

ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Выпуск 7 (50) 2017



СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**Сборник
научных трудов
Донбасского государственного технического
университета**

Сборник
Выходит 1–4 раза в год
Основан в июне 1999 г.
Выпуск 7 (50) 2017

**Збірник наукових праць
Донбаського державного технічного університету**

Збірник
Виходить 1–4 рази на рік
Заснований у червні 1999 р.
Випуск 7 (50) 2017

Collection of Scientific Papers of DonSTU

Collection
Publishing 1–4 times a year
Founded in June 1999
Issue 7 (50) 2017

Алчевск
2017

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 7 (50) 2017

**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 ученой
степени кандидата наук, на соискание ученой
степени доктора наук, утвержденный приказом
Министерства образования и науки Донецкой
Народной Республики от 1 ноября 2016 г.
№ 1134, согласно приложению 1*

*Рекомендовано Ученым советом
ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ»
(Протокол № 2 от 27.10.2017)*

Включен в наукометрическую базу данных РИНЦ

Формат 60×84¹/₈.

Усл. печат. л. 11

Заказ № 252

Тираж 100 экз.

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

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

E-mail: info@dstu.education

Web-site: <http://www.dstu.education>

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

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя

и распространителя средства массовой
информации

МИ-СГР ИД 000055 от 05.02.2016.

Главный редактор

Зинченко А. М. — к.э.н., и.о. ректора

Заместитель главного редактора

Новохатский А. М. — д.т.н., проф.

Редакционная коллегия:

Литвинский Г. Г. — д.т.н., проф.

Финкельштейн З. Л. — д.т.н., проф.

Корнеев С. В. — д.т.н., проф.

Леонов А. А. — к.т.н., доц.

Харламов Ю. А. — д.т.н., проф.

Ульяницкий В. Н. — к.т.н., проф.

Зелинский А. Н. — к.т.н., проф.

Куберский С. В. — к.т.н., проф.

Денищенко П. Н. — к.т.н., доц.

Дрозд Г. Я. — д.т.н., проф.

Шолух Н. В. — д. арх., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомская С. А. — секретарь редакционной
коллегии.

Для научных сотрудников, аспирантов,
студентов высших учебных заведений.

Язык издания:

русский, украинский и английский

Исмаилова Л. М. — корректор

© ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017

© Чернышова Н. В.,
художественное оформление
обложки, 2017

*Посвящается
60-летию
Донбасского государственного
технического университета*

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ

GEOSCIENCES

УДК 622.001.5:001.8

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

АНТАГОНИЗМ И БОРЬБА НАУЧНЫХ ДОКТРИН В ГОРНОМ ДЕЛЕ

Дан анализ причин отставания и прогноз перспективных направлений развития горной техники и технологии. Противопоставлены две антагонистические научные доктрины развития техники — экстенсивная (консервативная) и интенсивная (прогрессивная). Показаны основные технические реликты горной промышленности как результат инерции вектора мышления. Приведены примеры реализации новой научной доктрины при разработке концепции шахты нового типа: фронтальный проходческий комбайн, агрегат фронтальной шнековой выемки, гидродомкратный бесканатный подъем и беструбный водоотлив, новые схемы газообмена, вентиляции и отработки пластов. Показаны преимущества предложенных технических решений.

Ключевые слова: горная техника и технология, технические противоречия, научная доктрина, реликты горной техники, новые образцы горной техники, проходческий комбайн, агрегат для выемки угля, гидродомкратный подъем и водоотлив.

1 Введение

Анализ состояния и особенностей исторического развития горной промышленности показал, что на начальных этапах своего становления она, как база первой промышленной революции в конце 18-начале 19 вв., являлась передовым форпостом науки и техники. Именно тогда в горном деле впервые начали применяться различные механизмы, взрывные и механизированные методы разрушения пород, погрузные и транспортные машины, электрические двигатели, способы и средства предотвращения аварий и катастроф и др.

За весь период развития угольная промышленность в соответствии с поступательным изменением технологических укладов прошла несколько этапов развития: ручной технологии с применением простейших инструментов и приспособлений (начальный вплоть до XX века), механизированного разрушения угля врубовыми машинами (1920–1940), использования выемочных комбайнов (1940–1960) и стругов (1950–2000). В 1960–1970-х гг. была поставлена задача полной механизации подземных работ и появились первые попытки разработать безлюдную технологию добычи угля. Наконец, XXI век на первый план выдвинул проблему создания автома-

тизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) в горной промышленности.

Однако к настоящему времени темпы научно-технического развития промышленности существенно замедлились, основные идеи и направления, побуждающие развитие горной техники и технологии, почти исчерпались и к настоящему времени в горной промышленности появились явные признаки стагнации. Ученые многих стран анализировали состояние горной промышленности с разных точек зрения и предлагали свои прогнозы ее будущего развития [1–5 и др.]. Однако большинство таких исследований посвящалось обсуждению, главным образом, организационных и экономических проблем. В них мало внимания уделялось ретроспективному анализу состояния и разработке конкретных предложений по изменению технической базы горной промышленности — ее технологиям и оборудованию. Сейчас, когда наступил период смены технологических укладов мировой экономики, возникла настоятельная потребность в качественном («скачком») изменении принципов реализации способов и средств технического воплощения горных производственных процессов.

Целью исследований является анализ причин и прогноз перспективных направлений развития горной техники и технологии в условиях перехода мировой экономики к новому (шестому) технологическому укладу. Для этого следует выявить возникшие ранее и существующие ныне технические противоречия, вызывающие стагнацию развития горной промышленности, четко определить присущие горной технике и технологии устаревшие (реликтовые) решения и разработать пути их преодоления на новой концептуальной основе.

2 Проблемы и технические противоречия горной промышленности

Рассматривая техническую сторону проблемы и основываясь на накопленном историческом опыте по разработке и совершенствованию горных машин и технологических процессов, мы выделяем присущие им следующие основные группы недостатков:

- горное производство нарушает экологию окружающей среды, загрязняет ее выбросами метана и рудничных газов, отвалами породы и отходов, шахтными водами, существенно ухудшает ландшафт, водный баланс территории и окружающую атмосферу;

- недопустимо высокий уровень опасности и аварийности работ из-за низкой эффективности вентиляции, нарушений теплового и пылегазового режима, внезапных обрушений пород и разрушения крепи, пожаров, взрывов газа и пыли, затопления и пр.;

- горные стационарные машины и комплексы (подъем, вентиляция, водоотлив) имеют обширную номенклатуру и чрезмерное разнообразие, сложную конструкцию, неоправданно энергоемки, имеют большие габариты и массу и низкую надежность работы, плохо соответствуют принципам автоматизации, мехатроники, не обеспечивают безлюдных технологий и поточности организации работ;

- горные самоходные машины и комплексы (комбайны, струги, механизированные крепи, забойные конвейеры и др.) не отвечают принципам унификации, модульности, фронтального воздействия на забой, поточности организации работ, автоматизации управления, излишне специфичны и непригодны для тонких пластов угля;

- технологические схемы вскрытия, порядка подготовки и системы разработки месторождений полезных ископаемых многообразны и сложны, узкофункциональны и специфичны, плохо адаптируемы к изменению горно-геологических условий, требуют излишнего разнообразия горных машин и механизмов, мало экологичны и недостаточно безопасны, предусматривают большую долю ручного труда;

- горнорабочие оказываются в крайне вредных для здоровья условиях (перепады температур, пыль, шум, вибрация, плохая освещенность, загрязненность воздуха и воды), трудовые операции относятся к высокой категории тяжести, выполняются в вынужденном положении тела (часто лежа и ползком), в навязанном техникой темпе;

- удельные технико-экономические показатели шахт неудовлетворительны: неконкурентно высокие стоимость 1 т угля или руды, трудо-, энерго-, фондо- и капиталоемкость, амортизационные отчисления и потери полезного ископаемого, низкая производительность труда и надежность работы.

Преодоление главных технических противоречий в горной промышленности лежит на пути формулирования, осознания и в конечном счете отказа от устоявшегося вектора инерции мышления, присущего существующей ныне старой доктрине консервативного развития горной технологии. И время для такого пересмотра доктрин уже наступило.

3 Антагонистическое противостояние и борьба научных доктрин

Обобщая особенности накопленных технических противоречий, сформулируем существенные негативные атрибуты ста-

рой научной доктрины, которая до сих пор неявно, но неотвратно сдерживает скорость и эффективность процессов развития горной промышленности. Условно назовем ее консервативной доктриной.

Старая доктрина «консервативного» развития горной технологии использует:

- вектор инерции мышления, побуждающий некритично воспроизводить устаревшие и привычные идеи и принципы ведения горных работ и создания горных машин, используя по умолчанию реликты техники и технологий;

- концепцию экстенсивных изменений при разработке, проектировании и изготовлении конструктивных элементов техники и технологии, основанную на стремлении увеличить экстенсивные параметры проектных решений: мощности, массы, размеров, скорости, энерговооруженности и т. д.;

- поэтапные усовершенствования традиционных технических решений, направленных на устранение «узких мест» по мере их возникновения, зачастую без должного согласования, а иногда и в прямом противоречии с соседними, явно или латентно сопряженными участками производства.

Инерция мышления при решении технических задач до сих пор доминирует в среде производителей, проектировщиков и ученых, что способствует консервации реликтов технических решений, лавинообразному накоплению технических противоречий, делая их непреодолимыми и тупиковыми.

На смену старой, консервативной приходит путем антагонистического отрицания новая, прогрессивная доктрина развития горной техники и технологии. Исходя из истории становления и анализа состояния горной промышленности, как альтернативу существующей старой, консервативной доктрине мы предлагаем новую научную доктрину которую назовем прогрессивной, в виде иной методологии решения технических проблем и задач:

- выявление, осознание и преодоление на качественно новом уровне накопленных технических противоречий;

- отказ от существующих реликтов технических решений, преодоление «вектора инерции» мышления, кардинальное изменение сложившихся общепринятых подходов и представлений на основе новых воззрений и методов;

- использование концепции интенсивного развития горной техники и технологии с принципиальным изменением сути технологии и конструктивных принципов техники;

- последовательный переход к наиболее полному использованию автоматизации и мехатроники;

- обеспечение безопасных, поточных, безлюдных и экологически чистых горных технологий.

В настоящее время идет острая борьба этих альтернативных антагонистических научных доктрин, от исхода которой зависит будущее развитие горной промышленности в средней и, особенно, долгосрочной перспективе.

История и законы развития технических систем показывают, что попытки преодолеть технические противоречия на основе традиционных «консервативных» подходов не могут быть успешными и, как правило, обречены на неудачу. Необходимо «гибкое», нестандартное мышление как залог успеха в условиях быстро меняющейся межотраслевой конъюнктуры, поскольку горные наука, техника и промышленность, как никогда раньше, нуждаются в новых базовых подходах.

В настоящее время, когда происходит смена технологических укладов и обостряются проблемы мировой экономики, такая смена научных доктрин сможет обеспечить требуемый современный уровень развития горной промышленности.

4 Научная концепция «Шахта XXI века»

В приложении альтернативных научных доктрин к горной промышленности надо рассмотреть существующий уровень горной техники и технологии, выявить присутствующие им технические противоречия и неявно бытующие технические реликты и «векторы инерции мышления» (табл.1).

Технико-экономический анализ и прогнозные оценки тенденций развития горной техники и технологии позволили определить реликты горной промышленности, которые стали тормозом для ее

дальнейшего развития и от которых можно (и надо) возможно быстрее отказаться:

- *резцы* — в рабочих органах проходческих и выемочных комбайнов;
- *редукторы и валы* — в стационарных и самоходных конструкциях горных машин;
- *рельсы и гусеницы* — в подземном транспорте;
- *трубы, насосы и вентиляторы* — при рудничном водоотливе и вентиляции;
- *канаты и копры* — в шахтном подъеме;
- *силовые кабели* и провода управления и связи — в подземном энергоснабжении;

Таблица 1

Антагонизм доктрин развития науки и техники

<i>Консервативная (старая) доктрина</i>	<i>Прогрессивная (новая) доктрина</i>
Стабилизация достигнутых параметров на известных принципах и моделях, линейные прогноз и экстраполяция тенденций развития, статические подходы, инвестиции в копирование и воспроизведение привычных решений и проектов.	Качественное изменение достигнутых параметров, новые идеи и концепции, учет нелинейности, динамичности при прогнозе и планировании фазовых качественных переходов, инвестиции в инновации на всех этапах производственного цикла.
Рассмотрение частных задач, поэтапные усовершенствования традиционных технических решений, практика устранения «узких мест» на базе прошлого опыта, использование местных экстремумов оптимизации параметров.	Системный подход к решению проблем, кардинальная ревизия общепринятых подходов и воззрений, преодоление «вектора инерции» мышления, поиск и развитие новаторских идей и решений, использование «опережающего» мышления и глобальных экстремумов оптимизации.
Концепция экстенсивного развития технологии и техники: увеличение мощности, массы, размеров, скорости, энерговооруженности, инвестиции в ремонты, реконструкцию.	Концепция интенсивного развития базовых параметров техники и технологии, кардинальное изменение сути технологии и конструктивных принципов техники, инвестиции в патенты и ноу-хау.
Лавинообразное накопление технических противоречий в технологии, технике и экономике в целом, снижение эффективности функционирования существующего экономического уклада, кризисы и потрясения.	Осознание и преодоление на качественно новом уровне технических противоречий, создание новых научных направлений, активные многопараметрические оптимизация и адаптация, опережающие управление состоянием и развитием технологии, техники.

– *промышленные потери* в целиках — при горных работах;

– *обрушение и забойные крепи* — при управлении кровлей в очистном забое;

– *отвалы породы и отстойники* — на поверхности шахт и рудников;

– *широкая номенклатура забойного и стационарного оборудования*: подъемные машины, скипы, клетки, опрокиды, оборудование водоотлива, компрессоры, вентиляторы главного и местного проветривания, лебедки, комбайны избирательного и роторного действия, буровзрывные работы при проходке выработок, погрузочные машины, электровозы, рамные крепи и др.;

– *поверхностный комплекс* с горнотехническими зданиями и сооружениями: АБК, котельная, компрессорная, здания подъемных машин, бункера, эстакады, галереи, силовая подстанция электроснабжения, железнодорожный узел, и др.

Перечисленные «реликтовые» технические решения следует заменить новыми с существенно (в разы) более высокими показателями. Так, отказ от резцов в исполнительных органах комбайнов и замена их новыми конструкциями шарошек для разрушения пород напорным сколом позволяет снизить расход энергии в 1,5–2 раза, повысить стойкость и наработку на отказ инструмента в десятки раз. Отказ от редукторов и замена их гибридными трансмиссиями с силовым объемным гидроприводом в стационарных и самоходных горных машинах может повысить их эффективность в 7–10 раз.

На основе анализа основных показателей новой научной доктрины и отказа от старого мышления нами предложена новая научная концепция «Шахта XXI века». Для нее характерны принципиальные отличия, связанные с применением поточных проходческой и выемочной технологий. В угольной промышленности обеспечивается интенсивная разработка высокогазоносных, в том числе и тонких, угольных пластов на больших глубинах в инертной газовой среде на основе предло-

женных новых автоматизированных комплексов горных машин и стационарного оборудования.

В качестве примеров мы приведем краткие описания особенностей конструкции и технико-экономические показатели разработанной в ДонГТУ новой горной техники и технологии, отвечающей современным требованиям прогрессивной научной доктрины.

5 Фронтальный проходческий комбайн КПФ «MIR»

К одному из базовых видов горной техники следует отнести проходческие комбайны [6 и др.]. Их широкое применение в XX веке было достигнуто путем решения нетривиальных технических проблем, что обеспечило быстрый рост технико-экономических показателей проходки.

Тем не менее это сопровождалось возникновением и закреплением существенных недостатков, присущих конструкциям проходческих комбайнов. Их экстенсивное развитие привело к созданию разнообразных модификаций и типов (отсутствие унификации), частым отказам в меняющихся горно-геологических условиях (низкая адаптация), чрезмерным затратам времени и средств на монтаж-демонтаж, длительным подготовительно-заключительным операциям, низким коэффициентам готовности (0,5...0,7) и использования во времени (0,2...0,4). Устарел режущий инструмент — резцы, которые стали одним из главных тормозов развития комбайнов и ограничили их применение в крепких породах.

Основным техническим противоречием в комбайнах стало несоответствие функций исполнительного (снабжённого резцами) и напорного (в виде гусениц) органов требованиям скоростного проведения наклонных и криволинейных выработок [6]. Существующие комбайны сложно автоматизировать, они пригодны лишь для слабых пород ($f < 5 \dots 7$) в основном лишь в горизонтальных прямолинейных выработ-

ках. Комбайны обеспечивают скорость проходки не более 200...300 м/мес., в забое создаются высокая запылённость, шум, вибрации, многократно превышающие предельно допустимые нормы.

На основе анализа работы и преодоления присущих комбайнам технических противоречий нами был разработан проходче-

ский фронтальный комбайн КПФ «MIR» (рис. 1) с принципиально новой конструктивной компоновкой для поточной автоматизированной технологии проходки горизонтальных и наклонных ($\pm 30^\circ$) выработок по породам любой прочности (до $f = 20$ и более) со скоростью 50–100 м/сут (1500...2000 м/мес.).

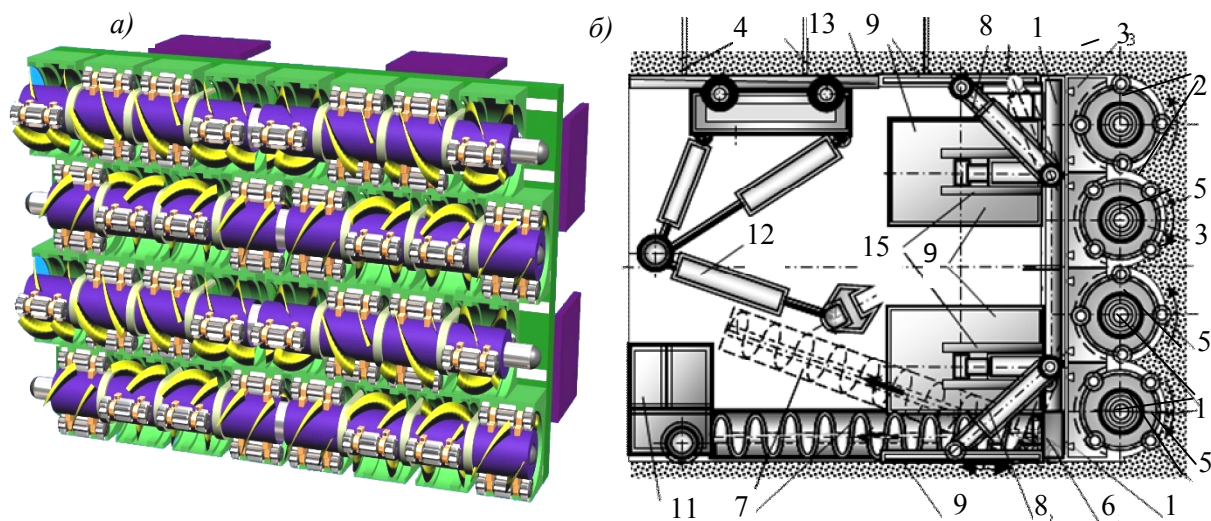


Рисунок 1 Общий вид (а) и конструктивная схема (б) фронтального проходческого комбайна КПФ «MIR»

Основными конструктивными элементами комбайна являются (рис. 1 а): 1 — несущая диафрагма; 2 — шнеки-барабаны, на которых установлены шарошки 3. Шнеки вращают высокомоментные объёмные гидромоторы 5, работающие по схеме статор-колесо от насосной станции 11. Шлам из забоя удаляется шнековым транспортером 7.

Двигатель комбайна выполнен распорношагающего типа из гидроцилиндров 8 и опорных плит 9, 15. Выработка крепится анкерами 4 с помощью манипулятора 13 на монорельсе 14. Комбайн работает в автоматическом режиме под управлением ЭВМ.

Достоинствами комбайна КПФ «MIR» являются: *безопасность* и комфортность труда (исключены пыль, вибрация, температура), *поточная* непрерывная технология, полная под управлением ЭВМ автоматизация работы с использованием прин-

ципов мехатроники; *универсальность* применения по крепости пород и типу выработок, простота и дешевизна конструкции; разрушение прочных пород *шарошками* за счет высоких (до 4...5 Мн) напорных усилий на забой, отсутствие дорогих и громоздких редукторов и валов; точность выдерживания контура и заданной трассы выработки в пределах ± 20 мм, большая маневренность (радиус поворота до 10 м); высокая скорость проходки (50–100 м/сут), рост производительности труда в 7–12 раз; снижение стоимости проходки в 3–4 раза, период окупаемости менее 4–6 мес.

Комбайн КПФ «MIR» универсален по применению и может составить серьезную конкуренцию на международном рынке горного оборудования комбайнам зарубежных фирм, ежегодная потребность только в странах СНГ составляет 500–700 шт. в год.

6 Техника безлюдной добычи угля — агрегат АФШВ

Главную роль при добыче угля на современных шахтах выполняют [6] выемочные комбайны и струги, работающие в очистном забое под защитой мощных механизированных крепей. В качестве режущего инструмента повсеместно используют резцы различных типов. Недостатки существующей выемочной техники во многом такие же, как и у проходческих комбайнов: резцы, невозможность автоматизации, цикличность работы, обязательное присутствие людей в забое, сложность и дороговизна конструкции, малая надежность и пр.

Для решения проблемы безлюдной добычи угля с помощью поточной технологии выемки мы разработали агрегат фронтальной шнековой выемки АФШВ (рис. 2). Он имеет выемочно-доставочный рабочий орган, выполненный из шнековых секций, на которых установлены шарошки. На шнеках закреплено щитовое ограждение. Оно устраняет потери угля и возможное его разубоживание породой.

Напорные катки за счет своего вращения, упираясь в подошву и кровлю пласта, создают напор на угольный забой и перемещают агрегат по мере выемки угля. Шарошки на шнеках производят эффективное фронтальное разрушение раздавленной горным давлением краевой зоны угля в пласте, одновременно снижая сопротивление вращению шнеков (эффект подшипника качения) между кровлей и почвой пласта.

Скорость фронтального перемещения агрегата составляет около 0,05...2 мм/с в зависимости от крепости и мощности пласта угля. Благодаря компактности и высокой скорости подвигания агрегата в лаве (до 50...100 м/сут), кровля над выработанным пространством переходит в режим плавного опускания, поэтому необходимость крепления призабойного пространства отпадает. Поскольку осуществляется безлюдная выемка и горнорабочих в лаве нет, в проветривании лавы нет необходимости.

К достоинствам агрегата АФШВ следует отнести: безлюдную добычу, поточность и непрерывность технологии работ, их полную автоматизацию; высокую производительность — 150–250 т/час угля из лавы длиной 100 м (до 5...7 кт угля в сутки); исключение концевых и вспомогательных операций в лаве; непрерывную работу в нейтральной газовой среде без проветривания при 100 % концентрации метана, что снимает «газовый барьер» и исключает опасность взрыва угольной пыли и газа; простоту и низкую цену агрегата; возможность извлекать тонкие и сверхтонкие пласты угля мощностью от 0,4 м с углами падения от 0 до 40–50 градусов; малый срок окупаемости (до 1 мес.).

7 Гидродомкратный подъем и водоотлив ГДПВ

Существующие технические решения стационарных горных машин [7] — шахтного канатного подъема и трубного водоотлива — также накопили в себе ряд нерешенных технических противоречий, что делает невозможным их использование на больших глубинах. Так, уже на достигнутых к настоящему времени глубинах разработки (1500 м и более) начинает исчерпываться так называемая прочная длина канатов L_0 , при которой канат разрывается под собственным весом.

Современный шахтный подъем обладает принципиальными недостатками, которые затрудняют или полностью исключают возможность его использования для горных предприятий будущего:

- неприемлемость использования канатного подъема для больших глубин разработки; низкая его производительность, которая к тому же пропорционально уменьшается с глубиной, возрастающая опасность обрыва каната;

- высокие удельные затраты энергии на единицу поднимаемого груза, превышающие теоретически необходимые в 2,2–2,4 раза, т. е. КПД. менее 0,4...0,5;

– циклический режим работы, сложность автоматизации, динамические нагрузки на несущие элементы конструкций и ответственные детали оборудования;

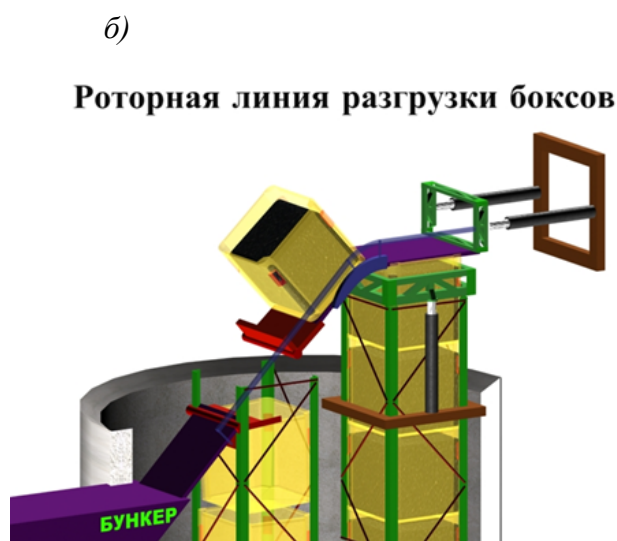
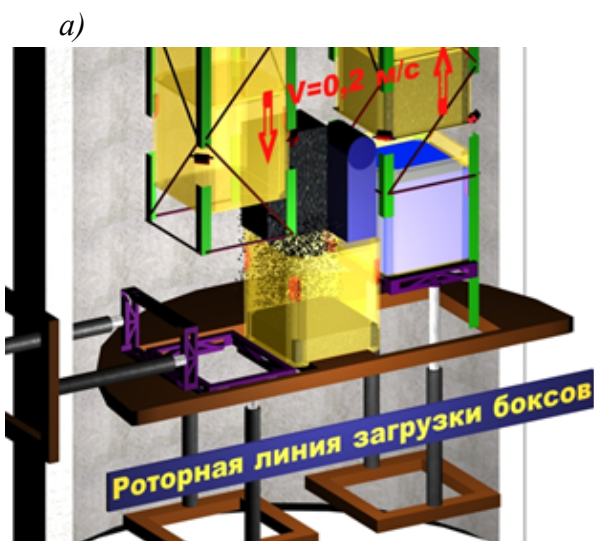
– большие диаметры стволов, стоимость оборудования, масса и сложность конструктивного исполнения, трудоемкие и длительные строительные-монтажные работы;

– громоздкость и сложность горнотехнических зданий и сооружений для подъема на поверхности, большой объем и высокая стоимость горных выработок и подземных коммуникаций.

Очевидно, чтобы устранить присущие канатному подъему недостатки, решение

следует искать на пути отказа от главного элемента вектора инерции конструирования шахтного подъема, которая до сих пор считалась незыблемой, — каната [7].

В ДонГТУ выполнен анализ наиболее перспективных направлений развития шахтного подъема, на основании чего разработано альтернативное и, на первый взгляд, неочевидное конструкторское решение — гидродомкратный подъем (ГДП). Он включает в себя (рис. 3) подъемные сосуда (боксы) емкостью около 1 м^3 , установленные друг на друга в виде колонн, скользящих в стволе по проводникам.



а) в стволе при загрузке боксов рудой или водой и б) на поверхности при их разгрузке в бункер

Рисунок 3 Гидродомкратный подъем и водоотлив ГДПВ: концевые роторные линии

Движителем колонн боксов являются гидроцилиндры, установленные попарно антисимметрично на опорных станциях, размещенных в стволе через каждые 120...250 м. Параллельно с подъемом грузовой колонны боксов со скоростью 0,2...0,3 м/с в стволе опускается такая же колонна пустых боксов.

Гидроцилиндры работают под управлением ЭВМ непрерывно в автоматическом режиме и подключены через напорную и

сливную гидромагистраль к стационарной насосной станции на поверхности.

На горизонте загрузки (площадью около 3 м^2) в стволе боксы заполняются из бункера рудой или водой из аккумулирующей емкости и поднимаются гидроцилиндрами в виде грузовой колонны на поверхность, где работает компактная (площадью 3 м^2) автоматическая роторная линия разгрузки боксов.

Производительность ГДПВ в одном стволе превышает 20 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$ и не зави-

матизации, требует ручного труда, потерь времени и поэтому неприемлемо.

Эту проблему решает применение автономных энергосистем из свободнопоршневых метанодизелей, работающих на газе метане (для угольных шахт) при создании в горных выработках нейтральной газовой среды (100 % CH_4) или на дизельном топливе при отсутствии газа (рудники).

Отметим, что метан обладает рядом ценных свойств: теряет способность гореть и взрываться (полностью безопасен) при концентрации уже более 16–17 % и имеет высокую теплотворную способность, равную 36 МДж/кг (20 МДж/м³), что превышает энергию антрацита примерно в два раза. Предварительные подсчеты показывают, что при одновременной работе всех подземных потребителей энергии в новой шахте (общей мощностью около 2 МВт) потребуется 300...360 м³/с метана из шахтной атмосферы. При суточной добыче угля 4...6 кт/сут достаточно, чтобы его метанообильность была более 0,9...1,2 м³/т. Этому условию удовлетворяет большинство угольных пластов газовых шахт, а у некоторых выход метана достигает до 10...15 м³/т и даже более. Излишки метана концентрацией 100 % отводят на поверхность для промышленной или бытовой утилизации.

Предлагаемый вариант подземного энергоснабжения является наиболее безопасным, технически эффективным, экономически выгодным и экологически чистым. Он дает значительные экономические выгоды и позволяет исключить многие сложные, небезопасные и дорогостоящие процессы, присущие использованию электроэнергии в шахте.

В шахте XXI века по-новому решаются вопросы управления кровлей в лаве (плавное опускание), крепления, поддержания и охраны подготовительных горных выработок, транспорта угля, материалов, оборудования и людей, существенно изменятся процессы, присущие подземной газо- и гидродинамике.

Поскольку забои очистных и подготовительных выработок перемещаются с высокой, ранее недостижимой скоростью до 100 м/сут, проявления горного давления будут менее интенсивными, изменяющимися в благоприятную сторону условия отработки пластов. Так, в лаве на тонких пластах управление кровлей кардинально упрощается, поскольку полное обрушение сменится плавным опусканием кровли. Это, в свою очередь, вызывает существенное увеличение концентрации напряжений в угле перед забоем лавы, что способствует более интенсивному раздавливанию краевой части пласта и существенно облегчает выемку угля фронтальными шнековыми агрегатами АФШВ.

После последовательной полной отработки сверху вниз всех пластов угля на шахтном поле (2х4 км) до предельной глубины (2...3 км) стволы шахты XXI века остаются работать в автоматическом режиме по подъему воды и дренированию метана по трубам в стволе из всего подработанного массива. Тем самым возникает искусственный локальный цикл кругооборота воды «массив-поверхность», превращаясь в постоянный источник орошения сельхозугодий и дешевой энергии из выходящего метана.

Таким образом создают новую инфраструктуру вокруг шахт-участков в виде горно-аграрных региональных анклавов, где используют метан и откачиваемую воду для капельного полива сельхозугодий и получают экологически чистую сельхозпродукцию, что облагораживает и сохраняет окружающую природную среду.

Выводы

В рамках новой научной доктрины мы предлагаем перейти к энергетически самодостаточному и экологически «чистому» горному предприятию.

Пилотные проекты нового горного оборудования и технологии угледобычи в виде научной доктрины «Шахта XXI века» дают следующие прогнозные параметры (табл. 2). Сравнивая технико-экономические

показатели современной угледобывающей шахты с показателями предлагаемой шахты XXI века, можно видеть их качественное отличие, в результате чего достигается сни-

жение себестоимости добычи угля в 8–10 раз, что окажет синергический эффект на всю экономику страны.

Таблица 2

Технико-экономические показатели шахты XXI века

Показатели технического уровня шахты	Шахта	
	XX века	XXI века
Суточная мощность шахты, кт*)	1–3	5–10
Срок строительства шахты, мес.	48–70	12–16
Нагрузка на очистной забой, кт/сут	0,5–1	5–7
Удельная длина горных выработок, м/кт добычи	12–15	5–8
Производительность труда, т/чел-см	1–3	100–200
Всего персонала в смену, чел/см	300–400	15–20
Проветривание шахты	общее	нет
Срок службы горизонта шахты, лет	30–50	8–12
Себестоимость угля, \$/т	60–80	7–10
Скорость очистного забоя, м/сут	2–4	50–70
Срок окупаемости оборудования, лет	3–5	0,5–1,0

Реализация новых перспективных научных направлений, объединенных в единую технологическую горнопромышленную систему, позволит отечественной горной промышленности и машиностроению выйти на достойное место в мировой системе

разделения труда и конкуренции, решить проблему обеспечения народного хозяйства страны энергией и сырьем, заметно повысить социально-экономический уровень жизни народа.

Библиографический список

1. John Deutch. *The Future of Coal*. <http://breakingenergy.com/2013/12/04/>
2. Garry G. Litvinsky. *Problem eksploatacji cienkich pokladow w ukraińskich kopalniach węgla kamiennego Zagłębia Donieckiego. Proc. of the School of Undergr. Mining 2002 // Intern. Mining Forum. Polish Acad. of Science. — Krakow : Nauka-Technica, 2002. — 343–363 pp.*
3. Плаиткина, Л. С. Анализ состояния и прогноз развития угольной промышленности России до 2035 г. [Текст] / Л. С. Плаиткина // Горный журнал. — 2015. — № 7. — С. 11–14.
4. Пучков, Л. А. Подземная разработка месторождений полезных ископаемых [Текст] / Л. А. Пучков, Ю. А. Жежелевский. — М. : Горная книга, 2015. — 624 с.
5. Шматко, С. И. О мерах по комплексному развитию угольной отрасли России [Текст] / С. И. Шматко. — Уголь № 1. — С. 4–10.
6. Горбатов, П. А. Горные машины для подземной добычи угля [Текст] / П. А. Горбатов, Г. В. Петрушкин. — Донецк : ДонНТУ, 2006. — 669 с.

7. Бежок, В. Р. Шахтный подъем [Текст] / В. Р. Бежок, В. И. Дворников, И. Г. Манец, В. А. Пристром. — Донецк : Юго-Восток Ltd, 2007. — 623 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 Мележником А. И.

Статья поступила в редакцию 17.10.17.

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

АНТАГОНІЗМ І БОРОТЬБА НАУКОВИХ ДОКТРИН В ГІРНИЦТВІ

Надано аналіз причин відставання і прогноз перспективних напрямків розвитку гірничої техніки і технології. Протиставлено дві антагоністичні наукові доктрини розвитку техніки - екстенсивну (консервативну) та інтенсивну (прогресивну). Показано основні технічні релікти гірничої промисловості як результат інерції вектора мислення. Наведено приклади реалізації нової наукової доктрини при розробці концепції шахти нового типу: фронтальний прохідницький комбайн, агрегат фронтальної шнекової виїмки, гідродомкратний бесканатний підйом і беструбний водовідлив, нові схеми газообміну, вентиляції та відпрацювання пластів. Показано переваги запропонованих технічних рішень.

Ключові слова: гірничі техніки та технології, технічні протиріччя, наукова доктрина, релікти техніки, нові зразки гірничої техніки, прохідницький комбайн, агрегат для виїмки вугілля, гідродомкратний підйом і водовідлив.

Prof. Litvinskiy G. G. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

ANTAGONISM AND THE CONFLICT OF SCIENTIFIC DOCTRINES IN MINING ENGINEERING

The status and historical development of the mining industry are examined. The analysis is given for reasons of weakness and prognosis of perspective development of mining industry and technology. Two scientific doctrines are opposed to each other i.e. extensive (conservative) and intense (progressive) for technology development. The main technical relics of the mining industry are revealed as a result of thinking vector inertia. The examples of application of the new scientific doctrine in developing the new mine idea are given: the frontal roadheader, the frontal screw aggregate for extracting coal, the hydrojack ropeless hoist and the pipeless drainage, new schemes of gas exchange, ventilation and coal extraction. The advantages of the new technical solutions are showed.

Key words: mining engineering and technology, technical contradictions, scientific doctrine, relics of mining equipment, new models of mining equipment, tunneling machine, machine for coal mining, the hydrojack hoist and drainage.

УДК 622.831: 622.28

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

СТАТИКА РАЗРУШЕНИЯ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД ВОКРУГ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

В настоящее время определение деформаций и смещений пород в горную выработку основано на эмпирических формулах и выполняется с недостаточной точностью. Цель исследований – разработка теоретических моделей проявлений горного давления (ПГД) для определения его параметров при образовании вокруг выработки зоны запредельных деформаций (ЗЗД). Исследования показали, что дилатансионная компонента деформации является главной и зависит от степени потери породой своей прочности и сплошности внутри ЗЗД. Полученные аналитические зависимости позволяют прогнозировать ПГД в статике (без учета времени), в том числе и в условиях больших смещений породного контура (геометрической нелинейности).

Ключевые слова: горное давление, выработка, запредельное поведение пород, статика деформаций, зона запредельных деформаций, разупрочнение пород, дилатансия, прогноз смещений, погрешности прогноза, закономерности деформаций.

1 Актуальность и задачи исследований

Существующая нормативная документация по прогнозу проявлений горного давления (ПГД) в капитальных и подготовительных горных выработках устарела и во многом основывается на эмпирических и отсталых представлениях о процессах деформирования и разрушения пород. Это объясняется недостаточным уровнем развития и использования теоретических моделей горной геомеханики, когда в расчетах ПГД использовались примитивные эмпирические подходы, которые без должных проверок и обоснований распространялись на все горно-геологические условия [1–3 и др.]. Проблема прогноза ПГД в подготовительных выработках еще более усложняется в условиях больших смещений пород, сравнимых по своей величине с размерами выработки (рис. 1).

Целью данной работы являлась разработка научных основ статистики деформирования и разрушения горных пород вокруг подготовительных выработок для повышения надежности их проектирования, сооружения и эксплуатации.

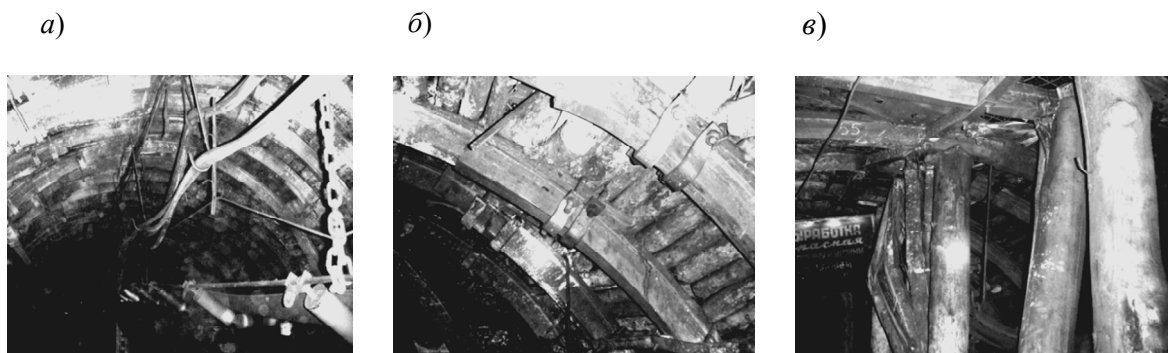
Идея работы состоит в использовании при рассмотрении ПГД так называемого «порождающего решения» [4], которое

дополняется зависимостями деформаций и смещений пород от их напряженно-деформированного состояния (НДС). При этом возникают новые законы формирования ЗЗД с учетом прочностной неоднородности и переменной дилатансии (расширения) пород при их разрушении.

