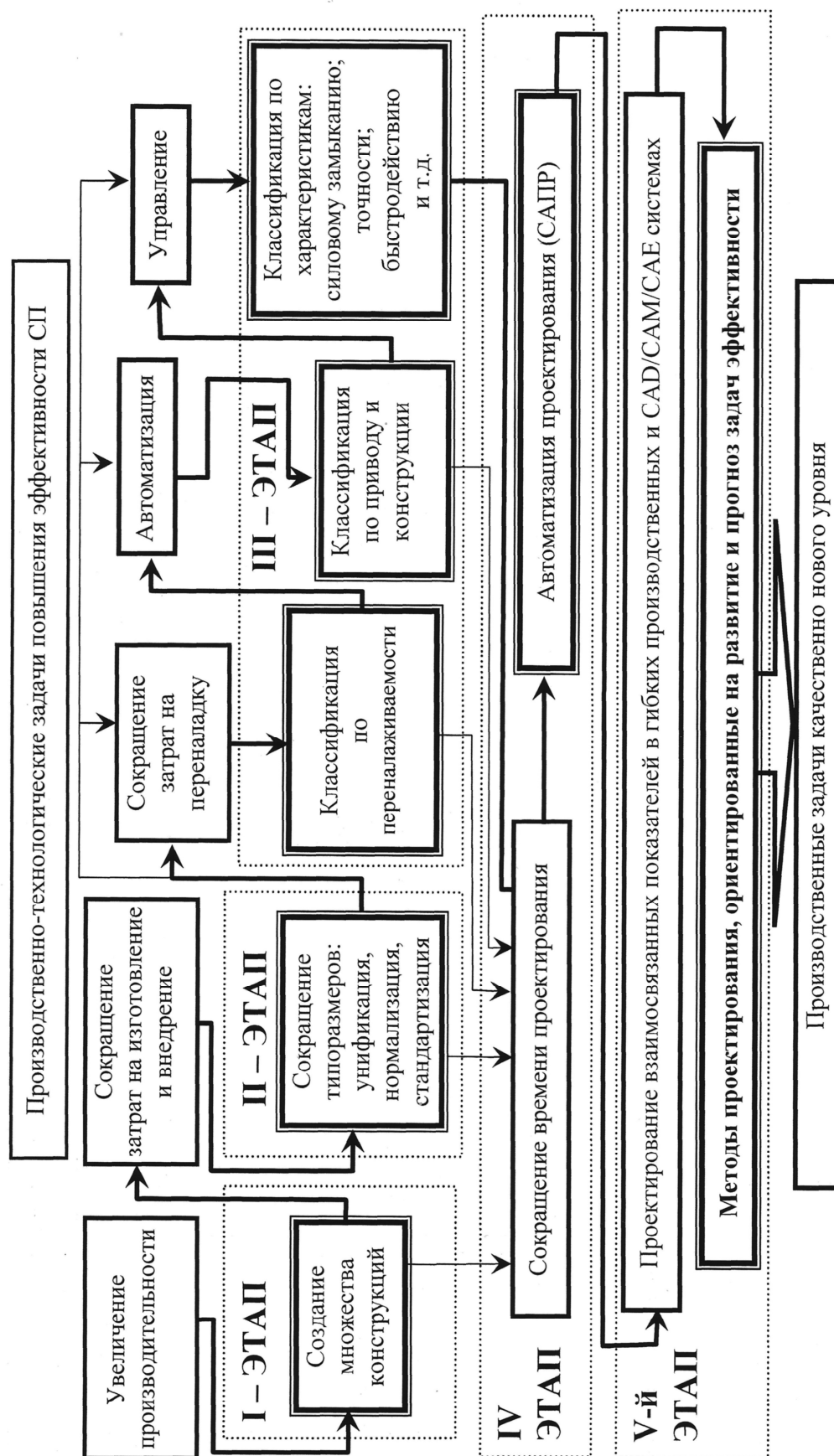


Рисунок 1 Основные этапы эволюции производственно-технологических задач повышения эффективности применения станочных приспособлений и методов их решения

Формирование множества конструктивных решений, выполненных в металле, в виде сборочных и рабочих чертежей, компоновочных схем приводит к постановке задачи *второго этапа* — сокращения затрат на создание конструкций путём уменьшения типоразмеров и оригинальности исполнения. Эффективность на этом этапе достигается хорошо проверенными и зарекомендовавшими себя средствами — применением принципов нормализации, унификации и стандартизации конструкций, рядов предпочтительных чисел для создаваемых типоразмеров. В результате этого этапа при создании системы стандартов технологической оснастки определяется чёткая иерархия элементов конструкции СП, отражённая в соответствующих нормативных документах, например в нормалях машиностроения МН 74-59-81-59 «Инструмент и приспособления для машиностроения».

На третьем этапе обе основные задачи повышения эффективности решаются одновременно, хотя в первую очередь стремятся к экономии в период эксплуатации. Это достигается организацией оборачиваемости конструкций путём применения принципа переналаживаемости СП. В результате выделены комплексы стандартов на системы конструкций, различающихся уровнем переналаживаемости. Этому этапу соответствует методика выбора системы приспособлений в соответствии со стандартом ГОСТ 14.305-73 «Правила выбора технологической оснастки». При высокой степени переналаживаемости СП эффективность также достигается от сокращения времени на проектирование и наладку.

Наряду с классификацией конструкций СП по переналаживаемости в рамках третьего этапа можно использовать также и другие виды классификации. При этом следует отметить, что классификация СП характерна не только отечественному машиностроению, она также проводилась и за рубежом представителями разных государств. Однако не все способы классификации напрямую направлены на повышение

эффективности, а в большей мере на систематизацию и упорядочение информации о СП. Так, разделение СП по типу станков на токарные, фрезерные, сверлильные, расточные фактически уменьшает для всего множества конструкций СП оборачиваемость и переналаживаемость, хотя в пределах группы формируются собственные направления повышения эффективности, которые могут применяться только в пределах данной группы приспособлений.

Таким образом, результатом третьего этапа — этапа классификаций — стало образование систем конструкций СП, объединяемых в классы по различным признакам. В пределах отдельного класса конструкций выполнена работа в соответствии с первым и вторым этапами, т. е. накопление вариантов, модификаций и их унификация и стандартизация.

Для дальнейшего сокращения затрат на проектирование конструкций стало необходимым применение средств автоматизации подготовки и обработки информации, наиболее прогрессивным из которых являются сегодня компьютеры.

Таким образом, задачей *четвёртого этапа* является организация автоматизированного проектирования СП, решение которой может обеспечить снижение трудоёмкости проектирования в 10–12 раз и себестоимости проектирования в 8–10 раз. В этом направлении проделана значительная работа. В теоретическом плане на основе общей теории систем автоматизированного проектирования, разработанной Минской научной школой под руководством Семенова О. И., Раковичем А. Г. предложен теоретический аппарат САПР СП, а Пуховым А. С. — информационно-поисковых систем. В практическом направлении под руководством Раковича А. Г. разработаны комплексы проектирования конструкций в основном сверлильной группы, например «Кондуктор-1 (2, 3)», а также токарных приспособлений.

*Четвёртый этап* соответствует современному состоянию методов обеспечения

эффективности конструкций СП. Однако на этом этапе решение задачи формализации представления информации о конструкциях, расчётах и способах повышения эффективности осуществляется прямым переводом информации в электронную форму (цифровой код). Такой подход приводит к созданию базы данных значительного объёма. И, что более важно, подход, основывающийся на данных о прошлом конструкций, не может способствовать решению новых производственно-технологических задач в соответствии с прогнозом развития машиностроения в целом: это и полная автоматизация производства (потребуется создания систем управления СП), и создание систем адаптивного управления точностью (соответственно и для СП), и возникновение новых конструкционных и инструментальных материалов (оценка применимости через моделирование работы СП), и разработка высокопроизводительных и высокоэффективных процессов механической обработки, и повышение общей наукоёмкости производства машин со структурой интегрированных CAD/CAM/CAE систем.

Для решения задачи четвёртого этапа важным на сегодня становится развитие методов комплексного анализа конструкций СП, допускающих возможность учёта разнообразных факторов, определяемых текущей научно-технической и производственно-технологической обстановкой.

Характерно, что сложность внедрения и развития систем САПР для станочных приспособлений в работах Раковича А. Г., Микитянского В. В., Ильицкого В. Б. связывается именно с отсутствием теоретических разработок. Можно сказать, что возникло противоречие между методикой организации САПР, требующей существенной формализации, и методикой проектирования СП, основывающейся на производственной практике конструктора. С одной стороны, существует большое множество работающих частных решений и методов. С другой стороны, при создании

САПР СП конструкция рассматривается как техническая система, т. е. как существенно теоретическая категория теории технических систем.

Таким образом, *завершение четвертого этапа* развития методов повышения эффективности конструкций СП сопровождается *переходом с нового этапа*, когда требуются теоретические исследования по формированию принципов объединения элементов конструкции СП, частных решений задач проектирования в единое целое в соответствии с системными принципами теории технических систем.

В завершении следует отметить, что приведённая последовательность поэтапного развития задач повышения эффективности СП и соответствующих методов решения может рассматриваться в целом как методика организации эффективного проектирования и эксплуатации СП.

**Относительная точность механической обработки как показатель эффективности работы СП.** Проведённый выше анализ выявил существенную особенность в оценке точности механической обработки как показателя эффективности СП. Эта особенность состоит в том, что все этапы и соответствующие им методы решают в основном задачи снижения трудоёмкости либо операции механической обработки, либо технологического процесса в целом, либо технологической подготовки производства. Точность механической обработки не рассматривается. И это понятно, так как повышение точности обработки, соответственно, через снижение погрешности, связанной с приспособлением, скорее всего, приведёт к удорожанию конструкции. Решение задачи повышения точности возможно только через увеличение затрат на создание конструкции, т. к. потребуются более тщательный расчёт (увеличивающий длительность проектирования), применение лучшего материала (более дорогого), большая точность изготовления (для уменьшения погрешности приспособления и погрешности базирования), более тща-

тельная сборка и наладка, проведение измерений соответствующих характеристик элементов конструкции (твёрдости, жёсткости, точности сопряжений). Таким образом, требование повышения точности механической обработки является тем фактором, который инициирует последующее поэтапное применение указанных выше методов повышения эффективности конструкции посредством экономии. Определим, в какой мере точность механической обработки может выступать в роли показателя эффективности СП.

Известно, что станочное приспособление является элементом, подсистемой всей технологической системы механической обработки. Точность механической обработки определяется не только приспособлением. Непосредственно с работой приспособления связаны такие составляющие суммарной погрешности механической обработки, как погрешность базирования, погрешность закрепления, погрешность, связанная с износом установочных элементов СП, погрешность положения заготовки, определяемая точностью изготовления и установки приспособления. Очевидно, что точность механической обработки в целом не может охарактеризовать эффективность работы станочного приспособления. Однако отношение погрешностей механической обработки, связанных с СП, к общей погрешности механической обработки может позволить оценить стабильность работы СП. Если обозначить погрешность, связанную с работой приспособления  $\omega_{СП}$ , а суммарную погрешность механической обработки  $\omega_{МЭХ}$ , то указанное отношение определится по формуле

$$ha = \frac{\omega_{СП}}{\omega_{МЭХ}}. \quad (1)$$

При этом возможно и формирование допустимой величины этого отношения через заданную точность механической обработки и средневзвешенную погрешность, связанную с СП:

$$[ha] = \frac{\varepsilon_{ПР}}{T_{ДЕТ}},$$

где  $[ha]$  — допустимое отношение;

$T_{ДЕТ}$  — допуск на изготовление детали в заданный размер;

$\varepsilon_{ПР}$  — допустимая величина погрешности, связанная с приспособлением.

Так как  $\varepsilon_{ПР}$ , как правило, определяется отношением  $\varepsilon_{ПР} = \psi \cdot T_{ДЕТ}$ , где  $\psi$  — коэффициент ужесточения, то можно сказать, что  $[ha] = \psi$ .

Если  $[ha]$  — это среднестатистическая величина, то  $ha$  по своему содержанию является мгновенной оценкой погрешности изготовления конкретной детали, так как величина погрешности механической обработки  $\omega_{МЭХ}$  может быть определена после обработки. По величине отношение  $ha$  меньше единицы и не должно превышать допустимое отношение  $[ha]$ , так как при этом появляется риск превышения допуска общей погрешностью механической обработки. По характеру отношение  $ha$  должно быть стабильным, изменяясь в пределах некоторого интервала, так как увеличение или уменьшение  $\omega_{СП}$  ведёт к соответствующему увеличению или уменьшению  $\omega_{МЭХ}$ , т. е. можно записать

$$ha = \frac{\omega_{ПР}}{\omega_{МЭХ}}, \quad ha_i = \frac{\omega_{ПРi}}{\omega_{МЭХi}},$$

если

$$\omega_{ПРi} = \omega_{ПР} \pm \Delta_{\omega i},$$

то

$$\omega_{МЭХi} = \omega_{МЭХ} \pm \Delta_{\omega i},$$

тогда

$$ha_i = \frac{\omega_{ПРi}}{\omega_{МЭХi}} = \frac{\omega_{ПР} \pm \Delta_{\omega i}}{\omega_{МЭХ} \pm \Delta_{\omega i}},$$

где  $\Delta_{oi}$  — колебание погрешности обработки в приспособлении в  $i$ -й момент времени или в  $i$ -й точке.

Если процесс обработки в СП стабильный, то отклонения погрешности, связанной с приспособлением, от некоторого среднего значения должны быть невелики; соответственно, и отклонения погрешности механической обработки также будут изменяться на величину изменения погрешности, связанной с приспособлением. Это можно записать следующим образом:

$$ha(\Delta_{\omega}) = \lim_{\Delta_{\omega} \rightarrow 0} \frac{\omega_{PP} \pm \Delta_{\omega}}{\omega_{MEX} \pm \Delta_{\omega}} = \frac{\omega_{PP}}{\omega_{MEX}} = ha.$$

Однако, в отличие от суммарной погрешности механической обработки, которая является измеряемой величиной, погрешность, связанная с приспособлением, измеряется значительно труднее. Более того, в производственных условиях измерение погрешности  $\omega_{СП}$  очень затруднительно, т. к. универсальные средства измерения для этого не подходят, а применение специальных средств в виде специальных приборов или оснастки на основе универсальных приборов в целом приведёт к усложнению условий выполнения технологической операции и к необоснованному её удорожанию. Кроме этого, изменение погрешности, связанной с приспособлением, необходимо измерять в процессе выполнения технологической операции, во время механической обработки, что практически трудноосуществимо.