В данной работе **объект** исследований — ПГД вокруг горных выработок, **предмет** исследований — закономерности деформирования пород в ЗЗД.

Основными задачами исследования в данной работе являются:

- 1) выявление и численный анализ источников деформации пород вокруг горной выработки;
- 2) формулирование и разработка физически обоснованных математических моделей для каждого вида деформаций;
- 3) обоснование принятых гипотез и идеализаций, получение теоретических зависимостей для деформаций и смещений пород вокруг выработки;
- 4) оценка достоверности и точности полученных результатов, анализ полученных результатов и формулирование направлений дальнейших исследований.



а) до влияния лавы, б) смещения замков крепи более 1 м; в) поломка верхняков и стоек усиления

Рисунок 1 Общий вид крепи и состояние устойчивости 25 западного коренного штрека шахты «Суходольская-Восточная» в зоне вредного влияния очистных работ

До настоящего времени [1–3 и др.] смещения массива пород в выработку определяют эмпирическими методами, причем лишь на породном контуре выработки, а не для всей области ЗЗД. Достоверность шахтных инструментальных наблюдений, положенных в основу эмпирических зависимостей, была невысокой и ограничивалась местными горно-геологическими условиями, где проводились шахтные измерения.

Попытки получить теоретические решения для определения смещений [5–7 и др.] были малопродуктивны из-за вынужденных упрощений и идеализаций принимаемых математических моделей ПГД. В частности, по умолчанию повсеместно постулировались однородность прочности и неизменность дилатансии в пределах ЗЗД, что существенно противоречило данным шахтных наблюдений. Кроме того, не оценивались все источники возможных смещений пород в ЗЗД. Выпал из поля зрения исследователей и вопрос определения зависимости смещений контура по мере роста размеров ЗЗД. Поэтому назрела необходимость решения подобных задач с более обобщенных и обоснованных позиций для развития теории и практики прогноза ПГД в выработках.

При формулировании задачи по описанию деформаций вокруг горной выработки

необходимо учитывать все слагаемые деформаций и смещений в окружающих выработку породах. Для статической постановки задачи (без учета влияния времени), возможны следующие источники смещений пород в выработку (рис. 2):

1) обусловленные деформациями массива горных пород на границе ЗЗД при $r = r_z$;

2) за счет упругой разгрузки пород в пределах ЗЗД по мере ее роста $a \leq r \leq r_z$, где a , r , r_z — соответственно радиус выработки, текущий радиус и радиус границы ЗЗД;

3) вызванные объемным расширением пород (дилатансией) при разупрочнении и разрушении пород внутри ЗЗД.

Кроме того, возможны также смещения от руинного крупноблочного разрушения пород из-за продольно-поперечного изгиба слоев при потере их устойчивости (по Эйлеру). Последняя форма смещений проявляется, как правило, при низкой несущей способности крепи в мелкослоистых слабых породах, она требует иной расчетной схемы и будет рассмотрена в дальнейшем.

При определении смещений пород следует учесть, что внутри ЗЗД породы частично потеряли сплошность, и прямое использование известных уравнений сов-

местности деформаций, как это делалось ранее, не всегда корректно и требует более общих подходов и особых обоснований.

2 Расчетная схема задачи определения смещений

Для решения поставленных задач примем следующую расчетную схему (рис. 2). Исходное напряженное состояние массива является гидростатическим, для произвольно расположенной в массиве декартовой системы координат x, y, z напряжения будут подчиняться равенству:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = p, \quad (1)$$

где p — давление вышележащей толщи горных пород, $p = \gamma H$, Па;

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ — исходные нормальные напряжения в нетронутом массиве горных пород;

γ — усредненный по всей глубине H объемный вес пород, $\gamma \approx 25 \text{ кН/м}^3$.

Введем полярную систему координат r, θ с началом $r = 0$ в центре выработки (рис. 2).

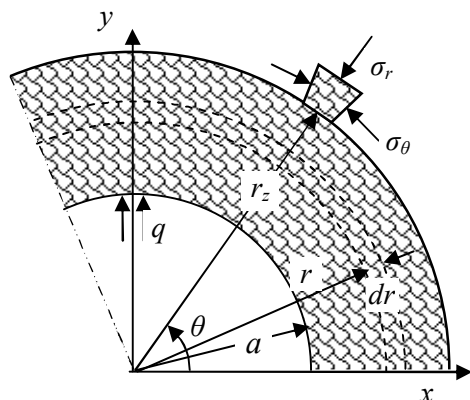


Рисунок 2 Расчетная схема задачи

На протяженном участке круглой выработки радиуса $r = a$ массив находится в плоско-деформированном состоянии. Если направить ось z вдоль выработки, ось y — по вертикали, а ось x — по горизонтали, то в окрестности выработки деформации пород $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ будут равны:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = Var, \varepsilon_z = Const. \quad (2)$$

Согласно полученному нами порождающему решению [4] о напряженном состоянии массива горных пород с прочностью на одноосное сжатие σ_c вокруг круглой горной выработки радиуса r_0 , напряжения в окрестности выработки при образовании в ее окрестности ЗЗД можно определить по формулам:

1) вне ЗЗД для области $\rho_z \leq \rho < \infty$:

$$\left. \begin{matrix} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{matrix} \right\} = p \mp (p - \sigma_r^*) \cdot \rho^{-2}; \quad \tau_{r\theta} = 0, \quad (3)$$

где $\rho = r/r_0$ — безразмерный радиус, изменяется в пределах $1 \leq \rho < \infty$;

$\rho_z = r_z/r_0$ — безразмерный радиус ЗЗД.

2) внутри ЗЗД для области $1 \leq \rho \leq \rho_z$:

$$\sigma_r = q \rho^\mu, \quad \sigma_\theta = (\mu + 1)q \rho^\mu, \quad (4)$$

где q — отпор крепи в выработке, Па;
 $\mu = k_\varphi + k_c - 1$ — коэффициент устойчивости массива пород; он суммирует влияние коэффициента внутреннего трения k_φ , определяемого по формуле:

$$k_\varphi = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi), \quad (0 \leq k_\varphi \leq 3), \quad (5)$$

и коэффициента возрастания прочности породы k_c внутри ЗЗД:

$$k_c = (k_\varphi + 1) \frac{\sigma_c}{2p - \sigma_c} = \frac{\mu + 2}{2} \cdot \frac{\sigma_c}{p}. \quad (6)$$

Из (6) и (7) получим для коэффициента устойчивости:

$$\mu = 2 \frac{(k_\varphi - 1)p + \sigma_c}{2p - \sigma_c}. \quad (7)$$

Коэффициент устойчивости изменяется в пределах $(k_\varphi - 1) \leq \mu < \infty$, и чем он больше, тем меньше размеры ЗЗД и смещения породного контура, тем выше устойчивость горной выработки.

Граница распространения ЗЗД вглубь массива определяется безразмерным радиусом [3]:

$$\rho_z = \left[\frac{2p}{(\mu+2)q} \right]^{\frac{1}{\mu}} = \left[\frac{2p - \sigma_c}{(k_\phi + 1)q} \right]^{\frac{1}{\mu}}. \quad (8)$$

В формуле (8) оба выражения эквивалентны, однако в дальнейшем мы будем использовать первое из них ввиду его большей компактности, наглядности и удобства преобразований.

3 Упругие смещения на границе ЗЗД

Определим смещения пород вокруг выработки, вызванные упругими деформациями массива пород на границе ЗЗД $\rho = \rho_z$. Для этого используем известную из теории упругости формулу для деформаций ε_r^* упругой среды на контуре круглого отверстия, подкрепленного радиальным напряжением, значение которого σ_r^* берем из первой формулы (5), подставляя в нее $\rho = \rho_z$:

$$\varepsilon_r^* = \frac{1}{2G}(2p - \sigma_r^*) = \frac{1}{2G} \left[2p - q \cdot \rho_z^\mu \right],$$

где G — модуль сдвига массива пород, $G \approx 10^3 \dots 10^5$ МПа.

Полученная зависимость оказывается справедливой при произвольном изменении размеров ЗЗД в пределах от $\rho = 1$ до границы $\rho = \rho_z$. Когда граница ЗЗД достигла своего предельного размера $\rho = \rho_z$, можно подставить сюда значение радиуса ЗЗД из (8), что для радиальных деформаций и смещений на границе $r = r_z$ даст:

$$\varepsilon_r^* = \frac{\mu+1}{\mu+2} \cdot \frac{p}{G}; \quad U_{rz}^* = \varepsilon_r^* r_z. \quad (9)$$

Чтобы определить смещения вдоль радиуса r при фиксированной границе ЗЗД r_z , необходимо воспользоваться формулой:

$$U_r^* = \varepsilon_r^* r_z^2 / r, \quad (r_0 \leq r \leq r_z). \quad (10)$$

Таким образом, первая часть общей задачи нахождения смещений решена. Анализируя полученные зависимости, можно предварительно оценить порядок получаемых смещений контура:

$$\varepsilon_r^* \approx \frac{p}{G} \approx \frac{10^{1 \dots 2}}{10^{4 \dots 5}} \approx 10^{-3} - 10^{-4}.$$

Следовательно, для горных выработок обычных размеров упругие радиальные смещения весьма незначительны и не превышают буквально нескольких миллиметров, что позволяет в дальнейшем ими пренебречь без заметной потери точности расчетов.

4 Смещения от упругой разгрузки пород внутри ЗЗД

При рассмотрении процессов упругого смещения пород, которые после запредельного деформирования с образованием ЗЗД претерпевают упругое восстановление объема, следует принять во внимание, что в осесимметричной задаче такое изменение скажется лишь на радиальной компоненте деформаций.

Как известно, упругое восстановление объема пород, так же, как и в любой другой упругой среде, зависит от изменения шарового тензора напряжений до и после образований ЗЗД.

В нетронутом массиве горных пород на основании обобщенного закона Гука и при условии (1) шаровой тензор напряжений равен:

$$\sigma_0 = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) / 3 = p. \quad (11)$$

После сооружения горной выработки и образования ЗЗД в массиве пород возникает иное распределение напряжений, и шаровой тензор на произвольном радиусе r с учетом (1)–(5) становится равным:

$$\sigma_{0z} = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z}{3} = \frac{\mu+2}{3} q \rho^\mu + \frac{p}{3}. \quad (12)$$

Зная исходное σ_0 и измененное σ_{0z} значения шаровых тензоров, приступим к

определению деформаций от упругого восстановления пород внутри ЗЗД. Для этого выделим на текущем радиусе r в ЗЗД элементарное кольцо толщиной dr (рис. 2) и определим приращение его объема $2\pi r dr$ за счет упругого восстановления:

$$dV_0 = 2\pi r \cdot dr \cdot (\sigma_0 - \sigma_{0z}) / K, \quad (13)$$

где K — объемный модуль упругости породы, $K \approx 10^6 \dots 10^8$ МПа.

Интегрируя (13) по заданной толщине ЗЗД от r_0 до r , получим изменение объема на этой части ЗЗД:

$$\Delta V_0 = \int_{r_0}^r dV_0 dr = 2\pi K^{-1} \int_{r_0}^r r (\sigma_0 - \sigma_{0z}) dr. \quad (14)$$

После подстановки (12), (13) в (14) и интегрирования, получим:

$$\Delta V_0 = \frac{2\pi r_0^2}{3K} \left\{ p[(\rho)^2 - 1] - q[(\rho)^{\mu+2} - 1] \right\}. \quad (15)$$

Определим радиальные смещения контура U_r исходя из вычисления разницы объемов пород до и после их упругого восстановления внутри ЗЗД, что приводит к квадратному уравнению:

$$\pi[r_0^2 - (r_0 - U_r)^2] = \Delta V_0, \quad (16)$$

решение которого дает искомую зависимость:

$$\varepsilon_r = 1 - \sqrt{1 - \Delta V_0 / A_0}, \quad (17)$$

или, пренебрегая величинами порядка ε_r^2 , получим в первом приближении:

$$\varepsilon_r \approx \Delta V_0 / 2A_0, \quad (18)$$

где $\varepsilon_r = U_r / r_0$ — радиальные деформации породного контура выработки;

$A_0 = \pi r_0^2$ — площадь горной выработки в черне.

Таким образом, получено уравнение радиальных деформаций и смещений пород

в выработку от упругой разгрузки массива при образовании ЗЗД.

Если произвести оценку ожидаемой величины смещений пород из-за их упругого восстановления в пределах ЗЗД, то, подставляя ориентировочные значения входящих в (16) переменных, получим деформации порядка:

$$\varepsilon_r \approx \frac{\Delta V_0}{2A_0} \approx \frac{p}{K} = \frac{10^{1 \dots 2}}{10^{6 \dots 8}} = 10^{-5} \dots 10^{-6},$$

а для смещений U_r породного контура выработки обычных размеров $r_0 \approx 2 \dots 4$ м оценка дает в мм значение:

$$U_r = \varepsilon_r r_0 \approx (10^{-5} \dots 10^{-6}) \cdot 4 \approx < 10^{-5} \text{ м.}$$

Как видим, порядок ожидаемых смещений весьма мал и не превышает сотых долей миллиметра. Это делает возможным не учитывать такого рода смещения контура выработки в дальнейшем.

5 Закономерности дилатансии пород внутри ЗЗД

Переходим к решению наиболее сложной проблемы смещений пород: к определению радиальных деформаций, вызванных расширением пород при их сдвиговом разрушении в процессе образования ЗЗД.

Попытки учесть дилатансию делались и ранее, однако всегда полагали, что она является скаляром, который не зависит от напряженного состояния породы, т. е. она является постоянной в ЗЗД, что, как правило, приводит к грубым ошибкам.

Уравнение для определения дилатансии dV_d элементарного объема dV целесообразно представить в виде:

$$dV_d = k_d dV, \quad (19)$$

где k_d — функция дилатансии, которая зависит от физико-механических свойств горной породы, напряженного состояния элементарного объема dV и степени потери прочности (разупрочнения) пород внутри ЗЗД.

Поскольку до настоящего времени определение функции дилатансии $k_d(r)$ не проводилось, будем эту функцию искать, исходя из наиболее простой и физически оправданной гипотезы: дилатансия пропорциональна степени разупрочнения («поврежденности») породы $\Omega(r)$ в процессе ее разрушения:

$$k_d = d_m \cdot \Omega(r), \quad (20)$$

где d_m — постоянная, равная предельному значению коэффициента разрыхления породы при ее полном разупрочнении $\Omega(r)=1$ от сдвиговых деформаций, определяется экспериментально для каждого типа породы.

Для учета разупрочнения породы внутри ЗЗД на разной ее глубине введем нормированную функцию разупрочнения $\Omega(r)$:

$$\Omega(r) = 1 - \sigma_s(r) / \sigma_c; \quad (0 \leq \Omega(r) \leq 1), \quad (21)$$

где $\sigma_s(r)$ — остаточная прочность породы внутри ЗЗД на глубине r :

$$\sigma_s(r) = k_c \sigma_r = k_c \cdot q \cdot \rho^\mu; \quad (22)$$

σ_c — прочность неразрушенной породы на одноосное сжатие, равная при $\rho = \rho_z$:

$$\sigma_c = k_c \sigma_r(\rho_z) = k_c \cdot q \cdot \rho_z^\mu.$$

Подставляя (22) в (21) с учетом (7) и (9), получим для функции разупрочнения зависимость в виде:

$$\Omega(r) = 1 - (\rho / \rho_z)^\mu, \quad (23)$$

откуда на контуре горной выработки находим максимальное $\Omega(r_0) = 1 - \bar{\rho}_z^\mu$, а на границе ЗЗД ($\rho = \rho_z$) — минимальное $\Omega(r_z) = 0$ разупрочнение пород.

На рисунке 3 показаны характерные графики изменения показателя разупрочнения пород $\Omega(r)$ на разном расстоянии от породного контура выработки для различ-

ных типов горных пород. Наибольшему разупрочнению в пределах ЗЗД подвергаются аргиллиты, наименьшему — песчаники, алевролиты занимают промежуточное положение.

Физический смысл коэффициента разрыхления d_m довольно прост: он равен верхнему пределу дилатансии для данного литологического типа пород с заданным углом внутреннего трения φ . В отличие от обычного коэффициента разрыхления, который показывает увеличение объема породы при ее отделении от массива (выемке), внутренний коэффициент разрыхления d_m связан лишь с увеличением объема породы при ее сдвиговых деформациях до начала разделения на несвязные отдельности.

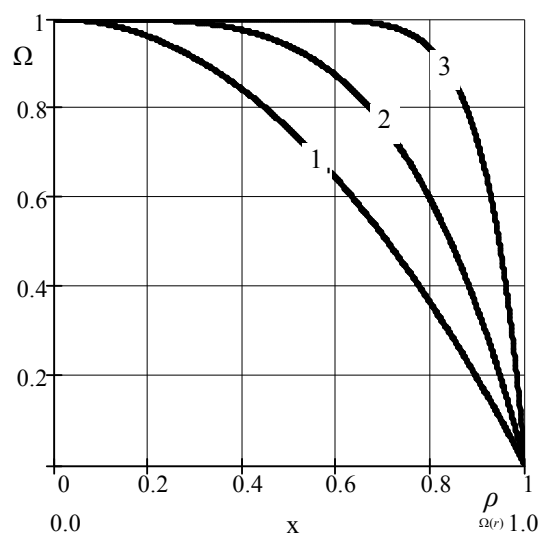


Рисунок 3 Изменение показателя разупрочнения Ω по глубине ЗЗД при разных значениях показателя устойчивости выработки μ для: 1 — аргиллитов ($\mu = 2$), 2 — алевролитов ($\mu = 4$), 3 — песчаников ($\mu = 12$)

При самых неблагоприятных условиях разрушения породы, когда наименьшая компонента тензора напряжений равна нулю, т. е. в условиях сдвиговых деформаций при одноосном сжатии, верхний предел дилатансии будет зависеть лишь от способности сопротивления породы сдвигам, т. е. от

параметра угла внутреннего трения k_φ согласно формуле (6). Чем больше этот угол φ , тем больше порода увеличивает свой объем при сдвиговом разрыхлении.

На основании накопленных экспериментальных данных при проведении шахтных инструментальных наблюдений [7 и др.], для определения d_m можно предложить следующее аппроксимирующее уравнение:

$$d_m = 0,3 \cdot \operatorname{tg} \varphi = 0,3 \cdot f, \quad (0 \leq d_m < 0,2), \quad (24)$$

где $f = \operatorname{tg} \varphi$ — коэффициент внутреннего трения породы.

Для идеально пластичных пород, у которых $\varphi \approx 0$, разрыхление отсутствует и коэффициент внутреннего разрыхления минимален $d_m = 0$. С увеличением угла внутреннего трения φ разрыхление увеличивается.

Окончательное выражение для функции дилатансии после преобразований и упрощений будет иметь достаточно простой вид:

$$k_d(\rho) = d_m \cdot \Omega(\rho) = d_m \cdot \left[1 - (\rho / \rho_z)^\mu \right]. \quad (25)$$

Уравнение (25) для описания особенностей дилатансии пород при их разрушении позволяет перейти к решению основной задачи — определению смещений пород в выработку

7 Смещения пород в ЗЗД от дилатансии

Чтобы приступить к определению искоемых деформаций и смещений пород от дилатансионных эффектов, сопровождающих их разрушение, используем исходную расчетную схему (рис. 2).

Запишем уравнение дилатансии пород для произвольного кольца элементарной ширины внутри ЗЗД. При этом мы избегаем использования уравнения неразрывности деформаций, которое внутри ЗЗД некорректно из-за разрушения породы, а производим прямое определение объема расширения породы при разрушении.

Дилатансию в виде приращения dV_d элементарного объема dV кольца шириной dr внутри ЗЗД можно представить в виде:

$$dV_d = k_d dV = k_d(r) \cdot 2\pi r dr. \quad (26)$$

Вначале вычислим приращение объема пород от их дилатансии в процессе развития ЗЗД. Для этого следует проинтегрировать (26) от границы r_z ЗЗД до переменной по радиусу глубины r :

$$V_d(r) = \int_{r_z}^r k_d(\rho) dV = 2\pi \int_{r_z}^r k_d(\rho) \rho d\rho. \quad (27)$$

Подставляя (26) в (27) и интегрируя от r_z до r , получим:

$$V_d = \frac{\pi d_m r^2}{\mu + 2} \left[\mu + 2 - \mu \left(\frac{r_z}{r} \right)^2 - 2 \left(\frac{r}{r_z} \right)^\mu \right]. \quad (28)$$

Для определения радиальных смещений и деформаций пород вокруг выработки, следует воспользоваться формулами, аналогичными (17) и (19)

$$\varepsilon_r = 1 - \sqrt{1 - V_d / A_0}, \quad (29)$$

или, пренебрегая величинами порядка ε_r^2 и используя безразмерный радиус ρ , получим:

$$\varepsilon_r \approx \frac{V_d}{2A_0} = d_m \left[(\rho^2 - 1) - \frac{q}{p} (\rho^\mu - 1) \right]. \quad (30)$$

Полученное выражение имеет достаточно простой и удобный для расчетов вид и позволяет определить радиальную деформацию пород вокруг выработки внутри ЗЗД при произвольном значении относительного радиуса в пределах $1 \leq \rho \leq \rho_z$.

Таким образом, в полученном решении удалось выявить и учесть физическую нелинейность при образовании ЗЗД, связанную с проявлением феномена дилатансии и отклонениями поведения материала (породы) при его разрушении от линейной пропорциональности деформаций и напряжений (закон Гука).

8 Учет геометрической нелинейности деформаций

В условиях интенсивного проявления горного давления нередко смещения пород в горную выработку могут достигать значительных величин, сравнимых с размерами выработки. Попытка прогноза ПГД для таких условий часто оказывается неудачной, поскольку расчетные значения смещений породного контура превышают радиус выработки, что противоречит физическому смыслу задачи. Это вызвано тем, что в существующих методах прогноза смещений используют по умолчанию линейные приближения для определения деформаций (меру Коши). На самом деле при больших

деформациях породного контура ($\varepsilon_r > 0,5$) мера Коши неприменима.

В условиях геометрической нелинейности, вызванной большими деформациями конструкции, следует перейти к «истинным» деформациям (мера Генки). В сопротивлении материалов расчеты, в которых учитывают геометрическую нелинейность, иногда называют расчетами по деформированной схеме. Для нашей расчетной схемы связь между обычными ε_r (мера Коши) и истинными e_r (мера Генки) радиальными деформациями будет иметь вид:

$$e_r = 1 - \exp(-\varepsilon_r). \quad (31)$$

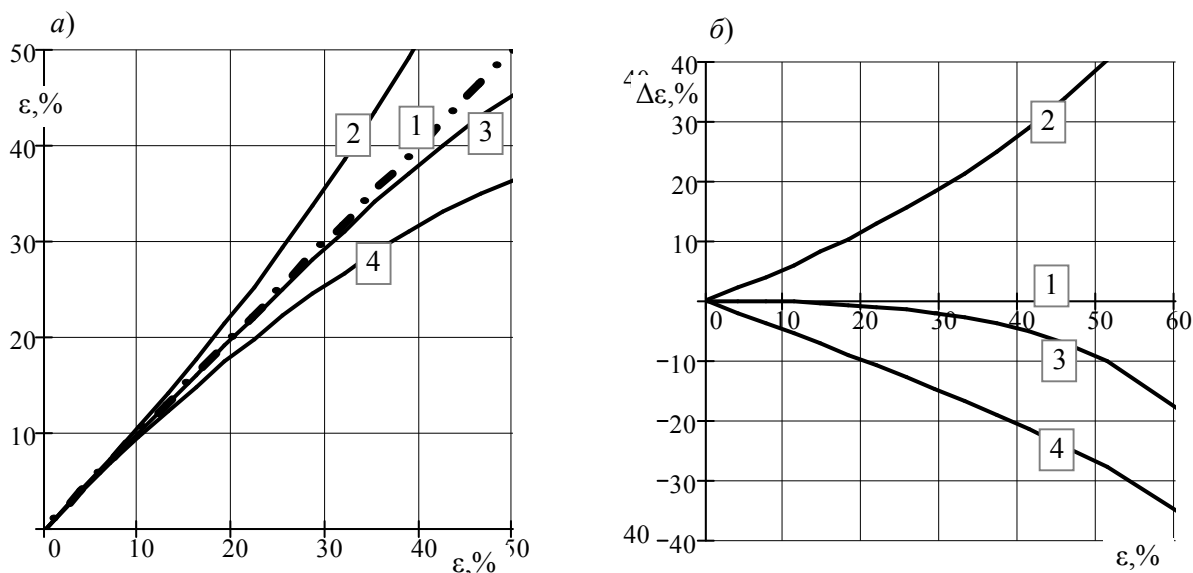


Рисунок 4 Сопоставление радиальных деформаций контура выработки (а) и оценка их отклонений (б) от истинных значений (мера Генки) при разных идеализациях расчетных схем: 1 — истинные (32); 2 — истинные с линейризацией уравнения (30); 3 — мера Коши с линейризацией (30); 4 — мера Коши без линейризации (31)

Из этого уравнения следует, что при больших деформациях, когда $\varepsilon_r \rightarrow \infty$, истинная деформация стремится к ограниченному предельному значению $e_r \rightarrow 1$.

Это значит, что выработка полностью заполняется породой в результате смещений породного контура. Исходные граничные значения этих мер деформаций совпадают: $e_r = \varepsilon_r = 0$.

С практической точки зрения представляет интерес проанализировать, какие неточности возникают при использовании для вычисления смещений пород вокруг горной выработки различных мер деформаций и когда следует для достижения точности вычислений переходить от обычной ε_r к истинной e_r деформации.

С этой целью были выполнены сравнительные расчеты истинных (мера Генки) деформаций (31) с учетом геометрической нелинейности и этих же деформаций с линеаризацией по формуле (30), а также радиальных деформаций без учета геометрической нелинейности по мере Коши (29) и их значения путем линеаризации (30) в виде (31).

Результаты вычислений представлены графиками на рисунке 4, на первом из которых (а) даны сравнения радиальных деформаций, вычисленных по разным формулам, а на втором (б) — их отклонения в % от истинных деформаций с учетом нелинейности.

Из графиков рисунка 4 видно, что наименьшие отклонения от истинных деформаций дают вычисления по самой простой формуле с использованием меры Коши согласно уравнению (30). При этом погрешность формулы (30) даже при смещениях породного контура выработки в пределах 50...60 % от исходного размера не превышает 10...15 %, что вполне допустимо с учетом требований практического применения такого рода прогноза. Такой неожиданный результат объясняется тем, что происходит взаимная компенсация погрешностей вычислений, что хорошо видно по графикам 2 и 4, и в итоге более точным оказывается график 3 на рисунке 3.

При больших смещениях массива пород вокруг выработки ее поперечное сечение не удовлетворяет условиям технической эксплуатации и выработку необходимо ремонтировать или перекреплять, при этом выполнение точных расчетов смещений (за исключением особых условий и целей) теряет смысл.

Следовательно, для подавляющего большинства горно-геологических условий можно вести расчеты деформаций по формуле (30), погрешность которой не превышает 10...15 % вплоть до уровня деформаций $\varepsilon_r \leq 50...60 \%$.

9 Анализ расчетов деформаций пород вокруг выработки

Для наглядного представления поведения массива горных пород вокруг выработки при образовании ЗЗД были выполнены расчеты радиальных деформаций для наиболее характерных горно-геологических условий и литологических разностей пород.

В качестве демонстрационного примера была взята круглая горная выработка на глубине 1000 м, закрепленная податливой крепью с сопротивлением 50 кПа.

Для сравнения были взяты наиболее представительные для горно-геологических условий Донбасса три типа литологических разностей пород:

- 1 — песчаники;
- 2 — алевролиты (песчанистые сланцы);
- 3 — аргиллиты (глинистые сланцы),

со следующими геомеханическими свойствами соответственно:

— показатели прочности на одноосное сжатие (в массиве с учетом масштабного эффекта и структурной нарушенности)

$$\sigma_c = 1) 40 \text{ МПа}; 2) 30 \text{ МПа}; 3) 25 \text{ МПа};$$

— углы внутреннего трения при линеаризации паспорта прочности породы в области предельного круга одноосного сжатия диаграммы О. Мора [8]:

$$\rho = 1) 30^\circ; 2) 25^\circ; 3) 20^\circ.$$

При выполнении расчетов для каждой из пород получены следующие коэффициенты устойчивости:

$$\mu = 1) 18,1; 2) 6,1; 3) 2,84.$$

Предельные относительные радиусы ЗНД вокруг горной выработки в разных породах оказались соответственно равными:

$$r_z = 1) 1,24; 2) 2,39; 3) 6,52.$$

Расчет радиальных деформаций проведен при разных размерах ЗЗД по мере ее роста после проведения выработки, т. е., когда границы разрушения пород постепенно сдвигаются в глубь массива. Чтобы определить радиальные смещения, необ-

ходимо деформации умножить на действительный радиус выработки в проходке.

На рисунке 5 даны графики, которые характеризуют развитие деформаций по мере увеличения размеров ЗЗД в песчанике. Как видим, деформации изменяются почти прямо пропорционально размеру радиуса ЗЗД и не превышают в пределах 2,5 %, что свидетельствует о высокой устойчивости выработки, несмотря на то, что породы вокруг нее начали разрушаться, хотя радиус ЗЗД не превысил четверти реального радиуса выработки.

Отметим, что подобного вида графики часто получают в результате обработки данных шахтных инструментальных наблюдений за деформациями пород с помощью глубинных реперов, установленных в скважины, пробуренные из выработки (см., например, [7] и др.).

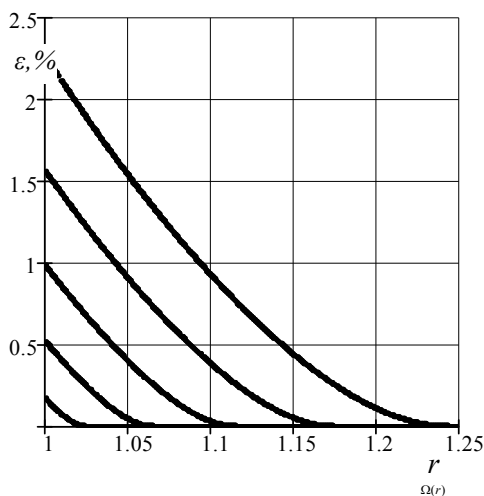


Рисунок 5 Зависимость радиальных деформаций ε , % от относительного радиуса при разных размерах ЗЗД в песчанике

На рисунке 6 приведены аналогичные графики деформаций, когда выработка на той же глубине разработки пройдена в аргиллитах, т. е. в сравнительно слабой породе. Здесь, в отличие от песчаников, деформации достигают почти 50 %, т. е. радиус выработки снижается вдвое, что недопустимо уменьшает поперечное сечение выработки и требует ее перекрепления.

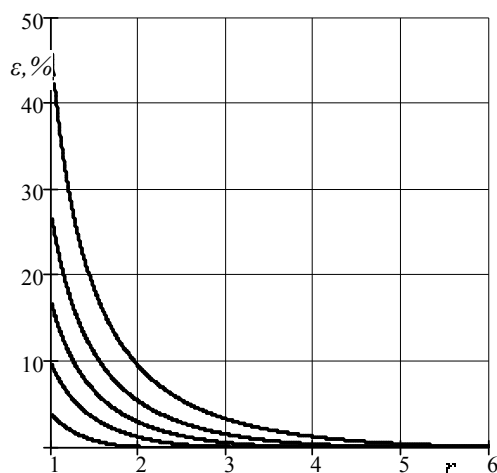


Рисунок 6 Радиальные деформации ε , % при разных размерах ЗЗД в аргиллитах и на разных этапах ее развития

Сопоставление деформаций при разных типах пород в одной и той же выработке можно видеть на рисунке 7. Из него следует, что чем меньше прочностные свойства породы, тем значительнее проявляются деформации, которые к тому же резко нелинейно возрастают по мере приближения к породному контуру.

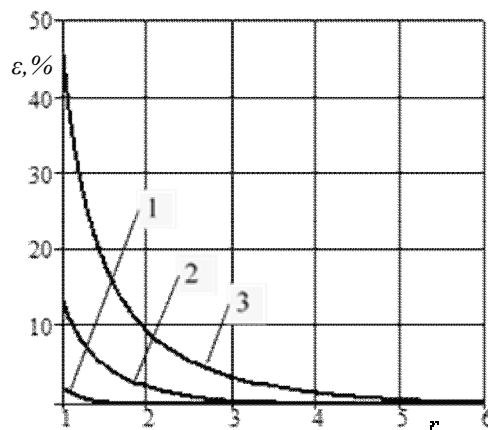


Рисунок 7 Сравнение радиальных деформаций ε , % в разных типах пород:

1 — песчаники, 2 — алевролиты,
3 — аргиллиты

Анализ результатов расчетов и полученных графиков деформаций позволяют заключить, что они достаточно удовлетворительно качественно и во многом количе-

ственно совпадают с данными шахтных наблюдений на замерных станциях [7].

Однако следует заметить, что, несмотря на вполне обнадеживающие результаты, следует для достижения необходимых по точности и представительности результатов прогноза учесть те достаточно важные горно-геологические факторы и процессы, которые на первом этапе не были отражены в исходной расчетной схеме. В первую очередь к таким нерешенным задачам следует отнести кинетику деформирования горных пород во времени, поскольку именно скорость и продолжительность деформирования массива пород во многом определяют выбор и обоснование параметров технологических процессов подземных работ.

Выводы

Выполненные исследования являются логическим продолжением результатов, полученных в предыдущей работе [4] и дополняют их. По сути, они являются таким же «порождающим» решением, как и полученное в работе [4] для напряженного состояния в ЗЗД, но касаются определения деформаций и смещений.

Исследованиями, представленными в данной работе:

1) установлено, что вклад в смещения пород вокруг подготовительных выработок от упругих деформаций границы ЗЗД и за счет упругого восстановления пород внутри ЗЗД весьма мал и им можно пренебречь;

2) определены закономерности возникновения дилатансии при запредельном

деформировании пород и их постепенном разрушении;

3) впервые даны оценки степени разупрочнения для различных литологических разностей пород при их запредельном деформировании вокруг выработки;

4) получены аналитические зависимости для определения деформаций и смещений пород по всей области ЗЗД вокруг выработки, которые впервые позволяют перейти на физически обоснованные методы прогноза ПГД и резко сузить область применения эмпирических подходов;

5) проведены анализ и оценка погрешностей расчетов смещений и деформаций пород в условиях геометрической нелинейности при использовании мер деформаций Коши и Генки, показано, что вплоть до уровня деформаций 50...60 % ошибка прогноза не превышает 10...15 %;

6) проведен анализ полученных аналитических выражений и даны численные оценки деформаций для типичных в Донбассе литологических разностей пород.

Задачами дальнейших исследований являются изучение кинетики разрушения и деформирования пород вокруг подготовительных выработок, чему будут способствовать ранее полученные «порождающие решения» для ЗЗД. Это позволит перейти к разработке аналитического метода прогноза ПГД с учетом большинства влияющих факторов в реальных горно-геологических условиях.

Библиографический список

1. Строительные нормы и правила СНиП II-94-80. Часть II Нормы проектирования. Глава 94 Подземные горные выработки [Текст]. — М. : Госстрой СССР, 1982. — 30 с.
2. Указания по рациональному расположению, охране и поддержанию горных выработок на угольных шахтах СССР [Текст]. — Л. : ВНИМИ, 1986. — 155 с.
3. Расположение, охрана и поддержание горных выработок при отработке угольных пластов на шахтах [Текст]. — Донецк : УкрНИМИ, 1998. — 163 с.
4. Литвинский, Г. Г. Запредельное поведение пород вокруг горной выработки (порождающее решение) [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2017. — Вып. 6 (49). — С. 5–14.
5. Вопросы теории горного давления [Текст] // Сб. переводов под ред. проф. П. И. Городецкого, А. А. Борисова. — М. : Госгортехиздат, 1961. — 300 с.

6. Petar Jovanović. *Projektovanje i proračun podgrade horizontalnih podzemnih prostoriya* [Текст] / Petar Jovanović. — Beograd : Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta, 1994. — Т. 2. — 316 str.
7. Заславский, Ю. З. Проявления горного давления в глубоких шахтах Донбасса [Текст] / Ю. З. Заславский. — М. : Недра, 1963. — 238 с.
8. Литвинский, Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов [Текст] / Г. Г. Литвинский. — Донецк : Норд-Пресс, 2008. — 207 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 17.10.17.

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

СТАТИКА РУЙНУВАННЯ І ДЕФОРМУВАННЯ ПОРІД НАВКОЛО ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ

В даний час визначення деформацій і зсувів порід в гірничу виробку засноване на емпіричних формулах і виконується з недостатньою точністю. Мета досліджень - розробка теоретичних моделей проявів гірського тиску (ПГТ) для визначення його параметрів при утворенні навколо виробки зони поза межних деформацій (ЗПД). Дослідження показали, що дилатансійна компонента деформації є головною і залежить від ступеня втрати породою своєї міцності і суцільності всередині ЗПД. Отримані аналітичні залежності дозволяють прогнозувати ПГТ в статичі, в тому числі і в умовах великих зсувів породного контуру (геометричної нелінійності).

Ключові слова: гірський тиск, гірнича виробка, поза межна поведінка порід, статика деформацій, зона поза межних деформацій, знеміцнення порід, дилатансія, прогноз зсувів, похибки прогнозу, закономірності деформацій.

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

STATIC OF DESTRUCTION AND DEFORMATION OF ROCK AROUND THE MINE WORKING

At present, finding the deformations and displacements of rocks in the mine workings is based on empirical formulas and is performed with insufficient accuracy. The aim of the research is the development of theoretical models of the manifestations of rock pressure (MRP) for determining its parameters when forming around the zone of ultimate deformations (ZUD). Studies have shown that the dilatancy component of deformation is the main one and depends on the degree the rock lose its strength and continuity within the ZUD. The obtained analytical dependences allow predicting MRP in statics, including conditions of large displacements of the rock contour (geometric nonlinearity).

Key words: rock pressure, development, ultimate behavior of rocks, statics of deformations, zone of ultimate strains, softening of rocks, dilatancy, displacement prediction, forecast error, patterns of deformations.

УДК 622.02:539.2/.8

д.т.н. Дрибан В. А.,

к.т.н. Дуброва Н. А.

(РАНИМИ, г. Донецк, ДНР, viktor-driban@yandex.ru, dubrovan@mail.ru)

ФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКРАТНО ПОДРАБОТАННОГО МАССИВА

Построена и верифицирована диффузионно-дисперсионная модель распределения вредных загрязняющих веществ, адекватно описывающая геомеханические и фильтрационные процессы в многократно подработанном массиве горных пород. Путем решения обратной задачи рассеивания получены коэффициенты фильтрации многократно подработанного массива горных пород в условиях Центрального района Донбасса.

Ключевые слова: многократно подработанный массив, проницаемость горных пород, фильтрационные свойства массива, коэффициент фильтрации.

Особую актуальность решение гидро-геомеханических и фильтрационных задач приобретает в горнодобывающих регионах, где естественная природная структура массива горных пород нарушается проведением подземных выработок различного назначения. Наиболее остро эта проблема проявилась в Центральном районе Донбасса, где подработка ведется более 130 лет по десяткам угольных пластов, что привело к кардинальному изменению геологической среды целого региона и, в частности, физико-механических и фильтрационных свойств горных пород.

В ранее опубликованных работах [1–4], посвященных оценке степени нарушенности массива горных пород было показано, что ведение горных работ в условиях ЦРД приводит к кардинальному изменению проницаемости горных пород со стабилизацией значений на уровне, соответствующем проницаемости зон водопроводящих трещин. Данное обстоятельство позволило сформулировать гипотезу, о том, что в процессе ведения горных работ породный массив трансформируется в квазиоднородную по фильтрационным характеристикам среду. Для подтверждения полученной оценки изменения фильтрационных характеристик деформирующегося массива горных пород были использованы нетрадиционные дополнительные экспериментальные данные о распределении вредных загрязняющих

веществ (ВЗВ) в массиве как наиболее представительные, полные и удовлетворяющие задаче исследования.

Высокая степень техногенной нагрузки в Горловской горно-промышленной агломерации привела к аварийной ситуации отравления шахтной атмосферы летально опасными концентрациями ВЗВ в 90-х гг. на шахтах «Углегорская» и «Александр-Запад», в силу чего были проведены уникальные исследования и получен широкий спектр фактических гидрогеохимических данных, включающих информацию о концентрациях и распространении ВЗВ в массиве [5].

На основе данных гидрогеохимического опробования по 58 наблюдательным скважинам и более чем 1500 проб были построены модели распределения загрязнителей в массиве (рис. 1). Объем массива составляет около 60 км³.

Еще раз подчеркнем, что район, в котором расположены потенциальные источники загрязнения (Горловский химзавод, ПО «Стирол» и пр.), в течение многих лет неоднократно подрабатывался. В качестве примера, иллюстрирующего интенсивность техногенной нагрузки на исследуемом участке, приведен рисунок 2, где на разрезе вкрест простирания горных пород совместно визуализированы зоны влияния аппроксимированных контуров горных работ и очаг загрязнения массива ацетоном.

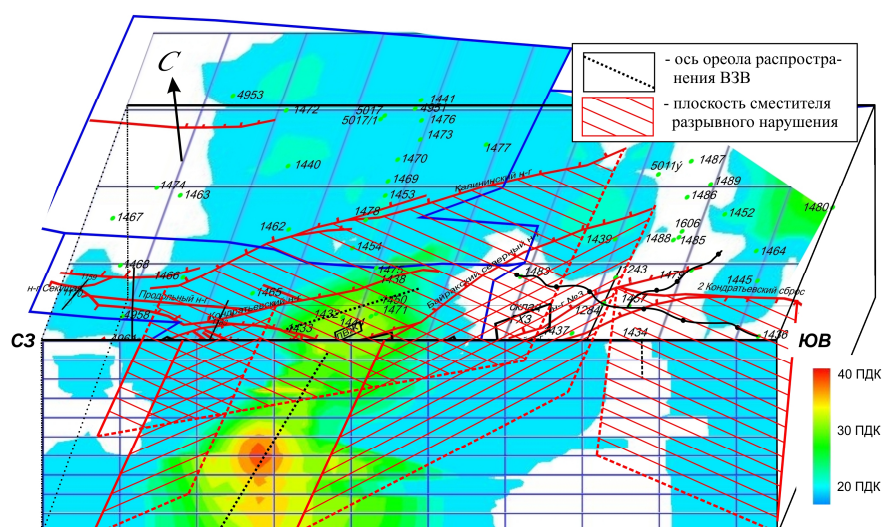


Рисунок 1 Ореол загрязнения дифенилолпропаном

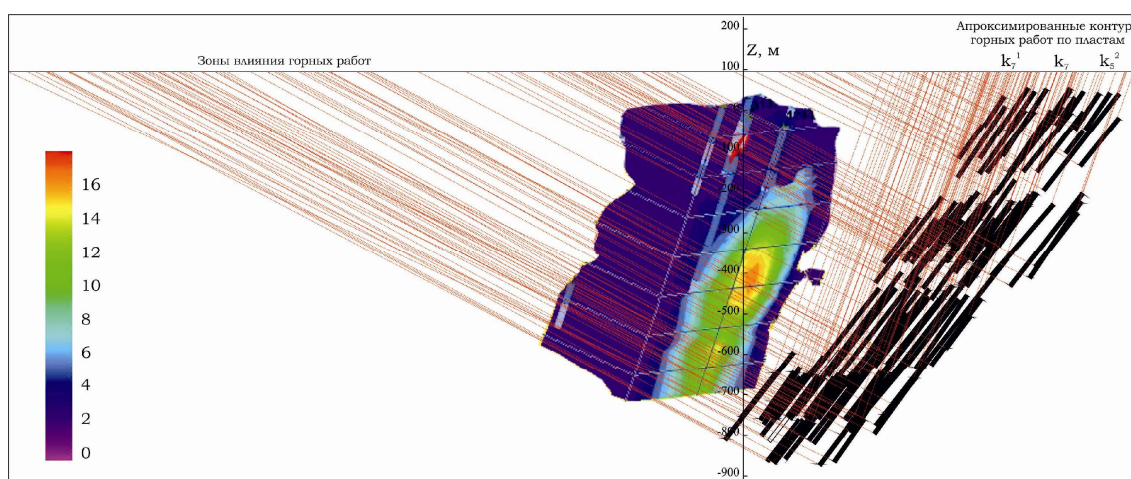


Рисунок 2 Разрез вкрест простирания горных пород с визуализацией зон влияния аппроксимированных контуров горных работ и очага загрязнения ацетоном

Анализ полученных моделей (см. рис. 1) выявил дуализм воздействия структурных геологических неоднородностей на распространение ВЗВ. Так, геометрия тела загрязнения наследует сходные элементы залегания основных тектонических структур по простиранию и падению и пространственно ограничена плоскостями их сместителей. При этом разрывные нарушения задают общее движение миграционного потока в блоке и представляют собой «миграционный коридор». Однако тектонические нарушения с направлением падения сместителя, про-

тивоположным направлению падения углепородной толщи, выполняют функцию тектонического экрана (барьера) при распространении ВЗВ.

Для корректной обработки экспериментальных данных разработана безразмерная модель распределения загрязнителей в массиве и на базе аналитического моделирования и статистического анализа выявлены типовые закономерности их распределения. Нормирование модели производилось по максимальным значениям концентраций и радиусу зоны их сосредоточения на каждом из срезов. Для реализации указанного подхо-

да полученные статические поэлементные модели были нарезаны горизонтальными и вертикальными сечениями с интервалом 100–200 м. На каждый горизонтальный и вертикальный срез были вынесены основные направления координатной сетки таким образом, чтобы точка пересечения координатных осей находилась в центре области (окружности), ограничивающей максимальные концентрации загрязнителя на данной глубине (для горизонтальных сечений) и на данном направлении (для вертикальных). В качестве пространственного показателя распределения ВЗВ использован параметр, характеризующий удаленность точки с известной концентрацией загрязнителя от центра очага загрязнения в единицах, приведенных к размеру радиуса тела максимально обнаруженной концентрации загрязнителя. На основании полученных данных были построены графики зависимости нормированных концентраций загрязнителей от нормированной пространственной составляющей их обнаружения.

Близость функций распределения загрязнителей оценивалась коэффициентом тесноты связи, который рассчитывается по формуле:

$$k_{\text{св}} = 1 - \left(\int_a^b (f(x) - g(x))^2 dx \right)^{0.5} \left(\int_a^b g(x)^2 dx \right)^{-0.5}. \quad (1)$$

Коэффициент тесноты связи рассчитывался между кривыми, характеризующими распределение загрязнителя на одном горизонте в направлении основных осей координатной сетки. Характер полученных распределений имеет высокие коэффициенты тесноты связи от 0,71 до 0,97 для различных глубин, направлений и веществ. Данные результаты позволяют говорить о типовых закономерностях распределения ВЗВ.

Сделанные ранее выводы о трансформации массива в квазиоднородную среду дают возможность построения относительно простой фильтрационной модели на основе данных о распространении загрязнителей.

Согласно [6], в сравнительно однородных породах, квазигомогенных по филь-

трационным свойствам, миграция описывается в рамках моделей микродисперсии: предполагается, что все механизмы процесса идут на одном микроуровне, отвечающем репрезентативному элементу гомогенной пористой или трещиноватой среды. Для трещиноватых пород это предполагает: пренебрежимо малое влияние пористости породной матрицы; рассмотрение объемов массива, удовлетворяющих условию сплошности среды; синхронность заполнения веществом трещин разного порядка в пределах физической точки репрезентативного минимального объема среды.

В работе [6] отмечено, что для крупноблочных трещиноватых пород или пород с каналовым механизмом миграции последние два условия выполнимы лишь для больших пространственно-временных масштабов, до достижения которых такие породы должны рассматриваться как гетерогенная среда.

Заметим, что описанные в [6] принципы в рамках решаемой нами задачи практически выполнены, что дает нам возможность построения аналитической модели распространения ВЗВ в первом приближении. Таким образом, задачу можно формализовать следующим образом.

Требуется определить поле распределения концентраций ВЗВ в плоскости при наличии постоянно действующего во времени источника загрязнений интенсивностью 1, занимающего некоторую область Ω . В общем случае диффузионно-дисперсионный перенос описывается уравнением, базирующимся на феноменологическом законе Фика [7]:

$$n \frac{\partial c}{\partial t} + \nabla J + W_s = 0, \quad (2)$$

где функция $J(c)$ отвечает массовому потоку (статистически осредненному в пределах минимальных репрезентативных объемов пористой или трещиноватой среды); W_s — объемная интенсивность поглощения-выделения, обусловленная проявлением внутренней гетерогенности пород (двойная

пористость, регулярная слоистость и т.п.) или физико-химическими взаимодействиями.

Вид функционала $\nabla J(c)$, вообще говоря, зависит от мерности процесса. В общем трехмерном случае в декартовой системе координат описывается формулой:

$$\nabla J = \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i c) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial c}{\partial x_j} \right), \quad (3)$$

где D_{ij} — компоненты тензора микродисперсии, зависящие от рассеивающих свойств среды.

Высказанные выше соображения о трансформации многократно подработанного массива в квазигомогенную среду позволяют существенно упростить выражения (2), (3). В безразмерных координатах указанные формулы принимают вид:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \frac{\partial \Phi}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где τ — обобщенный параметр, увязывающий время протекания процесса, диффузионно-фильтрационные характеристики массива и геометрические параметры области источника.

На основании частного решения уравнения диффузии (фильтрации, теплопро-

водности) поле распределений нормированных концентраций ВЗВ можно записать в следующем виде:

$$\Phi(\vec{r}_0, t) = \int_0^t \iint_{\Omega} \tau^{-1} e^{-\frac{|\vec{r}-\vec{r}_0|^2}{4k\tau}} d\Omega d\tau, \quad (5)$$

где r_0 — радиус-вектор данной точки плоскости сечения.

Анализ фактических распределений загрязнителей позволяет, по крайней мере, в первом приближении аппроксимировать область максимальных концентраций в виде круга радиуса R . В этом случае выражение (5) упрощается и принимает приемлемый для счета и анализа одномерный вид:

$$\Phi(r_0, t) = \int_0^t \int_0^{2\pi} \int_0^1 r \tau^{-1} e^{-\frac{|\vec{r}-\vec{r}_0|^2}{4k\tau}} dr d\theta d\tau, \quad (6)$$

где r_0 — радиус-вектор; r, θ — полярные координаты.

На рисунке 3 представлены типовые кривые распределения концентраций для различных значений обобщенного параметра в зависимости от относительного (приведенного к радиусу области максимальных концентраций) расстояния.

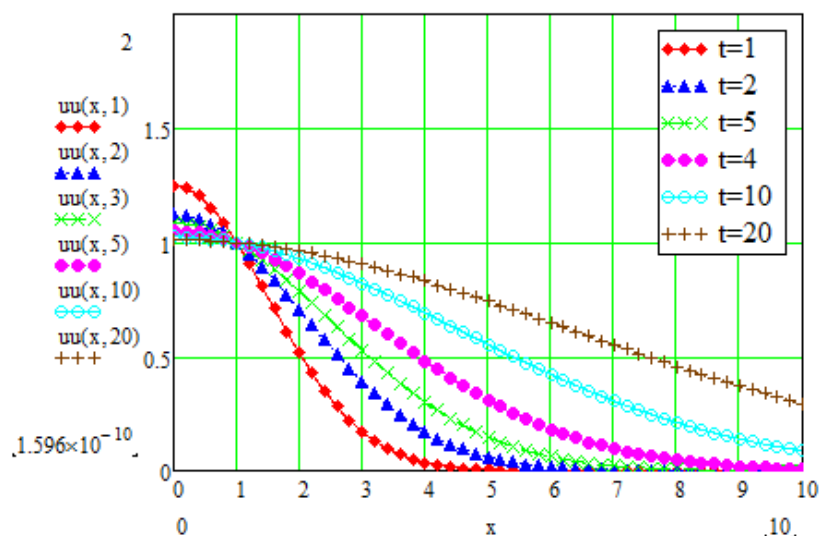


Рисунок 3 Типовые кривые распределения концентраций для различных значений обобщенного параметра в зависимости от относительного расстояния

Итак, построена теоретическая модель, описывающая поля распределения ВЗВ. Следующим необходимым шагом является верификация указанной модели по экспериментальным данным. Для этого были проанализированы функции невязки типовых распределений и фактических данных:

$$f(\tau) = \sum_i (\Phi(x_i, \tau) - yf_i)^2, \quad (7)$$

где yf_i — фактические относительные концентрации; x_i — относительные расстояния до центра пятна загрязнения; τ — обобщенный параметр, определяемый по формуле $\tau = 4ktR^{-2}$.

Расчет выполнен для временного интервала длительностью 10 лет, выбор которого обоснован временем обнаружения первых проявлений ВЗВ в горных выработках. На рисунке 4 представлена кривая невязки для О-ксилола, направление — восток-запад, горизонт «-120» м. Минимум функции невязки соответствует максимальным значениям тесноты связи фактических данных и теоретической кривой.

Таким образом, произведены перерасчеты и построены планиметрические модели распространения ВЗВ, а также решена обратная задача: по данным имитационного моделирования найдены параметры диффузионно-дисперсионного процесса протекающего в массиве.

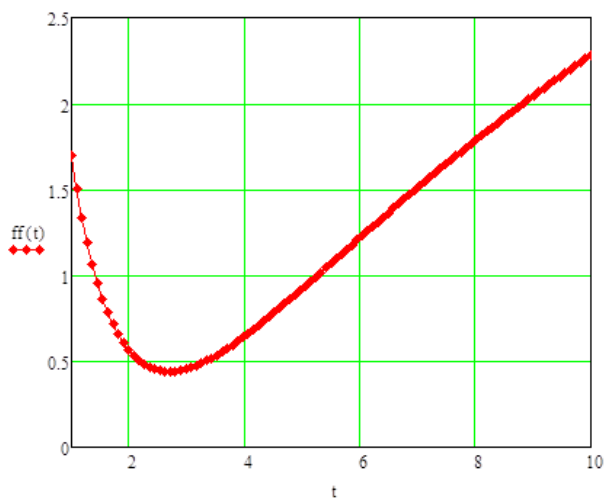


Рисунок 4 Кривая невязки для О-ксилола (направление — восток-запад, горизонт «-120» м)

Расчет выполнялся совместно для сопряженных направлений (восток-запад, север-юг) и в направлении залегания основных тектонических структур, однако в связи со спецификой (отсутствием полноты) исходных данных некоторые направления рассмотрены одиночно.

Поскольку вода является основным «переносчиком» ВЗВ в массиве, то появляется возможность отождествить диффузионно-дисперсионные коэффициенты с коэффициентами фильтрации и проницаемости.

Пример полученных моделей представлен на рисунке 5.

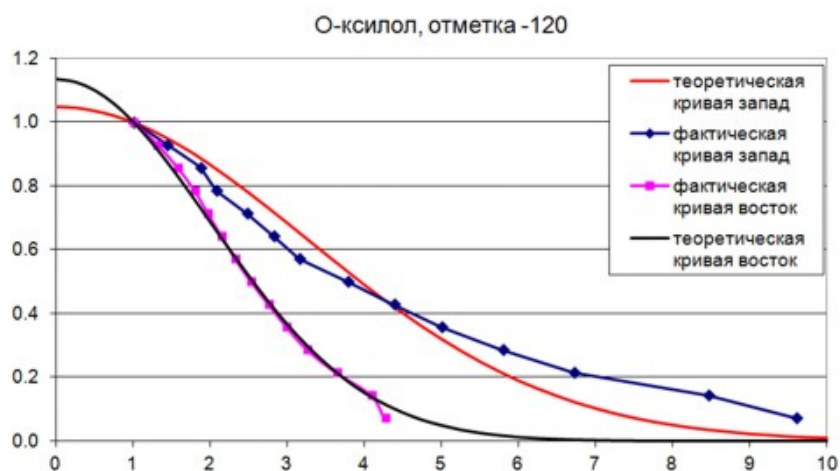


Рисунок 5 Типовые кривые распределения концентраций О-ксилола на горизонте «-120» м, направление — запад-восток

Полученные теоретические значения коэффициентов фильтрации изменяются от единиц до сотен метров в сутки и хорошо коррелируются с результатами экспериментальных исследований по запуску трассеров, выполненных Ростовским гидрохимическим институтом [5]. Так, установленная скорость миграции ВЗВ в массиве по данным режимных наблюдений и трассерных экспериментов 100–1400 м/сут при преобладающих значениях 200–600 м/сут. Время перемещения трассеров от источника до горных выработок варьируется от 5–14 до 30–37 суток по различным шахтам. Данные величины, согласно классификации Плотникова Н. А. [8], соответствуют первой группе — очень хорошо проницаемым породам (100–1000 Дарси) — и полностью соответствуют ранее сделанным выводам о скачкообразном (до 5 порядков) росте проницаемости многократно подработанных массивов.

Построена и верифицирована диффузионно-дисперсионная модель распределения ВЗВ, адекватно описывающая реальные геомеханические и фильтрационные процессы в многократно подработанном массиве горных пород. Путем решения обратной задачи рассеяния получены коэффициенты фильтрации многократно подработанного массива горных пород, которые в условиях ЦРД изменяются от еди-

ниц до сотен метров в сутки и соответствуют трансформации массива до проницаемого и очень хорошо проницаемого. А также реализована принципиальная возможность решения обратной задачи — восстановления, уточнения и прогноза изменения фильтрационных свойств массива по точечным (малым) данным о концентрациях загрязнителей, что представляет интерес для последующего прогноза экологической ситуации в регионе.

Отметим, что важной особенностью обратных геофильтрационных задач является их относительно слабая устойчивость, когда малые погрешности исходных данных приводят к большим погрешностям результата. Поэтому решение таких задач имеет свою серьезную специфику. Не вдаваясь в детали данного вопроса, заметим только, что алгоритм, используемый для решения обратной задачи, должен быть апробирован на чувствительность к определяемому параметру. Оправданным является применение только чувствительных алгоритмов. Это означает, что при подстановке в них реально возможных диапазонов изменения параметров измеряемых величин изменяются достаточно ощутимо по сравнению с их фоновыми колебаниями и точностью измерений. Заметим, что построенная в работе модель вполне соответствует указанным требованиям.

Библиографический список

1. Дрибан, В. А. Особенности деформирования массивов горных пород ЦРД при многократной долгосрочной подработке [Текст] / В. А. Дрибан, Н. Н. Грищенко, Н. А. Дуброва // *Форум гірників — 2013 : матеріали міжнар. конф. — Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2013. — Т. 2. — С. 226–232.*
2. Дрибан, В. А. Особенности формирования техногенных коллекторов при отработке угольных пластов в условиях ЦРД [Текст] / В. А. Дрибан, Н. Н. Грищенко, Е. Д. Ходырев, Н. А. Дуброва // *Наукові праці УкрНДМІ : зб. наук. праць. — Донецьк, УкрНДМІ НАН України, 2011. — №13 (I). — С. 220–237.*
3. Driban, V. Evaluation of changes in rock mass permeability due to long-time repeated mining / V. Driban, N. Dubrova // *PROGRESSIVE TECHNOLOGIES OF COAL, COALBED METHANE, AND ORES MINING. — CRC Press/Balkema, Netherlands, 2014. — pp. 167–174.*
4. Дрибан, В. А. Оценка изменения проницаемости трещиноватой деформируемой среды [Текст] / В. А. Дрибан, Н. А. Дуброва, Л. П. Полякова // *Проблемы и перспективы комплексного освоения и сохранения земных недр : 2-я Международная научная школа академика К. Н. Трубецкого. — М., 2016. — С. 57–60.*

5. Результаты разведки очагов загрязнения и создания сети наблюдательных скважин на полях шахт Центрального района Донбасса [Текст]: отчет о НИР (заключ.) / Укруглегеология; рук. О. А. Куц. — ГР 39–90; Инв. 743/Л. — Донецк, 1993. — 117 с.

6. Мироненко, В. А. Проблемы гидрогеоэкологии. Т. 1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов [Текст] / В. А. Мироненко, В. Г. Румынин. — М. : Изд. Московского государственного горного университета, 1998. — 611 с.

7. Лукнер, Л. Моделирование миграции подземных вод [Текст] / Л. Лукнер, В. М. Шестаков. — М. : Недра, 1986.

8. Справочное руководство гидрогеолога [Текст] / Под ред. В. М. Максимова. — Л. : Недра, 1967. — 592 с.

© Дрибан В. А.

© Дуброва Н. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., зав. ОКТ РАНІМІ Глуховым А. А.
д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТУ Литвинским Г. Г.*

Статья поступила в редакцию 22.09.17.

д.т.н. Дрибан В. О., к.т.н. Дуброва Н. О. (РАНІМІ, м. Донецьк, ДНР)

ФІЛЬТРАЦІЙНА МОДЕЛЬ БАГАТОРАЗОВО ПІДРОБЛЕНОГО МАСИВУ

Побудовано та верифіковано дифузійно-дисперсійну модель розподілу шкідливих забруднюючих речовин, що адекватно описує геомеханічні та фільтраційні процеси у багаторазово підробленому масиві гірських порід. Шляхом розв'язання оберненої задачі розсіювання одержано коефіцієнти фільтрації багаторазово підробленого масиву гірських порід в умовах Центрального району Донбасу.

Ключові слова: багаторазово підроблений масив, проникність гірських порід, фільтраційні властивості масиву, коефіцієнт фільтрації.

Doctor of Tech. Sc. Driban V. A., PhD Dubrova N. A. (RARDI, Donetsk, DPR, viktordriban@yandex.ru, dubrovan@mail.ru)

FILTRATION MODEL OF A REPEATEDLY WORKED-OUT MASSIF

A diffusion-dispersion model for the distribution of harmful pollutants adequately describing the geomechanical and filtration processes in the repeatedly worked-out rock massif was constructed and verified. By solving the inverse scattering problem, the filter coefficients of the repeatedly worked-out rock massif are obtained in the conditions of the Central region of the Donbas.

Key words: repeatedly worked-out rock massif, permeability of rocks, filtration properties of the massif, filtration coefficient.

УДК 621.59(075.8)

к.т.н. Рутковский Ю. А.,
к.т.н. Рутковский А. Ю.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

РЕЗОНАНСНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния колебаний давления газа во всасывающей системе поршневого компрессора на основные параметры его работы. Показано влияние резонансных явлений в газовых коммуникациях компрессора с цилиндрами двойного действия на режимы и экономичность работы поршневых компрессоров в промышленных условиях их эксплуатации. Получены аналитические расчетные зависимости влияния колебаний давления газа на производительность, мощность и удельный расход энергии.

Ключевые слова: поршневой компрессор, экспериментальные исследования, колебания давления газа, резонансные явления, всасывающая система.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Резонансные колебания давления газа во всасывающих и нагнетательных системах поршневых машин издавна привлекают внимание специалистов, так как научно обоснованное использование этих колебаний позволяет повысить мощность двигателей внутреннего сгорания до 47 % [1], а производительность поршневых компрессоров до 20–25 % [2–6].

Эффект увеличения производительности компрессора резонансными колебаниями давления достигается практически без капитальных и эксплуатационных затрат — подбором длины всасывающего трубопровода. Для наддува используются колебания столба газа в трубопроводе, возникающие в результате периодического всасывания. Колебания давления имеют место при любой длине трубопровода, но наибольшей амплитуды они достигают при резонансной длине, когда совпадут собственная частота колебания газового столба ω_0 и частота главной резонирующей гармоники ω возмущающих усилий, то есть резонанс возможен при условии, когда

$$\omega_0 = \omega. \quad (1)$$

Однако резонансные явления не нашли практического применения в компрессорных машинах. Одной из главных причин

такого положения является отсутствие количественных показателей влияния во всасывающем тракте, термодинамических и газодинамических процессов на значения объемного коэффициента, коэффициента давления и температурного коэффициента, определяющих в конечном итоге коэффициент подачи и действительную производительность компрессора. Отсутствует сравнительный анализ влияния различных зон (дорезонансной, резонансной и зарезонансной) всасывающей системы, включающей в себя не только всасывающий трубопровод, но и всасывающие клапаны и полость цилиндра, на режим работы компрессора и его экономичность.

Постановка задачи. На основании выявленных причин, объясняющих отсутствие практического использования резонансных явлений во всасывающей системе для повышения эффективности поршневых компрессоров, ставится задача установления закономерностей между термодинамическими и газодинамическими процессами в системе «всасывающий трубопровод — всасывающий клапан — цилиндр», обусловленными наличием резонансных колебаний давления газа, и отражения их влияния на важнейшие технико-экономические показатели работы поршневых компрессоров. Конечной целью исследований является получение резонанс-

ных эксплуатационных характеристик поршневых компрессоров, которые устанавливали бы связь между переменной относительной длиной всасывающего трубопровода \bar{L}_{BC} и относительными значениями коэффициента подачи $\bar{\lambda}$, производительности \bar{Q} , мощности \bar{N} , удельной мощности \bar{n} , а также температуры газа в С.Т.В. и С.Т.Н. (стандартных точках всасывания и нагнетания).

Наличие таких характеристик предоставило бы возможность изготовителям и потребителям компрессорных машин выбрать оптимальные режимы исходя из конкретных условий эксплуатации компрессоров. Достоверность теоретических результатов подтверждается экспериментальными данными исследования компрессорной станции ЗИФ ШВКС-5 в лабораторных условиях, а также компрессоров ВП-50/8М и ВП-20/8М на стендах Краснодарского завода-изготовителя этих машин, компрессоров 2ВГ, 5Г-100/8, 4ВМ10-100/8 в производственных условиях Юргинского машиностроительного завода и шахт «Украина», № 10 им. Артема ПО «Луганскуголь».

Изложение материала и его результаты. Определение условий наступления резонансных колебаний давления газа во всасывающем трубопроводе сводится к достаточно точному расчету частот собственных (свободных) колебаний газа в трубопроводе и определению его резонансной длины. Частота собственных колебаний газа зависит от формы трубопровода, его диаметра и длины, величины и расположения емкостей, находящихся в установке, в том числе и переменного объема цилиндра, присоединяемого к цилиндру в процессе всасывания. На значение частоты собственных колебаний оказывает влияние скорость звука в газе, зависящая от плотности газа и его температуры.

На рисунке 1 приведена наиболее часто встречающаяся в практике схема всасывающей системы компрессора: к одному

концу трубы присоединен цилиндр двустороннего действия, объем которого периодически меняется, другой конец трубы открыт в атмосферу.

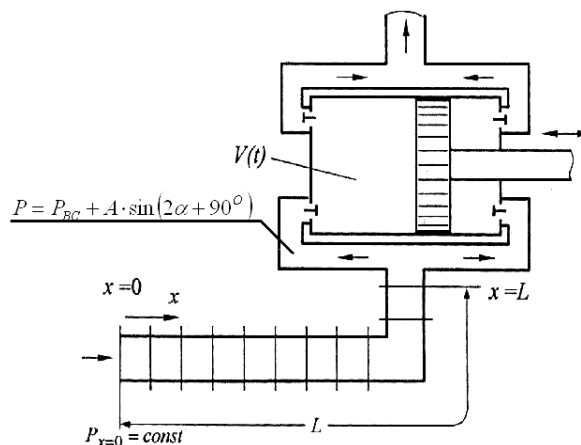


Рисунок 1 Схема всасывающей системы поршневого компрессора с цилиндром двойного действия в первой ступени и переменной длиной всасывающего трубопровода

На рисунке 2 представлены циклограммы колебаний давления воздуха во всасывающем патрубке и индикаторные диаграммы 1-й ступени компрессора ВП-50/8М, снятые стробоскопическим индикатором МАИ-2 для трех значений длин всасывающего трубопровода: а) дорезонансной, когда длина трубопровода $L_{BC} < L_{PE3}$; б) резонансной, когда $L_{BC} = L_{PE3}$ и в) зарезонансной, когда $L_{BC} > L_{PE3}$.

Из рисунка 2 видно, что колебания давления газа в трубопроводе при резонансе имеют строго синусоидальную форму, отражающую влияние второй (главной) гармоники возмущающего импульса.

Из рассмотрения кривых, представленных на рисунке 2, следует, что при $\bar{L}_{BC} = L_{PE3}$ (рис. 2, б) момент наступления максимального значения амплитуды совпадает с моментом прихода поршня в мертвую точку. В этом случае, как показывают экспериментальные измерения [7],

производительность компрессора имеет наибольшее значение. При $\bar{L}_{BC} > L_{PE3}$ (рис. 2, в) момент достижения максимального давления в волновом процессе происходит с отставанием на 90° от момента нахождения поршня в мертвой точке. Условия наполнения цилиндра газом здесь иные и это обстоятельство отражается на работе всасывающих клапанов, а также на производительности и удельных затратах энергии на компримирование газов [6–9].

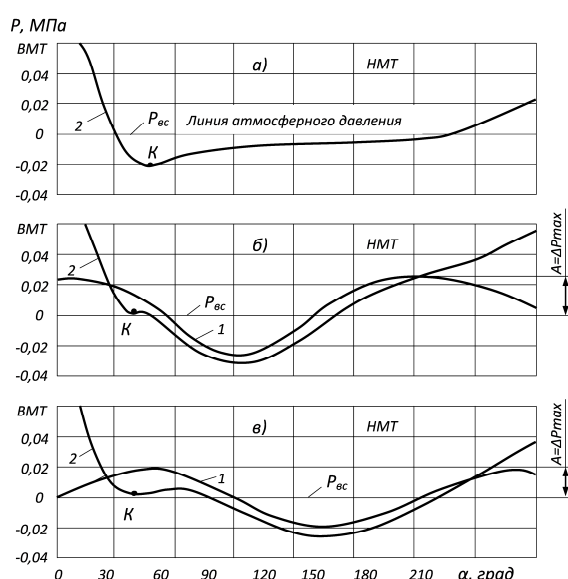


Рисунок 2 Циклограммы резонансных колебаний давления воздуха во всасывающем патрубке (1) и индикаторные диаграммы 1-й ступени (2) компрессора ВП-50/8М, развернутые по углу α поворота кривошипа:

а) $\bar{L}_{ec} = 0$; б) $\bar{L}_{ec} = 1$; в) $\bar{L}_{ec} = 1,15$

(т. К — момент открытия всасывающего клапана)

С учетом результатов исследований [11] коэффициент подачи поршневого компрессора при наличии резонансных колебаний давления во всасывающей системе может быть определен по формуле:

$$\lambda = \frac{Q}{Q_T} = \lambda_0 \lambda_P \lambda_T = \lambda_0 (\lambda_{P1} + \lambda_{P2}) \lambda_{T1} \cdot \lambda_{T2} \cdot \lambda_{T3}, \quad (2)$$

где Q — действительная производительность компрессора, $\text{м}^3/\text{мин}$; Q_T — производительность идеального (теоретического) компрессора [3], $\text{м}^3/\text{мин}$; λ_0 — объемный коэффициент, учитывающий уменьшение действительной производительности компрессора из-за расширения газа, оставшегося после нагнетания во вредном пространстве; $\lambda_P = \lambda_{P1} + \lambda_{P2}$ — коэффициент давления, учитывающий уменьшение производительности за счет падения давления в цилиндре в результате дросселирования газа через всасывающие клапаны (λ_{P1}) и влияния колебания давления во всасывающем патрубке (λ_{P2}); $\lambda_T = \lambda_{T1} \cdot \lambda_{T2} \cdot \lambda_{T3}$ — тепловой коэффициент, учитывающий уменьшение массы газа из-за повышения его температуры за счет теплообмена между горячими стенками цилиндра и всасываемым газом (λ_{T1}), за счет дросселирования газа при прохождении его через всасывающие клапаны (λ_{T2}) и за счет адиабатического сжатия газа в волне колебательного процесса, совпадающего по фазе с моментом прихода поршня в мертвую точку (λ_{T3}).

Коэффициенты влажности и плотности для упрощения приняты $\lambda_{BL} = 1$; $\lambda_{PL} = 1$ [3].

Для сравнения показателей введем относительные безразмерные величины. Тогда зависимости будут носить типовой характер.

1. Относительная длина всасывающего трубопровода:

$$\bar{L}_{BC} = \frac{L_{BC}}{L_{PE3}}, \quad (3)$$

где \bar{L}_{BC} — длина всасывающего трубопровода, м; L_{PE3} — оптимальная резонансная длина, при которой зафиксирована максимальная производительность компрессора, м (определяется опытным путем).

По относительной длине всасывающие трубопроводы различаются по зонам: дорезонансная зона, когда $\bar{L}_{BC} < 1$; резонансная зона $\bar{L}_{BC} = 0,9...1,15$; зарезонансная зона $\bar{L}_{BC} > 1,1$. Как показано в работе [7], влияние этих зон на наполнение цилиндра газом и эффективность интенсификации различно.

2. Относительная производительность (в %):

$$\bar{Q} = \frac{Q}{Q_0} \cdot 100, \% \quad (4)$$

где Q — действительная производительность компрессора со всасывающим трубопроводом с относительной длиной \bar{L}_{BC} , м³/мин; Q_0 — действительная производительность компрессора при начальной длине всасывающего трубопровода ($\bar{L}_{BC} = 0$), м³/мин.

3. Степень сжатия газа во всасывающем трубопроводе в процессе резонансных колебаний давления в нем по второй гармонике [8] определяется по формуле:

$$\varepsilon_{TP} = \frac{P_1}{P_{BC}} = \frac{P_{BC} + A}{P_{BC}} = 1 + \frac{A}{P_{BC}}, \quad (5)$$

где P_{BC} — номинальное давление газа во всасывающем трубопроводе, равное атмосферному давлению, Па; P_1 — абсолютное максимальное давление газа в трубопроводе при волновом процессе, Па; A — амплитуда колебания давления, определяемая по циклограмме давления в трубопроводе, Па.

Используя формулы для определения λ_0 , λ_P , λ_{T1} , λ_{T2} , λ_{T3} , λ_T в зависимости от ε_{TP} и β_A [9–11] и подставляя их в формулу (2), получим формулу для определения коэффициента подачи поршневого компрессора в режиме резонансной интенсификации его работы:

$$\lambda = \left\{ 1 - a_1 \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{TP}^{\frac{1}{n_1}} \cdot \frac{T_X}{T_{BC}} \right]^{\frac{1}{n_1}} - 1 \right\} \times \\ \times \left[(1,4...1,3) \cdot \varepsilon_{TP}^{0,667} - \varepsilon_{TP} \beta_A - (0,4...0,3) \right] \times \\ \times \left[1 - \frac{0,06}{\left(D_1 \cdot \rho_{BC} \cdot \varepsilon_{TP}^{\frac{1}{k}} \cdot C_P \right)^{0,2}} \cdot \left(\frac{S}{D_1} + 1 \right) \cdot \left(\varepsilon^{\frac{k-1}{k}} \right) \right] \times \\ \times \left[1 - \frac{k-1}{k} \cdot \frac{\beta_A \cdot (4 - \varepsilon_{TP}) - (\varepsilon_{TP} - 1)}{3 \cdot \varepsilon_{TP}^{\frac{1}{k}} \cdot (1 + \beta_A)} \right] \cdot \left(2 - \varepsilon_{TP}^{\frac{k-1}{k}} \right), \quad (6)$$

где a_1 — относительное вредное пространство цилиндра первой ступени;

$\varepsilon_0 = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2$ — относительное повышение

давления в цилиндре при условии полного охлаждения газа в промежуточном холодильнике ($T_X = T_{BC}$); D_1 и D_2 — диаметры цилиндров первой и второй ступени; T_X — абсолютная температура газа в С.Т.В. (°K) второй ступени; T_{BC} — абсолютная температура газа в С.Т.В. первой ступени; β_A — относительная потеря давления во всасывающих клапанах; ρ_{BC} — плотность всасываемого газа, кг/м³; C_P — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$; S — ход поршня,

м; ε — относительное повышение давления в цилиндре первой ступени; k — показатель адиабаты; n_1 — показатель политропы.

В качестве примера выполним расчет коэффициентов λ_0 , λ_P , λ_{T1} , λ_{T2} , λ_{T3} и λ для компрессора ВП-50/8М в зависимости от степени сжатия ε_{TP} и относительной длины всасывающего трубопровода \bar{L}_{BC} при использовании прямооточных клапанов.

На рисунке 3 показаны графические зависимости функций $\lambda_0 = f(\varepsilon_{TP})$, $\lambda_p = f(\varepsilon_{TP})$, $\lambda_{T1} = f(\varepsilon_{TP})$, $\lambda_{T2} = f(\varepsilon_{TP})$, $\lambda_{T3} = f(\varepsilon_{TP})$, $\lambda_T = f(\varepsilon_{TP})$, $\lambda = f(\varepsilon_{TP})$ для компрессора ВП-50/8М, из поведения которых видно, что наибольшее изменение при возрастании амплитуды колебаний давления газа во всасывающем трубопроводе и степени сжатия ε_{TP} претерпевают два коэффициента: коэффициент давления λ_p (он увеличивается со значения 0,98 до 1,3 при изменении ε_{TP} от 1 до 1,4) и тепловой коэффициент λ_{T3} (его значение уменьшается на 10 % при увеличении ε_{TP} от 1 до 1,4).

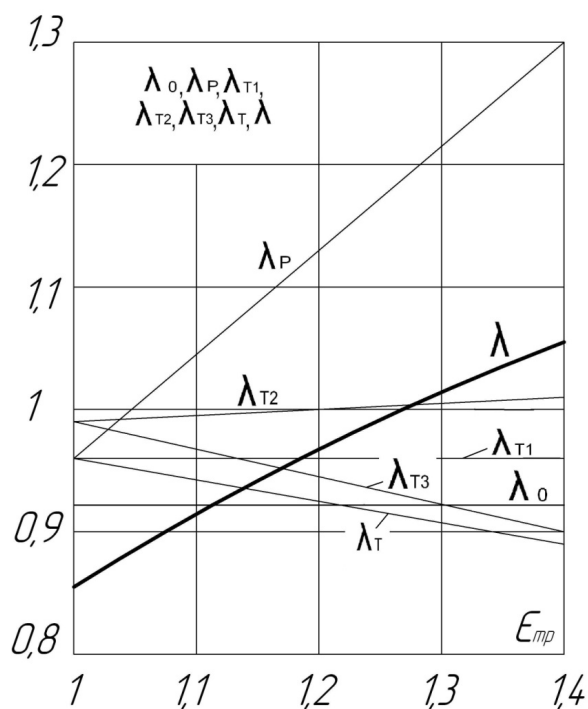


Рисунок 3 Зависимости объемного коэффициента λ_0 , коэффициента давления λ_p , тепловых коэффициентов λ_{T1} , λ_{T2} , λ_{T3} , λ_T и коэффициента подачи λ компрессора ВП-50/8М от степени сжатия воздуха ε_{TP} во всасывающем трубопроводе (клапаны прямооточные типа ПИК)

Как и следовало ожидать [11], значения коэффициентов λ_0 , λ_{T1} , λ_{T2} остаются практически без изменения. В силу этого обстоятельства результирующий тепловой коэффициент λ_T при увеличении ε_{TP} уменьшается пропорционально тепловому коэффициенту λ_{T3} .

В конечном итоге влияние тепловых факторов приводит к снижению коэффициента подачи λ и, следовательно, к уменьшению эффективности резонансной интенсификации компрессора по сравнению с максимально возможной.