Средняя величина погрешности  $\omega_{СП}$ , связанной с приспособлением, может быть определена при его сборке и наладке на специальном стенде в статическом или квазистатическом режимах.

Для определения текущей величины  $\omega_{СПi}$ , с учётом случайного характера факторов, её определяющих, и дрейфа характеристик СП наиболее подходящим представляется применение имитационного моделирования на основе адекватной

математической модели. В работе [3] была представлена математическая модель базовой расчётной схемы силового замыкания в СП [4], которая ориентирована на организацию процесса имитации. При подтверждённой для конкретной конструкции СП адекватности имитационной модели возможна организация оперативной диагностики работы СП через прогнозирование величины погрешности, связанной с приспособлением, как части общей погрешности механической обработки.

Таким образом, предлагается следующая схема оперативной диагностики работы станочного приспособления на основе параметра относительной точности механической обработки в СП (рис. 2).

На входе процесса механической обработки определены технологические параметры, являющиеся исходными данными для организации технологической операции, — режимы обработки, геометрия обрабатываемой заготовки.

В качестве возмущающих факторов приняты производственные факторы, в частности, колебания условий протекания технологической операции — качество подготовки заготовки, дрейф параметров оборудования, инструментов, приспособления и пр.

На выходе процесса механической обработки принимается погрешность обработки, полученная измерением.

Параллельно с выполнением операции механической обработки входные параметры и возмущающие факторы подаются для выполнения имитационного моделирования работы СП, в процессе которого определяется погрешность, связанная с приспособлением.

Любое изменение производственной обстановки, в том числе введение мероприятий по повышению эффективности СП, будет отражаться на изменении входных параметров и возмущающих факторов, следовательно, и на точности обработки. Можно предположить, что при правильном применении методов повышения эффективности характер относительной точности механи-

ческой обработки, связанной с СП, не должен претерпеть существенного изменения или его изменение будет протекать по некоторому оптимальному закону. В этом случае параметр относительной точности механической обработки (1), связанной с

СП, может быть принят в качестве показателя эффективности работы.

Выполним теоретический анализ влияния методов повышения эффективности СП на характер относительной точности мехобработки, связанной с СП.

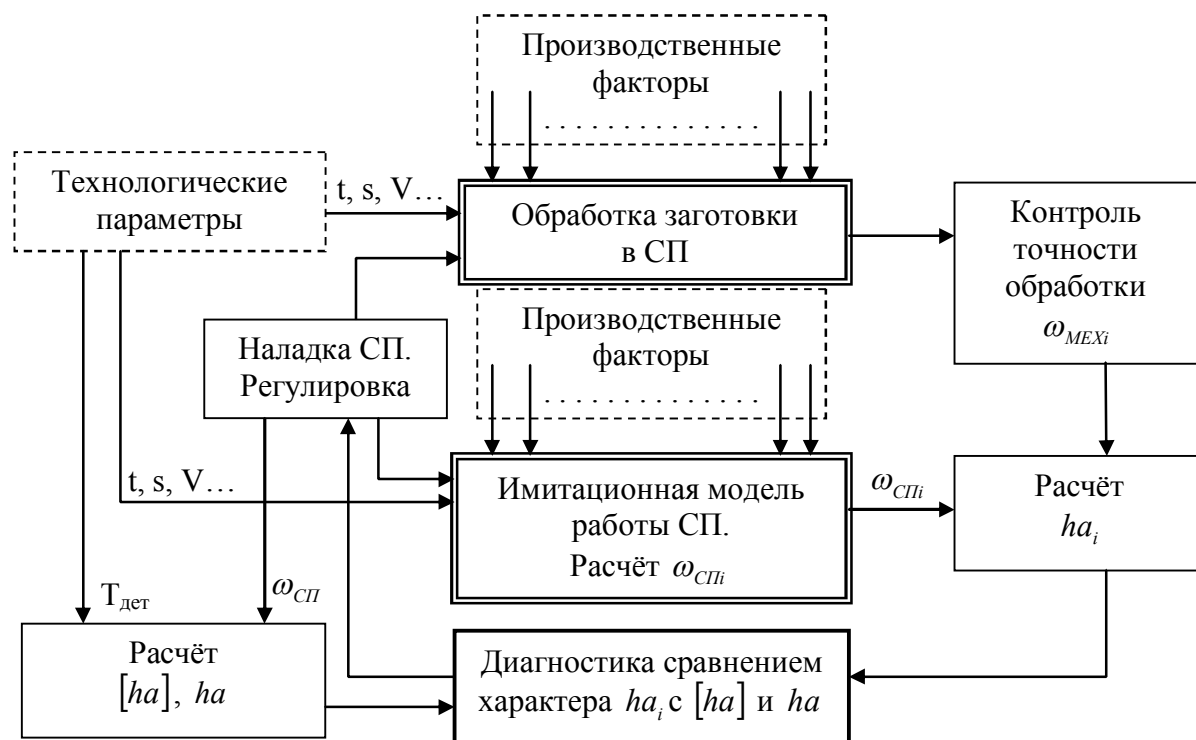


Рисунок 2 Схема организации диагностики работы станочного приспособления по параметру относительной точности

**Анализ методов повышения эффективности СП с позиций характера относительной точности механической обработки.** Для оценки характера изменения относительной точности механической обработки, связанной с приспособлением, определим составляющие погрешности механической обработки, связанные непосредственно с работой СП, а также факторы, изменение которых может отразиться на величине  $ha_i$  через изменение величины  $\omega_{СП}$ .

Погрешность механической обработки, связанная с приспособлением, включает в себя такие составляющие:

- погрешность базирования,  $\varepsilon_b$ ;
- погрешность зажима,  $\varepsilon_z$ ;

погрешность от износа установочных элементов,  $\varepsilon_u$ ;

погрешность изготовления приспособления,  $\varepsilon_{СП}$ ;

погрешность установки приспособления на станок,  $\varepsilon_{у.с.}$ .

Рассматривая вышеприведённую последовательность этапов применения методов повышения эффективности СП, с учётом факторов, связанных с изменением условий выполнения процесса обработки заготовки в СП, выполним оценку влияния этих факторов на характер составляющих погрешности механической обработки, связанных с работой СП. Анализ сведён в таблицу 1.

Таблица 1

Сравнительная оценка влияния основных факторов на погрешность, связанную с работой СП

Этапы: методы обеспечения эффективности	Составляющие погрешности $\omega_{СП}$					Факторы, существенно влияющие на составляющие погрешности обработки
	$\varepsilon_{\bar{b}}$	$\varepsilon_{з.о.}$	$\varepsilon_u$	$\varepsilon_{СП}$	$\varepsilon_{у.с.}$	
1 Этап: создание множества решений	+	+	+	+	+	Быстрое формирование исходного массива конструкций
2 Этап: унификация, стандартизация	+			+		Экономическая точность изготовления
3 Этап: классификация:						
по степени переналаживаемости	+	+	+	+	+	Сборка-разборка конструкции
по типу привода		+				Непостоянство усилия зажима
по типу станка					+	Точность посадочных мест станка и возможности его подналадки
по типу заготовки	+	+				Точность технологических баз, жёсткость заготовки
по характеристикам СП:						
тип зажимного механизма		+				Непостоянство усилия зажима
тип установочных элементов	+	+	+			Установка разнотипных деталей

В таблице 1 знаком «+» обозначены те методы соответствующих этапов (рис. 1), которые оказывают чётко выраженное влияние на составляющие погрешности обработки, связанной с СП. Четвёртый этап проектирования в САПР СП не связан напрямую с конструкцией, поэтому можно считать, что на точность механической обработки он не оказывает непосредственного влияния.

Для пятого этапа, связанного с прогнозированием, на сегодняшний момент ввиду отсутствия разработок сложно оценить характер влияния на погрешность механической обработки, поэтому он также опущен из рассмотрения.

Каждая из составляющих погрешности, связанной с приспособлением, характеризуется своими условиями образования.

Погрешность базирования образуется до выполнения механической обработки, до зажима заготовки и определяется степенью точности сопряжения базовых поверхностей с установочными элементами, а также выбором базовых поверхностей с

соблюдением принципов единства и постоянства баз. Фактически погрешность базирования не связана непосредственно с работой СП.

Погрешность от износа установочных элементов определяется в основном контактными взаимодействиями при установке и снятии заготовки между поверхностями заготовки и поверхностями установочных элементов, т. е. в момент переустановки заготовки. Интенсивность этого взаимодействия в большей степени определяется материалами и твёрдостью контактирующих поверхностей. То есть эта составляющая суммарной погрешности, связанной с приспособлением, также не формируется в момент работы приспособления. Хотя следует указать, что величина контактных напряжений определяется как усилием зажима заготовки, так и силами резания.

Погрешность изготовления СП, очевидно, также не формируется в процессе его работы. Эта погрешность определяется технологическими возможностями инструментальных участков (цехов) предприятия.

Погрешность установки приспособления на станок также не связана непосредственно с процессом механической обработки. Зависит величина погрешности от точности сопряжения базовых установочных поверхностей СП с соответствующими посадочными поверхностями станка.

Погрешность зажима заготовки определяется величиной и местом приложения усилий зажима заготовки, которые не изменяются в процессе обработки, и величиной и местом приложения сил резания, изменяющихся в процессе обработки. Формирование погрешности зажима происходит непосредственно в момент обработки. Следует отметить, что при зажиме заготовки может происходить неорганизованная или организованная смена баз (ГОСТ 21495–76), т. е. косвенно погрешность зажима заготовки может оказать влияние и на погрешность базирования.

Таким образом, из всех погрешностей обработки, связанных с СП, только погрешность зажима непосредственно характеризует работу СП. При этом остальные составляющие суммарной погрешности формируются до начала обработки и могут быть учтены подналадкой СП. Погрешность зажима полностью соответствует условиям проведения предложенной выше схемы (рис. 2) диагностики работы СП по критерию относительной точности механической обработки. При формировании имитационной модели работы СП получение модели погрешности зажима является первоочередной задачей, остальные составляющие могут рассматриваться как производственные факторы, определяемые по соответствующим моделям или экспериментально.

По таблице 1 можно видеть, что применение разных методов повышения эффективности СП оказывает влияние на различные составляющие погрешности обработки, связанной с СП. Погрешность зажима заготовки будет изменяться тогда, когда применение того или иного метода

приведёт к изменению параметров элементов системы СП, обеспечивающих зажим.

**Выводы.** В результате выполненного в данной работе анализа методов повышения эффективности станочных приспособлений получены выводы, имеющие в первую очередь методическую ценность для дальнейшего совершенствования процесса проектирования и заключающиеся в следующем:

1. На современном этапе развития производственных задач повышения эффективности процесса механической обработки заготовок в станочных приспособлениях наиболее прогрессивным методом проектирования является применение САПР СП.

2. Традиционная методика проектирования СП, основанная на опыте и практических навыках конструктора, входит в противоречие с методикой разработки САПР станочных приспособлений как технических систем, что требует теоретического анализа всего множества конструкций СП как класса технических систем.

Предложенный и обоснованный критерий относительной точности рекомендуется для практического применения при оценке эффективности конструкций станочных приспособлений и процесса проектирования.

Сформированная схема диагностики процесса механической обработки в станочном приспособлении на основе критерия относительной точности направлена не только на повышение эффективности конструкций и процесса проектирования, но также может использоваться для входных испытаний и прогнозирования показателей.

В целом изложенный подход к оценке эффективности принимаемых решений при проектировании станочных приспособлений подчёркивает необходимость формирования теоретического описания конструкций СП как технических систем для проведения имитационного моделирования, т. е. получения имитационных моделей. При этом основным объектом моделирования рекомендовано принять погрешность зажима заготовки.

**Библиографический список:**

1. Шабанов, Д. Технологическое оборудование и инструмент современного производства [Текст] / Д. Шабанов // CADmaster. — 2004. — № 2 (22). — С. 84–88. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.cadmater.ru/assets/files/articles/cm\\_22\\_pride-twl.pdf](http://www.cadmater.ru/assets/files/articles/cm_22_pride-twl.pdf).
2. Григорьев, С. Перспективы развития отечественного станкостроения в интересах обеспечения технологической независимости Российского машиностроения [Текст] / С. Григорьев // Станкоинструмент. — 2017. — № 1 (006). — С. 18–23. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.stankoinstrument.ru/files/article\\_pdf/5/article\\_5901\\_839.pdf](http://www.stankoinstrument.ru/files/article_pdf/5/article_5901_839.pdf).
3. Пипкин, Ю. В. Управление точностью операций механической обработки методом имитационного моделирования станочных приспособлений [Текст] / Ю. В. Пипкин, А. Н. Зелинский, Н. В. Коцюбинская // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2008. — № 3/5 (33). — С. 22–29.
4. Пипкин, Ю. В. Базовая расчётная схема силового замыкания в станочных приспособлениях [Текст] / Ю. В. Пипкин, А. Н. Зелинский, Н. В. Коцюбинская // Прогресивні технології і системи машинобудування : міжнародний зб. наукових праць. — Донецьк : ДонНТУ, 2006. — Вип. 31. — С. 227–237.

© Спичак Ю. Н.

© Пипкин Ю. В.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ГЭМО ДонГТУ Корнеевым С.В.,  
д.т.н., проф., зав. каф. ГД АФГДиТ ЛНУ им. В. Даля Рябичевым В. Д.*

*Статья поступила в редакцию 20.03.19.*

**д.т.н. Спичак Ю. М., Пипкін Ю. В. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)**

### **ОЦІНКА МЕТОДІВ ПРОЕКТУВАННЯ ВЕРСТАТНИХ ПРИСТРОЇВ З ПОЗИЦІЙ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ**

*У статті наведено аналіз методів, що застосовують у машинобудуванні для проектування верстатних пристроїв. Методи проектування розглянуто у вигляді послідовності етапів з урахуванням підвищення ефективності конструкцій пристроїв та процесу проектування. У якості критерію ефективності запропоновано показник відносної точності механічної обробки.*

**Ключові слова:** верстатні пристрої, проектування, ефективність, точність механічної обробки, діагностика, імітаційна модель, похибка затискання.

**Doctor of Tech. Sc. Spichak Yu. N., Pipkin Yu. V. (DonSTU, Alchevsk, LPR)**

### **ASSESSING THE DESIGN METHODS OF THE WORKHOLDING TOOLS TO IMPROVE THE ACCURACY AND EFFICIENCY OF THE DESIGNS**

*The article presents analysis of the methods used in mechanical engineering for the design of the workholding tools. Design methods are considered in the form of a sequence of stages, taking into account the improvement of efficiency of the devices design and the design process. As a criterion of efficiency the indicator of relative machining accuracy is given.*

**Key words:** workholding tools, designing, efficiency, machining accuracy, diagnostics, simulation model, inaccuracy of the clamp.

УДК 621.73:658.382.3

**к.т.н. Вишневский Д. А.**  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ В КУЗНЕЧНО-ПРЕССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ПО ВИДАМ ПОЛУЧЕННЫХ ТРАВМ

*Проведён анализ характера распределения несчастных случаев (НС) в кузнечно-прессовом производстве (КПП) по видам полученных травм. Установлено, что его максимальные показатели представлены в трёх видах: ушиб; перелом, трещина, вывих; термический ожог.*

*Анализ указывает на необходимость пересмотра организации технологических процессов, связанных с горячей обработкой металлов, поскольку термические ожоги занимают устойчивое третье место после ушибов, переломов, трещин и вывихов в исследуемые годы.*

**Ключевые слова:** кузнечно-прессовое производство, травматизм, несчастный случай, виды травм, человеческий фактор.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** В последнее время наблюдается тенденция смещения приоритетов при определении понятия риска от общеизвестного как частоты реализации опасности [1, 2] к совокупности значений возможного ущерба в некоторой стохастической ситуации и его вероятности. Но величина этого ущерба в такой ситуации является неизвестной до её осуществления, а следовательно — случайной, то есть теоретически-вероятностным аналогом понятия «ущерб» является понятие «случайная величина».

С учётом того, что значения как первого, так и второго понятия могут задаваться в разных вероятностных промежутках, задача сравнения рисков является нерешающей и несущественной, поскольку соответствующие случайные величины, которые могут быть функциями элементарных последствий, зависят от аргументов с разной сущностью, поэтому риски отождествляются с функциями распределения.

Также необходимо принимать во внимание и то, что в некоторых производствах опасность возникает (создаётся) периодически, например в кузнечно-прессовом — в процессековки или штамповки при рабочем ходе молота или пресса, когда число опасных ситуаций является прямо пропорциональным количеству рабочих циклов и численности работников участка [3].

**Анализ состояния вопроса.** За последнее время анализ рисков не только планетарного, глобального, но и регионального масштабов показывает [1, 2], что интенсивная производственная деятельность приводит к обострению существующих ВОПФ и порождает техногенные физические факторы, в первую очередь — поля, такие как температурные, шумовые, вибрационные, электромагнитные, блуждающих электрических токов, возникающих при использовании электрифицированного рельсового транспорта, заземления промышленного оборудования и т. д. Указанное обуславливает то, что все аварии, катастрофы и риски делятся на планетарные, глобальные, национальные, региональные, местные, объектовые и локальные. Эта классификация позволяет более целенаправленно совершенствовать методы и системы анализа, прогнозирования и предупреждения, в т. ч. и на конкретных объектах машиностроительного производства, связанных с использованием кроме основного КПП ещё и разного вспомогательного оборудования при холодной и горячей обработке металлических изделий, различных как по массе, так и по габаритам. К последним можно отнести внутри- и межцеховой транспорт (авто и электрокары, конвейеры, манипуляторы, краны, электропогрузчики, рельсовые и безрельсовые

электротележки), а также ванны травления и закалки, дробемётные и галтовочные барабаны, заточные станки и т. д.

**Постановка задачи.** Необходимо выполнить исследование распределения НС в КПП по видам полученных травм и определить их максимальные значения.

**Материалы и результаты исследования.** Исследование распределения НС по видам полученных травм [4, 5] с 1985 г. по 1989 г. (табл. 1, рис. 1–4) показывает, что чаще всего в КПП как при горячей, так и при холодной обработке металлов случаются НС, связанные с ушибами, переломами, трещинами и вывихами, но только при горячей обработке к вышеуказанным последствиям НС относятся ещё и термические ожоги. Полученные показатели по вышеуказанным годам свидетельствуют о том, что такие последствия НС, как резаные и рваные раны, травматическая ампутация, растяжение или разрыв связок, комплексные и другие виды травм, не попавших в перечень, в течение трёх лет находятся почти на совершенно одинаковом уровне и составляют от 5 до 12 случаев в год.

Данные таблицы 1 и рисунка 1 также свидетельствуют о том, что ушибы и переломы, трещины и вывихи преобладают над всеми видами травм в исследуемые годы. В частности, в 1985 г. (рис. 2, 3) их количество составляло 41 случай, в 1987 г. — 57 случаев и в 1989 г. — 46 случаев, то есть их количество по годам достигало четверти от общего количества НС по различным видам полученных травм. А такие виды травм, как переломы, трещины и вывихи, соответственно составляли в 1985 г. (рис. 3) — 31 случай, в 1987 г. (рис. 4) — 43 случая и в 1989 г. (рис. 5) — 29 случаев, что занимает от четверти до пятой части всех видов полученных травм.

Необходимо учитывать, что почти все виды полученных травм являются последствиями организационных, психофизиологических и частично технических причин НС. При этом необходимо отметить, что основной вклад в общее количество травм в КПП вносят мужчины, но с учётом того, что среди работников КПП женщины составляют четверть-пятую часть по количеству, эта разница достаточно велика.

Таблица 1

Распределение НС в КПП по видам полученных травм по годам

№ п/п	Виды травм	Общее количество травм среди мужчин			Общее количество травм среди женщин			Общее количество травм в КПП		
		1985	1987	1989	1985	1987	1989	1985	1987	1989
1	Резаная рана	14	8	12	7	6	1	21	14	13
2	Ушиб	32	50	39	9	7	7	41	57	46
3	Рваная рана	6	5	4	1	2	1	7	7	5
4	Термический ожог	23	17	15	2	3	2	25	20	17
5	Травматическая ампутация	3	5	9	5	1	1	8	6	10
6	Перелом, трещина, вывих	30	33	23	1	10	6	31	43	29
7	Растяжение, разрыв связок	10	4	7	2	3	1	12	7	8
8	Комплексная травма	14	8	6	3	1	2	17	9	8
9	Другие виды травм	11	12	6	2	1	2	13	13	8
10	Всего	143	142	121	32	34	23	175	176	144

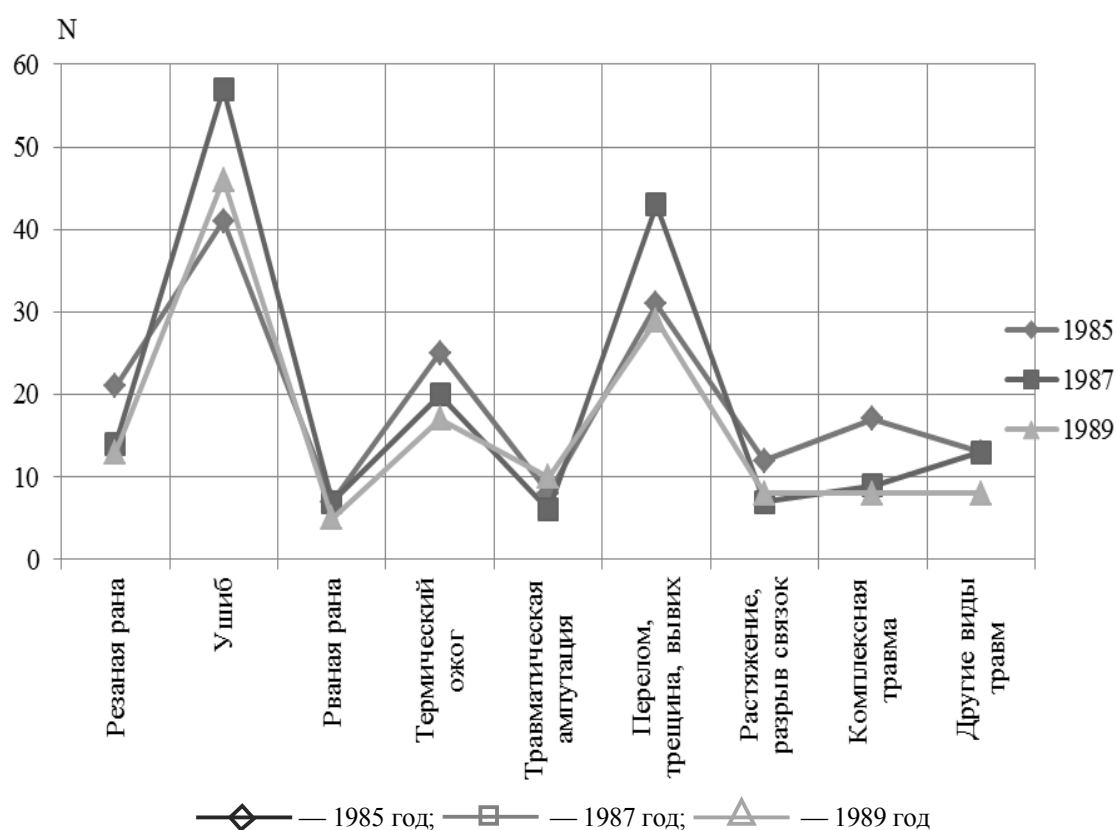


Рисунок 1 Распределение НС в КПП по видам полученных травм по годам

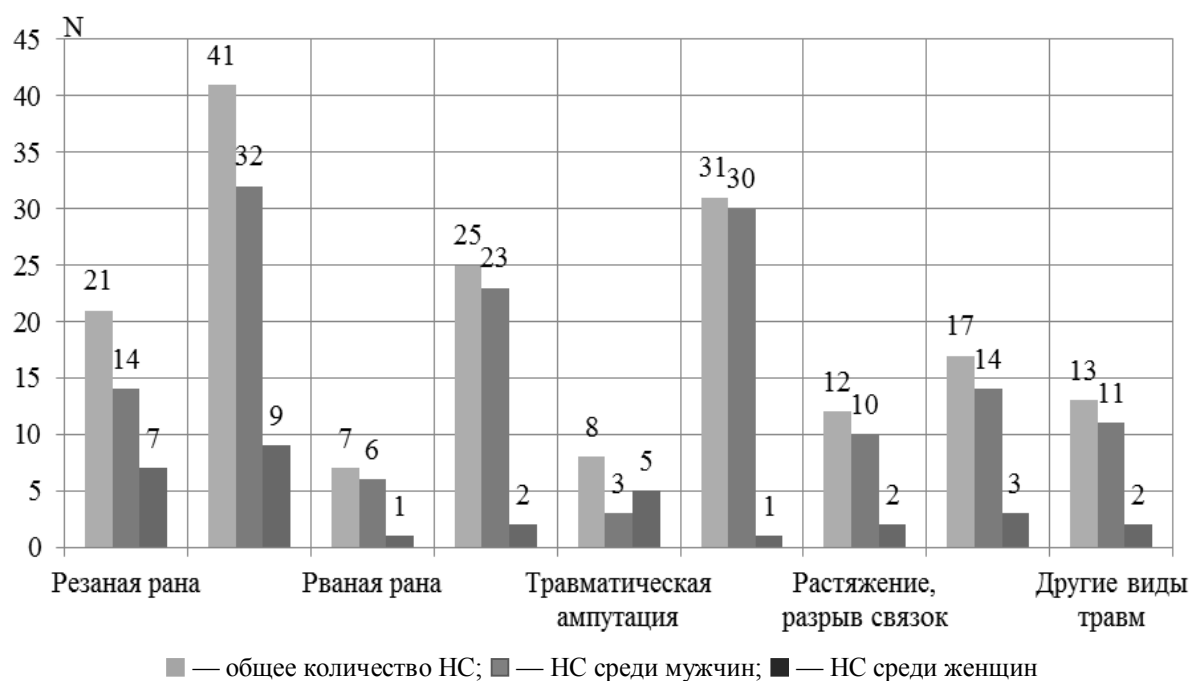


Рисунок 2 Распределение НС в КПП по видам полученных травм в 1985 г. среди мужчин и женщин

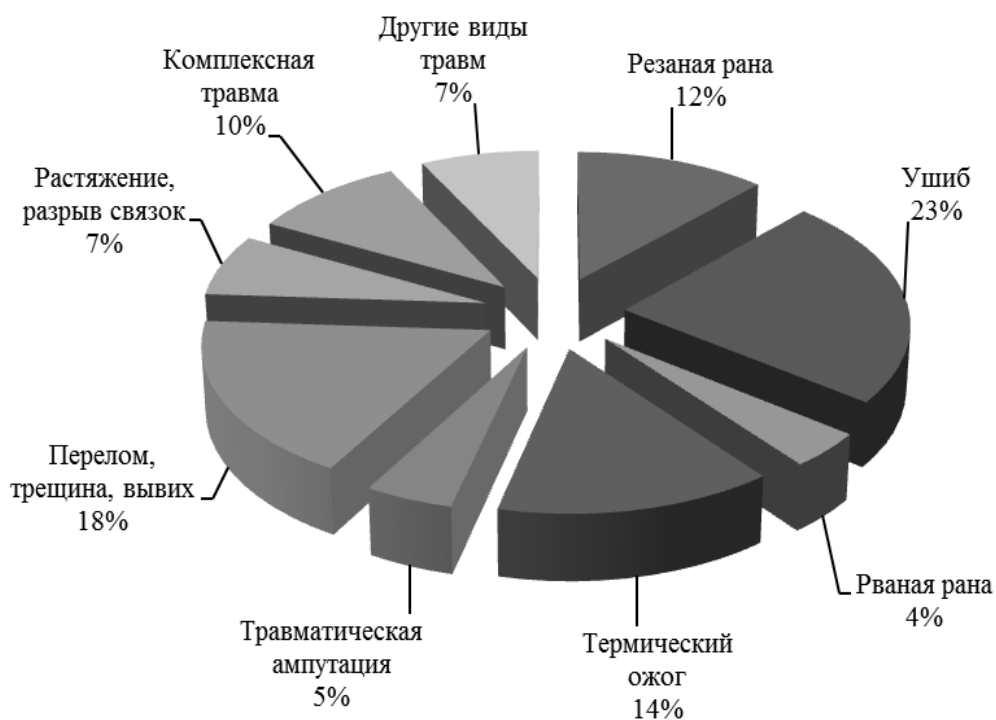


Рисунок 3 Распределение НС в КПП по видам полученных травм в 1985 г.