Наибольшую информацию о поведении рассматриваемых коэффициентов и изменении производительности могут дать зависимости этих величин от относительной длины всасывающего трубопровода \bar{L}_{BC} , т. е. зависимости $\lambda_{01} = f(\bar{L}_{BC})$; $\lambda_p = f(\bar{L}_{BC})$; $\lambda_T = f(\bar{L}_{BC})$; $\lambda = f(\bar{L}_{BC})$; $\bar{Q} = f(\bar{L}_{BC})$; $Q = f(\bar{L}_{BC})$.

На рисунке 4 представлены кривые изменения коэффициентов λ_0 , λ_p , λ_{T1} , λ_{T2} , λ_{T3} , λ_T и λ для компрессора ВП-50/8М с прямооточными клапанами ($\beta_A = 0,04$) в зависимости от относительной длины всасывающего трубопровода (\bar{L}_{BC}).

Как видно, наибольшее изменение при переходе всасывающей системы из дорезонансной зоны ($\bar{L}_{BC} < 1$) в зарезонансную ($\bar{L}_{BC} > 1$) имеет место для коэффициента давления λ_p и третьего теплового коэффициента λ_{T3} и связанных с ними результирующего теплового коэффициента λ_T и коэффициента подачи λ , отражающего влияние всех рассматриваемых факторов на производительность компрессора. Коэффициент подачи λ , как видно из рисунка 4, изменяется в пределах 0,86...1, достигая максимального значения при ($\bar{L}_{BC} = 1$). Если принять значение λ при

$\bar{L}_{BC} = 0$ за 100 %, то повышение коэффициента подачи при $L_{BC} = L_{PE3}$ составит, как показано выше, 16,3 %.

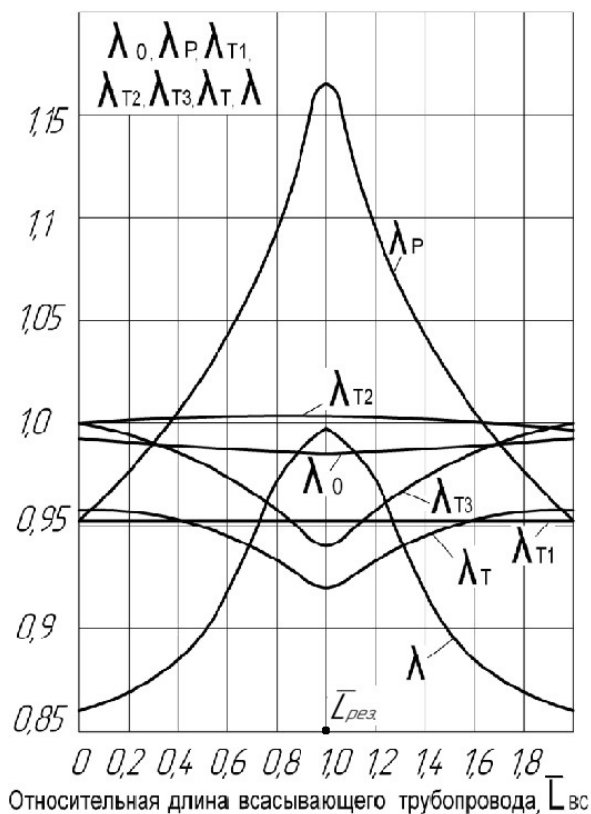


Рисунок 4 Зависимости объемного коэффициента λ_0 , коэффициента давления λ_P , тепловых коэффициентов λ_{T1} , λ_{T2} , λ_{T3} , λ_T коэффициента подачи λ компрессора ВП-50/8М от относительной длины всасывающего трубопровода \bar{L}_{BC} (клапаны прямоточные типа ПИК)

Этот результат совпадает с экспериментальными данными, полученными при испытании компрессора ВП-50/8М на стенде завода-изготовителя [6].

В работе [9] получены эмпирические экспоненциальные зависимости степени повышения давления во всасывающем трубопроводе ε_{TP} от его относительной длины \bar{L}_{BC} для различных по конструкции всасывающих клапанов. Форма этих зависимостей для всех конструкций клапанов,

независимо от типа компрессора, имеет одинаковый вид, выражаемый формулой:

$$\varepsilon_{TP} = 1 + B \cdot \exp \left[-C (\bar{L}_{BC} - 1)^2 \right], \quad (7)$$

где B и C — опытные коэффициенты, значения которых определяются в зависимости от конструкции и сопротивления всасывающих клапанов: а) прямоточные клапаны: $B = 0,247$; $C = 5,37$; б) кольцевые клапаны: $B = 0,204$; $C = 9,43$; в) тарельчатые клапаны: $B = 0,162$; $C = 13,6$.

Действительная производительность компрессора на основании формулы (2) равна:

$$Q = Q_T \cdot \lambda = V_n \cdot n \cdot \lambda, \text{ м}^3/\text{мин}, \quad (8)$$

где V_n — объем, описываемый поршнем цилиндра первой ступени за один ход, м^3 ; n — частота вращения коленчатого вала, $\text{об}/\text{мин}$.

Для наиболее часто применяемых на практике компрессоров с цилиндрами двойного действия формула (8) имеет вид [11]:

$$\begin{aligned} Q &= i \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot S \cdot \left(1 - \frac{z \cdot d_{ш}^2}{i \cdot D_1^2} \right) \cdot \lambda \cdot n = \\ &= i \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot S \cdot \xi \cdot \lambda \cdot n, \quad \text{м}^3/\text{мин}, \end{aligned} \quad (9)$$

где i — число рабочих полостей первой ступени; $d_{ш}$ — диаметр штока, м ; z — число рабочих полостей первой ступени, в которых имеется шток; $\xi = \left(1 - \frac{k \cdot d_{ш}^2}{i \cdot D_1^2} \right)$ — коэффициент, учитывающий уменьшение рабочего объема полости при наличии штока.

Подставляя в формулу (9) значение коэффициента подачи, определяемого уравнением (6), с учетом зависимости (7), получим уравнение резонансной характеристики поршневого компрессора, устанавливающее связь между производительно-

стью компрессора и относительной длиной всасывающего трубопровода в пределах изменения её от $\bar{L}_{BC} = 0$ до $\bar{L}_{BC} \gg 1$ и сопротивлением всасывающих клапанов (β_A), т. е.

$$Q = i \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} \cdot S \cdot \xi \cdot \left\{ 1 - a_1 \cdot \left[\varepsilon_0 \cdot (1+y)^{\frac{1}{k}} \cdot \frac{T_X}{T_{BC}} \right]^{\frac{1}{n1}} - 1 \right\} \times \\ \times \left[(1,4 \dots 1,3) \cdot (1+y)^{0,667} - \beta_A \cdot (1+y) - (0,4 \dots 0,3) \right] \times \\ \times \left[1 - \frac{0,06}{\left[D_1 \cdot \rho_{BC} \cdot (1+y)^{\frac{1}{k}} \cdot C_P \right]^{0,2}} \cdot \left(\frac{S}{D_1} + 1 \right) \cdot \left(\varepsilon^{\frac{k-1}{k}} \right) \right] \times \quad (10) \\ \times \left[1 - \frac{k-1}{k} \cdot \frac{3 \cdot \beta_A - y \cdot (1+\beta_A)}{3 \cdot (1+y)^{\frac{1}{k}} \cdot (1+\beta_A)} \right] \times \\ \times \left[2 - (1+y)^{\frac{k-1}{k}} \right] \cdot n, \quad \text{м}^3/\text{мин},$$

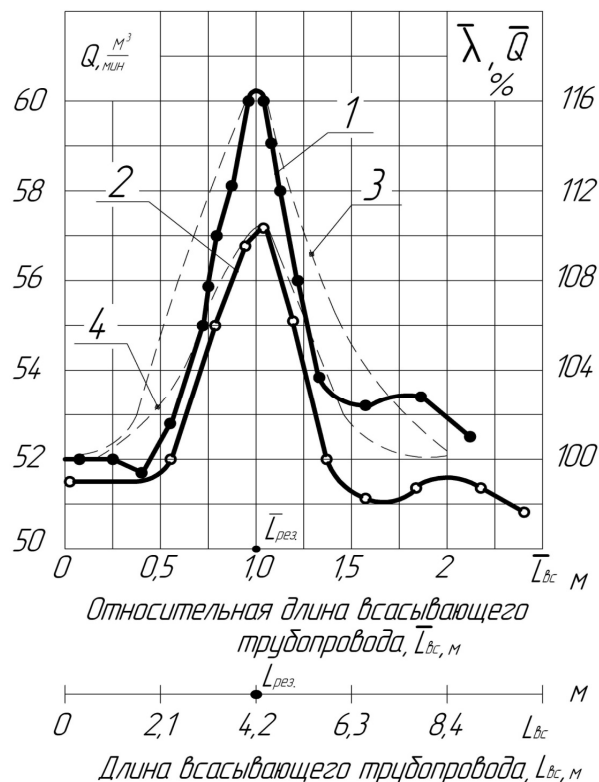
где

$$y = B \cdot \exp \left[-C \left(\bar{L}_{BC} - 1 \right)^2 \right].$$

На рисунке 5 приведены экспериментальные и теоретические зависимости производительности компрессора ВП-50/8М, отражающие влияние резонансных явлений во всасывающей системе на наполнение цилиндра газом. Их можно назвать резонансными характеристиками поршневого компрессора, позволяющими выбрать наиболее рациональный режим работы.

Построенные в относительных координатах $\bar{Q} - \bar{L}_{BC}$, зависимости имеют типовой характер и могут быть использованы как на стадии проектирования [5], так и в конкретных условиях эксплуатации. Как видно, теоретические зависимости $\bar{\lambda} = f(\bar{L}_{BC})$, совпадающие с зависимостями $\bar{Q} = f(\bar{L}_{BC})$ (кривые 3 и 4), имеют практически одинаковую форму с экспериментальными кривыми (1 и 2) и дают одинаковые результаты эффективности

интенсификации при резонансе колебаний давления газа при ($\bar{L}_{BC} = 1$).



Обозначения: 1 и 3 — прямоточные клапаны типа ПИК; 2 и 4 — кольцевые клапаны 10К-180

Рисунок 5 Экспериментальные зависимости производительности $Q = f(L_{BC})$ от длины всасывающего трубопровода (кривые 1 и 2) и теоретические зависимости относительного коэффициента подачи $\bar{\lambda} = f(\bar{L}_{BC})$ и относительной производительности $\bar{Q} = f(\bar{L}_{BC})$ от относительной длины всасывающего трубопровода (кривые 3 и 4) компрессора ВП-50/8М. (Резонансные характеристики компрессора ВП-50/8М)

Выводы и направление дальнейших исследований.

Получены аналитические зависимости для определения коэффициента подачи и его составляющих коэффициентов, а также уравнение для определения действительной производительности поршневых компрессоров с цилиндрами двухстороннего

действия в первой ступени (а именно такие имеют наибольшее распространение в промышленности), позволяющие оценить эффективность интенсификации их работы путем использования резонансных колебаний давления газа во всасывающей системе. Они могут быть применены как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации компрессорных машин.

Экспериментальные исследования, выполненные на компрессоре ВП-50/8М и ряде других машин [9], подтвердили результаты теоретического анализа. Полученные аналитические и экспериментальные характеристики производительности поршневых компрессоров при резонансной интенсификации их работы, наряду с температурными характеристиками [10], дают возможность изготовителям и потребителям компрессорных машин выбирать

оптимальные режимы работы исходя из конкретных условий их эксплуатации. Поэтому представляется необходимым получение таких характеристик для вновь создаваемых компрессорных машин и включение их в техническую документацию компрессора, как это имеет место применительно к машинам динамического действия. Кроме зависимостей $\bar{Q} = f(\bar{L}_{BC})$, следует определять характеристики относительной индикаторной мощности $\bar{N}_i = f(\bar{L}_{BC})$ и относительной удельной мощности $n_{уд} = f(\bar{L}_{BC})$, что даст возможность всесторонне оценить влияние резонансной интенсификации на все технико-экономические показатели поршневых компрессоров.

Библиографический список

1. Боднер, В. А. Повышение мощности двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В. А. Боднер // Двиглестроение. — 1939. — № 9. — С. 17–22; №10–11. — С. 29–30.
2. Френкель, М. И. Поршневые компрессоры [Текст] / М. И. Френкель. — М. : Машиностроение, 1969. — 742с.
3. Пластинин, П. И. Поршневые компрессоры. Том I. Теория и расчет [Текст] / П. И. Пластинин. — М. : Колос, 2000. — 456 с.
4. Видякин, Ю. А. Колебания и вибрации в поршневых компрессорах [Текст] / Ю. А. Видякин, Т. Ф. Кондратьева, Ф. П. Петрова, А. Г. Платонов. — Л. : Машиностроение, 1972. — 224 с.
5. Гринь, Н. П. Поршневые воздушные компрессорные машины нового поколения для ВРУ, реализующих циклы среднего и высокого давления [Текст] / Н. П. Гринь, Ю. Б. Наталуха, А. В. Смирнов // Технические газы. — 2009. — № 6. — С. 26–30.
6. Гогин, Ю. Н. Оптимальные режимы работы поршневых компрессоров [Текст] / Ю. Н. Гогин, Ю. А. Рутковский, М. Г. Усачев // Вестник машиностроения. — 1967. — № 11. — С. 47–50.
7. Рутковский, Ю. А. Интенсификация работы оппозитных поршневых компрессоров акустическим наддувом [Текст] / Ю. А. Рутковский // Сборник трудов 13-й межд. научно-практической конференции по компрессоростроению. — Сумы : Изд-во СумГУ, 2004. — Т 2. — С. 101–106.
8. Рутковский, Ю. А. Резонансные волновые процессы во всасывающих системах поршневых компрессоров [Текст] / Ю. А. Рутковский // Технические газы. — 2010. — № 2. — С. 23–32.
9. Рутковский, Ю. А. Производительность поршневых компрессоров при использовании резонансного наддува [Текст] / Ю. А. Рутковский // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2008–2009. — № 4(14), № 1(15). — С. 38–47.
10. Рутковский, Ю. А. Тепловые процессы и температурные характеристики поршневых компрессоров при наличии резонансных колебаний давления газа во всасывающей системе [Текст] / Ю. А. Рутковский // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2009. — № 4(18). — С. 44–49.

11. Рутковский, Ю. А. Коэффициент подачи и производительность поршневого компрессора в условиях резонансной интенсификации его работы [Текст] / Ю. А. Рутковский // Компрессорное и энергетическое машиностроение. — 2010. — № 1(19). — С. 41–47.

© Рутковский Ю. А.

© Рутковский А. Ю.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТУ Литвинским Г. Г.,
нач. ЦЛАМ ПАО «АМК» Мирошниченко А. В.*

Статья поступила в редакцию 03.10.17.

к.т.н. Рутковский Ю. О., к.т.н. Рутковский О. Ю. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

РЕЗОНАНСНІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРШНЕВИХ КОМПРЕСОРІВ

Наведено результати експериментальних досліджень впливу коливань тиску газу у всмоктувальній системі поршневого компресора на основні параметри його роботи. Показано вплив резонансних явищ в газових комунікаціях компресора з циліндрами подвійної дії на режими і економічність роботи поршневих компресорів в промислових умовах їх експлуатації. Отримано аналітичні розрахункові залежності впливу коливань тиску газу на продуктивність, потужність і питому витрату енергії.

Ключові слова: поршневий компресор, експериментальні дослідження, коливання тиску газу, резонансні явища, усмоктувальна система.

PhD Rutkovskyi Yu. A., PhD Rutkovskyi A. Yu. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

RESONANT OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF PISTON COMPRESSOR

The results of experimental studies on the influence of gas pressure fluctuations in the suction system of a piston compressor on the main parameters of its operation are presented. There has been shown the influence of resonant phenomena in gas compressor communications with double-acting cylinders on the modes and efficiency of piston compressor operation in their industrial operational conditions. Analytical calculated dependences of the effect of gas pressure fluctuations on productivity, power and specific energy consumption are obtained.

Key words: piston compressor, experimental studies, gas-pressure fluctuations, resonance phenomena, suction system.

УДК 555.43+553.41:902

к.г.н. Шубин Ю. П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, u0502823920@yandex.ru)

ГЕОАРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ДОНБАССКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Рассматривается становление в стенах Донбасского государственного технического университета коллектива учёных, которые исследовали древние медные рудники Донбасса. На базе геоархеологических исследований была выполнена реконструкция производственной деятельности, приведены проблемы, возникшие в процессе выполнения работ, дискуссии и способы их решения. Дана оценка роли Донецкого горно-металлургического центра эпохи поздней бронзы в Днепро-Донском регионе, разработан понятийный аппарат, а также апробированы методы геоархеологии, подобран оптимальный комплекс методов исследования вещественных свидетельств производственной деятельности применительно к исследованиям подобного рода объектов, первоочередными из которых нам видятся древние серебряные рудники серебряно-полиметаллических месторождений Нагольного кряжа Донбасса.

Ключевые слова: геоархеология, горно-металлургический центр, производственная деятельность, медные руды, терминология геоархеологии, методы геоархеологии.

Вторая половина XX века в мире ознаменовалась началом масштабных и систематических археологических исследований объектов древнего горнорудного производства, а также сопровождающей его металлургической и металлообрабатывающей деятельности. В связи с этим сформировалось новое научное направление – геоархеология. Термин «геоархеология» впервые ввели Д. Девидсон и М. Шекли 40 лет назад для исследований, направленных на изучение археологических объектов геологическими, минералого-геохимическими, геофизическими и другими методами [1]. На территории Луганщины первые попытки сотрудничества археологов и геологов предпринимались в начале 70-х годов в связи с попыткой определения возраста древних разработок серебряных руд в пределах Берёзовского серебряно-полиметаллического месторождения Нагольного кряжа [2], а также в пределах древних разработок медных руд на семи рудопроявлениях меди Бахмутской котловины Донбасса [3, 4]. Масштабные геологические и археологические исследования того периода позволили начать взаимодействовать археологам и геологам. Последнее сводилось к тому, что археологи пользовались

результатами проводимых геологических исследований территорий, а само сотрудничество носило во многом формальный характер, ссылки на результаты геологических исследований зачастую использовались просто как констатация факта, должного анализа полученной геологической информации полевых исследований при этом не производилось.

С 90-х годов XX века на территории России (Каргалы, Оренбуржье) и с начала XXI века на территории Донбасса были сформированы комплексные экспедиции с участием специалистов разного профиля в связи с масштабными археологическими исследованиями памятников древней горно-металлургической деятельности. Коллектив специалистов в Донбассе сформировался на базе Донбасского государственного технического университета в связи с проводимыми в период 2001–2010 гг. полевыми геологическими практиками в Попаснянском районе Луганской области (с. Новозвановка), а также выполняемыми в течение этого периода госбюджетными научно-исследовательскими работами. Археологию представлял Бровендер Ю.М., металлургию — Дрофеев В.Н., металлове-

дение — Коваленко О.А., горное дело — Гайко Г.И., геологию — Шубин Ю.П. Кроме того, существенное участие в научных исследованиях приняли приезжие археологи: Пряхин А.Д. (г. Воронеж), Саврасов А.С. (г. Воронеж), Черных Л.А. (г. Киев), Отрощенко В.В. (г. Киев), Никитенко И.С. (г. Днепропетровск). Интересным фактом явилось то, что Никитенко И.С., принявший участие в полевых исследованиях последних лет в пределах Картамышского археологического микро-района, получил два высших образования: сначала историческое, а затем — геологическое. Такой вариант подготовки специалистов в области междисциплинарных геологических исследований видится особенно перспективным. Без сомнения, именно примеры эффективного решения геoarхеологических задач коллективом специалистов ДонГТУ (г. Алчевск) побудили заинтересованных лиц к такой двух-этапной подготовке специалистов в области геoarхеологии.

Ежегодные международные полевые археологические семинары, постоянные беседы, дискуссии в период полевых исследований стимулировали обмен опытом, знаниями и своим индивидуальным видением проблем, задач и методов их решения каждым из членов творческого коллектива. Особенно примечательной была дискуссия на расширенном полевом Картамышском археологическом семинаре в 2003 г., где широко были представлены учёные Испании, Германии, США и России. Первый вопрос был посвящён вещественному составу исходных медных руд, которые использовались в эпоху поздней бронзы (дискуссия велась с испанским учёным, археологом-экспериментатором в области древнего медеплавильного производства Сальвадором Ровирой). Международная команда учёных, исследовавших Каргалинские рудники Южного Урала считали, что основными минералами медных руд, которыми пользовались древние

люди, были продукты окисления сульфидных руд (малахит, азурит, тенорит). Нами была показана невозможность формирования концентрированных скоплений окисных медных руд как на Картамышском рудопроявлении меди, так и на меднорудных месторождениях формации медистых песчаников в целом. Окисленные медные руды при этом могли играть второстепенную роль. Как известно, значительные скопления окисленных медных руд характерны для медноколчеданных месторождений. Сделанные выводы позволили корректно подойти в дальнейшем к отбору меднорудного материала как для реконструкции технологического процесса медеплавильного производства на древних медных рудниках Бахмутской котловины Донбасса, так и для объектов эпохи поздней бронзы в целом, поскольку в это время разрабатывались в основном руды одного генетического типа — формации медистых песчаников. Вторым дискуссионным вопросом был вопрос о масштабности и значении Донецкого горно-металлургического центра (дискуссия велась с археологом, специализирующимся в области древней металлургии и палеометалловедения Черных Е.Н.). Скудная фактологическая база на то время не позволяла дать однозначного ответа на этот вопрос. Но в дальнейшем были установлены пути импорта (из Поднепровья и Приазовья) каменных орудий металлообрабатывающего цикла, сложенных магматическими и метаморфическими горными породами, отсутствующими на Донбассе. Так, по результатам исследований Никитенко И.С. литейные формы были изготовлены из хлорит-талъковой породы, песты — из пироксенита, песчаника и метадолерита, тёрочник — из хлорит-кварцевого диафторита [5]. Установлен западный и южный вектор товарообменной деятельности, а изучение вещественного состава медных руд и продуктов их металлургического передела позволили выявить северный вектор товарообменной деятельности (Среднее Подонье, Мосоловское по-

селение). Таким образом, был выявлен Доно-Донецкий ареал распространения меднорудной продукции, подтверждающий уровень значимости Донецкого горно-металлургического центра эпохи поздней бронзы, базировавшегося, по крайней мере, на меднорудном сырье семи рудопроявлений медных руд восточного замыкания Бахмутской котловины Донбасса. Тем не менее, российские учёные указывают на незначительный, местный уровень роли Донецкого горно-металлургического центра, базировавшегося на единичных эпизодах пребывания их здесь ещё во второй половине XX века [10].

На первом этапе геоархеологических исследований нами был охарактеризован вещественный состав медных руд и вмещающих пород, их структуры и текстуры, установлен спектр и уровни содержания примесных химических элементов в мономинеральных фракциях меднорудных минералов с привлечением оптической микроскопии, химического, спектрального эмиссионного и рентгеноспектральных анализов. Были изучены геологические условия залегания тел полезных ископаемых на основании анализа результатов проведённых здесь ранее поисково-разведочных работ (фондовых материалов Донецкой геологоразведочной экспедиции). Полученные результаты послужили в дальнейшем основой для реконструкции горных работ, обогащения медных руд и подготовки меднорудного концентрата для экспериментальных плавок меди с целью реконструкции металлургического передела. Кроме того, геологические исследования явились основой для полевых обследований территорий меднорудных проявлений и точек минерализации восточного замыкания Бахмутской котловины Донбасса (2002–2005 гг.) на предмет сбора образцов медных руд, выявления следов горно-металлургической деятельности и бытовых памятников эпохи поздней бронзы — поселений древних горняков-металлургов. Обследованные меднорудные объекты бы-

ли оценены на предмет наличия благоприятных общегеологических предпосылок, которые позволили им быть пригодными для отработки древними горняками-металлургами. Прежде всего, благоприятными для отработки могли быть объекты с наличием тел богатых медных руд, не требующих значительных усилий на отделение рудных скоплений (конкреции, псевдоморфозы по древесным остаткам) от пустой вмещающей горной породы. Как правило, рудные объекты с высокой концентрацией полезного компонента характеризуются незначительными суммарными запасами (чем выше качество руд, тем меньше их суммарные запасы). Крепость вмещающих горных пород должна быть невысокой, чтобы обеспечить эффективную проходку горных выработок и добычу полезного ископаемого с использованием каменных орудий (молоты, мотыги, клинья). На Картамышском рудопроявлении меди песчано-алевритовые горные породы меденосных «серых» зон в приповерхностной части непрочные, часто на карбонатном цементе, интенсивно выветренные, с выщелоченными карбонатами вплоть до образования рыхлых песчано-алевритовых масс. При этом угол падения рудных тел определял способ их отработки.

Свидетельства отработки медных руд на рудопроявлениях Клиновое, Кислый Бугор, Медная руда были использованы для сравнительного анализа с такими материалами детально изученного Картамышского проявления медных руд, что затем оказалось существенным для формирования представлений о масштабности горно-металлургической деятельности в пределах Донецкого горно-металлургического центра в целом.

На втором этапе геоархеологических исследований (2005–2010 гг.) выполнялись экспериментальные работы по выплавке меди с применением материалов и технологий прошлого. Продукты удачных плавок медных руд (шлак, штейн, невосстановленный переплавленный сульфид меди

(халькозин), сам слиток меди черновой плавки) подвергались затем тщательным исследованиям. В первую очередь давалась макроскопическая характеристика этих продуктов: цвет, мощность слоёв, характер их контактов с соседними слоями, структурно-текстурные особенности, степень насыщенности инородными включениями. Затем информация уточнялась благодаря микроскопическим наблюдениям. Для более детальных исследований включений интересующих фаз они на прозрачно-полированных шлифах и аншлифах обводились и подвергались микрозондовым исследованиям. Фазовый состав минеральных и расплавных включений-индикаторов условий металлургического передела, а также состава исходных руд наряду с реликтовыми включениями исходных руд явились основой для очерчивания ареала распространения меднорудного сырья на прилегающих территориях Северского Донца и Среднего Дона. Последнее, безусловно, свидетельствует о значении и масштабности Донецкого горно-металлургического центра в эпоху поздней бронзы. Теплотехнические сооружения изготавливались в соответствии с остатками металлургических печей, вскрытых в результате проведения археологических раскопок на объекте Червонэ Озеро-3 (всего было вскрыто пять древних медеплавильных печей). Выплавка меди в то время велась в специально изготовленных для металлургического передела глиняных чашах, подобных тем, многочисленные фрагменты ошлакованных фрагментов которых были широко представлены в районе развалов древних металлургических печей. Сравнительный анализ продуктов металлургического производства экспериментальных плавов и поднятых археологических свидетельств древней металлургии позволил сделать вывод о большом сходстве результатов, а значит, о достоверной реконструкции как самого металлургического передела, так и используемых в то время меднорудных концен-

тратов. Полученные нами в результате экспериментальных плавов медных руд слитки меди черновой плавки достигли 100–150 грамм, что свидетельствует об эффективности применяемого по старым технологиям металлургического процесса. Изучение морфологии и вещественного состава древних литейных форм производственных зон Картамышского археологического микрорайона позволили установить вид изготавливаемых металлических изделий, а также сырьевую базу для изготовления литейных форм. Металлографические исследования изделий из металла в пределах медных рудников (шилья, иглы) позволили произвести реконструкцию процесса металлообработки (закалка, проковка) [6]. Параллельно с этим изучение продуктов металлургического цикла было также направлено на наблюдение перераспределения примесных химических элементов по продуктам металлургического производства для того, чтобы установить связь с составом исходного минерального сырья, а также для выяснения технологических этапов металлургического процесса (черновая, чистовая плавки, использование флюсов, легирование, применение металлического лома).

На трёх участках Картамышского рудопроявления, соответствующих трём кулисообразно смещённым рудоносным зонам, были обнаружены древние породные отвалы — свидетельства добычи медных руд. Для оценки объёмов горной массы на трёх отвалах были пройдены шурфы до уровня погребённых палеопочв. Исходя из морфологии, условий залегания и содержаний меди «серых» зон по результатам ранее проведенных в этом районе геологических исследований, а также благодаря измерению объёмов горной массы в породных отвалах нами в 2009 г. было предварительно оценено возможное количество меди, добытой в древности суммарно на трёх объектах разработки [7].

В процессе проведения детальных геоархеологических исследований примени-

тельно к объектам древней горно-металлургической деятельности на Донбассе возникла необходимость разработки единой терминологии, единого понятийного аппарата для возможности обобщения, сопоставления и анализа их результатов. Нами предприняты попытки создания такой терминологии применительно к исследованиям в области горной археологии объектов горно-металлургической деятельности эпохи поздней бронзы [8].

Многолетние исследования показали также на необходимость отработки методики геоархеологических исследований применительно к изучаемым объектам. Методика исследований таких памятников обычно включает, прежде всего, методы геоархеологии (геохимия, минералогия, петрография, минераграфия, аналитика, региональная и историческая геология, вулканология, гидрогеология, геоморфология, геофизика, учение о полезных ископаемых) [1], классические, в основном естественнонаучные методы, давно применяемые археологами (типологический анализ изделий, стратиграфический, палеозоологический, палеоботанический, палеоанатомический, радиоуглеродный анализ), а также методы по моделированию технологии производственного про-

цесса (горнопроходческого, обогащительного, металлургического, строительного и металлообрабатывающего), строительства жилых и производственных сооружений. Реконструкция технологических процессов основана на их экспериментальном моделировании с последующим сопоставлением результатов выполненных экспериментов с археологическими свидетельствами древних технологий [9].

Таким образом, многолетние геоархеологические исследования, проведенные коллективом учёных Донбасского государственного технического университета, позволили, с одной стороны, исследовать древние горно-металлургические объекты Донбасса по добыче, обогащению и выплавке медных руд, оценить роль Донецкого горно-металлургического центра в производственной деятельности прошлого, а с другой – сформировать понятийный аппарат, терминологию и отработать методику геоархеологических исследований, которую в дальнейшем рекомендуется применять на подобного рода объектах, первоочередным из которых видятся древние (средняя бронза?) серебряные рудники Берёзовского серебряно-полиметаллического месторождения Нагольного кряжа Донбасса.

Библиографический список

1. Зайков, В. В. Основы геоархеологии [Текст] / В. В. Зайков, А. М. Юминов, Е. В. Зайкова, А. Д. Таиров. — Челябинск : Издательский центр ЮУрГУ, 2011. — 263 с.
2. Гладкий, М. И. Исследования на Луганищине [Текст] / М. И. Гладкий, И. А. Писларий, А. А. Кротова // Археологические открытия 1974 г. — М., 1975. — С. 266–268.
3. Татарinov, С. И. Древние горняки-металлурги [Текст] / С. И. Татарinov. — Славянск : Печатный двор, 2003. — 131 с.
4. Татарinov, С. И. Древний металл Восточной Украины. Очерки истории горного дела, металлургии и металлообработки в эпоху бронзы [Текст] / С. И. Татарinov. — Артемовск, 1993. — 153 с.
5. Нікітенко, І. С. Про матеріали кам'яних знарядь Картамиського археологічного мікрорайону епохи бронзи, виготовлених з привозної сировини [Текст] / І. С. Нікітенко // Науковий вісник НГУ. — 2010. — вип. 9–10. — С. 5–9.
6. Бровендер, Ю. М. Металл поселения срубной общности Червонэ озеро-3 в Центральном Донбассе [Текст] / Ю. М. Бровендер, О. А. Коваленко. — Дніпропетровськ : Вид-во Дніпр. ун-ту, 2009. — С. 75–79.
7. Бровендер, Ю. М. Определение объёмов горных работ и оценка добычи медных руд на древних разработках Картамышского рудопроявления Донбасса [Текст] / Ю. М. Бровендер, Г. И. Гайко, Ю. П. Шубин // МДАСУ. — Луганськ : Вид-во СНУ, 2010. — № 8. — С. 213–219.

8. Бровендер, Ю. М. Горная археология: к вопросу о понятийном аппарате [Текст] / Ю. М. Бровендер, Ю. П. Шубин // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2014. — Вып. 2 (43). — С. 53–66.
9. Бровендер, Ю. М. Эксперименты по выплавке меди из руд Картамышского рудопоявления Донбасса [Текст] / Ю. М. Бровендер, Ю. П. Шубин // Археология Восточноевропейской лесостепи. — Воронеж : ВГУ, 2009. — С. 114–123.
10. Григорьев, С. А. Металлургическое производство в Северной Евразии в эпоху бронзы [Текст] / С. А. Григорьев. — Челябинск : Цицеро, 2013. — 660 с.

© Шубин Ю. П.

**Рекомендована к печати док. геол.-мин. наук, зав. лабораторией минералогии алмаза
ИГ Коми НЦ УрО РАН Шумиловой Г. Г.,
к.т.н., доц. каф. РМПИ ДонГТУ Леоновым А. А.**

Статья поступила в редакцию 22.09.17.

к.г.н. Ю. П. Шубін (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР, u0502823920@yandex.ru)

ГЕОАРХЕОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ДОНБАСЬКОМУ ДЕРЖАВНОМУ ТЕХНІЧНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ

Розглядається становлення в стінах Донбаського державного технічного університету колективу вчених, які досліджували давні мідні копальні Донбасу. На базі геоархеологічних досліджень була виконана реконструкція виробничої діяльності, наведені проблеми, що виникли в процесі виконання робіт, дискусії, засоби їх вирішення. Надано оцінку ролі Донецького гірничо-металургійного центру доби пізньої бронзи в Дніпро-Донському регіоні, розроблено понятійний апарат, а також апробовано методи геоархеології, підібрано оптимальний комплекс методів дослідження речовинних свідочств виробничої діяльності стосовно досліджень подібного роду об'єктів, першочерговими з яких нам бачаться давні срібні копальні срібно-поліметалевих родовищ Нагольного кряжу Донбасу.

Ключові слова: геоархеологія, гірничо-металургійний центр, виробнича діяльність, мідні руди, термінологія геоархеології, методи геоархеології.

Ph.D. in Geology Shubin Yu. P. (DonSTU, Alchevsk, LPR, u0502823920@yandex.ru)

GEOARCHEOLOGICAL RESEARCH IN DONBAS STATE TECHNICAL UNIVERSITY

The formation of a team of scientists in the walls of Donbas State Technical University is considered, which explored the ancient copper mines of Donbass. On the basis of geoarcheological studies, the reconstruction of production activities was carried out, problems are presented in the course of work execution, discussions and ways of their solution are listed. Assessment of the role of Donetsk mining and metallurgical center of the Late Bronze Age in the Dnieper-Don region is given, the conceptual apparatus have been developed, methods of geoarchaeology have been tested, and the optimal set of methods was selected for investigating the material evidence of production activities for the research of this kind of objects, with the priority studying of the ancient silver mines of silver-polymetallic deposits in the Nagolny Ridge of Donbass.

Key words: geoarchaeology, mining and metallurgical center, production activity, copper ore, terminology of geoarcheology, methods of geoarcheology.

УДК 622.837

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ ПОДРАБОТКИ НА ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Установлена зависимость максимальных сдвижений и деформаций земной поверхности от глубины очистных работ.

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

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Около 30 % оставшихся в Донбассе балансовых запасов угля залегает под застроенными территориями, коммуникациями и водными объектами. Безопасная разработка угля под сооружениями возможна после выбора мер их охраны, в основу которого заложено сопоставление ожидаемых деформаций земной поверхности с допустимыми для каждого объекта. Деформации земной поверхности определяют трудоемкими натурными маркшейдерскими наблюдениями или расчетом по методике "Правил подработки..." [1], которая позволяет вычислять ожидаемые сдвижения и деформации с определенной погрешностью при глубинах до 1000 м (и более). С увеличением глубины разработки увеличивается область влияния на земную поверхность, общая продолжительность процесса сдвижения и длины полумульд, что увеличивает трудоемкость и стоимость инструментальных наблюдений. Поэтому совершенствование методики расчета ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности при больших глубинах разработки угля является актуальной научной и практической задачей.

Постановка задачи. Задачей исследований является установление зависимости параметров процесса сдвижения земной поверхности от глубины подработки.

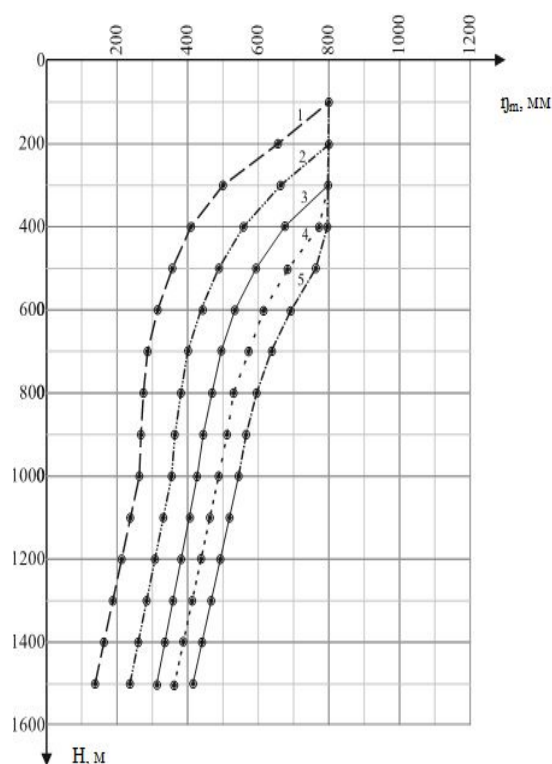
Изложение материала и его результаты.

Параметры процесса сдвижения земной поверхности зависят от ряда определяющих факторов: вынимаемой мощности пласта, размеров выработанного пространства, глубины подработки, крепости пород, угла падения пласта, литологии покрывающей толщи, тектонических нарушений, способа управления кровлей, системы разработки, нарушенности толщи первичной подработкой и других.

Целью данного этапа исследований является дифференцирование влияния глубины подработки на параметры сдвижений и деформаций земной поверхности.

Решение этой задачи выполнялось: методом натурных наблюдений [2], математическим моделированием методом конечных элементов [3] и расчетом параметров процесса сдвижений [4, 5] по методике отраслевого стандарта Украины [1].

Исследования [4,5] показали, что при остальных постоянных факторах максимальное оседание земной поверхности η_m в большей степени зависит от глубины подработки H и размеров выработанного пространства D_1 и D_2 соответственно по падению и простиранию пласта (рис. 1), выраженных коэффициентами N_1 и N_2 , характеризующими степень подработанности толщи пород:



1 — при $D_1 = 200$; 2 — при $D_1 = 300$; 3 — при $D_1 = 400$; 4 — при $D_1 = 500$; 5 — при $D_1 = 600$,
 $D_2 = 2000$ м, $\alpha = 5^\circ$,

Рисунок 1 Графики зависимости максимального оседания η_m от глубины подработки H и размеров выработанного пространства D_1

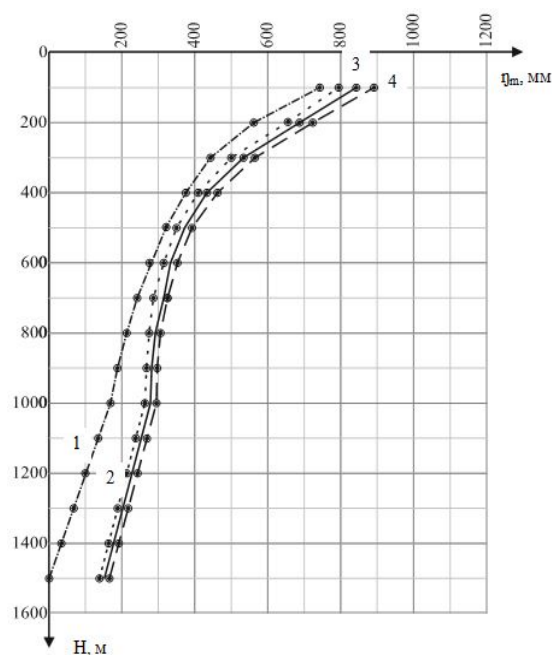
$$N_1 = \sqrt{0,9 \left(\frac{D_1}{H} + \Delta L_n + \Delta L_g \right)}; \quad (1)$$

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

где ΔL_n , ΔL_v , ΔL_{pr} , ΔL_{opr} — поправки к относительной длине лавы за счет целика со стороны падения, восстания, простирания и обратной простиранию пласта, значения которых приведены в "Правилах подработки..." [1].