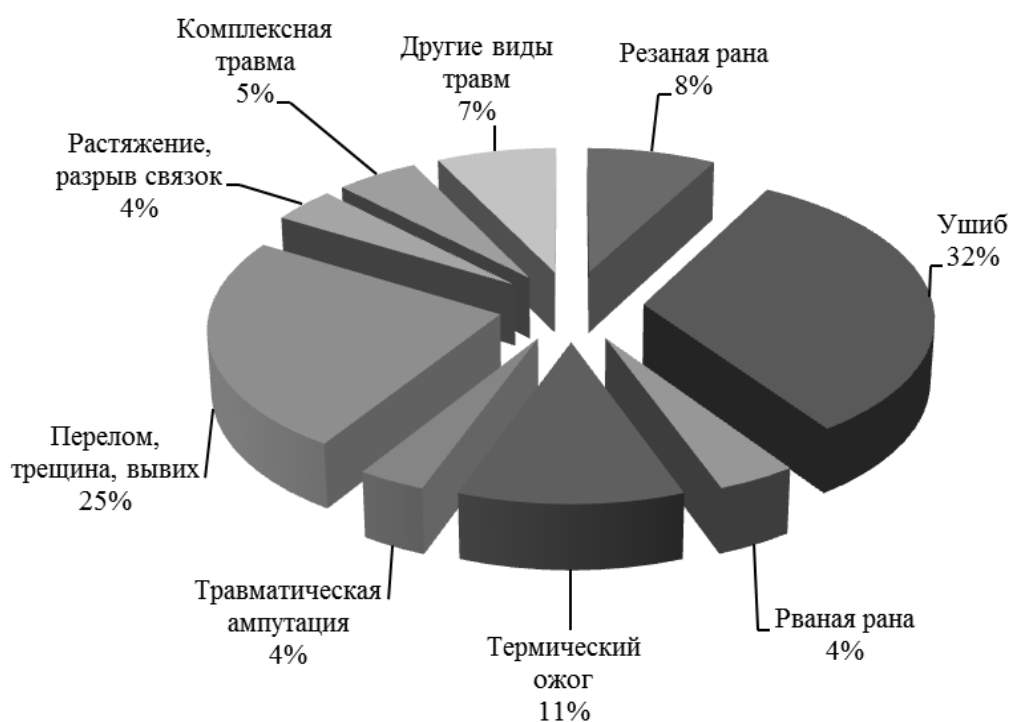


Рисунок 4 Распределение НС в КПП по видам полученных травм в 1987 г.

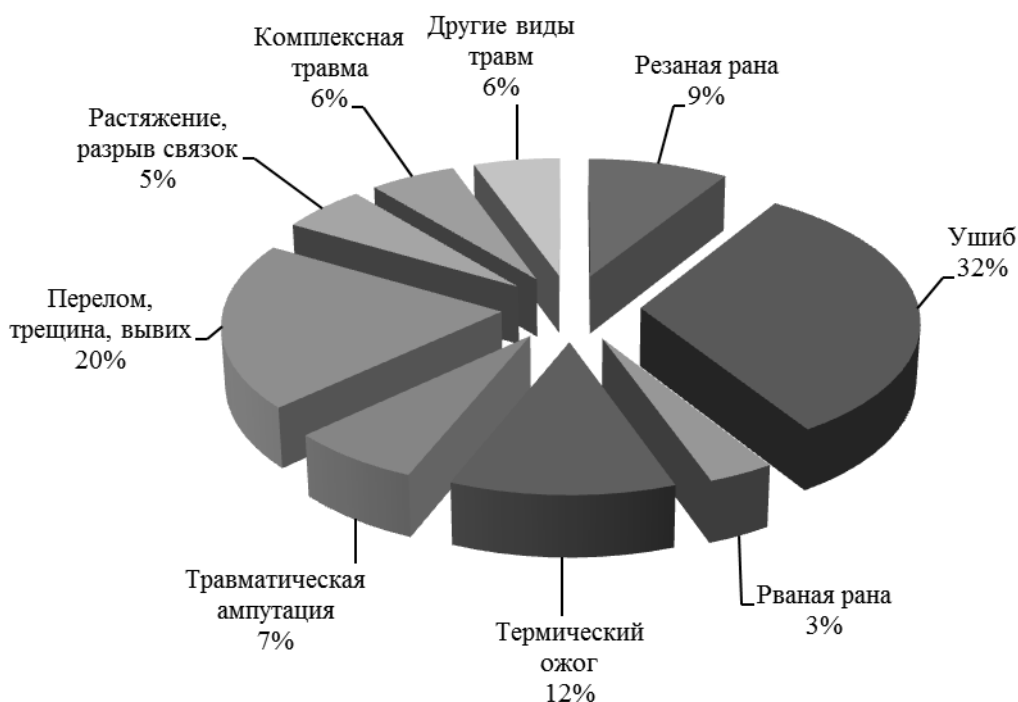


Рисунок 5 Распределение НС в КПП по видам полученных травм в 1989 г.

Так, например, в 1987 г. последствиями НС среди мужчин было 50 ушибов, а у женщин — только 7, это касается и 1989 г., когда, соответственно, среди мужчин было 40 ушибов, а среди женщин — всего 6.

По таким видам полученных травм, как переломы, трещины и вывихи, наблюдается почти такая же картина: в 1985 году (см. рис. 1) из 31 общего случая получения таких травм мужчины имеют 30, а женщины всего 1 и, соответственно, в 1987 из 43 случаев доля мужчин составляет 33, а женщин — 10, в 1989 из 29 НС доля мужчин составляет 20, а женщин — 9.

**Выводы.** Таким образом, применительно к анализу распределения НС в КПП по видам полученных травм в рассмотренных годах выявляется необходимость в детальном установлении причин возникновения таких НС, приводящих в первую очередь к ушибам, переломам, трещинам и вывихам. Поскольку КПП характеризуется очень высокой напряжённостью и сложностью труда, то должен быть получен ответ на вопросы, касающиеся не только работы технических систем и возможности их со-

вместного использования на одном производственном участке, но и правильности или удобства строительно-планировочных решений, компоновки рабочего места и т. д., что в первую очередь влияет на показатели производственного риска, которые зависят от надёжности используемого оборудования.

Необходимо также ответить на вопрос о профессионализме, способности к переобучению, ответственном отношении к рабочему процессу работников, соответствии их антропометрических характеристик существующим эргономическим параметрам оборудования и рабочего места и т. д., потому что НС возникают не только вследствие расстройств в работе КПП, но и ложных, объективных или субъективных решений и действий человека-оператора. Также анализ указывает на необходимость более придирического отношения к организации технологических процессов, связанных с горячей обработкой металлов, поскольку термические ожоги занимают устойчивое третье место после ушибов, переломов, трещин и вывихов в исследуемые годы.

## Библіографічний список

1. ДСТУ ISO 9004-2001. Системи управління якістю. Указання по удосконаленню діяльності [Текст]. — Введ. 2001-10-01. — К. : Государственный стандарт Украины, 2001. — 44 с.
2. Белов, П. Г. Системний аналіз і моделювання небезпечних процесів в техносфері [Текст] / П. Г. Белов. — М. : центр Академії ГЗ МНС РФ, 2003. — 512 с.
3. Аналіз методів моделювання показників стану охорони праці [Текст] / О. Н. Гунченко, В. А. Медяник, Н. А. Касьянов, Д. А. Вишневський // Вісник Східноукр. нац. ун-ту. — 2007. — № 12 (118), ч. 1. — С. 98–103.
4. Kasyanov, N. Development of simulation methods for labour protection status indicators [Text] / N. Kasyanov, O. Gunchenko, D. Vyshnevskyy // TEKA Com. Mot. i Energ. Roln. — OL PAN, Lublin – Lugansk, 2010. — Vol. XA. — P. 234–242.
5. Экспериментальные исследования распределения количества несчастных случаев (НС) в кузнечно-прессовом производстве (КПП) [Текст] / Д. А. Вишневский // Сборник научных статей 5-й Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Прогрессивные технологии и процессы». — Курск, 2018. — С. 53–58.

© Вишневский Д. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.,  
д.т.н., проф., зав. каф. ТМиИК ЛНУ им. В. Даля Витренко В. А.*

*Статья поступила в редакцию 11.03.19.*

**к.т.н. Вишневський Д. О.** (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

#### **ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ НЕЩАСНИХ ВИПАДКІВ В КОВАЛЬСЬКО-ПРЕСОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ ЗА ВИДАМИ ОТРИМАНИХ ТРАВМ**

*Проведено аналіз характеру розподілу нещасних випадків (НВ) в ковальсько-пресовому виробництві (КПВ) за видами отриманих травм. Встановлено, що його максимальні показники представлено у трьох видах: удар; перелом, тріщина, вивих; термічний опік.*

*Аналіз вказує на необхідність перегляду організації технологічних процесів, пов'язаних з гарячою обробкою металів, оскільки термічні опіки займають стійке третє місце після ударів, переломів, тріщин і вивихів у досліджувані роки.*

**Ключові слова:** ковальсько-пресове виробництво, травматизм, нещасний випадок, види травм, людський фактор.

**PhD Vishnevskiy D. A.** (DonSTU, Alchevsk, LPR)

#### **INVESTIGATION THE ACCIDENTS DISTRIBUTION IN THE PRESS-FORGING PRODUCTION BY TYPES OF INJURIES**

*There has been carried out the analysis of nature of the accidents (Acc) distribution in the press-forging production (PFP) by types of injuries. It is determined that its maximum indices are presented in three types: injury; fracture; split; dislocation; thermal burn.*

*The analysis points to the need to review the organization of technological processes related to the hot metal processing, as thermal burns occupy a stable third place after injuries, fractures, splits and dislocations in the years under review.*

**Key words:** press-forging production, injuries, accident, types of injuries, human factor.

УДК 621.926

Тумин А. Н.,  
к.т.н. Ткачёв Р. Ю.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР),  
д.т.н. Еронько С. П.  
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР),  
д.т.н. Замота Т. Н.  
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)

## СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ГИДРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНОЙ ДРОБИЛЬНО-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

*Рассмотрены вопросы гидрофикации центробежно-ударной дробильно-измельчительной машины с возможностью регулирования скорости вращения ротора. При этом проведён анализ наиболее простых схем регулирования с выбором рационального критерия оптимизации.*

**Ключевые слова:** центробежно-ударный измельчитель, гидрофикация, пропорциональный клапан.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Разгонно-ударные дробильно-измельчительные машины обладают высокой производительностью, относительно низкими энергозатратами, хорошей выравненностью гранулометрического состава готового продукта и возможностью его пневмотранспортировки.

Некоторые ограничения на широкое распространение данных машин накладывают высокие требования к балансировке ротора и необходимость применения износостойких материалов, особенно для лопастей ротора, подверженных высокому фрикционному влиянию. При этом для изготовления ударных элементов отбойных плит хорошо зарекомендовали себя марганцовистые стали типа стали Гадфильда (110Г13Л), однако фактически не поддающиеся механической обработке после отливки.

При значительной массе ротора возникает проблема его плавного разгона до номинальной частоты вращения из-за большой инерционности. Это достигается, например, за счёт применения фрикционной муфты или тиристорного преобразователя частоты переменного тока [1–3].

Исследования [3] показали, что при применении фрикционной муфты или тиристорного преобразователя частоты пере-

менного тока в механизме вращения ротора центробежно-ударного измельчителя производительность данной машины увеличивается на 5 %. Однако фрикционная муфта из-за своих конструктивных особенностей не обеспечивает постоянного передаточного отношения, а высокая стоимость тиристорного преобразователя очень затрудняет его приобретение для данной цели.

**Постановка задачи.** Задачей исследований, охватываемой данной работой, является рассмотрение рациональной гидрофикации центробежно-ударного измельчителя с возможностью регулирования мощности (скорости) для передачи вращения ротору машины без существенного изменения её конструкции.

**Изложение материала и его результаты.** Для выбора варианта управления мощностью центробежно-ударного измельчителя рассмотрим две наиболее простые схемы с возможностью настройки скорости вращения посредством пропорционального регулирующего клапана, приведённые на рисунке 1. Преимущества использования пропорциональных клапанов достаточно хорошо известны [4].

Наиболее простая гидравлическая задача вращательного движения состоит из генератора энергии (насоса) и потребителя

этой энергии (гидромотора), как правило, той же конструкции и той же величины (см. рис. 1, а). В насосе механическая энергия преобразуется в энергию потока

рабочей жидкости и направляется к гидромотору, где преобразуется в механическую энергию. После отдачи энергии жидкость возвращается в бак [2].

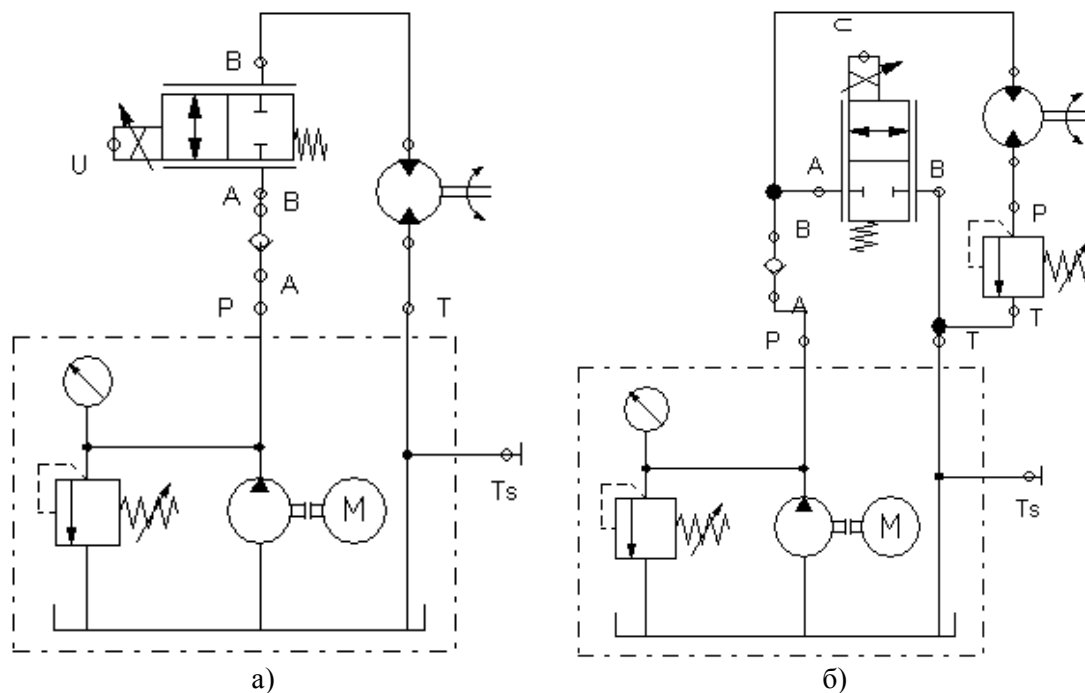


Рисунок 1 Гидравлические схемы привода вращения ротора в центробежно-ударном измельчителе

Анализ структурных схем объекта управления — силовой части гидропривода — показывает, что они имеют вид цепочки последовательно соединенных звеньев, на выходе каждого из которых формируется тот или иной параметр: перепад давления на гидромоторе, расход рабочей жидкости, скорость/частота вращения гидромотора и т. д.