Для определения влияния марок угля (степени метаморфизма пород) выполнен расчет и построен график зависимости максимального оседания η_m от глубины подработки H от 100 до 1500 м для всех марок угля при $q_0 = 0,75$, $q_0 = 0,8$, $q_0 = 0,85$,

$q_0 = 0,9$ и постоянных $D_1 = 200$ м, $D_2 = 1200$ м, $m = 1$ м, $\alpha = 5^\circ$ (рис. 2).



1 — при $q_0 = 0,75$; 2 — при $q_0 = 0,8$; 3 — при $q_0 = 0,85$; 4 — при $q_0 = 0,9$

Рисунок 2 График зависимости максимального оседания η_m от глубины подработки H , м

Из анализа рисунков 1, 2 можно сделать выводы: с увеличением глубины подработки уменьшаются относительные максимальные оседания земной поверхности, причем в большей степени при глубинах до 600 м; зависимость η_m от q_0 (степени метаморфизма пород) незначительная (рис. 2); наиболее существенное влияние на η_m в принятых горно-геологических условиях оказывает глубина подработки H .

При $H = 1000$ м отмечается изменение зависимости η_m от H , что свидетельствует о недостаточной изученности влияния больших глубин подработки на максимальные оседания земной поверхности.

В отдельных литературных источниках [6] по результатам математического моделирования установлена зависимость η_m от отношения ширины выработанного пространства D к H .

С целью установления влияния глубины подработки H на параметры сдвижений и деформаций выполнен расчет максимальных оседаний η_m , наклонов i_m и горизонтальных деформаций ε_m по методике [1] при постоянных отношениях $D/H = 1$, $D/H = 1,2$, $D/H = 1,4$ и H от 100 до 1500 м.

Наклоны по простиранию пласта i_x

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

где L_3 — длина полумульды (м), определяется графически;

$$\varepsilon_x = 0,5 a_0 * \frac{\eta_m}{L_3} * S''(Z_x) * S(Z_y), 1 \cdot 10^{-3}, \quad (4)$$

где $S(Z), S'(Z), S''(Z)$ — значения функций [1]; a_0 — относительная величина максимального горизонтального сдвижения, принята 0,3 [1].

По вычисленным значениям ε_m, i_m (табл. 1, 2), построены графики (рис. 3, 4), характеризующие зависимость максимальных деформаций земной поверхности от глубины подработки, из которых видно, что при вынимаемой мощности $m = 1$ м, $\alpha = 5^\circ$ и полной подработке ($D/H > 1$) ε_m и i_m менее опасных при H более 500 м, а при $H > 1000$ м деформации земной поверхности в два раза меньше опасных ($i = 4 \cdot 10^{-3}$, $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$) [1].

Таблица 1

Зависимости максимальных наклонов земной поверхности ($i_m, 1 \cdot 10^{-3}$) от глубины ($H, м$) при $D_2/H = 1$, $D_2/H = 1,2$, $D_2/H = 1,4$, $m = 1$ м, $q_0 = 0,8$, $a = 0,3$, $\alpha = 5^\circ$

H (м)	$i_m 1 \cdot 10^{-3}$		
	$D/H = 1$	$D/H = 1,2$	$D/H = 1,4$
100	15	17,84	19,2
200	7,4	8,66	9,31
400	3,78	4,52	4,76
600	2,6	2,93	3,23
800	2,03	2,27	2,5
1000	1,62	2,02	2,02
1200	1,42	1,69	1,69
1400	1,25	1,45	1,45
1500	1,19	1,35	1,35

Таблица 2

Зависимость максимальных горизонтальных деформаций земной поверхности ε_m от глубины подработки ($H, м$) при $D_2/H = 1$, $D_2/H = 1,2$, $D_2/H = 1,4$, $m = 1$ м, $q_0 = 0,8$, $a = 0,3$, $\alpha = 5^\circ$, $D_1 = 2000$ м

H (м)	$\varepsilon_m 1 \cdot 10^{-3}$		
	$D/H = 1$	$D/H = 1,2$	$D/H = 1,4$
100	8,02	8,21	9,55
200	3,9	3,94	4,64
400	1,95	2,17	2,37
600	1,29	1,52	1,61
800	0,93	1,22	1,2
1000	0,78	1,0	1,0
1200	0,69	0,84	0,84
1400	0,61	0,72	0,72
1500	0,58	0,67	0,67

Из анализа рисунка 2 можно сделать вывод, что в более крепких породах (при $q_0 = 0,75$) η_m на всех глубинах меньше (кривая 1), чем в слабых породах, это соответствует общепринятой теории.



Рисунок 3 Зависимость максимальных горизонтальных деформаций земной поверхности ε_m от глубины подработки ($H, м$) при $D_2/H = 1$, $D_2/H = 1,2$, $D_2/H = 1,4$, $m = 1$ м, $q_0 = 0,8$, $a = 0,3$, $\alpha = 5^\circ$, $D_1 = 2000$ м

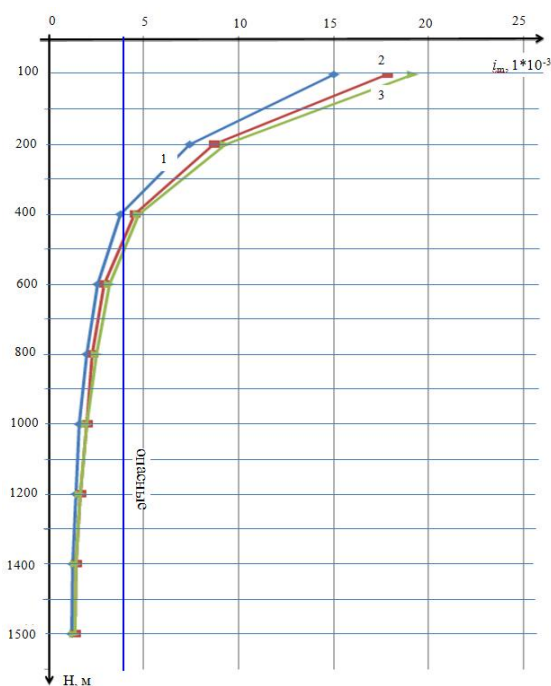


Рисунок 4 Кривые зависимости максимальных наклонов земной поверхности (i_m , $1 \cdot 10^{-3}$) от глубины (H , м) при $D_2/H = 1$, $D_2/H = 1,2$, $D_2/H = 1,4$, $m = 1$ м, $q_0 = 0,8$, $a = 0,3$, $\alpha = 5^\circ$

С увеличением глубины до 1500 м увеличивается прочность пород, значит, соответственно теории более интенсивно должны уменьшаться относительные максимальные оседания и деформации земной поверхности, чем при H до 600 м, что не подтверждается вычисленными по методике [1] значениями (табл. 1, 2, рис. 1–4).

Напрашивается вывод о недостаточной изученности влияния глубины подработки на максимальные сдвиги и деформации

земной поверхности и о том, что действующая методика расчета [1] требует корректировки при глубинах более 600 м.

Выводы и направление дальнейших исследований.

В результате выполненных исследований получены графики зависимости максимальных оседаний, наклонов и горизонтальных деформаций земной поверхности при постоянных отношениях $D/H = 1$, $D/H = 1,2$, $D/H = 1,4$ от глубины подработки в интервале 100–1500 м и принятых остальных влияющих факторах: $m = 1$ м, $\alpha = 5^\circ$, $D_2 = 2000$ м, $q_0 = 0,8$, $a_0 = 0,3$ (рис. 1–4, табл. 1,2), из которых видно, что при $H > 500$ м деформации земной поверхности не превышают опасных ($i = 4 \cdot 10^{-3}$, $\varepsilon = 2 \cdot 10^{-3}$). При $H > 600$ м зависимость параметров процесса сдвижения земной поверхности от глубины подработки изучена недостаточно. Действующая отраслевая методика расчета ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности требует совершенствования на больших глубинах, для чего необходимы традиционные натурные маркшейдерские наблюдения или заложение автоматической наблюдательной станции [7].

В дальнейшем планируется выполнить аналогичные расчеты для всех марок угля в различных горно-геологических условиях, построить номограмму, позволяющую быстро определять ожидаемые сдвиги и деформации при выборе мер охраны подрабатываемых сооружений земной поверхности.

Библиографический список

1. Правила підробки будівель, споруд і природних об'єктів при видобуванні вугілля підземним способом [Текст] // М-во палива та енергетики України. — Київ, 2004. — 127 с.
2. Ларченко, В. Г. Практические результаты исследований деформации земной поверхности при отработке свиты пологих угольных пластов [Текст] / В. Г. Ларченко // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників — 2009». — Днепропетровск : НГУ, 2009. — С. 222–230.
3. Ларченко, В. Г. Определение зависимости параметров сдвижений и деформаций подработанной толщи пород от определяющих факторов методом конечных элементов [Текст] / В. Г. Ларченко, О. А. Черных // Вестник МАНЭБ. — Санкт-Петербург, 2006. — № 22 — С. 16–24.
4. Ларченко, В. Г. Зависимость максимальных оседаний земной поверхности от основных определяющих факторов [Текст] / В. Г. Ларченко, Ю. А. Маталкина // Сб-к научных трудов Дон ГТУ. — 2016. — Вып 4(47). — С. 45–51.

5. Ларченко, В. Г. Зависимость максимальных оседаний земной поверхности от глубины разработки угольных пластов и крепости пород [Текст] / В. Г. Ларченко, Ю. А. Маталкина // Материалы международной конференции «Экология и безопасность жизнедеятельности – 2017» (Теберда, Карачаево-Черкесия, 23–28.08.2017): сб-к научных трудов. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. — С. 132–136.

6. Кодунов, Б. А. Зависимость максимальных оседаний земной поверхности от размеров лавы и глубины разработки [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://ea.dgtu.donetsk.ua:8080/bitstream/123456789/6975/1/kodunov_max_osed.pdf

7. Ларченко, В. Г. Автоматическая наблюдательная станция для мониторинга сдвижений и деформаций горных пород [Текст] / В. Г. Ларченко, О. М. Куценко, Ю. А. Маталкина // Сб. науч. трудов Дон ГТУ. — 2015. — Вып. 1 (44). — С. 49–55.

© Ларченко В. Г.

© Маталкина Ю. А.

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

Статья поступила в редакцию 17.10.17.

к.т.н. Ларченко В. Г., Маталкина Ю. А. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЛИБИНИ ПІДРОБКИ НА ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ ЗРУШЕННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

Встановлено залежність максимальних зрушень і деформацій земної поверхні від глибини очисних робіт.

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

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

DEPENDENCE OF THE MAXIMUM EARTH SURFACE SUBSIDENCE FROM THE MAIN DEFINITIVE FACTORS

The dependence is established for the maximum shifts and deformations of the earth's surface on the depth of face works.

Key words: maximum subsidence, slopes, horizontal deformations of the earth's surface, depth of underwork, dependence.

**МЕТАЛУРГІЯ
И МАТЕРІАЛОВЕДЕНИЕ**

**МЕТАЛУРГІЯ
ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

**METALLURGY
AND MATERIAL SCIENCES**

УДК 669.16.013.5

Ивасенко В. В., Кобзев В. К.
(Филиал №2 «ЕМЗ» ЗАО «ВТС», г. Енакиево, ДНР),
д.т.н Новохатский А. М.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР),
к.т.н. Падалка В. П.
(Филиал №2 «ЕМЗ» ЗАО «ВТС», г. Енакиево, ДНР)

РЕКОНСТРУКЦИЯ РУДНОГО ДВОРА АГЛОМЕРАЦИОННОГО ЦЕХА ФИЛИАЛА №2 «ЕНАКИЕВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД» ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС»

Приведены данные о реконструкции рудного двора агломерационного цеха Филиала № 2 «Енакиевский металлургический завод» ЗАО «Внешторгсервис». Формирование штабелей сырья и подачу усредненного сырья далее в производство вместо рудно-грейферных кранов осуществляют экскаваторы с объемом ковша 5 м³. Удалось сократить колебания химического состава агломерата, уменьшив неорганизованные выбросы с рудного двора.

Ключевые слова: рудный двор, рудно-грейферный кран, экскаватор ЭКГ-5А, железорудный концентрат, штабель железорудного сырья, аглоруда.

Производство агломерата с высокими прочностными характеристиками и низкими колебаниями химического состава позволяет улучшить технико-экономические показатели доменного процесса, увеличить производительность доменных печей, повысить качество чугуна и поэтому является первоочередной задачей.

Проектная схема рудного двора агломерационного цеха предусматривала разгрузку аглоруды, железорудного концентрата, известняка, извести, коксовой мелочи и металлосодержащих отходов гравитационным способом на двух эстакадах. Проведение операций по формированию штабелей и усреднению сырья с последующей погрузкой его в трансферкары осуществляли два рудно-грейферных крана (РГК). При этом на рудном дворе в один штабель складировался железорудный концентрат, известь и желесодержащие отходы, а в другой — аглоруда. Каждый из указанных штабелей, в свою очередь, делился на формируемую и расходуюмую части.

Поступающий на аглофабрику известняк крупностью 0–5 мм складировался в откос эстакады № 2. По необходимости

РГК грузил известняк в трансферкар, который подавал его в предназначенные для известняка бункеры. Коксовая мелочь, поступавшая из доменного цеха в вагонах, разгружалась непосредственно в предназначенные для нее бункеры. Излишки коксовой мелочи складировались в откос эстакады № 2. При необходимости РГК грузил коксовую мелочь из откоса в вагоны, которые подавали ее в бункеры.

Однако в процессе длительной эксплуатации РГК утратили возможность полноценно проводить работу с сырьем, что начало сказываться на качестве агломерата и производительности цеха в целом. Возросли среднеквадратичные колебания химического состава агломерата, увеличилось содержание в нём класса крупности 0–5 мм, а его производство уменьшилось в среднем до 30 %. Поэтому возникла необходимость реконструкции рудного двора аглофабрики.

Суть реконструкции заключается в том, чтобы формирование штабелей и подачу усредненного сырья из них в производство вместо РГК выполнять тремя экскаваторами ЭКГ-5А, которые передвигаются вдоль эстакад.

Железородный концентрат, известь и частично отсеб агломерата из доменного цеха совместно разгружаются по правому пути эстакады № 2. Количество разгружаемых компонентов шихты соответствует запланированным на производство агломерата расходным коэффициентам. Один из экскаваторов перегружает сырье из откоса эстакады № 2 в промежуточный штабель; второй экскаватор перегружает сырье из промежуточного штабеля в отгрузочный штабель; третий экскаватор загружает сырье в вагоны, которые располагаются вдоль эстакады № 1 (рис. 1). Емкость каждого из штабелей составляет порядка 6 тыс. т. В процессе перегрузки сырья из штабеля в штабель происходит его усреднение. Усредненная концентрато-известковая смесь, погруженная в вагоны, доставляется к специально предназначенным для нее бункерам, где разгружается.

Также проектом предусмотрено строительство еще двух новых трактов для подачи в аглошихту сырья (например, конвертерного шлака и подготовленной шламоизвестковой смеси).

Конвертерный шлак класса крупности 0–10 мм планируется разгружать из вагонов по левому пути эстакады № 2. Из откоса эстакады № 2 фронтальным погрузчиком конвертерный шлак планируется подавать в приемный бункер. Далее по системе конвейеров конвертерный шлак планируется доставлять в шихтовое отделение и через дозирующие бункеры подавать к остальным компонентам аглошихты (рис. 2).

Подготовленную шламоизвестковую смесь из вагонов планируется разгружать по правому пути эстакады № 1. Из откоса эстакады № 1 фронтальным погрузчиком шламоизвестковую смесь планируется загружать в приемный бункер. Далее конвейером шламоизвестковую смесь планируется подавать в накопительный бункер и из него дозировать на существующие конвейеры аглофабрики (рис. 3).

Для подачи в аглошихту твердого топлива остается прежняя схема: коксовая ме-

лочь, поступившая из доменного цеха в вагонах разгружается непосредственно в предназначенные для нее бункеры. Далее по системе конвейеров она поступает в дробильное отделение. В дробильном отделении происходит двухстадийная обработка коксовой мелочи на четырехвалковых дробилках для достижения необходимого класса крупности. Через новые приемные бункеры имеется возможность подачи в аглошихту известняка, аглоруды, отходов металлургического производства и др.

В настоящее время реализован первый этап реконструкции рудного двора аглофабрики — введение в работу экскаваторов вместо РГК. Уже сейчас понятно, что удалось улучшить логику перемещения сырья на рудном дворе, достичь увеличения производительности цеха, повышения прочностных характеристик и снижения колебаний химического состава агломерата. Кроме этого, существенно снизились неорганизованные выбросы с рудного двора, т. к. экскаваторы производят операции с сырьем с меньшей высоты, чем РГК.

В периоды работы аглофабрики, когда РГК утратили возможность полноценно производить операции с сырьем, а реконструкция рудного двора с использованием экскаваторов ЭКГ-5А не была завершена, железородное сырье, отходы металлургического производства, флюсующие добавки и твердое топливо подавались в специально отведенные бункеры непосредственно из железнодорожных вагонов, минуя рудный двор.

Неподготовленные, плохо усредненные шихтовые материалы при выходе из бункеров были подвержены сводообразованию, что ухудшало их дозировку. Наблюдалась плохая транспортировка шихтовых материалов по технологическим трактам с зарастанием течек, вынужденной шуровкой материалов, что периодически приводило к простоям агломашин из-за недостатка шихты.

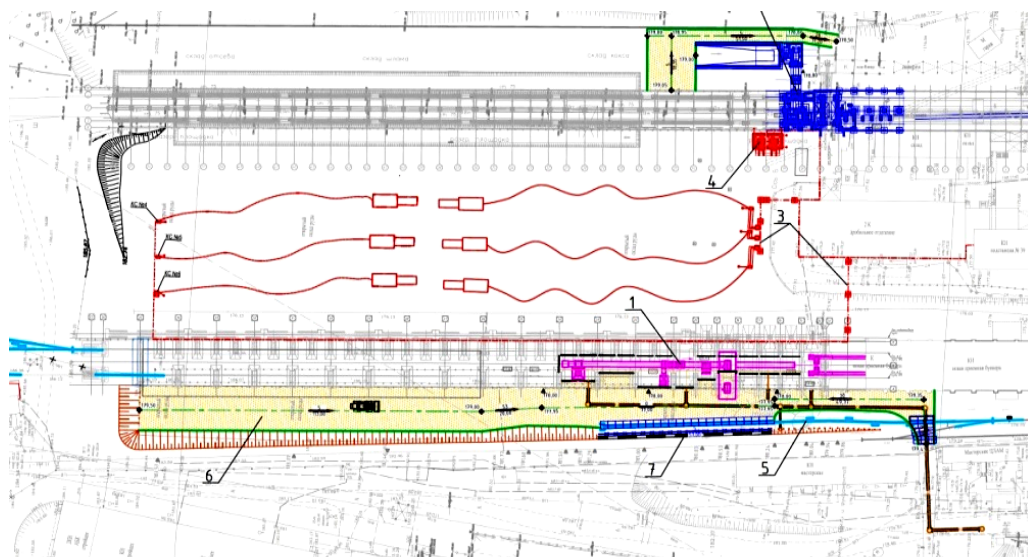


Рисунок 1 Схема реконструкции рудного двора аглофабрики

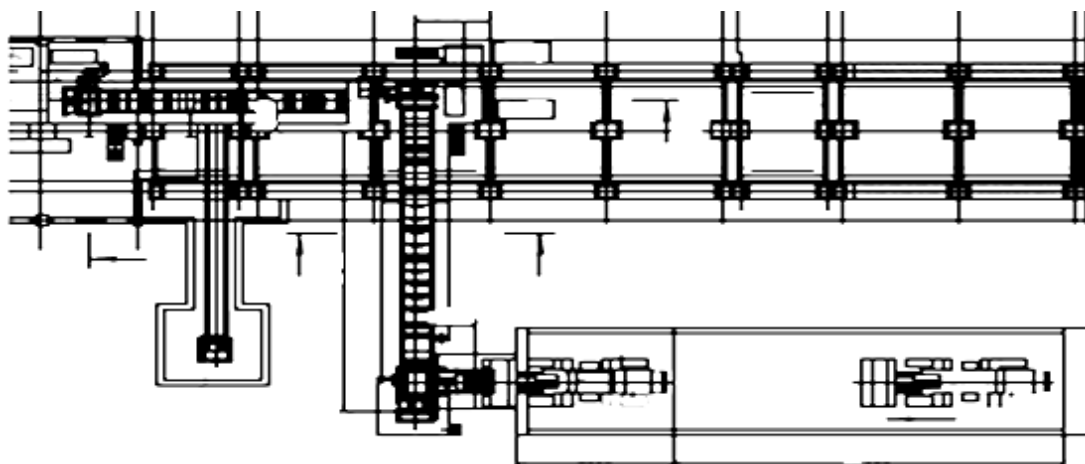


Рисунок 2 Схема подачи в аглошихту конвертерного шлака

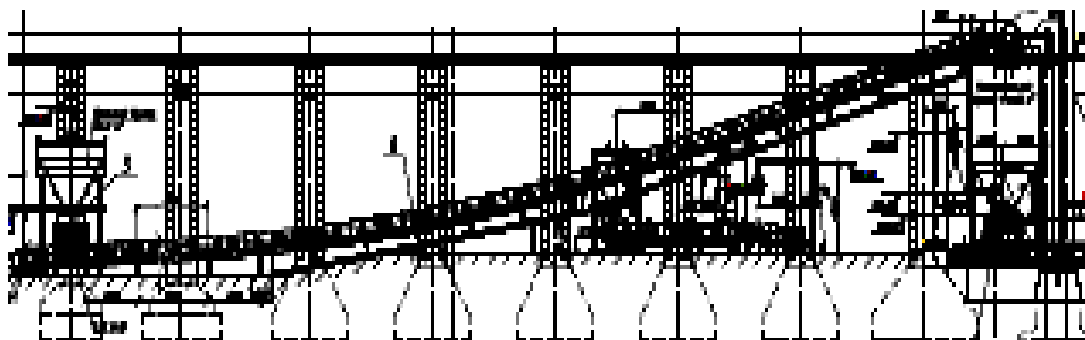


Рисунок 3 Схема подачи в аглошихту шламоизвестковой смеси

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Недостаточное взаимодействие шихтовых материалов с известью приводило к снижению температуры аглошихты, ухудшению окомкования, что снижало скорость спекания и, соответственно, приводило к уменьшению удельной производительности агломашин.

В таблице 1 приведены показания работы агломерационного цеха и качества агломерата в периоды подачи шихтовых материалов в бункеры, минуя рудный двор (сентябрь 2015 г.), и после реконструкции рудного двора с установкой экскаваторов ЭКГ-5А (август 2016 г.)

Таблица 1

Показатели работы агломерационного цеха и качества агломерата

Наименование показателей	Единицы измерения	Период	
		Сентябрь 2015 г.	Август 2016 г.
Количество агломашин	шт.	4	4
Площадь спекания агломашины	м ²	62,5	62,5
Среднесуточное производство	т/сут.	3416,2	4720,3
Высота слоя шихты	мм	350	350
Вертикальная скорость спекания	мм/мин	16,26	18,48
Расход на 1 т агломерата			
Концентрат и аглоруда (украинские поставщики)	кг/т	514,7	635,0
Вторичные Fe-содержащие материалы	кг/т	442,5	337,6
Известняк	кг/т	84,6	108,3
Конвертерный шлак	кг/т	83,4	0,0
Известь	кг/т	32,5	30,9
Коксовая мелочь	кг/т	45,8	46,7
Химический состав агломерата			
в т. ч. массовая доля:			
Fe	%	50,03	54,63
SiO ₂	%	8,84	9,54
CaO	%	15,28	12,55
Основность CaO/SiO ₂	ед.	1,67	1,32
Среднеквадратичное отклонение:			
по содержанию Fe	%	2,31	1,495
по основности	ед.	0,264	0,161

Из приведенных в таблице 1 данных следует, что после реконструкции рудного двора производство агломерата увеличилось на 25–30 %. Это произошло по той причине, что при вылёживании с железорудными материалами на рудном дворе основная масса извести прореагировала до портландита. Это повлекло за собой увеличение температуры аглошихты, снижение содержания влаги в шихтовых материалах, находящихся в штабелях. Связующие свойства портландита способствовали улучшению окомкования аглошихты. В свою очередь, снижение влаги в шихтовых материалах, находящихся в штабелях, улучшило их транспортабельность по технологическим трактам, что снизило простой агломашин из-за отсутствия сырья.

Внедрённая после реконструкции рудного двора технология подготовки шихтовых материалов экскаваторами ЭКГ-5А позволила усреднять шихтовые материалы на рудном дворе, что существенно снизило колебание химического состава агломерата. Также снижению колебаний химического состава агломерата способствовало то, что подготовленные на рудном дворе шихтовые материалы не склонны к сводообразованию в бункерах и удовлетворительно транспортируются по технологическим трактам. Это улучшило их дозировку. В результате среднеквадратичное отклонение содержания железа в агломерате

сократилось с 2,310 % до 1,495 %, среднеквадратичное отклонение основности агломерата сократилось с 0,264 до 0,161 единиц.

С февраля по апрель 2016 года агломерационный цех, как и другие цеха предприятия, был остановлен по известным причинам. С апреля 2017 года на предприятие для производства агломерата начал поступать железорудный концентрат Ковдорского месторождения, богатый по содержанию железа. Аглоруда в шихте за период май-сентябрь 2017 года практически не использовалась. Возврат отсева агломерата из доменного цеха и конверторный шлак выполняют функции комкующей составляющей шихты [1] при окомковании.

Использование богатого по железу ковдорского железорудного концентрата привело к увеличению содержания железа в агломерате в августе 2017 года до 57,44 % при основности 1,39.

Выводы. На Енакиевском металлургическом заводе в настоящее время проводится реконструкция рудного двора агломерационного цеха, которая уже позволила увеличить производство агломерата, повысить его прочностные характеристики, снизить колебания химического состава, существенно уменьшить неорганизованные выбросы с рудного двора.

Библиографический список

1. Коротич, В. И. Агломерация рудных материалов [Текст] / В. И. Коротич, Ю. А. Фролов, Т. Н. Бездежский. — Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. — 400 с.
2. Малышева, Т. Я. Петрография и минералогия железорудного сырья [Текст] / Т. Я. Малышева, О. А. Долицкая. — Москва : МИСИС, 2004. — 423 с.

© Ивасенко В. В.
© Кобзев В. К.
© Новохатский А. М.
© Падалка В. П.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.

Статья поступила в редакцию 05.10.17.

Івасенко В. В., Кобзєв В. К. (Філія №2 «ЄМЗ» ЗАТ «ВТС», м. Єнакієве, ДНР),
д.т.н. Новохатський О. М. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР), **к.т.н. Падалка В. П.** (Філія №2 «ЄМЗ»
 ЗАТ «ВТС», м. Єнакієве, ДНР)

РЕКОНСТРУКЦІЯ РУДНОГО ДВОРУ АГЛОМЕРАЦІЙНОГО ЦЕХУ ФІЛІЇ № 2 «ЄНАКІЇВСЬКИЙ МЕТАЛУРГІЙНИЙ ЗАВОД» ЗАТ «ВНЕШТОРГСЕРВИС»

Наведено дані про реконструкцію рудного двору агломераційного цеху Філії № 2 «Єнакіївський металургійний завод» ЗАТ «Внешторгсервіс». Формування штабелів сировини і подача усередненого сировини з штабелів у виробництво замість рудно-грейферних кранів здійснюють екскаватори з об'ємом ковшу 5 м³. Вдалося скоротити коливання хімічного складу агломерату, зменшити неорганізовані викиди з рудного двору.

Ключові слова: рудний двір, рудно-грейферний кран, екскаватор ЕКГ-5, залізорудний концентрат, штабель залізорудної сировини, аглоруда.

Ivasenko V. V., Kobzev V. K. (Branch No. 2 "EISW" CJSC "VTS", Yenakiyev, DPR),
Doctor of technical sciences. Novokhatsky A. M. (DonSTU, Alchevsk, LPR), **PhD Padalka V. P.**
 (Branch No. 2 "EISW" CJSC "VTS", Yenakiyev, DPR)

RECONSTRUCTION THE RAW-ORE STOCKYARD OF AGGLOMERATION SHOP OF BRANCH № 2 AT "ENAKIYEVO IRON-AND-STEEL WORKS" CJSC "VNESHTORGSERVICE"

Data on the reconstruction of the raw-ore yard of the agglomeration shop of Branch No. 2 at "Enakievo Iron-and-Steel Works" CJSC Vneshtorgservis are presented. The formation of raw material stacks and averaged raw material feeding from stacks into production by excavators instead of grabbing cranes, a bucket capacity being 5 m³. It became possible to reduce fluctuations in the chemical composition of the agglomerate, to reduce disorder ejections from the ore yard.

Key words: raw-ore yard, grabbing crane, excavator ECG-5, iron ore concentrate, stack of iron ore raw materials, sinter ore.

УДК 669.162

д.т.н. Новохатский А. М.,

Блинов А. М.

(ДонГТУ, Алчевск, ЛНР, bat_10_89@mail.ru)

ХАРАКТЕР ВЫПУСКА ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛА ЧУГУННОЙ ЛЕТКИ

Проведен анализ истечения продуктов плавки по каналу чугунной летки доменной печи. Определено влияние геометрических параметров канала на характер и длительность выпуска.

Ключевые слова: холодная модель горна доменной печи, канал чугунной летки, кокс, длительность выпуска, эквивалентный диаметр.

Характер опорожнения горна в большой степени зависит от режима наполнения и выпуска продуктов плавки. Это связано с тем, что скорость движения расплава по мере отдаления от чугунной летки уменьшается из-за увеличения суммарной площади сечения каналов в межкусковых промежутках коксовой насадки, что приводит к наличию в горне остаточного шлака, который, как правило, находится на диаметрально противоположной стороне от выпускного отверстия. На количество остаточных продуктов плавки в металлоприемнике доменной печи по завершении выпуска влияет ряд параметров: химический состав шлака, температура расплава, порозность коксовой насадки, форма и геометрические размеры чугунной летки.

Анализ текущего состояния вопроса показал зависимость между дренажом расплава через коксовую насадку к чугунной летке и характером выпуска продуктов плавки. Кроме того, на этот процесс влияет конфигурация канала летки [1–4].

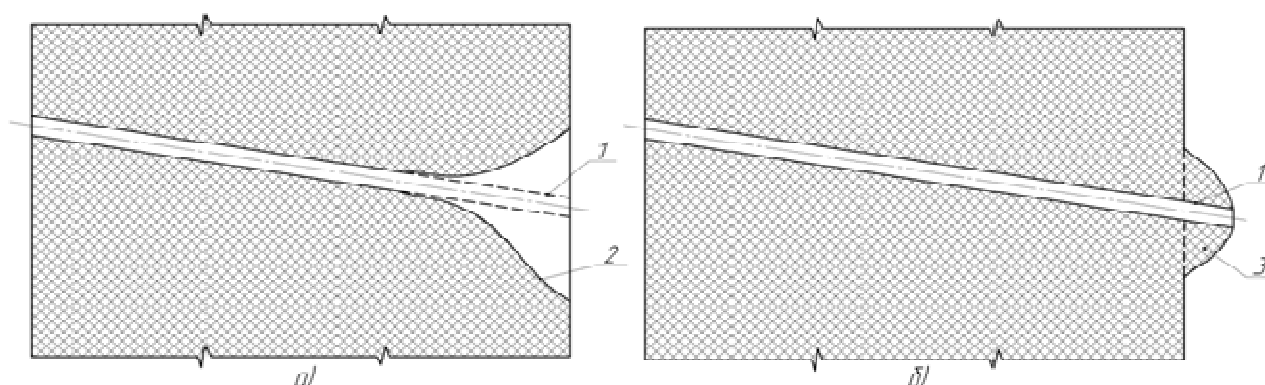
В современных условиях при работе доменных печей с безводными леточными массами существует проблема их заправки в канал чугунной летки, так как большинство заправочных машин проектировалось под более эластичные водные материалы местных глинянок. Из-за высокой стоимости безводных масс иностранного производства обслуживающий персонал осуществляет их экономию, и канал чугунной летки заполняется неполностью. В условиях постоянно

ограниченной подачи запорной массы в канал происходит образование «короткой» летки, а при избытке леточной смеси формируется удлиненный канал, выступающий на внутренней стенке горна (рис. 1), что сказывается на характере выпуска чугуна и шлака.

После выдувки ДП № 5 ПАО «АМК» в горне была обнаружена воронка на входе в канал чугунной летки с внутренней стороны печи (по данным отчета предприятия ООО «Донбасс–Днепрострой»). Образование воронки связано с абразивным воздействием жидких продуктов плавки на устье выпускного канала.

С гидравлической точки зрения, горн представляет собой цилиндрическую емкость, из которой продукты плавки выходят через канал длиной от 2 до 3 метров, в зависимости от объема печи. Скорость тока жидкости через него может быть рассчитана по известным формулам, однако находящаяся в горне доменной печи коксовая насадка оказывает существенное влияние на характер истечения продуктов плавки.

Поэтому в данной работе освещен вопрос определения влияния формы и геометрических размеров канала чугунной летки на скорость истечения продуктов плавки с присутствием коксовой насадки. Исследование процесса течения чугуна по каналу чугунной летки производилось с использованием холодной физической модели горна доменной печи полезным объемом 1719 м³, выполненной в масштабе 1:15. Роль коксовой насадки выполнял известняк крупностью



1 – Угловый канал чугунной летки; 2 – Воронка, образующаяся при недостатке запорной массы;
3 – Нарост, образующийся при избытке запорной массы.

Рисунок 1 Форма канала чугунной летки:

- а) при систематическом недостатке запорной массы;
б) при систематическом избытке запорной массы

1–3 мм, а жидкого чугуна — вода, которая имеет схожие гидравлические свойства. Остальные параметры «натура — модель» соблюсти довольно сложно, поэтому был использован принцип автомодельности в общем объеме горна, в котором происходит ламинарное движение жидкости. В районе летки и в ее канале происходит турбулентное движение. Давление в модели поддерживалось 40 кПа.

Модель (рис. 2) выполнена из стального листа толщиной 2 мм в виде герметичного цилиндра. Для подачи материала и жидкости в верхней части выполнен съемный люк, герметичность которого обеспечивалась резиновым уплотнением.

Для создания избыточного давления в модель подавался сжатый воздух. Регулирование давления производилось сбросным клапаном. Внутреннее пространство модели заполнено имитатором коксовой насадки. Канал чугунной летки формировался пластилином, его вскрытие производилось при помощи металлических калибров, имеющих диаметры 2 и 4 мм. Создание воронки и нароста в устье канала чугунной летки производилось при помощи специальных шаблонов. Для соблюдения равных начальных условий в модель заливалась вода в избытке. Жидкость, выходящая через летку, собира-

лась в контейнер, находящийся на весах. При достижении заданной массы определялась продолжительность выпуска. Исследование осложнялось наличием притыканий канала чугунной летки кусочками коксовой насадки. Это явление наблюдается и на действующих доменных печах. В этом случае горновыми производится шуровка летки с помощью длинного прута. Поэтому при моделировании производилась аналогичная операция. Диаметр канала чугунной летки исследовался в интервале от 2 до 4 мм. Для имитации образующейся воронки внутренней части летки придавали конусообразный вид с углами раскрытия от 2° до 30° с шагом в 4°. Глубина конусной части составляла 0,25 от длины канала. Имитацию «длинной летки» производили путем формирования конусовидного нароста с углами раскрытия от 10° до 90° с шагом 10°. Схема канала летки показана на рисунке 3. Полученные результаты показывают, что увеличение диаметра канала чугунной летки значительно увеличивает скорость выпуска.

Повышение размера бура с 2 до 4 мм в физической модели приводит к снижению длительности выпуска в 1,7 раза. Помимо этого, значительный эффект дает угол раскрытия конуса во внутренней поверхности канала чугунной летки. На рисунке 4 пока-

заны графики изменения длительности выпуска при увеличении угла раскрытия конуса внутренней части канала чугунной летки. При достижении конусности 14° видно по-

вышение расхода продуктов плавки, далее происходит его снижение (рис. 4 а). В случае образования нароста, длительность выпуска экспоненциально снижается (рис. 4 б).

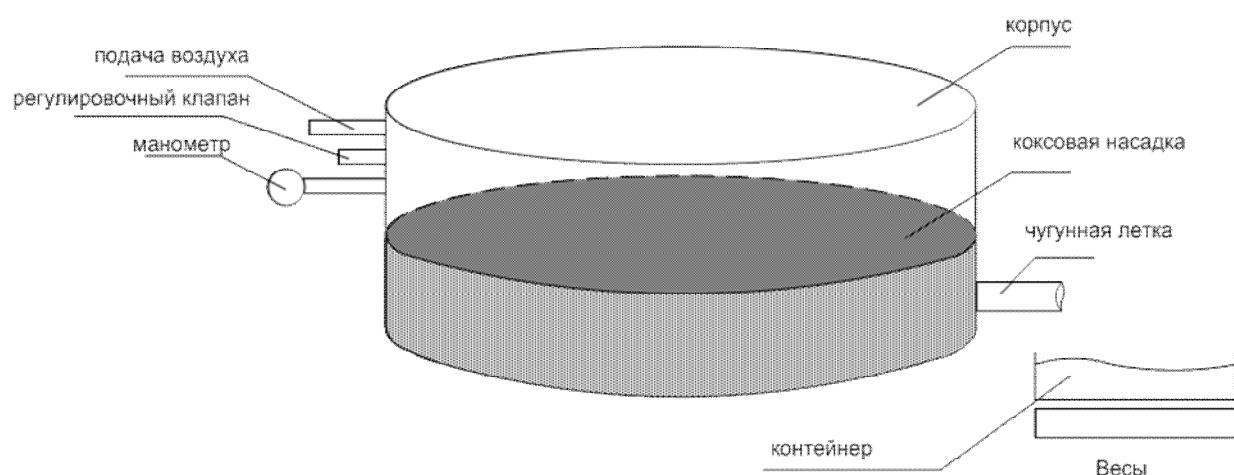


Рисунок 2 Модель горна доменной печи

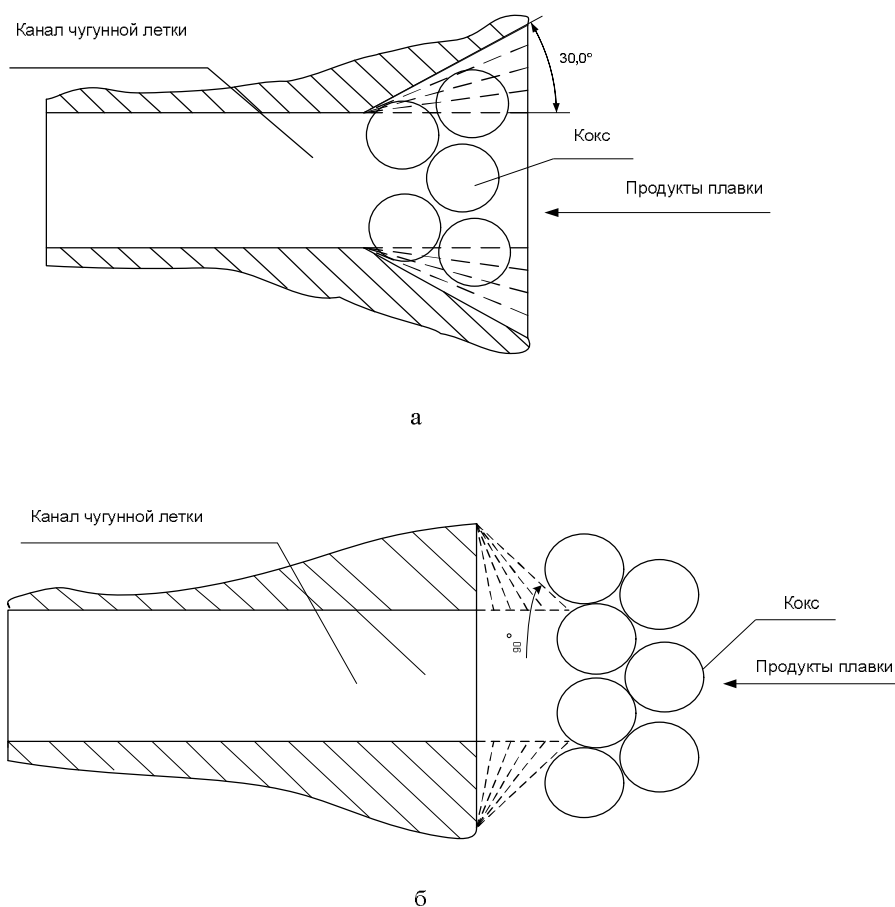


Рисунок 3 Имитация канала чугунной летки:
а) имитация воронки; б) имитация нароста

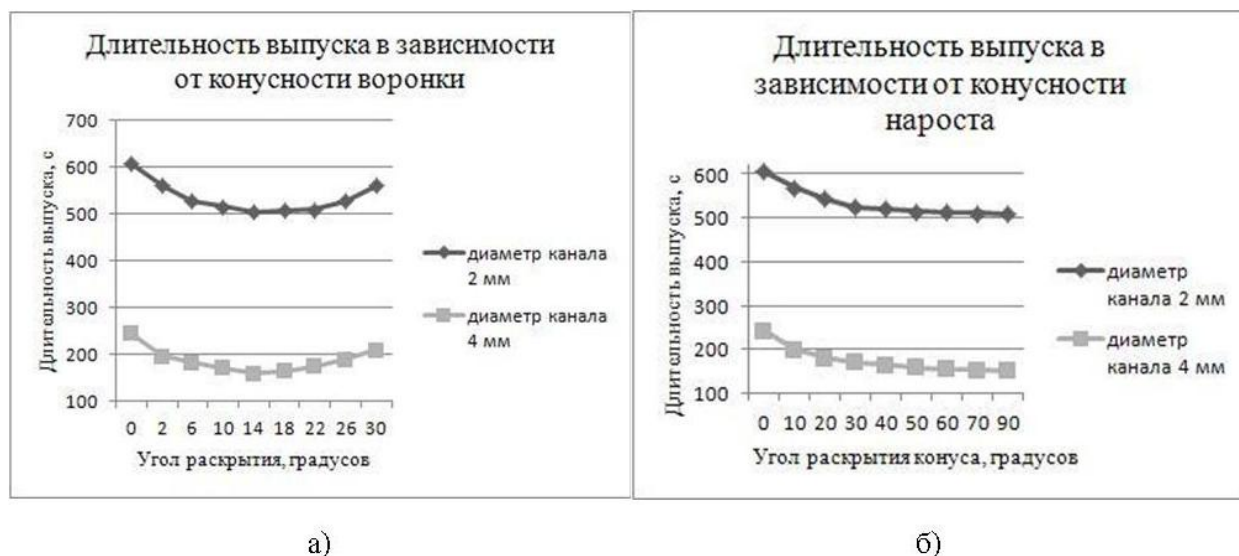


Рисунок 4 Изменение длительности выпуска в зависимости от угла раскрытия конуса: а) при разгаре устья канала в виде воронки; б) при образовании нароста

Поскольку известны фактическая и теоретическая скорости выхода заданного количества жидкости из модели, по формуле 1 был рассчитан эквивалентный диаметр участка, соединяющего канал чугунной летки и коксовую насадку.

$$d_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \phi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H_0} \cdot t}}, \quad (1)$$

где: Q — количество жидкости вышедшей из модели, м^3 ; t — длительность выпуска, с, ϕ — коэффициент скорости; H_0 — действующий напор, м.

Для оценки пропускной способности канала чугунной летки в условиях наличия коксовой насадки предлагается определить расходный коэффициент, который характеризуется отношением эквивалентного и фактического диаметров канала летки, колеблющийся в интервале 0,68–0,9, для различных условий. Помимо всего вышеперечисленного, в работе определено количество шуровок канала чугунной летки из-за притыканий коксовой насадки, зависящих от конфигурации ее внутреннего тракта, которое составило в среднем от 0,5 до 4,5 раз.

Наименьшее их количество наблюдалось при углах раскрытия конуса воронки в 14° .

Таким образом, результаты исследования показывают значительное влияние формы канала чугунной летки на количество проходящих через него продуктов плавки.

Выводы:

1. Определено, что, помимо диаметра канала чугунной летки, на длительность выпуска продуктов плавки и подпирания его тракта частицами коксовой насадки, значительное влияние имеет конусность воронки и нароста, которые образуются в устье канала.

2. В ходе физического моделирования установлено, что наименьшее время выпуска жидкости из горна и минимальное количество притыканий летки при разгаре воронки происходит с углом ее раскрытия, равным 14° , а при образовании нароста длительность выпуска экспоненциально снижается.

3. На основании результатов опытов был рассчитан эквивалентный диаметр тракта чугунной летки физической модели и определен расходный коэффициент влияния коксовой насадки на пропускную способность канала чугунной летки, который колеблется в интервале 0,68–0,9, для различных условий.

Библиографический список

1. Маханек, Н. Г. К вопросу выпуска продуктов плавки из доменной печи [Текст] / Н. Г. Маханек, О. П. Онорин, О. К. Грибоедова и др. // Производство чугуна : межвуз. сб. — Свердловск, 1979. — С. 104–114.
2. Пляшкевич, А. С. Расчётные и модельные исследования движения чугуна в горне доменной печи [Текст] / А. С. Пляшкевич, Н. М. Бабушкин / *Металлургическая теплотехника : тематический отраслевой сб.* — М. : Металлургия, 1970. — № 8 — С. 121.
3. Товаровский, И. Г. Доменная плавка в мощных доменных печах [Текст] / И. Г. Товаровский, Р. Д. Каменев, Г. Б. Рабинович. — М. : Металлургия, 1968. — 116 с.
4. Новохатский, А. М. Методики и технические средства определения технологического состояния горна доменной печи [Текст] / А. М. Новохатский, Г. Д. Михайлюк / *Донбасский государственный технический университет : сб. научн. трудов.* — Алчевск, 2008. — Вып. 27. — С. 201–209.

© Новохатский А. М.

© Блинов А. М.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.,
вед. инженером ЦЛК ПАО «АМК» Самарским В. Н.**

Статья поступила в редакцию 09.10.17.

д.т.н. Новохатський О. М., Блинов О. М. (ДонДТУ, Алчевськ, ЛНР, bat_10_89@mail.ru)

ХАРАКТЕР ВИПУСКУ ПРОДУКТІВ ПЛАВКИ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КАНАЛУ ЧАВУННОЇ ЛЬОТКИ

Проведено аналіз витікання продуктів плавки по каналу чавунної льотки доменної печі. Визначено вплив геометричних параметрів каналу на характер та тривалість випуску.

Ключові слова: холодна модель горна доменної печі, канал чавунної льотки, кокс, тривалість випуску, еквівалентний діаметр.

Doctor of Tech. Sc. Novokhatskiy A. M., Blinov A. M. (DonSTU, Alchevsk, LPR, bat_10_89@mail.ru)

TYPE OF MELTING PRODUCTS TAPPING ACCORDING TO GEOMETRIC PARAMETERS OF TAPHOLE CHANNEL

There has been carried out the analysis of melting products flowing along the tap-hole channel of blast furnace. There has been determined the influence of geometric channel parameters on a type and time of tapping.

Key words: cold model of the blast-furnace hearth, taphole channel, coke, tap time, equivalent diameter.

УДК 621.762.4

д.т.н Рябичева Л. А.
(Луганский национальный университет им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР,
e-mail ryabic@gmail.com)

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ

В статье представлены результаты исследования структуры и физико-механических свойств порошкового медно-титанового материала, полученного различными механическими схемами деформации. Наименьшая величина зерна, наибольшая плотность, твердость и микротвердость получены при РКУ-прессовании.

Ключевые слова: наноматериалы, РКУ-прессование, холодная закрытая осадка, горячая закрытая осадка, плотность, твердость, микротвердость, предел прочности.

Развитие нанотехнологий в скором будущем должно изменить экономику и затронуть многие стороны создания новых материалов и изделий. Долгое время в обработке давлением занимались созданием технологий на макроуровне, т. е. формоизменением для изготовления деталей машин, получением проката. Сейчас получены данные, представляющие возможность на микроуровне управлять различными физико-химическими эффектами, позволяющими изготавливать новые изделия с высоким уровнем свойств. Академик Н. П. Лякишев отмечал «... известно, что свойства металлов улучшаются «измельчением» их структуры. Чем меньше частицы, из которых состоит сталь, тем выше ее качество. Прочность металлов в наносостоянии возрастает в 3–4 раза, твердость — во сто крат, усиливается стойкость к коррозии».

Современные масштабы производства в металлургии достигли значительных объемов: выплавка стали в мире превысила 1,3 млрд т в год; более 80 % выплавленной стали перерабатывается в металлопродукцию с использованием различных способов обработки давлением: прокатное, трубное и кузнечно-штамповочное производство [1]. В настоящее время только незначительная часть в металлургическом производстве занимает специальная металлургия,

направленная на производство конкурентоспособной металлопродукции.

Существуют ключевые приоритеты развития нанотехнологий, к которым относится применение процессов обработки давлением для получения новых материалов [2]. Многообразие методов порошковой металлургии, к которым относится компактирование нанопорошков, интенсивная пластическая деформация (ИПД), кристаллизация из аморфного состояния, обеспечивает широкие возможности для получения наноматериалов. Перспективными способами получения наноматериалов являются: спекание нанопорошков под давлением, кручение под гидростатическим давлением, знакопеременный изгиб, равноканальное угловое прессование [3].

В последние годы использование методов интенсивной пластической деформации для получения объемных наноструктурных материалов с ультрамелкозернистой структурой в субмикроструктурном (размер зерен $d \sim 100\text{--}1000\text{ нм}$) или нанокристаллическом ($d < 100\text{ нм}$) диапазонах становится одним из наиболее актуальных направлений обработки давлением и материаловедения. Такие материалы с новыми свойствами рассматриваются как перспективные конструкционные и функциональные материалы следующего поколения металлов и сплавов.

Любая пластическая деформация оказывает существенное влияние на микроструктуру и свойства материалов. Например, при интенсивной прокатке или протяжке происходит измельчение микроструктуры и формирование ячеек, субзерен и фрагментов, что может привести к определенному повышению их прочностных характеристик. Однако материалы, подвергнутые деформации этими традиционными методами, обычно обладают пониженной пластичностью, которая является одной из фундаментальных характеристик, необходимых для разработки новых конструкционных материалов. Как правило, и наноматериалы, получаемые компактированием порошков, обладают так же очень низкой пластичностью и, более того, часто бывают хрупкими [3]. Это является причиной растущего интереса к развитию методов интенсивной пластической деформации, позволяющих формировать ультрамелкозернистые (УМЗ) структуры и, как результат, приводить к новым физическим и механическим свойствам.

Равноканальное угловое (РКУ) прессование наряду с кручением под высоким давлением относится к методам ИПД, впервые использованным для получения УМЗ металлов и сплавов. Несмотря на активное развитие нескольких новых методов ИПД (всестороннейковки, прокатки с наложением и соединением листов, специального циклического деформирования и ряда других), РКУ-прессование остается наиболее широко исследуемым методом ИПД. Кроме того, модернизация РКУ-прессования, в частности, при создании непрерывного процесса, может обеспечить его широкое практическое использование.

Целью работы является сравнительный анализ структуры и физико-механических свойств порошкового медно-титанового материала, полученного различными механическими схемами деформации.

Образцы изготавливали из композиционного порошкового материала на медной основе. В качестве основной составляющей композиции использовали порошок стабилизированный медный марки ПМС-1 (ГОСТ 4960-75), форма частиц дендритная; в качестве легирующей добавки — порошок титана марки ВТ1-0 (ГОСТ 1.90013-81) 0,5 % по массе. Номинальная величина частиц порошка титана 0,063 мм, форма частиц — дендритная. Смешивание порошков меди и титана выполняли механическим методом в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 0,5 ч. Образцы получали по следующей технологии: смешивание порошков, прессование, спекание, деформирование по двум схемам (РКУ-прессование и закрытая осадка при комнатной и повышенной температуре).

Двухстороннее прессование призматических образцов выполняли на гидравлическом прессе модели ПД-476 усилием 1600 кН. Спекание производили в лабораторной печи СШОЛ-11.6/12-МЗ по ступенчатому режиму в среде генераторного газа (состав газа: 72 % H_2 , 21 % CO , 5,5 % CO_2 , 1,5 % H_2O). Деформирование пористых образцов осуществляли на том же гидравлическом прессе. РКУ выполняли в штампе с приложением противодействия 110 МПа (рис. 1). Основная особенность штампа для РКУ-прессования состоит в конструкции пресс-формы, вертикальный входной канал которой имеет круглое сечение, а горизонтальный (выходной) канал — прямоугольное сечение. Это обеспечивает полное заполнение внешнего угла каналов, способствует накоплению большей степени истинной деформации и более равномерному распределению внутренних напряжений. Закрытую осадку выполняли при максимальном давлении 225 МПа в штампе, показанном на рисунке 1, б. Закрытую осадку производили при комнатной (X_3O) и повышенной температуре 500°C ($Г_3O$).

После каждой операции определяли плотность образцов методом гидростатического взвешивания (ГОСТ 20018-74). Микроструктуру изучали с помощью оптического микроскопа МИМ-8. Микротвердость исследовали на приборе ПМТ-3 (ГОСТ 9450-76), а твердость — на

приборе Роквелла (ГОСТ 9013-59); испытание на сжатие выполняли на универсальной испытательной машине Z/D 10/90. Насыпная плотность порошковой смеси меди с титаном составила 1,65 г/см³ (ГОСТ 19440-74).

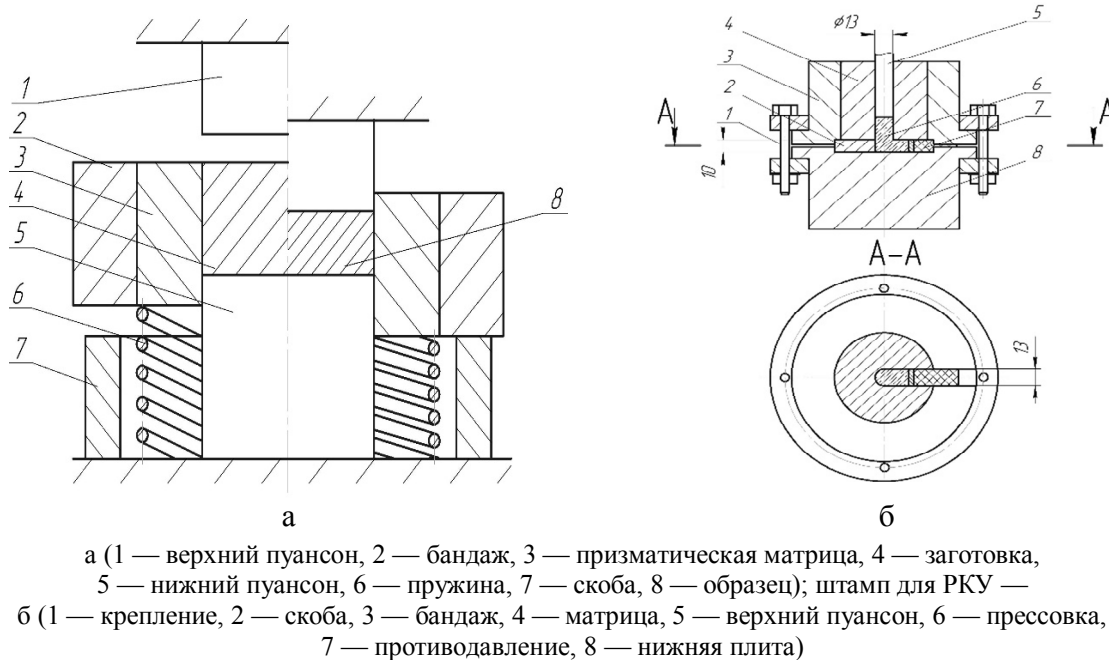


Рисунок 1 Штамп для закрытой осадки

Плотность порошковой смеси рассчитывали по формуле аддитивности:

$$\rho_{см} = \frac{100\%}{\frac{X_{Cu}}{\rho_{Cu}} + \frac{X_{Ti}}{\rho_{Ti}}},$$

где X_{Cu} — содержание меди в смеси, %; плотность меди $\rho_{Cu} = 8,94$ г/см³;

X_{Ti} — содержание титана в смеси, %; плотность титана $\rho_{Ti} = 4,505$ г/см³.

Расчетная плотность образцов составила 8,89 г/см³.

Размеры и плотность прессовок после прессования приведены в таблице 1, после спекания — в таблице 2. После спекания плотность образцов увеличилась вследствие их усадки.

Таблица 1

Размеры и плотность прессовок

Схема деформации	Размеры, мм	Плотность, г/см ³	Пористость, %
I – РКУ	Ø12,75×54,30	7,64	14,06
II – ХЗО	12×12,7×54,2	7,59	14,96
III – ГЗО	12,0×12,5×54,2	7,57	14,88

Таблица 2

Размеры и плотность прессовок после спекания

Схема деформации	Размеры, мм	Плотность, г/см ³	Пористость, %
I	Ø12,45×53,20	8,25	7,3
II	11,73×12,35×53,1	8,18	8,0
III	11,72×12,35×53,1	8,19	7,9

Изменения размеров и плотности образцов после различных схем деформации представлены в таблице 3.

Из анализа таблицы 3 следует, что после РКУ-прессования плотность по всему объему образца одинаковая, практически отсутствует разнородность вследствие схемы всестороннего неравномерного сжатия (рис. 3). После холодной закрытой осадки плотность самая низкая из трех исследуемых схем деформации, причем у стенок матрицы она меньше, вследствие сил контактного трения. После горячей закрытой осадки это уменьшение несколько меньше.

В структуре образцов после спекания видны зерна меди, частицы титана и поры (рис. 3). Среднестатистическая величина

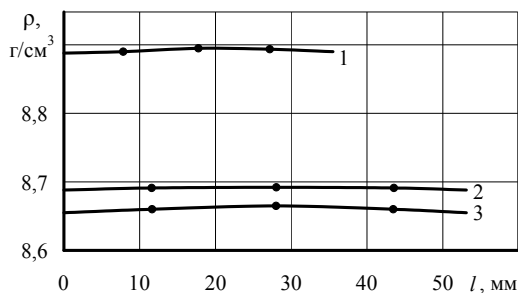
зерна меди составляет 21–22 мкм, размер частиц титана — 55 мкм, в то время как номинальный размер частиц порошка титана ВТ1-0 составляет 63 мкм.

Анализ микроструктуры после РКУ-прессования вдоль оси на боковой части образца показал ярко выраженную текстуру деформации: зерна меди и частицы титана вытягиваются вдоль направления деформирования (рис. 4, а) [4]. После холодной закрытой осадки сформировалась крупнозернистая равноосная структура с крупными частицами титана (рис. 4, б). Горячая закрытая осадка выполнена выше температуры рекристаллизации, что привело к образованию зерна меньшего размера, чем при холодной осадке (табл. 4) [5].

Таблица 3

Плотность и размеры образцов после деформации

Схема деформации	Размеры, мм	Плотность, г/см ³	Пористость, %
I	10×10×35,5	8,89	0,088
II	9,57×12,7×54,2	8,66	2,67
III	8,72×12,7×54,2	8,76	1,54

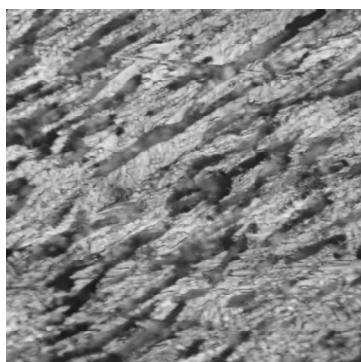


1 — РКУ-прессование; 2 — ГЗО; 3 — ЗО

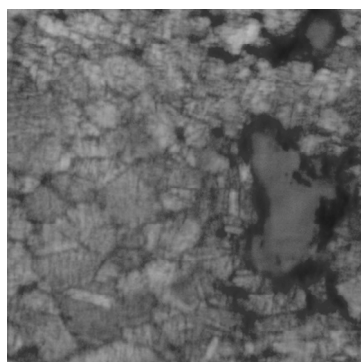
Рисунок 2 Распределение плотности по длине образца



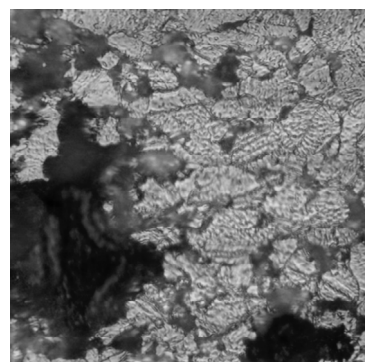
Рисунок 3 Микроструктура после спекания, x500



а



б



в

а — РКУ-прессования (средняя зона); б — ХЗО; в — ГЗО, x1440

Рисунок 4 Микроструктура после деформирования

Деформирование образцов по различным схемам деформации привело к измельчению зерна и частиц титана (табл. 4). Наименьший размер зерна меди и частиц титана получен после РКУ-прессования [6]. По изменению микротвердости оценивали уровень напряжений в образцах после различных схем деформации (рис. 5). Вследствие жесткой схемы напряженного состояния при РКУ-прессовании получен наиболее высокий уровень микротвердости, что и обеспечило высокую плотность образцов (рис. 5, а). После закрытой осадки

микротвердость меньше, что соответствует увеличению плотности.

Для оценки влияния схемы деформации на формирование механических свойств материала измеряли твердость и определяли предел текучести и предел прочности при сжатии. Характер распределения твердости аналогичен распределению микротвердости (рис. 5, б). Наиболее высокие прочностные свойства получены после РКУ-прессования, очевидно, вследствие более прочных контактных связей между частицами (табл. 5).

Таблица 4

Размер зерна после деформирования

	d_{Cu} , мкм	d_{Ti} , мкм
РКУ-прессование	2,3-2,5	2,11
ХЗО	15,8	47,40
ГЗО	19,3	40,3

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

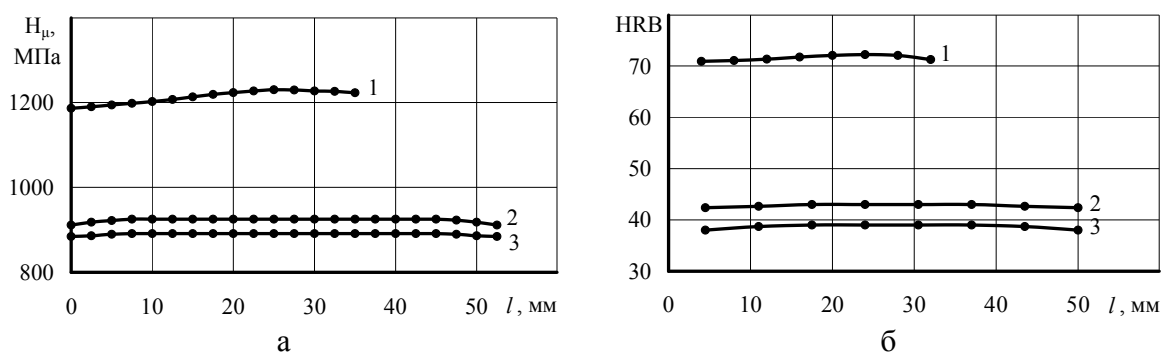


Рисунок 5 Распределение микротвердости а и твердости – б после деформирования:
1 — РКУ-прессование; 2 — ХЗО; 3 — ГЗО

Таблица 5

Механические свойства

	σ_T , МПа	σ_B , МПа
РКУ-прессование	625	881,5
ХЗО	451,4	677,2
ГЗО	525	697,5

Вывод. Выполнены сравнительные исследования по влиянию схемы деформации на формирование структуры и физико-механических свойств порошкового медно-титанового материала.

Наименьшая величина зерна, наибольшая плотность, твердость и микротвердость, а также прочностные свойства получены после РКУ-прессования вследствие более прочных межчастичных связей.

Библиографический список

1. Дубровский, В. А. Современные тенденции развития технологии в машиностроении и перспективы использования прогрессивных методов обработки металлов давлением [Текст] / В. А. Дубровский, Н. И. Подволоцкая, В. П. Ступников // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2005. — № 5. — С. 3–6.
2. Колпаков, С. В. Перспективы развития мировой металлургии [Текст] / С. В. Колпаков / Металлург, 2005. — № 1. — С. 3–7.
3. Валиев, Р. З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией [Текст] / Р. З. Валиев, И. В. Александров. — М.: Логос, 2000. — 272 с.
4. Рябичева, Л. А. Технология изготовления порошковых деталей методами пластического деформирования [Текст] / Л. А. Рябичева. — Луганск: изд-во ВЛУ им. В. Даля, 2011. — 180 с.
5. Рябичева, Л. А. Структура и свойства порошковой меди после РКУ-прессования [Текст] / Л. А. Рябичева, Д. А. Усатюк, В. В. Смоляк, Т. А. Рябовол // 3-я Международная конференция HighMatTech. — Київ, 2011. — С. 268.
6. Рябичева, Л. А. Новые порошковые материалы: структура и свойства [Текст] / Л. А. Рябичева // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки матеріалів у машинобудуванні: зб. наук. пр. Луганськ. — Вид-во СЛУ ім. В. Даля, 2011. — № 1(12). — С. 3–12.

© Рябичева Л. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М.,
пом. нач. сортопрокатного цеха ПАО «АМК», к.т.н. Чичканом А. А.

Статья поступила в редакцию 09.10.17.

д.т.н Рябічева Л. О. (Луганський національний університет ім. В. Даля, Луганськ, ЛНР, e-mail ryabic@gmail.com)

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ОТРИМАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ

У статті подано результати дослідження структури та фізико-механічних властивостей порошкового мідно-титанового матеріалу, отриманого різними механічними схемами деформування. Найменшу величину зерна, найбільшу щільність, твердість та мікротвердість отримано при РКУ-пресуванні.

Ключові слова: наноматеріали, РКУ-пресування, холодна закрита осадка, гаряча закрита осадка, щільність, твердість, мікротвердість, межа міцності.

Doctor of Eng. Riabicheva L. A. (V. Dahl Luhansk National University, Lugansk, LPR)

PROSPECTS OF DEVELOPING THE METHODS OF NANOMANUFACTURING

The paper presents the results of studying the structure and physical and mechanical properties of powdered copper-titanium material manufactured on various mechanical deformation schemes. The smallest grain size, the largest density, hardness, and microhardness have been achieved through CGS-pressing.

Key words: nanomaterials, CGS-pressing, cold closed sediment, hot closed sediment, density, hardness, microhardness, ultimate strength.

УДК 669.04: 669.054.8

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

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДА ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ РАСПЛАВА ДВУМЯ РУДНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫМИ БЛОКАМИ

Впервые исследованы параметры метода дугового глубинного восстановления элементов при одновременной обработке железоуглеродистого расплава двумя рудно-восстановительными блоками. Показано, что в случае использования двух блоков повышается степень и скорость извлечения полезных элементов, а также скорость нагрева расплава заглубленным в его объем дуговым разрядом, что наряду со снижением расхода электроэнергии способствует значительному снижению себестоимости обработки в сравнении с базовыми технологиями.

Ключевые слова: железоуглеродистый расплав, дуговое глубинное восстановление, рудно-восстановительный блок, эффективность, раскисление, легирование, нагрев, себестоимость.

В настоящее время созданы теоретические основы и разработана технология дугового глубинного восстановления (ДГВ) элементов в железоуглеродистые расплавы для их рафинирования, раскисления, легирования, гомогенизации и нагрева [1, 2]. Данный метод был успешно реализован для десульфурации чугуна магнием и кальцием, восстанавливаемыми непосредственно в жидкий металл из их оксидов, входящих в состав различных отходов производства, вторичных материалов и недефицитного сырья (магнезит, бой магнезитовых огнеупоров, доломит, известь, известняк и др.). Кроме того, на нескольких машиностроительных и литейных предприятиях для раскисления и легирования железоуглеродистых расплавов опробована технология ДГВ Mn и Si из шлака от производства силикомарганца (MnC), которая показала свою достаточно высокую эффективность в сравнении с традиционной технологией, предусматривающей использование для этих целей дорогостоящих ферросплавов и лигатур. Одним из основных преимуществ метода ДГВ является ресурсосбережение вследствие использования в качестве шихты бедных руд, шлаков, шламов, отходов и вторичных материалов для замены дорогостоящего первичного рудного сырья. Кроме того, более низкая себестоимость такого

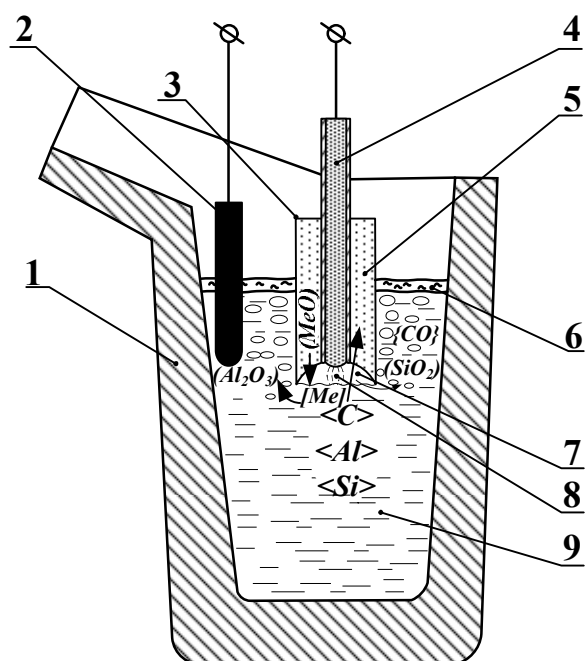
вида обработки позволяет получить значительный экономический эффект [3–5].

Принципиальная схема реализованных в настоящее время технологий обработки расплавов по методу ДГВ, в индукционной сталеплавильной тигельной печи (ИСТ), представлена на рисунке 1 и предусматривает использование одного рудно-восстановительного блока (РВБ), а для зажигания дуги в расплав дополнительно вводится графитовый контактный элемент в виде цилиндрического стержня или параллелепипеда.

Наиболее важными технологическими параметрами метода ДГВ являются степень и скорость извлечения элементов, расход электроэнергии как основной затратной статьи в себестоимости процесса, скорость и эффективность нагрева расплава заглубленной дугой, себестоимость обработки и др.

Одним из недостатков, выявленных при реализации метода, является невысокая скорость восстановления элементов, что в первую очередь обусловлено относительной бедностью по их содержанию использованных отходов. При переработке шлака от производства MnC, содержащего 8–30 % MnO, этот показатель находился в среднем на уровне 0,01 %/мин для каждого из извлекаемых элементов. Поэтому за 10–30 мин внепечной обработки расплав дополнитель-

но насыщался Mn и Si на величину 0,1–0,3 %. Такого содержания отмеченных элементов в стали вполне достаточно для ее раскисления, а для обеспечения более высоких концентраций Mn и Si в металле необходимо усовершенствование технологии с целью увеличения скорости извлечения полезных элементов в расплав, что и явилось основной задачей исследований.



- 1 — тигель ИСТ; 2 — графитовый контактный электрод; 3 — рудно-восстановительный блок; 4 — комбинированный токоподводящий электрод; 5 — рудно-восстановительная смесь; 6 — шлак; 7 — пусковая полость; 8 — электрическая дуга; 9 — обрабатываемый расплав

Рисунок 1 Схема обработки расплавов по методу ДГВ в ИСТ

Анализ используемой технологической схемы показал, что эффективным решением отмеченного недостатка может быть замена применяемого для образования дуги графитового контактного элемента на второй РВБ. В случае использования технологии ДГВ на предприятиях, имеющих в составе технологического оборудования дуговые печи, для обработки может использоваться их система электродержателей, в которую вместо графитовых электродов устанавливается три РВБ для обработки расплава с целью его раскисления, легирования, рафинирования, нагрева и перемешивания.

Для подтверждения выдвинутой гипотезы в лабораторных условиях была проведена серия экспериментов по одновременной обработке железоуглеродистого расплава в ИСТ методом ДГВ двумя РВБ (рис. 2).

Рисунок 2 РВБ в резервной позиции (а, б) и обработка расплава двумя РВБ в ИСТ (в, г)



1 — ИСТ; 2 — устройства для погружения РВБ в расплав; 3 — РВБ; 4 — отходящие в процессе обработки газы

Рисунок 2 РВБ в резервной позиции (а, б) и обработка расплава двумя РВБ в ИСТ (в, г)

Базовым компонентом рудно-восстановительной смеси (РВС) в использованных РВБ был шлак от производства MnC. Состав РВС, конструкция и состав комбинированных электродов (КЭ) и самого РВБ, а также основные температурные и энергетические параметры обработки были выбраны на основании оптимальных значений технологических и конструктивных параметров метода ДГВ, установленных в ходе предыдущих исследований [1, 2, 6–8] и рекомендованных для обеспечения максимальной степени и эффективности извлечения Mn. Кремний в технологии переработки шлака от производства MnC мето-

дом ДГВ является побочным продуктом, и создание условий для его эффективного извлечения не входило в перечень решаемых задач. Тем не менее было отмечено, что эффективность нового метода существенно возрастает при увеличении степени извлечения Si, так как создаются условия для сокращения расхода дорогостоящих кремниевых ферросплавов.

Для сравнительного анализа ТЭП обработки расплава по методу ДГВ с использованием различного количества РВБ было проведено 4 опытных плавки, на которых для насыщения металла Mn и Si в него одновременно погружалось два РВБ. При проведении экспериментов температура расплава перед обработкой была больше 1500°C ($1524\text{--}1645^{\circ}\text{C}$), диаметр РВБ составлял 55 мм, отношение площади поперечного сечения РВБ к площади поперечного сечения КЭ 9,4, сила переменного тока 250 А, удельная мощность, подводимая в зону горения электрической дуги, $4,1\text{--}5,7\text{ Вт/мм}^2$ площади поперечного сечения РВБ ($39\text{--}53\text{ Вт/мм}^2$ площади поперечного сечения КЭ), основность РВС 1,4, содержание магнезита в электродной смеси 12,5 %, скорость расходования РВБ $0,37\text{--}0,50\text{ мм/с}$.

Практически все рекомендованные в работах [1, 2, 6–8] параметры были выдержаны, за исключением скорости расходования РВБ и величины удельной мощности, подводимой в зону горения электрической дуги (Вт/мм^2 площади поперечного сечения КЭ), значения которых имели незначительные отклонения.

Полученная на плавке № 4 скорость расходования РВБ $0,37\text{ мм/с}$ обусловлена более плотной формовкой блока, а на плавке № 3 — $0,50\text{ мм/с}$ — более высокой начальной температурой обработки расплава (1645°C). Однако отклонение этого параметра не оказало существенного влияния на экономическую эффективность процесса, и снижение суммарных затрат на этих плавках в сравнении с обработкой ферросплавами (ФС) составило 45,2 % и 65,54 % соответственно.

Рекомендуемая в выше отмеченных работах удельная мощность, подводимая в зону горения электрической дуги, составляет $40\text{--}45\text{ Вт/мм}^2$ площади поперечного сечения КЭ. Однако в соответствии с установленной в работах [1, 2] зависимостью влияния подводимой мощности на размеры откалывающихся фрагментов ЭС повышение мощности способствует уменьшению их размеров, что является позитивным фактором для исследуемой технологии. Уменьшение размеров откалывающихся фрагментов электродной смеси будет способствовать стабилизации режима горения электрической дуги, обеспечивая меньшие колебания ее длины и более плавный переход дугового разряда на стальную трубку, что немаловажно для организации автоматизированного управления процессом. Кроме того, большая мощность на дуге способствует увеличению степени извлечения элементов (рис. 3), и на рассматриваемой плавке эта величина составила 95 % и 13 % для Mn и Si соответственно, что в конечном итоге компенсировало повышенный расход электроэнергии в калькуляции себестоимости обработки и позволило получить снижение суммарных затрат в сравнении с обработкой ФС на 32,3 %.

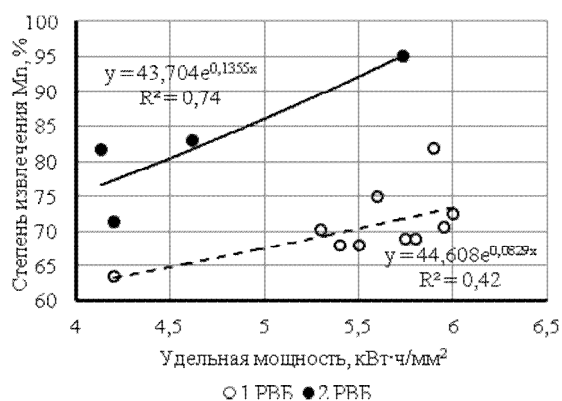


Рисунок 3 Зависимости степени извлечения Mn от удельной мощности на дуге при обработке одним и двумя РВБ

Результаты рисунка 3 свидетельствуют о том, что повышение мощности на дуге оказывает положительное влияние на степень извлечения Mn как при обработке одним РВБ, так и двумя.

Более высокие значения степени извлечения Mn при обработке двумя РВБ можно объяснить улучшением тепло- и массообмена в результате увеличения интенсивности перемешивания и объемов расплава вовлеченных в него за счет газообразных продуктов реакций, выделяющихся в ходе реализации метода ДГВ с реакционных поверхностей двух РВБ, и, соответственно, обеспечения более благоприятных кинетических условий для протекания восстановительных процессов.

Этим же можно объяснить и более высокие значения степени извлечения Mn, максимальное значение которой при обработке одним блоком составило 82 %, тогда как при использовании двух блоков эта величина находилась в пределах 71,4–95 % при среднем значении 82,8 % (рис. 4).