Естественно, каждый параметр следует регулировать по возможности с наибольшими скоростью и точностью. Однако на практике этот принцип вступает в противоречие с рядом технических и экономических условий. Поэтому каждый критерий оптимизации представляет собой компромиссный вариант.

Определим мощность гидромотора как наибольшую мощность, которой управляет пропорциональный клапан при макси-

мальном давлении и оптимальной нагрузке согласно [5]:

$$p_m = P_n - \frac{2q^2}{g^2}, \quad (1)$$

где  $P_m$  — перепад давления на гидромоторе (под нагрузкой);  $P_n$  — давление питания (насоса);  $q$  — расход рабочей жидкости через гидромотор;  $g$  — гидравлическая проводимость щели клапана), определяемая как

$$g = a \cdot C_d \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}}, \quad (2)$$

где  $a$  — площадь щели пропорционального клапана;  $C_d$  — коэффициент расхода;  $\rho$  — плотность рабочей жидкости.

Мощность, подводимая к нагрузке, выражается произведением перепада давления на нагрузку и расхода. Тогда с учётом (1) имеем

$$H_m = q \cdot p_m = q \cdot P_n - \frac{2 \cdot q^2}{g^2}. \quad (3)$$

Уравнение (1) будет иметь максимум при  $\frac{dH}{dq} = 0$  или

$$\frac{dH_m}{dq} = P_n - \frac{6 \cdot q^2}{g^2} = 3 \cdot p_m - 2 \cdot P_n = 0. \quad (4)$$

Отсюда следует, что максимальная мощность, выделяемая на нагрузку, равна

$$p_m = \frac{2}{3} \cdot P_n. \quad (5)$$

Как видно из этого выражения, при последовательном включении пропорционального клапана по схеме, приведённой на рисунке 1,а, теоретически будет теряться 1/3 мощности насоса. Конечно, при выборе насоса давление питания не является критической величиной и выбирается по многим факторам.

Наибольший расход через пропорциональный клапан без нагрузки на гидромоторе будет достигаться при максимальном открытии щели распределителя и при перепаде давления, равном давлению питания  $P_n$ , будет определяться выражением

$$q_m = g_m \cdot \sqrt{\frac{P_n}{2}}, \quad (6)$$

где  $g_m$  — наибольшее значение гидравлической проводимости трубопровода пропорционального клапана при полном открытии.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что применение источника постоянной производительности в простой гидравлической цепи (рис. 1, а) нецелесообразно ввиду вращения гидродвигателя с постоянной скоростью, когда последовательно включённый пропорциональный распределитель не сможет управлять его работой в полной мере, а будет создавать напрасные потери мощности (5).

Следует учитывать и тот факт, что при действии высокого давления необходимо

выбирать всё гидрооборудование повышенной жёсткости и, как следствие, более высокой его стоимости. Поскольку последовательное соединение клапана и гидромотора с позиций теории управления представляют собой интегратор (без учёта инерционности нагрузки), привод пропорционального клапана является позиционным устройством, и если цикл мощности не полностью определён, то невозможно будет также установить и величину входной мощности. В то же время очевидно, что повышенная жёсткость клапана задаётся соответствующим его типоразмером, а это, в свою очередь, приводит к существенным перемещениям золотника, на что требуется большая мощность.

Известно, что выходная мощность электромагнитного привода никогда не бывает избыточной, поэтому даже небольшое увеличение хода золотника пропорционального клапана потребует несоразмерного увеличения габаритов и мощности механизма управления, что приведёт к значительному уменьшению быстродействия [6].

Более простое решение можно получить при сочетании насоса постоянной производительности с параллельным подключением пропорционального клапана к гидромотору, как показано на рисунке 1,б.

В этом случае уравнение расхода такой системы примет вид

$$q_m = q_n - G \cdot y \cdot \sqrt{P_1}, \quad (7)$$

где  $G$  — проводимость рабочей щели полностью открытого пропорционального клапана ( $y=1$ );  $y = \frac{g_k}{G}$  — степень открытия клапана (принимает значения от 0 — клапан перекрыт, до 1 — клапан полностью открыт);  $P_1$  — перепад давления на гидромоторе, равный  $P_n - P_n$ , т. е. разнице между давлением питания и давлением подпорного клапана.

В случае полностью перекрытого клапана ( $y=0$ ) имеем максимальную мощность

$$q_m = q_n, \quad (8)$$

т. е. вся мощность, вырабатываемая насосом, идёт на гидромотор без ограничений и потерь через клапан.

Регулирование скорости, равно как и мощности, в этом случае осуществляется за счёт изменения расхода через регулируемый пропорциональный клапан (7). В зависимости от требуемого диапазона регулирования скорости вращения нагруженного измельчителя выбирается типоразмер пропорционального клапана.

Управление скоростью (мощностью) гидромотора [1] (рис. 1, б) осуществляется в зависимости от требований технологии или ограничений, накладываемых механическим оборудованием либо путём непосредственного задания скорости на вход регулятора.

Составной частью контура регулирования скорости вращения гидромотора является объект управления, в который входят оптимизированный контур электромеханического преобразователя и механическая часть электропривода, датчик скорости/частоты вращения и регулятор. В зависимости от требований, предъявляемых технологией к гидроприводу механизма, контур скорости выполняют однократно интегрирующим (с П-регулятором) или двукратно интегрирующим (с ПИ-регулятором).

Оптимизацию однократно интегрирующего контура скорости можно выполнить по модульному критерию, поскольку объект управления в этом случае является статическим [7].

Реакция системы стабилизации скорости вращения гидромотора при значении 1000 об/мин приведена на рисунке 2, а на рисунке 3 показан переходный процесс по перемещению золотника пропорционального клапана.

Как видно из рисунка 3, в системе стабилизации скорости вращения с учётом влияния момента сопротивления нагрузки и принятых ограничений на перемещение регулирующего золотника показатели качества несколько отличаются от расчётных (теоретических) значений, но на системе в целом существенно это не сказывается.

В начальный момент клапан полностью открывается на незначительное время для создания максимального нарастания регулируемой величины (скорости), а затем полностью закрывается на время, необходимое для уменьшения скорости до заданного значения, и лишь с 0,37 секунды начинается регулирование скорости вращения. Общее время перемещения клапана составляет 0,7 с. Степень открытия золотника 25 %.

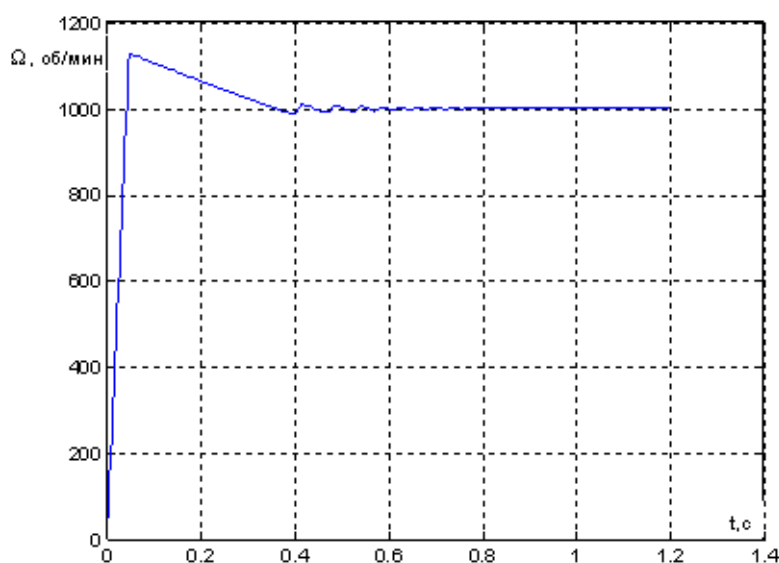


Рисунок 2 График переходного процесса в системе регулирования по скорости вращения при заданной скорости вращения 1000 об/мин

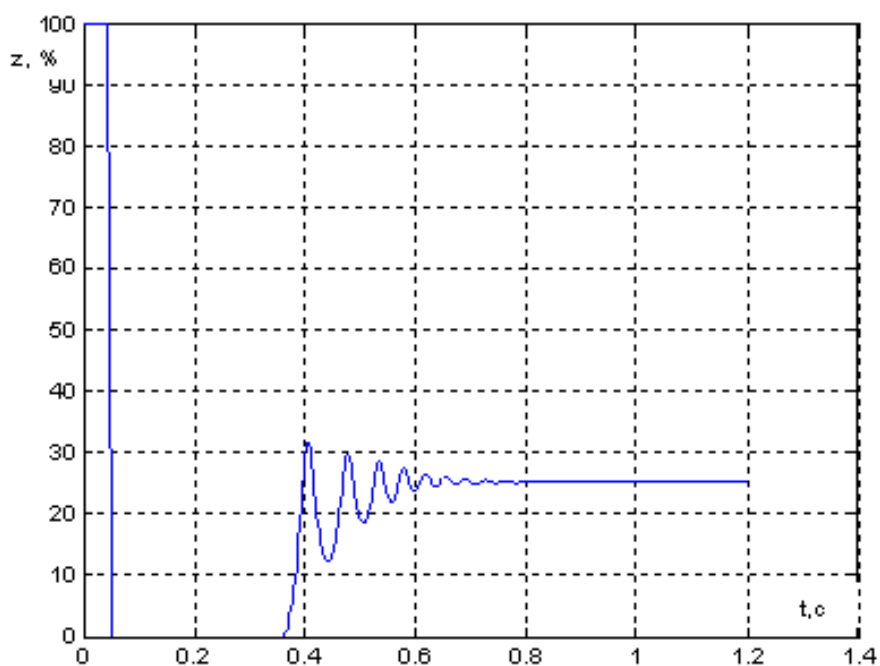


Рисунок 3 График переходного процесса по перемещению управляющего клапана (золотника)

На рисунках 4 и 5 приведены графики переходных процессов в системе стабилизации скорости вращения гидромотора при ступенчатом изменении выходного сигнала

задатчика скорости вращения на 1000 об/мин от 0 до 3000 об/мин, а также по перемещению управляющего золотника при этом же задающем воздействии.

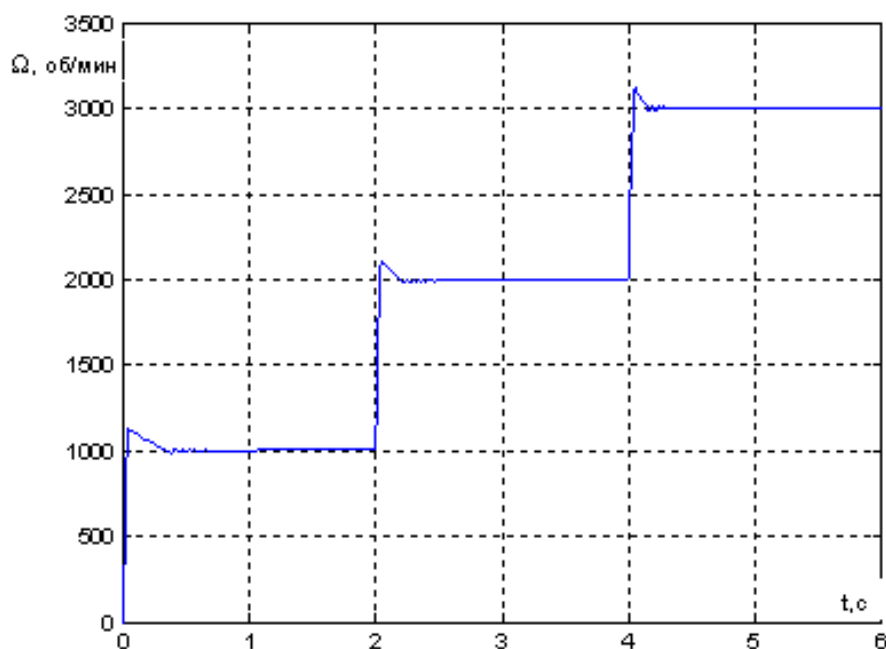


Рисунок 4 График переходного процесса в системе регулирования по скорости вращения при ступенчатом увеличении заданной скорости вращения на 1000 об/мин



Рисунок 5 График переходного процесса по перемещению управляющего клапана при ступенчатом изменении скорости вращения

Как видно из приведённых графиков, система обеспечивает приемлемое качество регулирования. Так, перерегулирование при переходе от одной ступени сигнала задания к другой составляет 12 %, а время регулирования сокращается с 0,4 с до 0,15 с. Время перемещения клапана уменьшается до 0,4 с на ступень.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Таким образом, в результате проведённого синтеза выбран наиболее ра-

циональный способ управления гидрофицированной центробежно-ударной дробилкой, а также установлен алгоритм функционирования регулятора стабилизации скорости вращения гидромотора. Данная структура обладает достаточной простотой применения, поскольку требования к точности поддержания скорости на заданном уровне не являются жёсткими, а также когда гидропривод работает в режиме ограничения перепада давления на гидромоторе.

#### Библиографический список

1. А. с. 1797995 СССР. МКИ В 02 С 13/14. Центробежная мельница [Текст] / Сухомлин Р. М., Левченко Э. П., Зинченко А. М., Онопченко А. Н., Богатова Л. И. ; заявитель и патентообладатель Коммун. горн.-мет. ин-т. — № 4887067/33 ; заявл. 04.12.90 ; опубл. 28.02.93, Бюл. № 8. — 2 с. : ил.
2. Тумин, А. Н. Использование гидропривода в центробежной разгонно-ударной мельнице [Текст] / А. Н. Тумин, О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2017. — Вып. 7 (50). — С. 158–159.
3. Панков, А. С. Диспергирование материалов в разгонно-ударных машинах [Текст] / А. С. Панков, А. А. Бревнов, А. Н. Тумин, Э. П. Левченко // Материалы 3-й Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов». — Донецк, 2017. — С. 68–71.
4. Шольц, Д. Пропорциональная гидравлика. Основной курс [Текст] / Д. Шольц. — К. : ДП «Фесто», 2002. — 128 с.
5. Гидравлические и пневматические силовые системы управления [Текст] / под ред. Дж. Блекборн. — М. : Изд-во иностранной литературы, 1962. — 615 с.