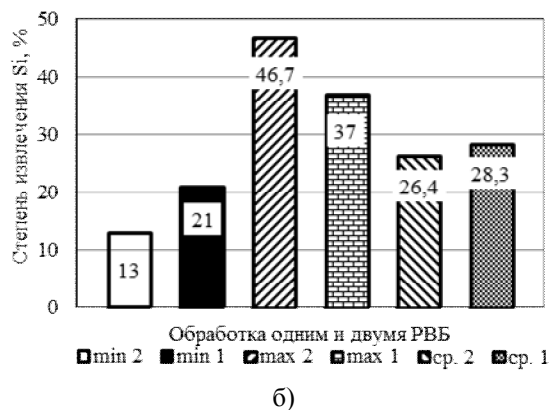
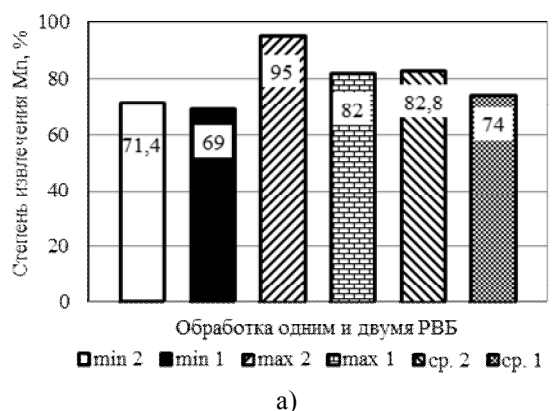


Рисунок 4 Пределы и средние значения степени извлечения Mn (а) и Si (б) при обработке одним и двумя РВБ

Как было отмечено выше, для эффективного извлечения Mn температура расплава перед обработкой должна быть не ниже температуры восстановления его из силиката с учетом протекания процесса в объеме обрабатываемого расплава. Повышение температуры увеличивает степень извлечения, однако требует больших энергетических затрат. Тем не менее для увеличения степени извлечения Si этот параметр может быть одним из основных управляющих факторов.

Так, при начальной температуре расплава 1645°C, очень близкой к температуре восстановления Si в условиях заглубленного в объем металла дугового разряда (1653°C), отмечена высокая степень его извлечения из РВС (46,7 %) со скоростью 0,04 %/мин (рис. 5), а степень извлечения Mn для этих условий составила 83 %. При этом удельный расход электроэнергии на процесс составил 0,496 кВт·ч/моль, что практически в 3 раза меньше среднего значения этой величины, характерного для обработки одним РВБ, которое составляет 1,419 кВт·ч/моль, и в 2,5 раза меньше удельного расхода электроэнергии, характерного для обработки двумя РВБ при начальной температуре обрабатываемого расплава в пределах 1524–1562°C, средняя величина которого имеет значение 1,245 кВт·ч/моль (рис. 6).

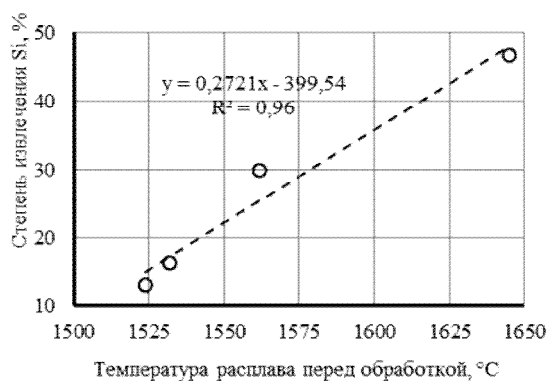


Рисунок 5 Влияние температуры расплава перед обработкой на степень извлечения Si

На основании вышеизложенного можно утверждать, что расплавы, в которых необходимо иметь большее содержание Mn, нужно обрабатывать при меньшей начальной их температуре и, наоборот, в случае необходимости обеспечения высокого содержания Si в металле начальная температура расплава должна быть не менее 1650°C.

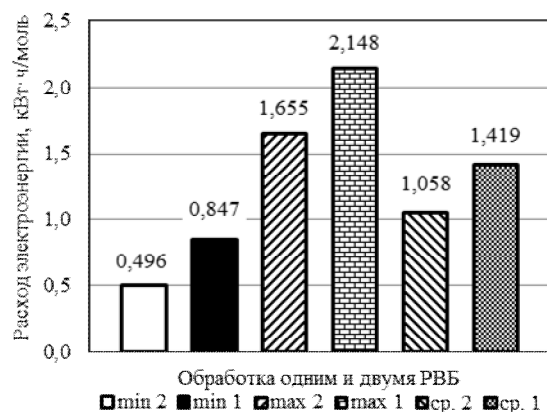


Рисунок 6 Пределы и средние значения удельного расхода электроэнергии на извлечение суммарного количества Mn и Si при обработке одним и двумя РВБ

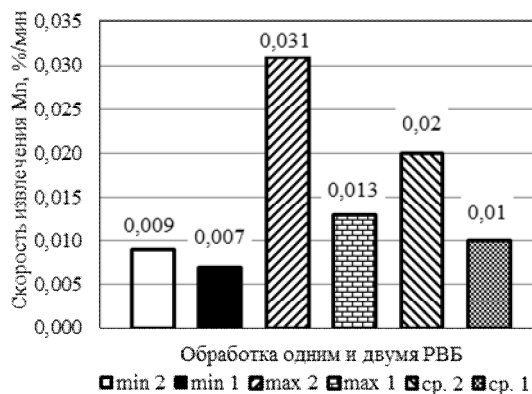
На рисунке 7 представлены значения скорости извлечения Mn и Si в расплав.

Как и ожидалось, замена графитового контакта вторым РВБ позволила в 2 раза увеличить величину этого параметра, что является важным фактором в случае необходимости обеспечения высокого содержания легирующих элементов в расплаве в условиях ограниченного времени внепечной обработки.

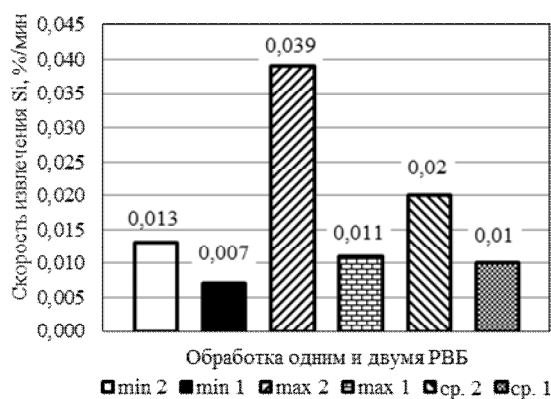
Согласно данным рисунка 7, скорости извлечения Mn и Si практически одинаковы, несмотря на тот факт, что степень извлечения Mn почти в 3 раза превышает степень извлечения Si. Однако это легко объясняется составом РВС, в которой содержание SiO₂ в 4–7 раз превышает содержание MnO.

Следующим важным параметром, исследованным в данной работе, является скорость нагрева расплава. Данные рисунка 8 свидетельствуют о значительном улучше-

нии теплового баланса при обработке металла двумя РВБ, при которой средняя скорость нагрева ванны возрастает практически на 30 %.



а)



б)

Рисунок 7 Пределы и средние значения скорости извлечения Mn (а) и Si (б) при обработке одним и двумя РВБ

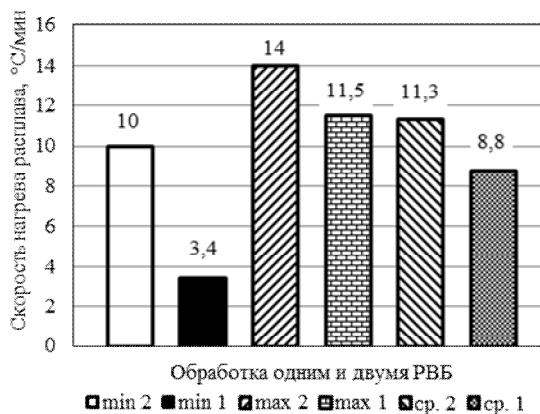


Рисунок 8 Пределы и средние значения скорости нагрева расплава при обработке одним и двумя РВБ

Это может быть связано с отмеченным выше усилением барботажа ванны отходящими из реакционной зоны газами, когда улучшаются условия переноса тепла к нижним объемам расплава и меньшее его количество теряется через зеркало металла. Кроме того, больший экранирующий эффект оказывает второй РВБ в сравнении с используемым ранее контактным электродом.

Экономическую эффективность нового способа обработки железоуглеродистого расплава оценивали сравнением разницы между затратами, имеющими место при реализации внепечного раскисления и легирования по методу ДГВ с использованием одного и двух РВБ, а также базовой технологии, предусматривающей применение ФС, содержащих Mn и Si. На рисунке 9 показана экономическая эффективность различных технологических схем обработки железоуглеродистых расплавов.

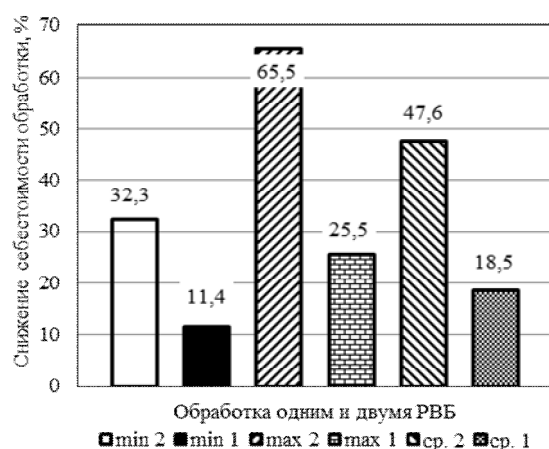


Рисунок 9 Пределы и средние значения снижения себестоимости обработки при использовании одного и двух РВБ

Данные, представленные на рисунке 9, свидетельствуют о значительных преимуществах способа обработки железоуглеродистых расплавов двумя РВБ не только в сравнении с базовой технологией, но и с технологией ДГВ, предусматривающей использование одного РВБ.

Снижение затрат на обработку расплава по методу ДГВ с одновременным использованием двух РВБ обусловлено значительным улучшением практически всех параметров обработки, исследованных в ходе проведенных экспериментов.

Таким образом, впервые исследованы параметры метода ДГВ при одновременной обработке железоуглеродистого расплава двумя РВБ. В результате проведенных экспериментов и обработки их результатов показано, что в случае использования двух РВБ повышается степень и скорость извлечения полезных элементов, а также скорость нагрева расплава заглубленным в его объем дуговым разрядом, что наряду со снижением расхода электроэнергии способствует значительному уменьшению затрат на обработку в сравнении с базовыми технологиями.

В ходе последующих исследований предполагается исследовать параметры процесса ДГВ при использовании двух РВБ, состоящих из различных РВС, для решения задач одновременного насыщения металла несколькими полезными элементами или параллельного выполнения операций по раскислению и легированию, а также рафинированию железоуглеродистых расплавов.

Библиографический список

1. Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов [Текст]: монография / А. Н. Смирнов и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 320 с.
2. Куберский, С. В. Внепечная обработка расплавов методом дугового глубинного восстановления [Текст]: монография / С. В. Куберский, А. Н. Смирнов, М. Ю. Проценко. — LAMBERT Academic Publishing, Германия, 2014. — 116 с.
3. Проценко, М. Ю. Сравнение эффективности легирования металла ферросплавами и методом дугового глубинного восстановления [Текст] / М. Ю. Проценко, С. В. Куберский, В. С. Эссельбах // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2011. — № 35. — С. 211–220.

4. Проценко, М. Ю. Использование отходов ферросплавного производства для легирования металла методом дугового глубинного восстановления [Текст] / М. Ю. Проценко и др. // Металл и литье Украины. — 2010. — № 9–10. — С. 54–57.

5. Проценко, М. Ю. Сравнительный анализ эффективности легирования металла методом дугового глубинного восстановления и ферросплавами [Текст] / М. Ю. Проценко и др. // Сборник научных трудов конференции «Инновационные технологии внепечной металлургии чугуна и стали». — Донецк : ДонНТУ, 2011. — С. 143–151.

6. Куберский, С. В. Анализ технологических параметров обработки металла методом дугового глубинного восстановления марганца [Текст] / С. В. Куберский и др. // Наукові праці Донецького національного технічного університету. серія «Металургія». — Донецьк : ДонНТУ, 2013. — № 1(16)–2(17). — С. 96–106.

7. Куберский, С. В. Влияние состава рудно-восстановительной смеси на эффективность дугового глубинного извлечения элементов из силикомарганцевого шлака [Текст] / С. В. Куберский, М. Ю. Проценко // Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра: матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції. — К. : НТУУ «КПІ», 2015. — С. 497–507. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.science-community.org/en/system/files/Conference_Info_21_04_2015.pdf

8. Куберский, С. В. Влияние состава рудно-восстановительных смесей на основе силикомарганцевого шлака на степень извлечения марганца и кремния [Текст] / С. В. Куберский // Металл и литье Украины. — 2015. — № 12. — С.3–6.

© Куберский С. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М., старшим мастером ОНРС ККЦ ПАО «АМК» Максаевым Е. Н.

Статья поступила в редакцию 10.10.17.

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

АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ МЕТОДУ ДУГОВОГО ГЛИБИННОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЗА ОДНОЧАСНОЇ ОБРОБКИ РОЗПЛАВУ ДВОМА РУДНО-ВІДНОВНИМИ БЛОКАМИ

Вперше досліджено параметри методу дугового глибинного відновлення елементів за одночасної обробки залізовуглецевого розплаву двома рудно-відновними блоками. Показано, що у разі використання двох блоків підвищується ступінь і швидкість вилучення корисних елементів, а також швидкість нагріву розплаву заглибленим в його об'єм дуговим розрядом, що поряд зі зниженням витрат електроенергії сприяє значному зниженню вартості обробки в порівнянні з базовими технологіями.

Ключові слова: залізовуглецевий розплав, дугове глибинне відновлення, рудно-відновний блок, ефективність, розкислення, легування, нагрів, собівартість.

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

ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF THE ARC DEEP REDUCTION METHOD AT THE SIMULTANEOUS PROCESSING OF MELT WITH TWO ORE-REDUCING BLOCKS

For the first time, the parameters of the arc deep reduction method have been studied at simultaneous processing the iron-carbon melt with two ore-reducing blocks. It is shown that if two blocks are used, the degree and the rate of extraction of useful elements increases, as well as the heating rate of the melt by buried arc discharge in its volume, that along with the reduction of power consumption, significantly reduces the cost of processing in comparison with basic technologies.

Key words: iron-carbon melt, arc deep reduction, ore-reducing block, efficiency, deoxidation, alloying, heating, cost price.

УДК 669.162

Лукьянов А. В.,
Зубенко А. В.,
Ивасенко В. В.

(Филиал № 2 «ЕМЗ» ЗАО «Внешторгсервис», г. Енакиево, ДНР)

ЭФФЕКТИВНАЯ РАБОТА АГЛОДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ФИЛИАЛА № 2 «ЕМЗ» ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» ПРИ РАСШИРЕНИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ШИХТЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ И ОКАТЫШЕЙ

С целью уменьшения удельного расхода минерального сырья при выплавке чугуна заданного качества в условиях Филиала № 2 «ЕМЗ» ЗАО «Внешторгсервис» опробована и внедрена технология подготовки металлургических отходов к аглодоменному переделу, позволившая увеличить расход вторичных ресурсов на 27 кг/т агломерата и улучшить прочность агломерата на 2,36 %. Повышение качества агломерата, распределение шихтовых материалов по сечению колошника, обеспечивающих самообновление защитного гарнисажа, позволило сократить вынос колошниковой пыли на 4,3 кг/т чугуна и уменьшить расход кокса на 19,6 кг/т чугуна, повысить конкурентоспособность продукции Филиала № 2 «ЕМЗ» ЗАО «Внешторгсервис» (далее ЕМЗ) даже при дополнительных затратах на подготовку аглошихты к спеканию.

Ключевые слова: вторичные ресурсы, качество агломерата, доменная плавка, расход кокса.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Особенность металлургического производства — высокая материало- и энергоемкость продукции при значительном накоплении техногенных отходов, что ухудшает экологическую обстановку в регионах добычи и переработки железных руд [1].

В результате обеспечения доменного производства ЕМЗ шихтовыми материалами в агломерационной и доменной шихтах содержатся 22–25 % вторичных ресурсов от массы всех железосодержащих и флюсовых материалов на 1 т чугуна. Ситуация с шихтовыми материалами осложняется тем, что доля частично офлюсованных окатышей в составе шихтовых материалов периодически может изменяться от 20 до 55 %, вызывая необходимость изменения химического состава агломерата в достаточно широком диапазоне. В связи с увеличением доли вторичных ресурсов в составе агломерационной шихты и возросшим количеством окатышей в доменной шихте улучшение стабильности состава и свойств агломерата, а также разработка программ распределения шихтовых материалов по сечению ко-

лошника, обеспечивающих сохранность футеровки доменных печей, приобретают особую актуальность.

Постановка задачи. Анализ шихтовых условий на Енакиевском металлургическом заводе показывает, что основной вклад в нестабильность химического состава в доменной шихте вносит агломерат ЕМЗ. В составе агломерационной шихты наиболее нестабилен по химическому составу и свойствам штабель концентратной смеси, включающий концентрат и вторичные ресурсы. При увеличении основности агломерата изменения в химическом составе увеличиваются. Так, например, повышение основности агломерата на 0,3 ед. увеличивает выход агломерата второго сорта на 2,5–3,0 %.

Анализ технологических параметров работы агломерационного и доменного цехов показал, что использование в составе доменной шихты высокоосновного агломерата и значительной доли окатышей существенно отражается на гранулометрическом составе и свойствах доменного отсева.

Изложение материала и его результаты. Для изучения и предотвращения негативных явлений, связанных с увеличением

доли окатышей в железорудной части шихты, проведены лабораторные спекания аглошихты переменной основности с разными вторичными ресурсами, в том числе с отсевом окатышей в составе концентратной смеси и в условиях дополнительной грануляции, либо с отсевом окатышей и шламом.

Лабораторные спекания производились с основностью 1,8 ед. при использовании в составе аглошихты концентрата, аглоруды Яковлевского месторождения, конвертерного шлака, шлама, окалины и переменного количества отсева окатышей или гранулированных промышленных вторичных отходов. Удельные расходы компонентов аглошихты при использовании отсева окатышей или гранулированных промышленных вторичных отходов определяли такими, чтобы расход концентрата, руды, конвертерного шлака, известняка и вторичных ресурсов на 1 т агломерата оставался постоянным. Расход гранулированных отходов увеличивали за счет дополнительного сокращения шлама.

Анализ результатов исследований показал:

- вертикальная скорость спекания аглошихты при вводе отсева окатышей в количестве до 85 кг/т агломерата остается на базовом уровне;
- прочность агломерата при содержании отсева окатышей более 85 кг/т и недоомковании шихты резко падает;
- замена отсева окатышей в количестве 85 кг/т гранулами из отсева окатышей и шлама приводит к увеличению скорости спекания на 7,6 % (с 21,63 до 23,26 мм/мин), прочность агломерата при этом увеличивается на 3,8 %.

Расчетно-аналитические исследования прогнозных показателей доменной плавки на основе результатов лабораторных и промышленных агломератов позволили управленческим и технологическим службам оценить риски дополнительных затрат на подготовку аглошихты к спеканию и

принять решение о проведении опытно-промышленных исследований.

Технико-экономические показатели (ТЭП) работы агломерационного цеха ЕМЗ периодах 2013 г. Представлены в таблице 1.

Согласно анализу ТЭП работы агломерационного цеха при замене части вторичных ресурсов гранулированными металлургическими отходами:

- выход агломерата второго сорта сократился на 2,3 %, в среднем основность агломерата повысилась с 1,5 до 1,85 ед.;
- прочность агломерата ($B_{>5}$) повысилась на 2,4 %;
- соотношение концентрат/аглоруда уменьшилось с 1,36 до 1,24;
- количество вторичных ресурсов увеличилось на 26,4 кг/т агломерата;
- постоянство состава агломерата по основности улучшилось на 7,5 %.

Опыт работы металлургических комбинатов с повышенной долей окатышей в железорудной части доменной шихты показывает неоднозначность изменений ТЭП доменной плавки при замене части агломерата окатышами. В одних случаях это сопровождается уменьшением расхода кокса, увеличением производительности печей, в других — ухудшением ТЭП при снижении стойкости плавильного агрегата [2].

Практика работы доменных печей с применением окатышей в шихте и анализ их поведения при восстановительно-тепловой обработке выявили негативные особенности поведения окатышей в процессе доменной плавки: агрессивное воздействие на футеровку шахты, снижение стойкости воздушных фурм, склонность к самопроизвольному перераспределению на поверхности засыпи.

На протяжении ряда лет научные сотрудники и технологи доменных цехов металлургических комбинатов СНГ исследовали состав и свойства расплавов шихтовых материалов и добавок, чтобы опре-

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Таблица 1

Технико-экономические показатели работы агломерационного цеха ЕМЗ в 2013 г.

Показатель	Период работы	
	Базовый	Опытный
Производство агломерата, т	195049,7	202962,1
Выход агломерата 2-го сорта, %	5,1	2,8
Удельная производительность, т/(м ² · сут)	1,17	1,14
Скорость агломерации, м/мин	1,1	1,2
Вертикальная скорость спекания, мм/мин	17,4	16,8
Расход на 1 т агломерата:		
рудная часть, кг	590,9	551,0
концентрат аглоруды, отн. ед.	1,36	1,24
вторичные железорудные материалы, кг	355,3	382,1
гранулированные отходы, кг	3,8	74,2
флюсы, кг	221,7	274,8
коксовая мелочь (сухой вес), кг	45,2	40,4
Содержание Fe в агломерате, %	50,6	49,8
Основность агломерата (CaO/SiO ₂)	1,5	1,85
Б _{>5} (прочность), %	71,0	73,4
Б _{<0,5} (истираемость), %	5,2	4,9
Содержание, %:		
фракции 0 – 5 мм в агломерате	13,6	14,9
углерода в аглошихте	3,9	3,8
Укладка по содержанию, %:		
Fe (± 1,0 %)	53,8	56,3
CaO/SiO ₂ (± 1,0)	47,0	54,5

делить рациональный состав смеси компонентов в пристеночной зоне, обеспечивающий благоприятные условия образования гарнисажа, его стабильность и непрерывное обновление. Проведенные ранее аналитические, лабораторные и промышленные исследования позволили сформулировать требования к железорудным материалам, загружаемым в пристеночную зону для формирования защитного гарнисажа в нижней части шахты доменных печей, футерованных высокотеплопроводящими материалами [3, 4]. Исследования показали, что для формирования устойчивого гарнисажа в нижней зоне доменной печи необходимо получить жидкоподвижный (вязкостью < 8 Пз), низкотемпературный железистый расплав массой более 10 % массы загружаемого железорудного материала. Вязкопластичное состояние мате-

риала и его капельное течение должны находиться в температурном диапазоне 1270–1350°C. Для самообновления гарнисажа содержание FeO в жидкоподвижном первичном шлаковом расплаве должно быть в пределах 12–15 %. Для его наращивания на высокотеплопроводной футеровке содержание FeO в первичном шлаковом расплаве целесообразно увеличить до 18–25 %.

Получить расплав, обеспечивающий необходимый гарнисажеобразующий состав в пристеночной зоне доменной печи, можно при проплавке агломерата заданного химического состава либо смеси агломерата, окатышей, кусковой руды и шлака конвертерного производства. До проведения опытных плавов, включающих изменение доли окатышей в составе железорудной части шихты от 20 до 55 % с корректировкой основности

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

агломерата и вводом до 3 % конвертерного шлака, были проведены лабораторные плавки смесей железорудных материалов с разными долями окатышей и основностями агломерата и определены состав и свойства первичных шлаковых расплавов. По результатам лабораторных плавок были определены требования к распределению шихтовых материалов по сечению доменной печи и подготовлена матрица изменения режимов их загрузки, обеспечивающих в пристеночной зоне доменной печи постоянство состава и свойств первичных шлаковых расплавов

при перешихтовках. Несмотря на то, что доля окатышей в железорудной части шихты изменялась от 20 до 55 %, корректировка режима загрузки позволила стабилизировать в пристеночной зоне температуры полной потери газопроницаемости железорудного слоя и начала фильтрации жидких фаз через коксовую насадку, при этом содержание FeO в первичном шлаке в пределах 15°C и 2,5 % соответственно.

ТЭП работы ДП № 3 ЕМЗ в базовом на протяжении 2013 г. представлен в таблице 2.

Таблица 2

Технико-экономические показатели работы доменной печи № 3 ЕМЗ в 2013 г.

Показатель	Период работы	
	Базовый	Опытный
1	2	3
Полезный объем, м ³	1719	1719
Производство чугуна, т	80316,4	85539
Среднесуточное производство, т	2722,2	2885,4
Съем, т/м ³	1,5832	1,678
Рудная нагрузка, т/т	3,4648	3,4712
Расход на 1 т чугуна, кг:		
руда железная	35,02	12,12
агломерат	1246	959
окатыши	479,2	762,18
известняк	7,74	8,6
конвертерный шлак	78,36	59,78
брикеты Mn-содержащие	5,1	12,72
кокс скиповый (сухой)	500,88	481,24
коксовый орешек (сухой)	33,54	38,04
Потери от измельчения, кг/т	21,3	18,18
Расход природного газа, м ³ /т	43,28	44,18
Вынос колошниковой пыли (сухой), кг/т	43,12	38,82
Выход шлака, кг/т	459,36	417,5
Состав чугуна, %		
Si	0,684	0,612
Mn	0,322	0,458
S	0,0452	0,0524
P	0,0906	0,093
Содержание Fe в шихте, %	53,36	54,018
Дутье:		
расход в печи, м ³ /мин	3238	3235,4
давление, кПа	273,4	282,0
температура, °C	1129,4	1130,8

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Продолжение таблицы 2

1	2	3
содержание O ₂ , %	21,66	21,7
Колошниковый газ:		
давление, кПа	166,2	168,2
температура, °C	302,8	186,4
содержание CO ₂ , %	14,58	13,38
Состав шлака:		
MgO, %	5,604	5,086
FeO, %	0,474	0,272
CaO/SiO ₂	1,184	1,184
Расход железа на 1 т чугуна, кг	993,58	980,82
Количество прогоревших фурм	23	20

Анализ приведенных данных показывает, что улучшение качества агломерата, в том числе за счет частичной грануляции металлургических отходов, корректировка программ загрузки шихтовых материалов при изменении соотношения долей агломерата и окатышей в составе доменной шихты позволили:

- уменьшить расходы (на 1 т чугуна): железа — с 994 до 981 кг, ЖРС — на 2,45 % (с 1846 до 1800 кг), кокса — с 500,8 до 481,2 кг/т;

- увеличить стабильность теплового состояния доменной печи ([Si] уменьшилось с 0,68 до 0,61 %);

- сократить на 13 % количество сгоревших фурменных приборов.

Выводы

Установлено, что замена части металлургических отходов гранулами, полученными из отсева окатышей, шлама, колошниковой пыли позволила стабилизировать химиче-

ский состав агломерата. Показано, что выбор рационального состава аглошихты, замена части неподготовленных отходов гранулами, обеспечение контроля подготовки аглотоплива к спеканию позволили увеличить расход вторичных ресурсов на 27 кг на 1 т агломерата и улучшить прочность агломерата на 2,36 %. Увеличение содержания Fe_{общ} в шихте, повышение качества агломерата, разработка программ распределения шихтовых материалов по сечению колошника доменной печи, обеспечивающих самообновление защитного гарнисажа, позволили сократить вынос колошниковой пыли на 4,3 кг/т чугуна, уменьшить количество сгоревших фурм на 13 % и сократить расход кокса на 19,6 кг/т чугуна. Таким образом, несмотря на дополнительные затраты на подготовку аглошихты к спеканию агломерата, конкурентоспособность продукции Филиала № 2 «ЕМЗ» ЗАО «Внешторгсервис» повысилась.

Библиографический список

1. Большаков, В. И. Направления развития металлургического комплекса Украины [Текст] / В. И. Большаков, Л. Г. Тубольцев // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. — Днепропетровск : Изд-во «Визион», 2012. — Вып. 26. — С. 3–5.
2. Большаков, В. И. Опытнo-промышленная апробация технологии доменной плавки с повышенной долей окатышей [Текст] / В. И. Большаков, В. Н. Логинов, М. Ю. Суханов и др. // *Сталь*. — 2006. — № 1. — С. 6–11.
3. Нестеров, А. С. Взаимодействие первичных шлаковых расплавов с окисными огнеупорными материалами доменного производства [Текст] / А. С. Нестеров, В. И. Большаков // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2005. — № 1. — С. 8–11.

4. Большаков, В. И. Влияние химического состава и свойств железорудных материалов на характер формирования гарнисажных масс [Текст] / В. И. Большаков, А. С. Нестеров, Н. М. Можаренко и др. // Сталь. — 2009. — № 4. — С. 7–11.

© Лукьянов А. В.

© Зубенко А. В.

© Ивасенко В. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М.

Статья поступила в редакцию 06.10.17.

Лук'янов А. В., Зубенко О. В., Івасенко В. В. (Філія № 2 «ЄМЗ» ЗАТ «Внешторгсервіс», м. Єнакієве, ДНР)

ЕФЕКТИВНА РОБОТА АГЛОДОМЕНОГО ВИРОБНИЦТВА ФІЛІЇ № 2 «ЄМЗ» ЗАТ «ВНЕШТОРГСЕРВІС» ПРИ РОЗШИРЕННІ ВИКОРИСТАННЯ В ШИХТІ ВТОРИННИХ РЕСУРСІВ І ОБКОТИШІВ

З метою зменшення питомої витрати мінеральної сировини при виплавленні чавуну заданої якості в умовах Філії № 2 «ЄМЗ» ЗАТ «Внешторгсервіс» випробувано і впроваджено технологію підготовки металургійних відходів до аглодоменого переділу, що дозволила збільшити витрату вторинних ресурсів на 27 кг/т агломерату і полішити міцність агломерату на 2,36 %. Підвищення якості агломерату, розподіл шихтових матеріалів по перетину колошника, що забезпечують самовідродження захисного гарнісажу, дозволило скоротити винос колошникового пилу на 4,3 кг/т чавуну і зменшити витрату коксу на 19,6 кг/т чавуну, підвищити конкурентоспроможність продукції Філії № 2 «ЄМЗ» ЗАТ «Внешторгсервіс» (далі ЄМЗ) навіть при додаткових витратах на підготовку аглошихти до спікання.

Ключові слова: вторинні ресурси, якість агломерату, доменна плавка, витрата коксу.

Lukyanov A. V., Zubenko A. V., Ivashenko V. V. (Branch No. 2 "EISW" CJSC "Vneshtorgservice", Yenakievo, DPR)

EFFICIENT OPERATION OF THE AGGLOMERATION SECTION OF BRANCH NO. 2 "EISW" OF CJSC "VNESHTORGSERVICE" WITH THE EXPANSIVE USE OF SECONDARY RESOURCES AND PELLETS IN THE CHARGE

In order to reduce the specific consumption of mineral raw materials during iron melting of the specified quality, in the conditions of Branch No. 2 of "EISW" CJSC Vneshtorgservice, the preparation technology of metallurgical wastes for the agglomeration concentrate was tested and introduced, that allowed increasing the secondary resources consumption by 27 kg / t of agglomerate and improving the agglomerate strength for 2.36 %. Improving the agglomerate quality, the distribution of charge materials along the cross-section of the top, which provides self-renewal of the protective skull, provided reducing the blast furnace flue dust removal by 4.3 kg / ton of pig iron and to reduce coke consumption by 19.6 kg/ton of pig iron, to increase the products competitiveness of Branch No. 2 CJSC Vneshtorgservice (hereinafter EISW), even with additional costs for the agglomerate preparation for sintering.

Key words: secondary resources, quality of agglomerate, blast furnace melting, coke consumption.

УДК 669.162

к.т.н. Карпов А. В., Карпова К. С.
(ЛГТУ, г. Липецк, Россия, antonkrpv@rambler.ru),
д.т.н. Новохатский А. М., к.т.н. Диментьев А. О.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

АНАЛИЗ ВЕЛИЧИНЫ КОЛЕБАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЧУГУНА ПО ОКРУЖНОСТИ ГОРНА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ

Произведена оценка величины окружной неравномерности состава чугуна для доменных печей полезным объемом 4290 м³ и 2000 м³. Показана описательная статистика изменения содержания кремния, марганца и серы в чугуне, а также его объема в течение года. Показана величина среднеквадратичного отклонения параметров продуктов плавки, выпущенных на разные летки в течение года.

Ключевые слова: доменная печь, чугун, шлак, выпуск продуктов плавки, описательная статистика, окружная неравномерность.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Значительный рост объема доменных печей (ДП) привел к непропорциональному изменению их габаритов. Так, отношение полной высоты печи объемом 1719 м³ к диаметру ее горна составляет 3,14, а для 5580 м³ — 2,3. Это говорит не только о конструкционных изменениях, но и об отличиях технологии ведения доменной плавки.

Следующим важным фактором современных изменений работы доменных печей является применение большего количества интенсификаторов процесса выплавки чугуна, например, использование дутья с температурой, равной 1300°C, обогащенного кислородом до 30 % O₂, и подачей пылеугольного топлива (ПУТ) порядка 200 кг/т чугуна.

Совокупность приведенных особенностей современной доменной плавки приводит к возникновению существенного колебания параметров продуктов плавки: температуры нагрева, химического состава и выпускаемых объемов на разные чугунные летки.

Основными причинами возникновения проблем с окружной неравномерностью химического состава продуктов плавки могут являться [1–3]:

1. Нерационально подобранный режим выпуска продуктов плавки. Количество выпусков и смен чугунных леток может приводить к образованию застойных зон, в которых нарушается ход процессов.

2. Неравномерное распределение дутья и углеводородных добавок по окружности горна.

3. Нарушения в равномерности распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи, в результате чего изменяется направление движения газовых потоков в рабочем пространстве доменной печи.

4. Оползания гарнисажа, в результате чего в горн попадает большое количество неподготовленной шихты.

Постановка задачи. Анализ величины колебания химического состава чугуна по окружности горна доменной печи позволит оценить степень колебания данного параметра, а в дальнейшем — выявить конкретные причины возникновения настоящей проблемы с соответствующими предложениями их устранения.

Изложение материала и его результаты.

Колебания химического состава по окружности горна доменной печи могут быть установившимися и неустойчивыми. Первые являются высокочастотными изменениями по времени, которые сложно

выявить и устранить; вторые имеют стационарный характер, что упрощает их выявление и последующее устранение.

Оценка колебаний параметров продуктов плавки выполняется при помощи пассивного эксперимента — методами статистического анализа. В данной работе анализу подверглись показатели по доменным печам объемом 2000 м³ и 4290 м³ за 12 месяцев, из которых были исключены периоды простоев и ремонтов.

Описательная статистика исходных параметров приведена в таблице 1, а расположение чугуновых леток — на рисунке 1. Также известно [4] об условных зонах влияния летки на часть горна, их предположительное расположение показано на рисунке 1.

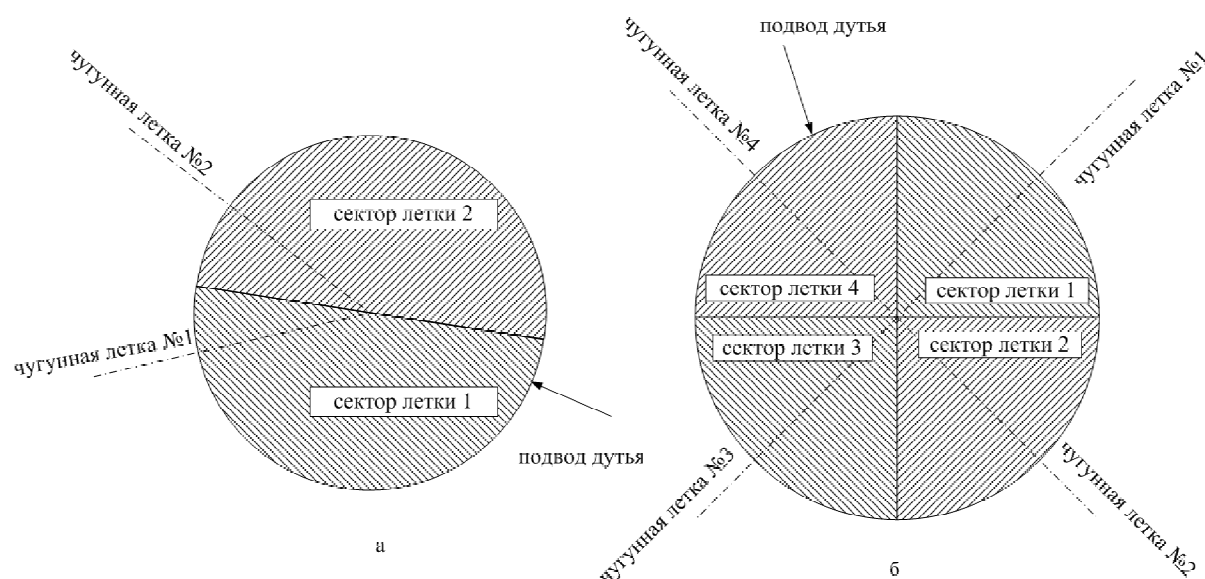
В качестве характеристик окружающей неравномерности использованы среднее значение, абсолютная разница и среднеквадратичные отклонения содержания кремния, марганца, и серы в чугуне, а также вес выпускаемого чугуна.

По работе доменной печи большого объема видно, что наибольшее количество выпусков было произведено на чугуновую летку № 4, наименьшее — на чугуновую летку № 3. В процентном соотношении количество выпусков на первую чугуновую летку составило 25,5 %, на вторую — 24,3 %, на третью — 24,2 %, на четвертую 25,8 %. По меньшей печи на первую летку было произведено 50,6 %, на вторую — 49,4 %.

Таблица 1

Описательная статистика исходных данных

Объем ДП, м ³	4290				2000	
Номер летки	1	2	3	4	1	2
Количество выпусков, шт.	1442	1375	1369	1456	1477	1440
Среднее содержание [Si], %	0,488	0,535	0,542	0,558	0,539	0,563
Минимум [Si], %	0,104	0,158	0,143	0,242	0,277	0,244
Максимум [Si], %	1,287	2,445	1,965	2,346	1,165	1,219
Среднеквадратичное отклонение [Si], %	0,135	0,169	0,131	0,156	0,12	0,12
Среднее содержание [Mn], %	0,378	0,365	0,363	0,377	0,335	0,341
Минимум [Mn], %	0,134	0,144	0,08	0,133	0,132	0,152
Максимум [Mn], %	0,876	0,976	0,84	0,825	0,565	0,603
Среднеквадратичное отклонение [Mn], %	0,102	0,096	0,091	0,107	0,064	0,061
Среднее содержание [S], %	0,023	0,023	0,025	0,024	0,022	0,023
Минимум [S], %	0,006	0,006	0,005	0,007	0,009	0,009
Максимум [S], %	0,081	0,11	0,226	0,093	0,071	0,088
Среднеквадратичное отклонение [S], %	0,007	0,007	0,012	0,007	0,005	0,006
Средний вес выпуска, т	688,9	681,9	704,5	696,5	569	562,9
Минимум веса выпуска, т	23	59	83	21	144	159
Максимум веса выпуска, т	2149	1321	1515	1240	1363	1239,9
Среднеквадратичное отклонение веса выпуска, т	164,5	154,4	147,6	160,4	194,2	182,5

Рисунок 1 Расположение леток доменных печей объемом 2000 м³ (а) и 4290 м³ (б)

Среднее содержание кремния в чугуне, производимом на ДП объемом 4290 м³ за год, увеличивается от первой летки до четвертой в интервале от 0,488 до 0,558 %. Среднеквадратичные отклонения содержания кремния по всем леткам незначительно отличаются друг от друга. Колебания количества марганца в чугуне для этой печи незначительны и находятся в пределах 0,02 %.

Что касается серы, то можно увидеть небольшой всплеск в районе третьей летки как по среднему содержанию, так и по среднеквадратичному отклонению. Масса выпускаемого чугуна на каждую из леток также отличается незначительно, в интервале от 681,9 до 704,5 т, при среднеквадратическом отклонении от 147,6 до 164,5 т. В целом по этой печи можно сделать вывод о наличии значительного колебания по окружности только содержания кремния. Результаты исследования показали наличие повышенного его значения в районе четвертой чугунной летки, что можно объяснить подводом горячего дутья именно в эту зону [5] (рис. 1). Также необходимо отметить невысокое среднеквадратичное отклонение массы выпускаемого чугуна по окружности.