6. Хохлов, В. А. Электрогидравлические следящие системы [Текст] / В. А. Хохлов, В. Н. Прокофьев, Н. А. Борисова и др. — М. : Машиностроение, 1971. — 431 с.

7. Гарнов, В. К. Унифицированные системы автоуправления электроприводом в металлургии [Текст] / В. К. Гарнов, В. Б. Рабинович, Л. М. Вишинецкий. — М. : Металлургия, 1977. — 192 с.

© Тумин А. Н.

© Ткачев Р. Ю.

© Еронько С. П.

© Замота Т. Н.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А., к.т.н., доц., зав. каф. ЭМПЭ ЛНУ им. В. Даля Луцким Д. В.**

*Статья поступила в редакцию 18.02.19.*

**Тумин О. М., к.т.н. Ткачев Р. Ю. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР), д.т.н. Еронько С. П. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР), д.т.н. Замота Т. М. (ЛДУ ім. В. Даля, м. Луганськ, ЛНР)**

### **СПОСІБ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ГІДРОПРИВОДУ ВІДЦЕНТРОВО-УДАРНОЇ ДРОБАРНО-ЗДРІБНЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ**

*Розглянуто питання гідрофікації відцентрово-ударної дробарно-здрібнювальної машини з можливістю регулювання швидкості обертання ротора. При цьому проведено аналіз найбільш простих схем регулювання з вибором раціонального критерію оптимізації.*

**Ключові слова:** відцентрово-ударний здрібнювач, гідрофікація, пропорційний клапан.

**Tumin A. N., PhD Tkachyov R. Yu. (DonSTU, Alchevsk, LPR), Doctor of Tech. Sc. Eron'ko S. P. (DonNTU, Donetsk, DPR), Doctor of Tech. Sc. Zamota T. N. (LSU after V. Dahl, Lugansk, LPR)**

### **METHOD OF ADJUSTING THE ROTATIONAL SPEED OF THE HYDRAULIC CENTRIFUGAL IMPACT CRUSHER**

*There have been studied the questions of hydraufication of centrifugal impact crusher capable to control the rotor rotational speed. Therewith, the analysis of the simplest control schemes with the rational optimization criterion selection is carried out.*

**Key words:** centrifugal impact crusher, hydraufication, proportional valve.

УДК 621.926.9

Власенко Д. А.,  
Долгих В. П.  
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ С ДРОБИМЫМ МАТЕРИАЛОМ В МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКЕ

*Приводится модель и результаты моделирования взаимодействия ударных рабочих органов с материалом в роторной молотковой дробилке в программном комплексе ANSYS Workbench. При моделировании процесса соударения молотка с материалом конечно-элементным методом определяются основные параметры кинематики системы и проводится сравнительный анализ соответствия основных аналитических зависимостей и предложенной закономерности для определения угла его отклонения.*

**Ключевые слова:** эксперимент, молотковая дробилка, молоток, соударение, угол отклонения, моделирование, ANSYS Workbench.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** В последнее время в доменном производстве всё более широко применяется офлюсованный агломерат. Флюсы вводятся в шихту в виде известняка, извести, известкового молока, мела и доломита. Каждая из этих добавок по-разному интенсифицирует процесс спекания и требует своих требований к подготовке по крупности. Для условий агломерации шихтовых материалов, обеспечивающих требуемые прочностные свойства и стойкость агломерата, рекомендуется использование флюсов крупностью 0–3 мм.

На металлургические предприятия известняк и доломит поступают в виде кусков фракцией 40–80 мм, поэтому перед введением в шихту для них требуется предварительная фракционная подготовка. Одним из самых распространённых типов дробильного оборудования при этом являются молотковые дробилки, однако данный вид дробильных машин не позволяет в полной мере достигать требуемой технико-экономической эффективности их работы, что объясняется наличием ряда недостатков.

Наряду с интенсивным износом (эксплуатация отдельных рабочих органов составляет 72–530 часов), основная доля затрачиваемой энергии расходуется на измельчение именно за счёт истирания (до 83 %), а не удара, что

приводит к излишнему росту удельных энергозатрат, достигающих 50–60 кВт·час/т.

Одним из приоритетных направлений повышения технико-экономических показателей молотковых дробилок является повышение эффективности процесса дробления материалов за счёт наложения ударной нагрузки [1, 2].

При соударении с куском материала молоток теряет часть кинетической энергии, направленной на деформацию, за счёт отклонения от своего радиального положения [3, 4]. Это негативно сказывается на основных технологических показателях дробилки, таких как степень измельчения материала и износ молотков.

Существует ряд методик, позволяющих теоретически определить угол отклонения [3, 5], в том числе и предлагаемая методика [6]. Из их анализа следует, что отношение массы молотка к массе материала (коэффициент масс) оказывает существенное влияние на динамику ударного элемента дробилки.

Вместе с тем отсутствует экспериментальное подтверждение математической модели процесса ударного контакта молотков и материала при его дроблении.

**Постановка задачи.** Задачей работы является разработка модели молотковой дробилки для исследования кинематики удар-

ного органа при соударении с материалом, а также анализ и обоснование адекватности существующих зависимостей для определения угла отклонения молотка при компьютерном моделировании механической системы на основе анализа её свойств [7].

**Изложение материала и его результаты.** Поставленные задачи решаются путём сопоставления значений угла отклонения, полученных по известным методикам, с результатами моделирования процесса соударения с использованием программного комплекса ANSYS Workbench [8].

Для сравнительного анализа используем известные методики:

– Гернета М. М., в основу которой легло определение работы молотка в его относительном движении [5]:

$$\gamma = \arccos \left( 1 - \frac{D_1 (v_m - v'_m)^2}{4v_m^2 (D_1 - R)} \right), \quad (1)$$

где  $v_m$  — скорость молотка до удара;  $v'_m$  — скорость молотка после удара;  $D_1$  — диаметр окружности, в зоне которой происходит соударение;  $R$  — радиус окружности осей подвеса молотка;

– Сидашенко А. И. [3], полученную из закона сохранения моментов количества движения до и после удара:

$$\gamma = \frac{R+l-a}{(l-a) \left( 1 + \frac{m_m(l-a)^2 - a^2}{m_q(l-a)^2} \right) \sqrt{\frac{3(R+r)^2}{(l-a)^2 - a^2}}}, \quad (2)$$

где  $m_m$  — масса молотка, сосредоточенная в точке соударения (приведённая масса);  $m_q$  — масса частицы материала;  $l$  — длина молотка;  $a$  — длина участка ножки ниже оси подвеса;  $r$  — расстояние до внешней грани;

– математическую модель, полученную на основании статического закона Герца и законов сохранения импульса и кинетической энергии, обоснованную в работе [6]:

$$\gamma_2 = \left( 1 + \frac{R}{r-c} \right) \frac{4r_u}{(k_m + 1) \sqrt{(r-c)(R+r-c)}}, \quad (3)$$

где  $c$  — расстояние, на которое проникает материал в рабочую зону молотков;  $r_u$  — радиус инерции молотков относительно оси подвеса;  $k_m$  — коэффициент масс.

При разработке технического решения, направленного на определение параметров динамики молотка при соударении с материалом конечно-элементным методом, предполагаем, что происходит одиночный упругий центральный удар молотка. Силы тяжести и трения в шарнирах не учитываются.

На первом этапе построена трёхмерная модель ротора дробилки в масштабе 1:1, состоящая из вала, двух дисков и шарнирно подвешенного молотка, установленного на оси подвеса ротора (рис. 1). Затем модель экспортирована в среду ANSYS Workbench (рис. 2). После этого нанесена конечно-элементная сетка (рис. 3).

Основной задачей исследования является моделирование кинематики системы «ротор–молоток–частица» в программном комплексе ANSYS Workbench. Для этого принимались следующие исходные параметры системы: угловая скорость вращения ротора —  $78,54 \text{ с}^{-1}$ ; диаметр подвеса молотков —  $0,43 \text{ м}$ ; радиус внешней грани молотка —  $0,295 \text{ м}$ ; расстояние внедрения в рабочую зону —  $0,02 \text{ м}$ ; масса молотка —  $15,06 \text{ кг}$ ; радиус инерции молотка —  $0,168 \text{ м}$ ; диаметр частицы —  $0,04\text{--}0,08 \text{ м}$ ; плотность материала частицы —  $2700 \text{ кг/м}^3$ , при этом частица находилась неподвижно в точке соударения.

Модель предназначена для оценки параметров ударного взаимодействия частицы материала и молотка, а также для ориентировочного определения угла отклонения молотка при их соударении.

Для определения угла отклонения молотка после соударения обрабатывались полученные результаты линейного перемещения узловых точек на роторе и на внешней грани молотка по соответствующим радиусам (рис. 4).

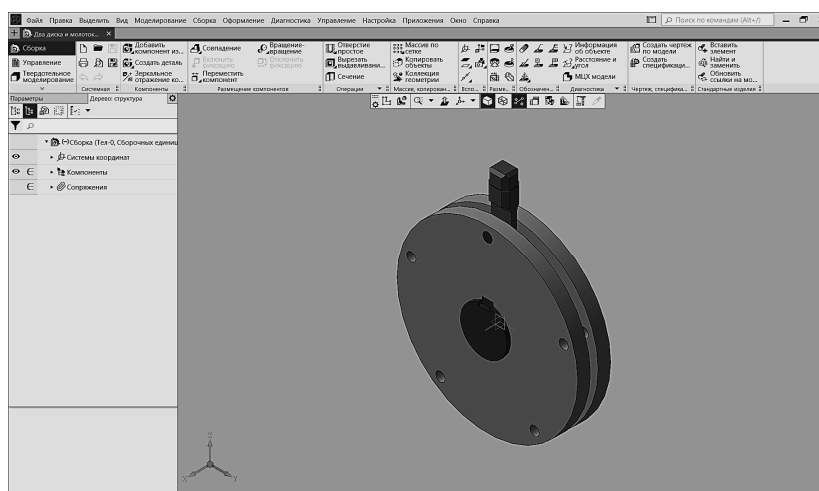


Рисунок 1 Трёхмерная модель участка ротора молотковой дробилки

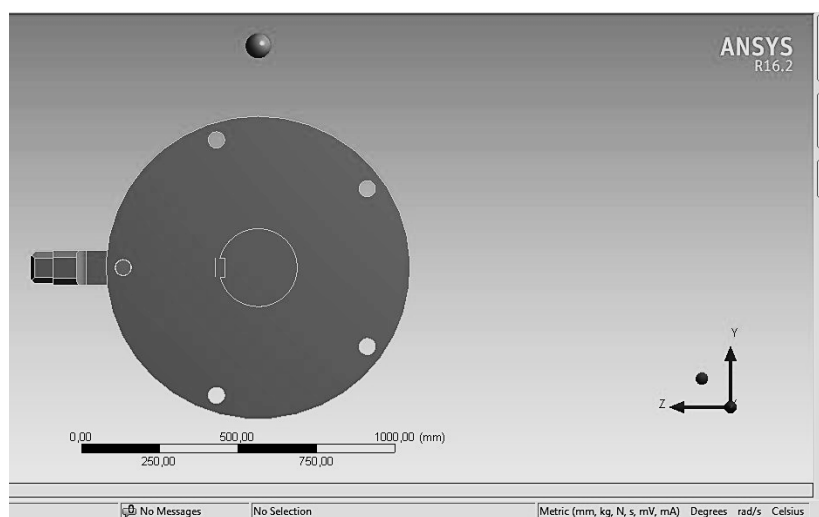


Рисунок 2 Трёхмерная модель ротора молотковой дробилки в среде ANSYS Workbench

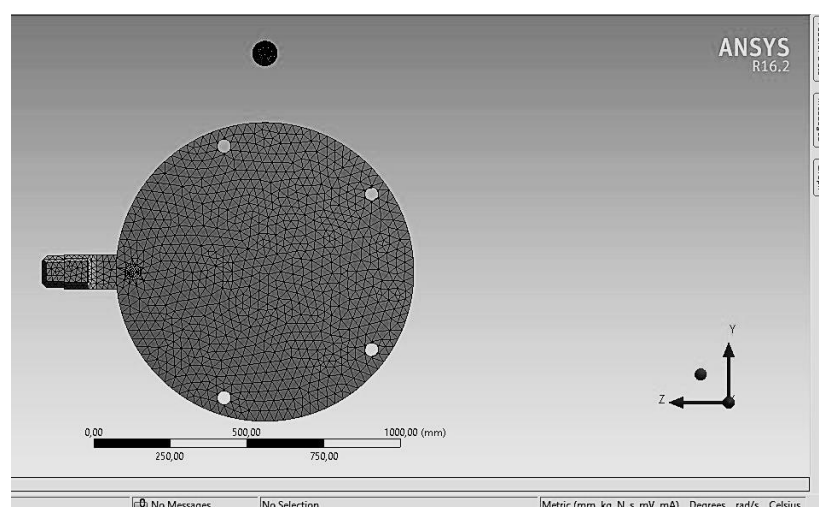


Рисунок 3 Конечно-элементная сетка модели ротора

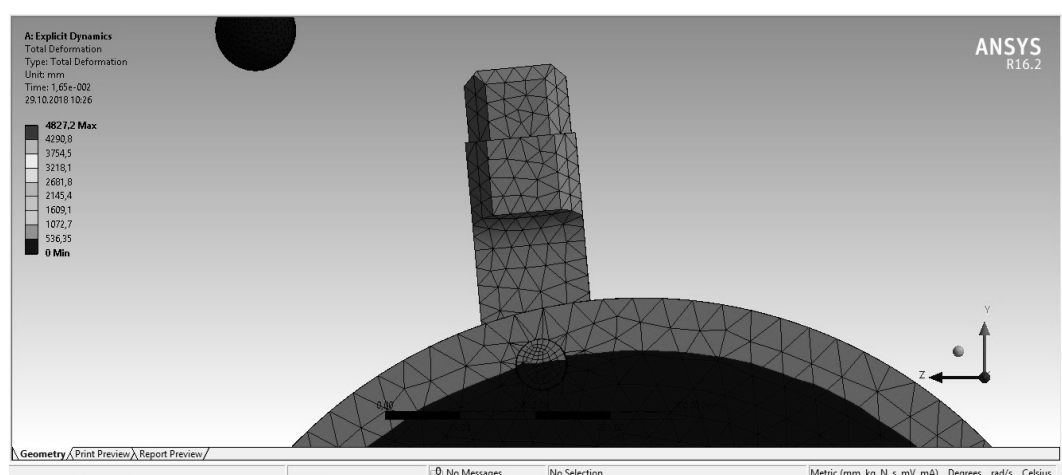


Рисунок 4 Положение молотка и частицы после соударения

В этом случае угол отклонения определяется из соотношения скоростей молотка до и после соударения или разницы расстояний, пройденных узловой точкой молотка и точкой на наружном радиусе вала ротора от начала отсчёта, отображённых на графике зависимостей расстояний характерных точек элементов (рис. 5).

Так как точка на роторе перемещается без ускорения (масса дисков ротора на несколько порядков больше массы частицы, а значит, влияние на параметры кинематики ротора дробилки будет незначительным), применив теорию подобия [9], угол

отклонения точки на внешней грани относительно оси вращения ротора приближённо определим как

$$\phi_3 \approx \arcsin \left( \frac{S_{\max} - k_s S_{\min}}{R + r} \right), \quad (4)$$

где  $S_{\max}$  — расстояние, преодоленное точкой на внешней грани молотка от начала отсчёта;  $k_s$  — отношение радиусов узловых точек на внешней грани молотка и роторе;  $S_{\min}$  — расстояние, преодолеваемое узловой точкой на роторе (рис. 5).

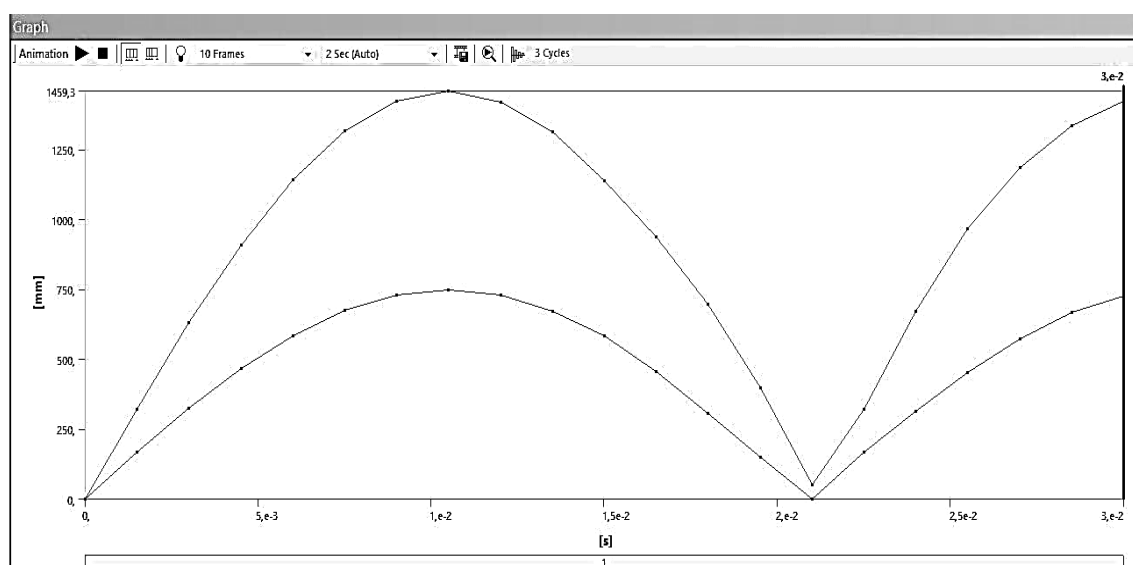


Рисунок 5 Графики траекторий движения характерных точек на роторе и молотке в процессе соударения с частицей известняка диаметром 0,08 м

На основании метода подобия выражение для определения угла отклонения молотка относительно оси подвеса принимает вид

$$\gamma_{\phi} \approx \phi_{\phi} \frac{R + r_u}{R}. \quad (5)$$

По результатам исследований получены значения углов отклонения с использованием аналитических зависимостей (1–3) и их соответствие аналогичным параметрам при моделировании в программном комплексе ANSYS Workbench, представленные в таблице.

Таблица

Значения угла отклонения молотка при ударном взаимодействии с материалом

№ п/п	Диаметр куска материала, м	Результаты моделирования, рад	По формуле Герца М. М., рад	Относительная погрешность, %	По зависимости Сидашенко А. И., рад	Относительная погрешность, %	По предложенной методике, рад	Относительная погрешность, %
1	0,04	0,037	0,039	6	0,003	62	0,027	21
2	0,06	0,099	0,125	26	0,012	75	0,086	15
3	0,08	0,212	0,277	31	0,027	81	0,198	9

Из анализа полученных результатов следует, что математическая модель (1) не подходит для условий контакта ударного элемента и сырья в молотковой дробилке, а наиболее достоверно описывает данный процесс при дроблении материала свободным ударом закономерность (3). При значениях угла отклонения от 0,05 до 0,2 рад степень соответствия данной зависимости результатам моделирования процесса соударения конечно-элементным методом составляет 87,5 %.

При этом выявлено, что крупность материала существенно влияет на показатели кинематики молотка — укрупнение фракции с 0,06 м до 0,08 м увеличивает угол отклонения в 2,1 раза.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Разработана конечно-элементная модель молотковой дробилки для исследования кинематики молотка при соударении с материалом в процессе дробления, проанализированы существующие зависимости для определения угла отклонения молотка и обоснована их адекватность при сравнении с экспериментальными данными моделирования.

При анализе результатов выявлено, что зависимость, полученная на основании статического закона Герца и законов сохранения импульса и кинетической энергии, наиболее достоверно описывает процесс ударного контакта материала с молотком. В дальнейшем она может служить теоретической основой при разработке и обосновании математической модели, предназначенной для определения основных технико-эксплуатационных характеристик процесса дробления в молотковой дробилке, таких как степень дробления материала и износ молотков.

Также доказано, что укрупнение фракции дробимого материала приводит к резкому увеличению угла отклонения молотка, а значит, и к потере его кинетической энергии, направленной на дробление.

Таким образом, для дальнейших исследований перспективным направлением является разработка и обоснование новых, направленных на повышение массы, конструкций молотков, вступающих в ударное взаимодействие с материалом, что позволит повысить эффективность работы ударного органа и увеличить производительность процесса дробления свободным ударом.

## Библиографический список

1. Барабаикин, В. П. Исследования параметров молотковых дробилок на примере дробления газового угля [Текст] / В. П. Барабаикин // Изд-во института горных ископаемых. — М. : ИГИ, 1971. — С. 41–49.
2. Хлынин, П. П. Совершенствование конструктивно-режимных параметров дробилки молоткового типа [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01, 05.20.03 / Хлынин Пётр Петрович. — Оренбург : НОГАУ, 2003. — 20 с.
3. Сидашенко, А. И. Теоретическое и экспериментальное определение угла отклонения молотка в момент удара о материал [Текст] / А. И. Сидашенко // Прогрессивные технологические способы и процессы восстановления деталей сельскохозяйственной техники. — 1984. — № 14. — С. 37–42.
4. Власенко, Д. А. Энергозатраты ударных дробилок с жёстким и шарнирным креплением бил к ротору [Текст] / Д. А. Власенко, О. И. Павленко, Э. П. Левченко // Вестник ДонНТУ. — 2016. — № 3. — С. 21–26.
5. Шестопалов, А. А. Строительные и дорожные машины и оборудование. Машины для переработки каменных материалов [Текст] : учебное пособие для вузов / А. А. Шестопалов, В. В. Бадалов. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 115 с.
6. Власенко, Д. А. Влияние крупности сырья на кинематику рабочих органов и материала в молотковой дробилке [Текст] / Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Вестник ДонНТУ. — 2018. — № 3. — С. 9–15.
7. Ковалёв, Р. В. Моделирование динамики механических систем [Текст] / Р. В. Ковалёв, А. Л. Сотников // Вибрация машин, измерение, снижение, защита. — 2012. — № 3 (30). — С. 44–49.
8. 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.
9. Веников, В. А. Теория подобия и моделирования [Текст] : учебное пособие для вузов / В. А. Веников. — [2-е изд., доп. и перераб.]. — М. : Наука, 1976. — 479 с.

© Власенко Д. А.

© Долгих В. П.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.,  
д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ, нач. НИЧ ДонНТУ Сотниковым А. Л.

Статья поступила в редакцию 08.02.19.

Власенко Д. О., Долгих В. П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

# МОДЕЛЮВАННЯ УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ З МАТЕРІАЛОМ, ЩО ПОДРІБНЮЄТЬСЯ, В МОЛОТКОВІЙ ДРОБАРЦІ

Наводиться модель і результати моделювання взаємодії ударних робочих органів з матеріалом в роторній молотковій дробарці в програмному комплексі ANSYS Workbench. При моделюванні процесу зіткнення молотка з матеріалом кінцево-елементним методом визначаються основні параметри кінематики системи і проводиться порівняльний аналіз відповідності основних аналітичних залежностей і запропонованої закономірності для визначення кута його відхилення.

**Ключові слова:** експеримент, молоткова дробарка, молоток, зіткнення, кут відхилення, моделювання, ANSYS Workbench.

Vlasenko D. A., Dolgikh V. P. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

# MODELING OF IMPACT INTERACTION BETWEEN THE OPERATING ELEMENTS AND CRUSHING MATERIAL IN HAMMER CRUSHER

The model and results of modeling of the interaction between the impact operating elements and material in the rotary hammer crusher are given in the software environment ANSYS Workbench. When modeling the process of hammer collision with the material by the finite element method, the main system kinematics parameters are determined and a comparative analysis of the correspondence of the main analytical dependences and the proposed regularity is carried out to determine its deflection angle.

**Key words:** experiment, hammer crusher, hammer, collision, deflection angle, modeling, ANSYS Workbench.

**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 7 раз за 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 (на усмотрение автора, рекомендовано два вида рецензий: рецензия в произвольном изложении; международная форма рецензирования статьи);

– лицензионным договором с автором(и).

Текст статьи предоставляется на электронном носителе и в печатном виде, сопроводительная документация только в печатном виде.

Рекомендуемое количество авторов статьи — до 3-х человек. При необходимости, по решению редколлегии, количество авторов может быть увеличено до 5-ти.

Языки предоставления статей: русский, английский, украинский.

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Текст рукописи статьи от 5 до 10 страниц в книжной ориентации на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) с полями: верхнее, нижнее — 27 мм; левое — 23 мм, правое — 25 мм. Различать колонтитулы чётных и нечётных страниц: от края до верхнего колонтитула — 2 см; от края до нижнего колонтитула — 2 см. Страницы не нумеруются. Рукопись статьи оформляется с применением редактора **MS Word (не ниже Word 97 и не старше Word 2003)**: шрифт — Times New Roman, размер — 12 пт, интервал — одинарный, выравнивание — по ширине, абзацный отступ — 0,5 см.

Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **активирована**. Весь материал подаётся в чёрно-белом оформлении (без градиентов серого или цветовой палитры).

**Не допускается** использование списков (маркированных и нумерованных) и элементов «Надпись».

### *Оформление статей*

Статья подаётся отдельным файлом «*Статья.doc*».

УДК проставляется вверху, выравнивание по левому краю, шрифт полужирный, без абзацного отступа. УДК можно определить самостоятельно с помощью классификатора <https://teacode.com/online/udc>. Проверить корректность расшифровки известного УДК можно здесь — <http://scs.viniti.ru/udc/Default.aspx>.

Через один интервал — учёная степень, фамилия, инициалы, разделённые пробелом. С новой строки в круглых скобках через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. Шрифт полужирный, курсив, выравнивание по правому краю, без абзацного отступа.

С новой строки — название статьи. Выравнивание по центру, шрифт Arial, полужирный, видоизменение — все прописные, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца — 12 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. **Не допускается** набор всего названия заглавными буквами (Caps Lock).

С новой строки — краткая аннотация на языке публикации: размер шрифта — 11 пт, курсив. В аннотации сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

После аннотации с новой строки — ключевые слова (6–8 слов на языке статьи), курсивом, размером 11 пт, интервал после абзаца — «Авто». Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

С новой строки — текст статьи в **две колонки** одинаковой ширины, промежуток между колонками — 0,5 см.

Слова «рисунок» и «таблица» при упоминаниях в тексте пишутся полностью (пример: «... на рисунке 2 ...»), а в ссылках в конце предложения — сокращённо в скобках (примеры: «... схема инвертора (рис. 2).», «... получены экспериментальные данные (табл. 4).»).

После текста статьи полужирным шрифтом размером 11 пт располагается заголовок «Библиографический список»: интервал перед абзацем — 12 пт, после абзаца — 8 пт, выравнивание по левому краю.

Библиографический список оформляется согласно ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления» размером 11 пт, курсивом и должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Рекомендованное количество ссылок — не более восьми источников с датой их издания не ранее чем 20 лет назад.

Через один интервал — учёная степень, фамилия, инициалы, полное название организации, название статьи, аннотации и ключевые слова на оставшемся языке из двух (русский, украинский), размером шрифта 11 пт.

Учёная степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. В круглых скобках курсивом через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора.

С новой строки, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю — название статьи заглавными буквами.

С новой строки — краткая аннотация курсивом.

С новой строки — ключевые слова курсивом. Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

### **Оформление аннотаций отдельным файлом**

Аннотация и ключевые слова дополнительно подаются на двух языках (русский, украинский) отдельным файлом «*Аннотация.doc*», размером шрифта 11 пт.

Учёная степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. В круглых скобках курсивом через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. С новой строки, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю — название статьи заглавными буквами.

С новой строки — краткая аннотация курсивом.

С новой строки — ключевые слова курсивом. Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

**Не допускается** внедрение в текст аннотации объектов (формул, рисунков и т. д.).

### **Оформление рефератов отдельным файлом**

Реферат подаётся на двух языках (русский, украинский) отдельным файлом «*Реферат.doc*»: размер шрифта — 11 пт, без абзацного отступа, выравнивание — по левому краю. Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **выключена**.

Фамилия, имя, отчество оформляются полужирным шрифтом.

С новой строки — учёная степень, должность.

С новой строки — название подразделения.

С новой строки через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора.

Через интервал повторить данные для каждого автора.

Через интервал — название статьи (полужирным начертанием).

Через интервал — текст реферата. Реферат объёмом от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель, методика, результаты, научная новизна, практическая значимость. Фразы «Цель.», «Методика.», «Результаты.», «Научная новизна.», «Практическая значимость.» (на русском языке), «Мета.», «Методика.», «Результати.», «Наукова новизна.», «Практична значущість.» (на украинском языке), «Aim.», «Technique.», «Results.», «Scientific novelty.», «Practical significance.» (на английском языке) размещаются с новой строки и выделяются полужирным начертанием. Реферат не должен повторять название статьи.

**Не допускается** внедрение в текст реферата объектов (формул, рисунков, и т. д.).

### **Рисунки**

Рисунки вставляются в текст единым объектом и могут быть представлены:

– *растровыми форматами* — gif, tiff, jpg, bmp и им подобными (качество 300 dpi);

– векторными форматами — emf, wmf (графики, диаграммы).

Рисунки, выполненные в программах Corel, CAD, Word и др., переводятся в один из описанных выше форматов, предпочтительно векторный.

Графический материал следует располагать непосредственно после текста, в котором он упоминается впервые, или на следующей странице. Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте и нанесены слева направо, сверху вниз. Перед рисунком интервал 12 пт. Выравнивание по центру, ширина в одну колонку (большие рисунки располагают на ширину страницы 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** 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> РАЗВИТИЕ ЕДИНОЙ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ .....	5
<i>Маталкина Ю. А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ПОДРАБОТАННОСТИ НА МАКСИМАЛЬНЫЕ ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ .....	19

**МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

<i>Русанов И. Ф., Русанова Н. И.</i> ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОТКОСА НА СЕГРЕГАЦИЮ МАТЕРИАЛОВ ПО КРУПНОСТИ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ .....	27
<i>Тюляев Д. В., Куберский С. В., Проценко М. Ю.</i> АНАЛИЗ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЦЕННОСТИ КОНВЕРТЕРНОЙ ПЫЛИ .....	34
<i>Кухарев А. Л.</i> ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В РАСПЛАВЕ МНОГОЭЛЕКТРОДНОЙ ДУГОВОЙ ПЕЧИ ПРИ УЧЁТЕ ЭЛЕКТРОВИХРЕВЫХ ТЕЧЕНИЙ .....	40
<i>Русанов И. Ф., Куберский С. В., Лупанов Д. В.</i> ОЦЕНКА УСЛОВИЙ СПЕКАНИЯ АГЛОМЕРАТА У БОРТОВ СПЕКАТЕЛЬНЫХ ТЕЛЕЖЕК КОНВЕЙЕРНЫХ АГЛОМАШИН .....	49

**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

<i>Дрозд Г. Я.</i> ШАХТНЫЕ ВОДЫ КАК ФАКТОР РИСКА ТЕХНОГЕННОЙ КАТАСТРОФЫ ДЛЯ ДОНБАССА ..	57
<i>Мартынова В. Б., Парамонова А. В.</i> ВЛИЯНИЕ РАСХОДА МОДИФИКАТОРА НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОБЕТОНА НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДЕНИЯ .....	73

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

<i>Корнеев С. В., Доброногова В. Ю., Долгих В. П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕАЛЬНЫХ НАГРУЗОК В ШАХТНЫХ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРАХ НА ОСНОВЕ УТОЧНЁННОГО ТЯГОВОГО РАСЧЁТА .....	81
<i>Ульяницкий В. Н., Петров П. А., Ульяницкая О. В., Еронько С. П.</i> ОЦЕНКА ИЗНОСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАБОЧИХ ИНСТРУМЕНТОВ ВАЛКОВО- ТАРЕЛЬЧАТЫХ МЕЛЬНИЦ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА .....	91
<i>Сичак Ю. Н., Пипкин Ю. В.</i> ОЦЕНКА МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТАНОЧНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ С ПОЗИЦИИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ .....	100
<i>Вишневский Д. А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСЧАСТНЫХ СЛУЧАЕВ В КУЗНЕЧНО- ПРЕССОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ПО ВИДАМ ПОЛУЧЕННЫХ ТРАВМ .....	111
<i>Тумин А. Н., Ткачёв Р. Ю., Еронько С. П., Замота Т. Н.</i> СПОСОБ РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ГИДРОПРИВОДА ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНОЙ ДРОБИЛЬНО-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ .....	117
<i>Власенко Д. А., Долгих В. П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ УДАРНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ С ДРОБИМЫМ МАТЕРИАЛОМ В МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКЕ .....	124

**ЗМІСТ****НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ**

<i>Литвинський Г. Г.</i> РОЗВИТОК ЄДИНОЇ ТЕОРІЇ МІЦНОСТІ І ЗАКОНОМІРНОСТІ РУЙНУВАННЯ .....	5
<i>Маталкіна Ю. А.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТУПЕНЯ ПІДРОБКИ НА МАКСИМАЛЬНІ ОСІДАННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ .....	19

**МЕТАЛУРГІЯ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

<i>Русанов І. Ф., Русанова Н. І.</i> ВПЛИВ УМОВ ФОРМУВАННЯ УКОСУ НА СЕГРЕГАЦІЮ МАТЕРІАЛІВ ЗА КРУПНІСТЮ НА ЙОГО ПОВЕРХНІ .....	27
<i>Тюляєв Д. В., Куберський С. В., Проценко М. Ю.</i> АНАЛІЗ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ І ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ЦІННОСТІ КОНВЕРТЕРНОГО ПИЛУ .....	34
<i>Кухарев О. Л.</i> ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОПЕРЕНОСЕННЯ У РОЗПЛАВІ БАГАТОЕЛЕКТРОДНОЇ ДУГОВОЇ ПЕЧІ З УРАХУВАННЯМ ЕЛЕКТРОВИХРОВИХ ТЕЧІЙ .....	40
<i>Русанов І. Ф., Куберський С. В., Лупанов Д. В.</i> ОЦІНКА УМОВ СПІКАННЯ АГЛОМЕРАТУ БІЛЯ БОРТІВ СПІКАЛЬНИХ ВІЗКІВ КОНВЕЄРНИХ АГЛОМАШИН .....	49

**БУДІВНИЦТВО ТА АРХІТЕКТУРА**

<i>Дрозд Г. Я.</i> ШАХТНІ ВОДИ ЯК ФАКТОР РИЗИКУ ТЕХНОГЕННОЇ КАТАСТРОФИ ДЛЯ ДОНБАСУ .....	57
<i>Мартинова В. Б., Парамонова А. В.</i> ВПЛИВ ВИТРАТИ МОДИФІКАТОРА НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ГАЗОБЕТОНУ НЕАВТОКЛАВНОГО ТВЕРДІННЯ .....	73

**МАШИНОБУДУВАННЯ ТА МАШИНОЗНАВСТВО**

<i>Корнєєв С. В., Доброногова В. Ю., Долгих В. П.</i> МОДЕЛЮВАННЯ РЕАЛЬНИХ НАВАНТАЖЕНЬ В ШАХТНИХ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРАХ НА ОСНОВІ УТОЧНЕНОГО ТЯГОВОГО РОЗРАХУНКУ .....	81
<i>Ульяницький В. Н., Петров П. О., Ульяницька О. В., Єронько С. П.</i> ОЦІНКА ЗНОСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РОБОЧИХ ІНСТРУМЕНТІВ ВАЛКОВО-ТАРІЛЧАСТИХ МЛІНІВ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА .....	91
<i>Сичак Ю. М., Піпкін Ю. В.</i> ОЦІНКА МЕТОДІВ ПРОЕКТУВАННЯ ВЕРСТАТНИХ ПРИСТРОЇВ З ПОЗИЦІЇ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ .....	100
<i>Вишневський Д. О.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ НЕЩАСНИХ ВИПАДКІВ В КОВАЛЬСЬКО-ПРЕСОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ ЗА ВИДАМИ ОТРИМАНИХ ТРАВМ .....	111
<i>Тумін О. М., Ткачов Р. Ю., Єронько С. П., Замота Т. М.</i> СПОСІБ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ ОБЕРТАННЯ ГІДРОПРИВОДУ ВІДЦЕНТРОВО-УДАРНОЇ ДРОБАРНО-ЗДРІБНЮВАЛЬНОЇ МАШИНИ .....	117
<i>Власенко Д. О., Долгих В. П.</i> МОДЕЛЮВАННЯ УДАРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ З МАТЕРІАЛОМ, ЩО ПОДРІБНЮЄТЬСЯ, В МОЛОТКОВІЙ ДРОБАРЦІ .....	124

**CONTENT****GEOSCIENCES**

<i>Litvinsky G. G.</i> DEVELOPMENT OF A UNIFIED THEORY OF STRENGTH AND PATTERNS OF DESTRUCTION .....	5
<i>Matalkina Yu. A.</i> STUDY OF INFLUENCE OF THE DEGREE OF UNDERMINING ON THE MAXIMUM EARTH CRUST SUBSIDENCE .....	19

**METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES**

<i>Rusanov I. F., Rusanova N. I.</i> INFLUENCE OF SLOPE FORMATION CONDITIONS ON THE SEGREGATION OF MATERIALS BY SIZE OVER INCLINED SURFACE .....	27
<i>Tyulyaev D. V., Kuberskiy S. V., Protsenko M. Yu.</i> ANALYSIS OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES AND TECHNOLOGICAL VALUE OF CONVERTER DUST .....	34
<i>Kukharev A. L.</i> NUMERICAL STUDY OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN THE MELT IN A MULTI- ELECTRODE ARC FURNACE CONSIDERING EDDY CURRENT FLOWS .....	40
<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 .....	49

**CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE**

<i>Drozd G. Ya.</i> MINE WATER AS A RISK FACTOR OF TECHNOLOGICAL DISASTER FOR THE DONBASS ...	57
<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 .....	73

**MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE**

<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 .....	81
<i>Ulianitskiy V. N., Petrov P. A., Ulianitskaia 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 .....	91
<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 .....	100
<i>Vishnevskiy D. A.</i> INVESTIGATION THE ACCIDENTS DISTRIBUTION IN THE PRESS-FORGING PRODUCTION BY TYPES OF INJURIES .....	111
<i>Tumin A. N., PhD Tkachyov R. Yu., Eron'ko S. P., Zamota T. N.</i> METHOD OF ADJUSTING THE ROTATIONAL SPEED OF THE HYDRAULIC CENTRIFUGAL IMPACT CRUSHER .....	117
<i>Vlasenko D. A., Dolgikh V. P.</i> MODELING OF IMPACT INTERACTION BETWEEN THE OPERATING ELEMENTS AND CRUSHING MATERIAL IN HAMMER CRUSHER .....	124

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 13 (56) 2019

**Засновник:**  
**Донбаський державний технічний  
університет**

*Свідоцтво Міністерства інформації,  
друку і масових комунікацій ЛНР  
про державну реєстрацію засобу масової  
інформації МІ-СГР ПІ 000003  
від 05.02.2016*

*Наказом Міністерства освіти і науки Донецької  
Народної Республіки від 2 травня 2017 р № 464  
збірник наукових праць включений до Переліку  
рецензованих наукових видань, в яких повинні  
бути опубліковані основні наукові результати  
дисертацій на здобуття наукового ступеня  
кандидата наук, на здобуття наукового ступеня  
доктора наук, затвердженого наказом  
Міністерства освіти і науки Донецької Народної  
Республіки від 1 листопада 2016 р № 1134, згідно  
з додатком І.*

*Наказом МОН ЛНР № 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  
ДСУ ВПО ЛНР «ДонДТУ»  
(Протокол № 8 від 29.03.2019)*

*Включений до наукометричної бази даних РІНЦ*

Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.

Ум. друк. арк. 17.

Зам. № 130.

Наклад 100 пр.

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

Адреса редакції, видавця

та виготовлювача:

ДСУ ВПО ЛНР

«Донбаський державний технічний університет»  
пр. Леніна, 16, м. Алчевськ, ЛНР, 94204.

E-mail: info@dstu.education

Web-site: http://www.dstu.education

ВИДАВНИЧО-ПОЛІГРАФІЧНИЙ ЦЕНТР,  
ауд. 2113, т./факс 2-58-59

Свідоцтво про державну реєстрацію видавця,  
виготовлювача

і розповсюджувача засобу масової інформації  
МІ-СГР ВД 000055 від 05.02.2016.

**Головний редактор**

Зінченко А. М. — к.е.н., в.о. ректора

**Заступник головного редактора**

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.

Дрозд Г. Я. — д.т.н., проф.

Шолух М. В. — д. арх., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомська С. А. — секретар редакційної  
колегії.

Для наукових співробітників, аспірантів,  
студентів вищих навчальних закладів

**Мова видання:**

російська, українська та англійська

Комп'ютерна верстка і коректура

Ісмаїлова Л. М.

© ДСУ ВПО ЛНР «ДонДТУ», 2019

© Чернишова Н. В., художнє  
оформлення обкладинки, 2019

Distribution and replication is forbidden without official allowance of DonSTU

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

**Collection of scientific papers  
of Donbass State Technical  
University**

**Collection**

Issue 13 (56) 2019

**Establisher: Donbass  
State Technical  
University**

*Certificate of Ministry of Information,  
Press and Mass Communication of LPR  
for mass media registration  
MI-SGR PI 000003  
dated 05.02.2016*

*By order of the Department of Education and Science  
of Donetsk People Republic of 2 May 2017 № 464 the  
Collection of scientific papers  
is being offered in the list of peer-reviewed scientific  
editions with required publications  
of the main scientific PhD and Doctor's thesis results,  
approved by an order of the Department of Education  
and Science of Donetsk People Republic of 1  
November 2016 № 1134,  
according to annex 1.*

*By order of the Department of Education and Science  
of the Lugansk People Republic No. 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 Republic  
of 15 May 2018 № 477-OD.*

*Recommended by academic council of DonSTU  
(Record № 8 dated 29.03.2019)*

*Added to scientometrical data base of RSCI*

Format 60×84%.  
Conventional printed sheet 17.  
Order № 130.

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 Engineering,  
acting rector

**Deputy chief editor**

Kuberskyi S. V. — PhD in Engineering, prof.

**Editorial board:**

Litvinskyi G. G. — Doctor of tech. sc., prof.

Finkelstein Z. L. — Doctor of tech. sc., prof.

Korneiev S. V. — Doctor of tech. sc., prof.

Leonov A. A. — PhD in Engineering

Kharlamov Yu. A. — Doctor of tech. sc., prof.

Uliianitskyi V. N. — PhD in Engineering, prof.

Zelinskyi A. N. — PhD in Engineering, prof.

Dolzhikov V. V. — PhD in Engineering

Denisschenko P. N. — PhD in Engineering

Drozd G. Ya. — Doctor of tech. sc., prof.

Sholukh N. V. — Doctor of arch., prof.

Bondarchuk V. V. — PhD in Engineering

Psjuk V. V. — PhD in Engineering

Skomskaia S. A. — Secretary to the editorial board.

For research scientists, PhD seekers, students of  
higher educational institutions.

**Issue language:**

Russian, Ukrainian, English

**Computer layout and proofreading**

*Ismailova L. M.*

© SEIHPE «DonSTU», 2019

© Chernyshova N.V., graphic, 2019