По ДП объемом 2000 м³ можно говорить о низкой окружной неравномерности работы печи в течение года. Так, по среднему

содержанию кремния в чугуне разница для первой и второй летки составляет 0,02 %, а среднеквадратичное отклонение — 0,12 %. По содержанию марганца и серы в чугуне можно увидеть аналогичную ситуацию. Средняя масса выпускаемого чугуна по леткам изменяется незначительно, однако имеет место высокое среднеквадратичное отклонение — 194,2 и 182,5 т для 1 и 2 летки. Это можно объяснить особенностями организации выпуска продуктов плавки на печах малого объема, которые делятся на периоды накопления и опорожнения, в отличие от непрерывного выпуска на больших печах. Таким образом, по этой ДП можно сделать вывод об отсутствии окружной неравномерности в химическом составе продуктов плавки в течение года при достаточно высоком среднеквадратичном отклонении массы выпуска чугуна.

Предварительный анализ показал отсутствие установившегося стационарного режима работы исследуемых печей. Рассмотрим данные показатели более подробно на наличие высокочастотных колебаний.

По представленным графикам (рис. 2) видно, что в течение года на большой печи объемом 4290 м³ химический состав чугуна значительно колеблется как по времени, так и по разным леткам. В апреле среднее

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

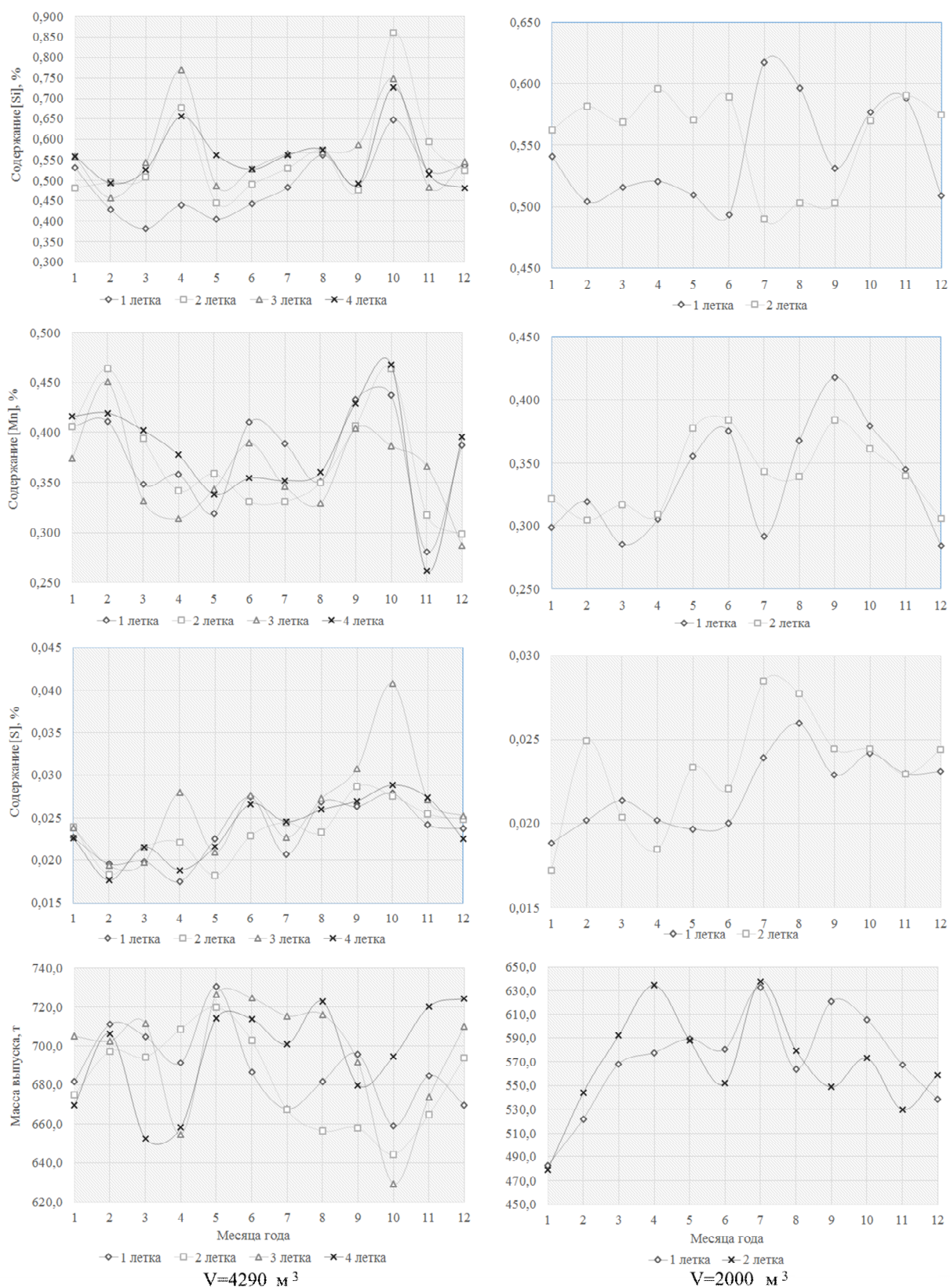


Рисунок 2 Результаты ежемесячного изменения параметров чугуна на исследуемых ДП

содержание кремния в чугунах на 2, 3 и 4 летки повысилось на 0,25 %, а на 1 летке — на 0,05 %. В это же время можно увидеть снижение массы выпускаемого чугуна на все летки, кроме второй, что может объяснить повышение содержания кремния из-за излишнего нагрева.

Далее, в октябре, виден следующий скачок содержания кремния по всем леткам, который так же можно объяснить уменьшением массы выпускаемого чугуна в этот период.

По содержанию серы видны два всплеска на третью летку в апреле (0,008 %) и октябре (0,01 %), в остальные периоды значительного расхождения на разные выпускные каналы не наблюдается.

Масса выпускаемого чугуна на разные летки в течение года находится в интервале от 630 до 730 т, что является незначительным, но можно отметить, что на третьей летке в апреле и октябре происходит снижение массы выпускаемого чугуна, что коррелирует с изменением его химического состава.

Анализируя данные по доменной печи объемом 2000 м³, можно видеть низкие колебания по содержанию кремния в исследуемом периоде в пределах от 0,49 до

0,61 %, такие же низкие колебания видны и по содержанию марганца (0,3–0,4 %).

По содержанию серы в чугунах при его выпуске на разные летки для этой ДП большая разница не видна, есть только общее повышение количества [S] в 7 и 8 месяце (около 0,005 %). При этом масса выпуска колеблется в значительном интервале от 490 до 630 т.

В качестве способа достижения окружающей равномерности химического состава чугуна можно производить корректировку дутьевых параметров, включающую регулируемое на каждой фурме изменение расходов дутья и дополнительного топлива на печь, в зависимости от давления дутья и параметров продуктов плавки.

Таким образом, при сравнении окружающей неравномерности состава чугуна, производимого в ДП полезным объемом 4290 м³ и 2000 м³, обнаружена большая величина колебания содержания элементов в первой печи. Это объясняется меньшими поперечными размерами последней, а также особенностями выпуска продуктов плавки на большей печи, где идет непрерывный выпуск на разные летки, а на меньшей печи происходит чередование периодов накопления и опорожнения горна.

Библиографический список

1. Новохатский, А. М. Потеря полезного объема горна доменной печи [Текст] / А. М. Новохатский, А. О. Диментьев, А. В. Карпов, Г. Д. Михайлюк // Вісник Приазовського державного технічного університету. Технічні науки. — 2012. — № 25. — С. 47–50.
2. Герман, М. И. Оценка эффективности работы горна доменной печи [Текст] / М. И. Герман, А. В. Карпов, А. М. Новохатский // Сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета посвящается 60-летию Липецкого государственного технического университета: в 2-х частях. — Липецк : ЛГТУ, 2016. — С. 264–266.
3. Дружков, В. Г. Выбор режима выпуска чугуна и шлака из горна доменных печей в современных условиях [Текст] / В. Г. Дружков, И. Е. Прохоров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. — Магнитогорск : МГТУ им. Г. И. Носова, 2011. — № 4. — С. 9–12.
4. Новохатский, А. М. Анализ влияния режима выпусков на дренажные условия в горне доменной печи [Текст] / А. М. Новохатский, А. О. Диментьев, А. М. Блинов, А. В. Карпов // Современная металлургия нового тысячелетия: сборник научных трудов. — Липецк : ЛГТУ, 2015. — С. 195–203.

5. Куприянова, И. В. Анализ величины неравномерности распределения дутья по окружности доменной печи [Текст] / И. В. Куприянова, А. В. Карпов // Тенденции развития современной науки: сборник тезисов докладов научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета : в 2 частях. — Липецк : ЛГТУ, 2017. — С. 226–228.

© Карпов А. В.

© Карпова К. С.

© Новохатский А. М.

© Диментьев А. О.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МЧМ ДонГТУ Куберским С. В.,
д.т.н., проф. ЛГТУ Лебедевым С. В.*

Статья поступила в редакцию 06.10.17.

к.т.н. Карпов А. В., Карпова К. С. (ЛДТУ, м. Липецьк, Росія), д.т.н. Новохатський О. М.,
к.т.н. Дімент'єв О. О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

АНАЛИЗ ВЕЛИЧИНЫ КОЛИВАННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЧАВУНУ ПО ОКРУЖНОСТІ ГОРНА ДОМЕННОЇ ПЕЧІ

Виконано оцінювання величини окружної нерівномірності складу чавуну для доменних печей корисним об'ємом 4290 м³ і 2000 м³. Показано описову статистику зміни вмісту кремнію, марганцю і сірки в чавуні, а також його обсягу протягом року. Показано величину середньоквадратного відхилення параметрів продуктів плавки, випущених на різні льотки протягом року.

Ключові слова: доменна піч, чавун, шлак, випуск продуктів плавки, описова статистика, окружна нерівномірність.

PhD Karpov A. V., Karpova K. S. (LSTU, Lipetsk, Russia, antonkrpv@rambler.ru),

Doctor of tech. sc. Novokhatskiy A. M., PhD Dimentiev A. O. (DonSTU, Alchevsk, LNR)

ANALYSIS OF VALUE OF THE CHEMICAL COMPOSITION VARIATIONS ALONG THE CIRCUMFERENCE OF THE BLAST FURNACE HEARTH

Assessment of the circumferential nonuniformity of iron composition for blast furnaces with useful volume of 4290 m³ and 2000 m³ was performed. The descriptive change-relative statistics of the silicon, manganese and sulfur content in iron as well as its volume within the year are shown. The value of the root-mean-square deviation of the melting products parameters let out to different tap-holes during the year is shown.

Key words: blast furnace, cast iron, slag, production of melting products, descriptive statistics, circumferential unevenness.

УДК 621.98.042

к.т.н. Коробко Т. Б.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, korobko.tamara@rambler.ru),
Рыбалко Е. М.
(компания ООО «Эл Си Ваикики Ритейл Бел»,
г. Минск, Республика Беларусь, ekaterina.rybalko@lcwaikiki.com)

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ СО ЗНАКОПЕРЕМЕННЫМ НАГРУЖЕНИЕМ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ

В статье рассмотрена методика расчета процесса глубокой вытяжки предварительно гофрированных деталей в штампе с поворотными дисками (ПД) при использовании эффекта переменного нагружения с учетом трения для различных материалов.

Ключевые слова: штамп с многосекционными поворотными дисками, радиальная деформация, гофрирование, пуансон, матрица.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Основная задача процесса обработки металлов давлением состоит в максимальном приближении формы и размеров заготовки к форме и размерам готовых изделий при обеспечении необходимых физико-механических свойств.

Проблема повышения точности размеров и улучшения качества изделий при получении осесимметричных деталей глубокой вытяжкой оптимально решается за счет предварительного гофрирования исходной заготовки путем снижения трения между заготовкой и перетяжными радиусами пуансона и матрицы и ее знакопеременного нагружения в штампе с поворотными дисками (ПД) [1].

Постановка задачи. Целью данной работы является разработка методики расчета технологического процесса глубокой вытяжки с учетом трения со знакопеременным нагружением осесимметричных деталей для различных материалов.

Изложение материала и его результаты. Применение способа гофрирования заготовки [2, 3] рационально, когда необходимую высоту изделия невозможно получить за переход в жестком штампе из-за значительной деформации стенки изделия.

Если в качестве исходного материала необходимо применять мягкие материалы (сталь 08кп, алюминий, медь, латунь), а относительная высота находится в пределах $0,8 < H/d < (1-1,5)$, то для их изготовления можно применять глубокую вытяжку в штампах с ПД. Это позволит снизить количество операций штамповки, а детальный анализ возможных вариантов технологического процесса штамповки позволит устанавливать условия технологичности в каждом конкретном случае.

По чертежу детали определяют материал, из которого она изготовлена, и его толщину. Затем рассчитывают диаметр [4].

Используя систему MathCAD, строим зависимости $R_{\text{заг}} = F(H, \alpha)$ (где $R_{\text{заг}}$ — радиус заготовки, H — высота изделия, α — угол контакта заготовки с инструментом) и по зависимостям, представленным на рисунках 1 и 2, предварительно определяем возможность получения $R_{\text{заг}}$ от α и $R_{\text{заг}}$ от H для используемых материалов. Полученные данные применяем для деталей с наружным диаметром d_m , которые отвечают требованиям процесса. Приняв величину угла $\alpha = 45^\circ$, определим глубину гофра и его основные параметры.

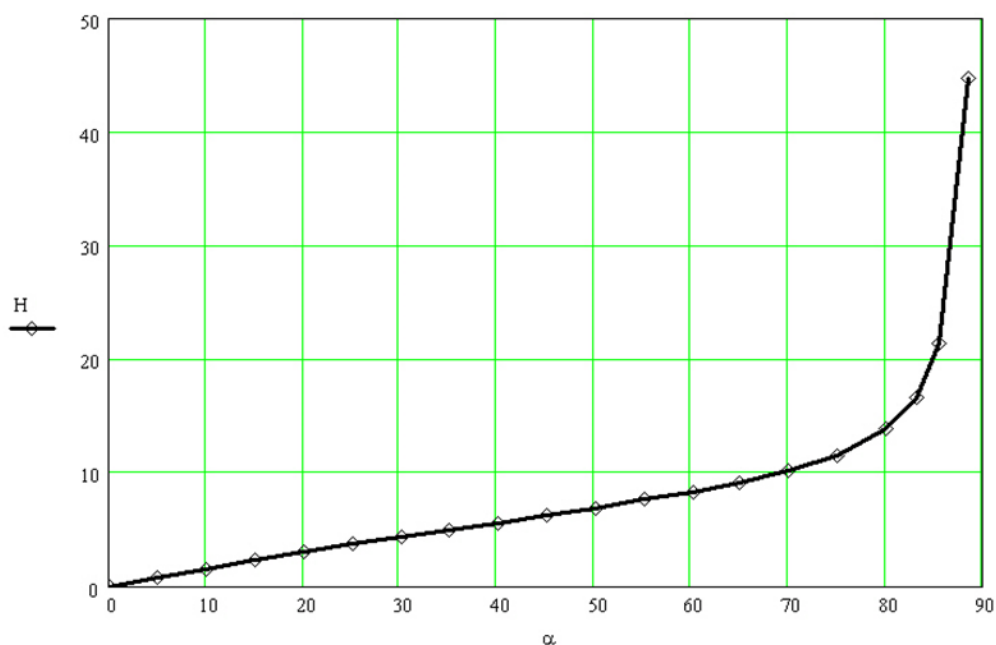


Рисунок 1 График зависимости высоты изделия H (мм) от угла контакта α (град) заготовки с радиусом матрицы при вытяжке

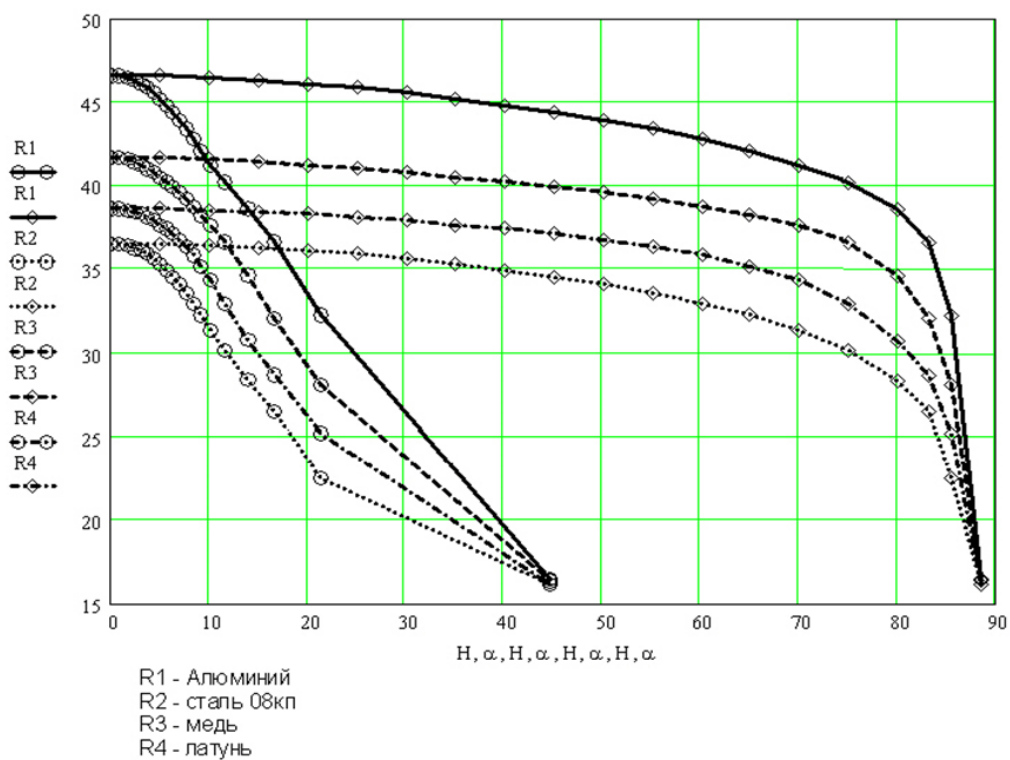


Рисунок 2 График зависимости внешнего радиуса фланца (мм) от угла контакта заготовки α (град) с инструментом и от высоты изделия H (мм) в процессе вытяжки

Глубина формуемого гофра находится из выражения:

$$H_r = 2R_p(1 - \cos\alpha), \quad (1)$$

где R_p — радиус кривизны срединной поверхности элемента.

Тогда радиус кривизны срединной поверхности элемента в радиальном сечении будет равен:

$$R_p = r_n + 0,5s_0.$$

Находим значение радиуса матрицы r_m и выбираем значение радиуса поворотного диска r_n [5]. Диаметр первого ряда от оси штампа ПД $D_1 = 2 R_1$ определится как:

$$D_1 = (d_m + 2r_n). \quad (2)$$

Диаметр второго ряда, в котором располагаются ПД на прижиме, определим по формуле:

$$D_2 = 2[R_1 + (r_{n1} + r_{n2} + S_0) \sin \times \\ \times (\arccos(1 - H_r / (r_{n1} + r_{n2} + S_0)))], \quad (3)$$

где r_{n1} , r_{n2} — радиусы поворотных дисков первого и второго ряда;

S_0 — исходная толщина материала заготовки.

Диаметр, на котором располагается крайний ряд ПД, может быть найден из геометрических соображений:

$$D_3 = 2 D_2 - D_1. \quad (4)$$

Соотношение площадей поверхностей подвижных и неподвижных частей матрицы и прижима могут быть заменены соответствующими относительными длинами дуги кольцевого элемента, на котором рассчитывается условно усредненное значение коэффициента трения с использованием формул:

$$l_{ni} = K_i \cdot l_i / [2\pi \cdot (R_1 - r_n \sin\alpha)];$$

$$l_{ni} = 1 - l_{ni}.$$

Усредненный коэффициент трения μ_{1i} будет определен по формуле:

$$\mu_{1i} = (\mu_{ni} \cdot l_{ni} + \mu_n \cdot l_n) / (l_{ni} + l_n).$$

Таким образом, произведен учет условий трения при его дифференцированном характере.

Величина гофрируемой части фланца определяется по формуле:

$$L(B) = L(R) - R_1, \quad (5)$$

где $L(R)$ — длина развертки гофра от оси штампа.

Длина одного поворотного диска будет определяться как:

$$l_{ni} = K_i \cdot l_i / [2\pi \cdot (R_{1i} - r_n \sin\alpha)],$$

где K_i — количество ПД на перетяжном радиусе матрицы,

l_i — длина ПД с учетом погрешности изготовления инструмента.

Количество поворотных дисков определим из выражения:

$$K_i \geq \frac{\pi (R_{1i} - r_n)}{l_i}. \quad (6)$$

Тогда, с учетом изложенного, условный усредненный коэффициент трения μ_{1i} будет определен по формуле:

$$\mu_{1i} = \mu_{ni} \cdot l_{ni} + \mu_n \cdot l_n, \quad (7)$$

где $l_{ni} = l - l_{ni}$ — длина одного неповоротного элемента;

μ_{ni} , μ_n — коэффициент трения на поворотном диске и неповоротных элементах.

Таким образом, произведен учет условий трения при его дифференцированном характере. Радиус заготовки по размерам получаемого гофра найдем из выражения:

$$R_e = \sqrt[3]{\frac{l \cdot F}{\pi}}, \quad (8)$$

где l — длина огибающей срединной линии гофра радиусом R_r ;

F — площадь поверхности гофра с наружным радиусом изделия R_r .

Напряжение течения σ_s определим, используя работу [6]:

$$\sigma_s = A - E \cdot e^{-\varepsilon_i} - G \cdot e^{-N\varepsilon_i}, \quad (9)$$

где A, E, G — коэффициенты применяемого металла,

N — число, определяемое методом итераций.

Величину деформации определим по формулам:

$$\varepsilon_{\theta}(\rho) = \ln\left(\frac{\rho}{L(\rho)}\right);$$

$$\varepsilon_z(\rho) = -\varepsilon_{\rho}(\rho) - \varepsilon_{\theta}(\rho);$$

$$\varepsilon_{\rho}(\rho) = -\varepsilon_{\theta}(\rho) \frac{\sigma_{\theta}(\rho) + 2 \cdot \sigma_{\rho}(\rho)}{\sigma_{\rho}(\rho) + 2 \cdot \sigma_{\theta}(\rho)}.$$

Математическая модель анализа напряженно-деформированного состояния металла в процессе вытяжки с предварительным гофрированием в штампе с поворотными дисками приведена в работе [5]. В этой модели отсутствует начальная стадия вытяжки, но это не вносит в расчет большой погрешности, хотя значительно упрощает поставленную задачу.

Величина $\varepsilon_{i\text{кр}}$ определяется в зависимости от показателя напряженно-деформированного состояния m^* , равного отношению радиального и тангенциального напряжений [4, 5]:

при $0,5 \leq m^* \leq 1$

$$\varepsilon_{i\text{кр}} = \frac{2 \cdot \sqrt{1 - m^* + m^{*2}}}{2 - m^*} \cdot n;$$

при $-\infty \leq m^* \leq 0,5$

$$\varepsilon_{i\text{кр}} = \frac{2 \cdot \sqrt{1 - m^* + m^{*2}}}{1 + m^*} \cdot n.$$

Радиальные и тангенциальные напряжения могут быть найдены путем сов-

местного решения системы уравнений равновесия и условия пластичности численным способом:

$$\rho \cdot \frac{d\sigma_{\rho}}{d\rho} + \sigma_{\rho} \cdot \left(1 + \frac{\rho \cdot dS}{S \cdot d\rho}\right) -$$

$$-\sigma_{\theta} \pm F(\mu, \rho, \alpha, \sigma_{\rho}, \sigma_{\theta}) = 0,$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{\rho} - \sigma_{\theta})^2 + \sigma_{\rho}^2 + \sigma_{\theta}^2} = \beta \cdot \sigma_s. \quad (10)$$

Тогда, зная показатель напряженно-деформированного состояния при вытяжке m^* и показатель упрочнения n , определим $\varepsilon_{i\text{кр}}$ для операции вытяжки.

Знакопеременное нагружение в процессе вытяжки позволяет получать увеличение радиальной деформации. Величину немоной критической интенсивности деформаций в опасном сечении при вытяжке будем определять по формуле:

$$\varepsilon_{i\text{кр}}^* = \varepsilon_{i\text{кр}} + \Delta\varepsilon, \quad (11)$$

где $\Delta\varepsilon$ — величина деформации после гофрирования.

Значения параметров $\varepsilon_{i\text{кр}}^*$ для исследуемых материалов приведены в таблице 1.

Технологическое усилие вытяжки определим с учетом усилия противодействия:

$$P_{\max} = \pi \cdot (d_m - S_0) \cdot S_0 \cdot \sigma_{\rho\max} + P_{\text{прот}}, \quad (12)$$

где $P_{\text{прот}}$ — усилие противодействия,

$$P_{\text{прот}} = q_1 F_m,$$

где q_1 — давление жидкости в матрице;
 F_m — площадь сечения очка матрицы.

Таблица 1

Значения параметров $\varepsilon_{i\text{кр}}^*$ для различных материалов

Материал	δ_p	n	$\varepsilon_{i\text{кр}}$	$\Delta\varepsilon$	$\varepsilon_{i\text{кр}}^*$
Сталь 08кп	0,35	0,300	0,574	0,062	0,636
Латунь Л68	0,32	0,278	0,502	0,032	0,534
Медь М2	0,28	0,262	0,482	0,038	0,520
Алюминий АЗ	0,27	0,260	0,511	0,042	0,553

Выводы и направление дальнейших исследований.

В статье разработана методика расчета технологического процесса вытяжки со

знакопеременным нагружением осесимметричных деталей, изготовленных из различных материалов с учетом трения и напряженно-деформированного состояния.

Библиографический список

1. Пат. 47766 А Україна, МКІ В21D 22/23. Спосіб глибокого витягування / Т. Б. Коробко, Д. Г. Майоров, Г. І. Майоров, В. О. Луценко; Донбасс. гос. техн. ун-т. — №2001096196; заявл. 10.09.2001; опубл. 15.07.2002, Бюл. № 7. — 2 с.
2. Майоров, Г. И. Особенности построения математической модели для гофрирования осесимметричных заготовок в штампе с поворотными дисками [Текст] / Т. Б. Коробко, Д. Г. Майоров, В. А. Луценко // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. — Краматорськ, 2004. — С. 377–380.
3. Майоров, Г. И. Математическая модель глубокой вытяжки в штампах с поворотными дисками из предварительно гофрированных заготовок [Текст] / Т. Б. Коробко, Д. Г. Майоров, Н. Г. Митичкина // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні: зб. наук. пр. — Краматорськ, 2004. — С. 251–256.
4. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке [Текст] / В. П. Романовский. — Л. : Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. — 520 с.
5. Майоров, Г. И. Исследование влияния условий трения на качество вытягиваемых изделий в матрице с поворотными дисками [Текст] / Т. Б. Коробко, Д. Г. Майоров // Сб. науч. тр. — Алчевск : ДГМИ, 2002. — Выпуск 16. — С. 165–168.

© Коробко Т. Б.

© Рыбалко Е. М.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М.,
пом. нач. сортопрокатного цеха ПАО «АМК» Чичканом А. А.**

Статья поступила в редакцию 17.10.17.

к.т.н. Коробко Т. Б. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР, korobko.tamara@rambler.ru), **Рыбалко К. М.** (компанія ТОВ «Ел Сі Ваїкікі Рітейл Бел», м. Мінськ, Республіка Білорусь, ekaterina.rybalko@lcwaikiki.com)

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГЛИБОКОГО ВИТЯГУВАННЯ ІЗ ЗНАКОЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ

У статті розглянуто методику розрахунку глибокого витягування попередньо гофрованих деталей в штампі з поворотними дисками (ПД) при використанні ефекту змінного навантаження з урахуванням тертя для різних матеріалів.

Ключові слова: штамп з багатосекційними поворотними дисками, радіальна деформація, гофрування, пуансон, матриця.

PhD Korobko T. B. (DonSTU, Alchevsk, LPR), **Rybalko E. M.** (LLC "Al Si Waikiki Retail Bel", Minsk, Republic of Belarus)

CALCULATING METHOD FOR TECHNOLOGICAL PROCESS OF DEEP DRAWING WITH ALTERNATING LOADING OF AXISMETRIC DETAILS

The procedure for calculating the process of deep drawing of pre-corrugated parts in a stamp with rotary disks (RD) is considered using the effect of variable loading taking friction into account for various materials.

Key words: stamp with multi-section rotary disks, radial deformation, corrugation, punch, matrix.

УДК 621.771.2: 621.771.8

Денищенко Н. П.,
Бевз А. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРИ ПРОКАТКЕ СИММЕТРИЧНОГО БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЧЕТЫРЕХСЛОЙНОГО ПАКЕТА С СОЧЕТАНИЕМ СТАЛИ ОСНОВНОГО СЛОЯ СТ3, ПЛАКИРУЮЩЕГО СЛОЯ СТАЛИ 15Х13

Было смоделировано обжатие биметаллического пакета в черновой клетке стана 3000 за 7 проходов с суммарным обжатием 52 %. Исследовалась совместная деформация двух разнородных металлов с целью анализа напряженно-деформированного состояния.

Ключевые слова: деформация двух разнородных металлов, биметаллический пакет, моделирование, формулировка Лагранжа-Эйлера, прокатка симметричного четырехслойного пакета, вытяжка плакирующего слоя.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

На сегодняшний день значительную роль в металлургической промышленности занимает продукция, полученная из материалов, которые имеют неоднородные по своей толщине физико-механические свойства. Для следующего шага в повышении эффективности производства металлургической продукции необходимо расширять разнообразность выпускаемого сортамента готовой продукции как по размеру, так и по различному сочетанию используемых материалов.

Однако дальнейшее расширение сферы применения этой продукции связано с широкомасштабным освоением процессов обработки давлением многослойных полиметаллических материалов, что зачастую является сложной задачей как с точки зрения технологических режимов, так и с точки зрения конструктивных параметров используемого оборудования [1].

Использование известных методов создания необходимых процессов обработки давлением многослойных материалов приводит к понижению коэффициента выхода годного, а в некоторых случаях и вовсе нецелесообразности дальнейшего использования полученной технологии. Поэтому для реализации всего технологического

процесса производства данной продукции необходимо наличие научно обоснованного подхода к формированию как напряженно-деформированного состояния, так и основных показателей качества готовой металлопродукции [2].

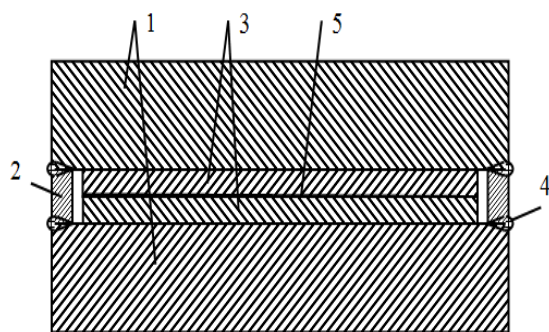
Существует сортамент двухслойных листов, в котором для плакирующего слоя применяются такие марки стали, как: 12Х18Н10Т; 08Н22Н6Т, 08Х17Н15М3Т; 08Х13, а для основного слоя — 09Г2С, 20К, Ст3.

Поэтому можно предположить отсутствие какого-либо экспериментального подтверждения процесса формоизменения составляющих биметаллического пакета с сочетанием марок сталей плакирующего слоя 15Х13 и основного слоя Ст3 при прокатке симметричного четырехслойного пакета.

Постановка задачи. Задачей экспериментальных исследований является изучение процесса формоизменения составляющих биметаллического пакета при прокатке симметричного четырехслойного пакета.

Изложение материала и его результаты. Одним из видов производства биметаллов является пакетный. Применение некоторых технологических приемов, учитывающих особенности производства и состав технологического оборудования на конкретном предприятии, позволяет сни-

зить указанные негативные явления. Составляющие пакета представлены на рисунке 1. Длина основного слоя больше длины плакирующего слоя на 130–200 мм для предотвращения выдавливания планок в процессе деформирования.



1 — слэбы из углеродистой стали; 2 — планки;
3 — пластины нержавеющей стали; 4 — сварной шов; 5 — разделительный слой

Рисунок 1 Четырехслойный пакет конструкции фирмы «Phoenix-Feinrohr»

Было выполнено моделирование четырехслойного пакета с размерами слэба основного слоя толщиной 100 мм и шириной 2000 мм, толщина плакирующего слоя 20 мм, ширина 1800 мм, длина слоёв 1200 мм. Изображение моделируемого пакета приведено на рисунке 2. Материалы основного слоя (Ст3) и плакирующего слоя (15X13) приняты изотропными.

Контакт между заготовкой и валком, плакирующим слоем и основным слоем

учитывали при помощи модели контакта «surface-to-surface contact» путём задания коэффициента трения $\mu = 0,3$, используя «classical isotropic Coulomb friction model» [3]. Валок представлен в виде аналитически жёсткой недеформируемой поверхности. В процессе моделирования деформации пакета использовали адаптацию сетки в формулировке Лагранжа-Эйлера.

Тип элементов — шестигранные элементы C3D8R и опции Hourglass control — Saffness [3]. В процессе описания данной модели учитывается симметричность моделируемого процесса относительно плоскости XZ и XY для сокращения времени расчёта.

В качестве моделируемого материала используем сталь Ст3 и 15X13 с химическим составом, представленным в таблице 1.

Было смоделировано обжатие пакета в черновой клетки стана 3000 биметаллического пакета за 7 проходов с суммарным обжатием 52%. Исследовалась совместная деформация двух разнородных металлов с целью исследования напряженно-деформированного состояния. Получены поля распределения эквивалентной пластической деформации. Получены поля распределения эквивалентной пластической деформации (рис. 3) и напряжений по Мизесу (рис. 4) по проходам.

Таблица 1

Химический состав сталей

Марка стали	Содержание элементов, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S	N	As
Ст3	0,14–0,22	0,15–0,3	0,4–0,65	0,3	0,3	0,3	0,04	0,05	0,008	0,08
15X13	0,15	0,2–0,8	0,3–0,8	12–14	0,5	0,3	0,03	0,025	—	—

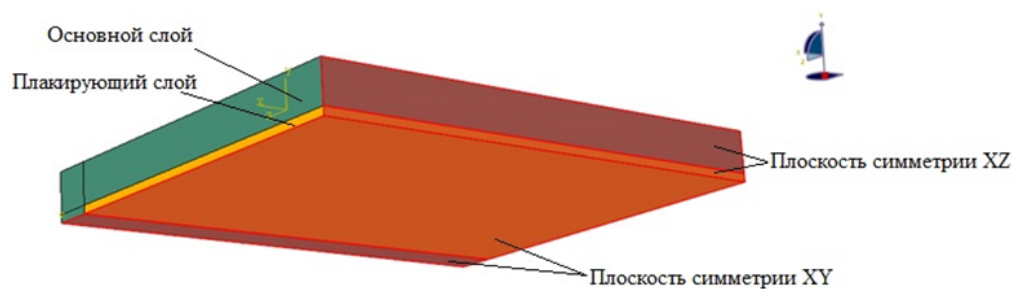


Рисунок 2 Модель пакета

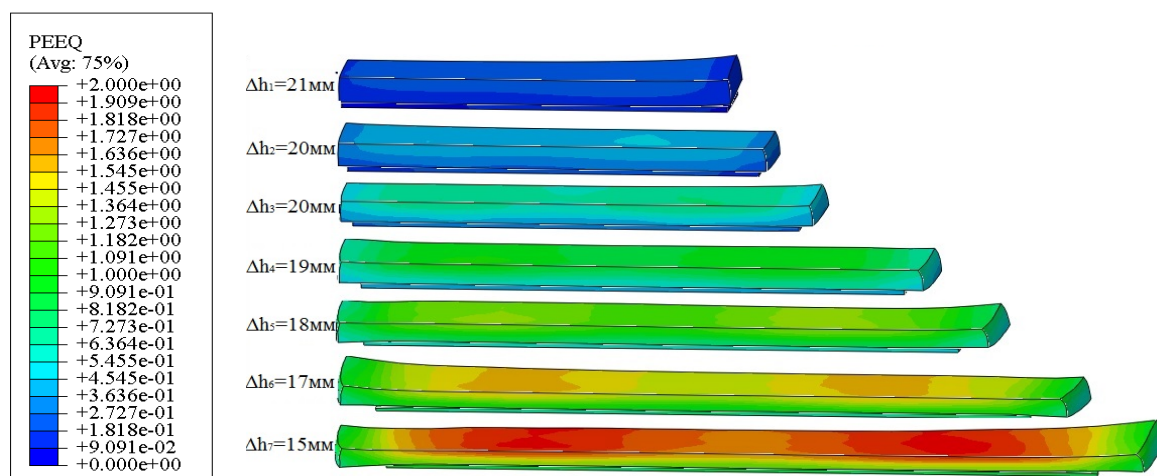


Рисунок 3 Поля распределения эквивалентной пластической деформации

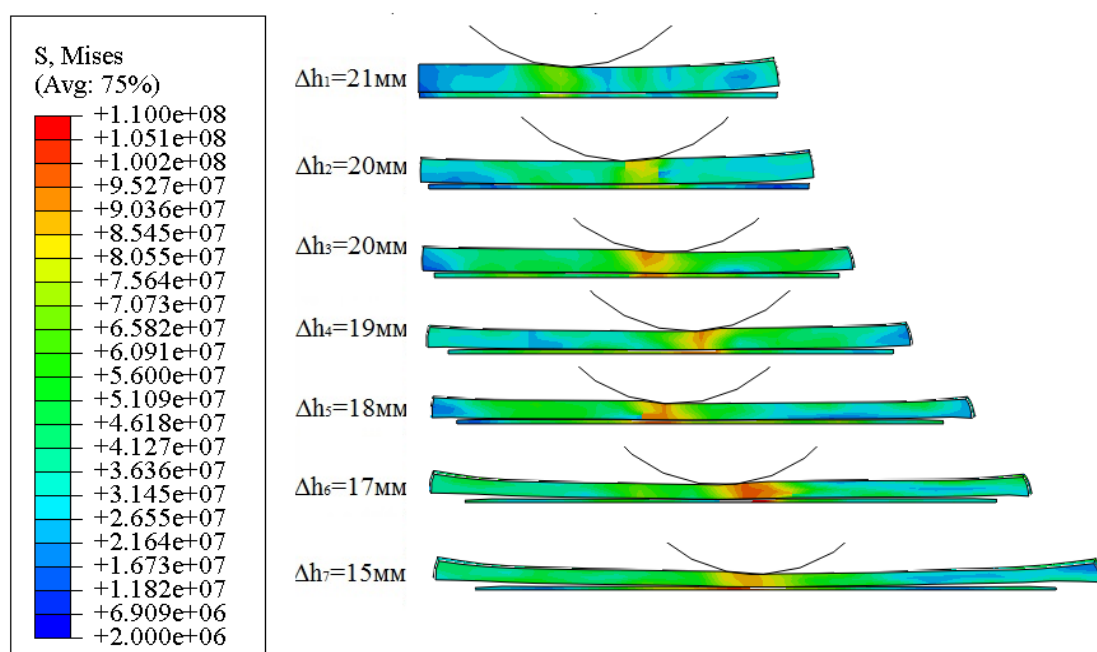


Рисунок 4 Поля распределения напряжений по Мизесу в очаге деформации при прокатке биметаллического пакета

Выводы и направление дальнейших исследований.

Из результатов моделирования видно, что вытяжка плакирующего слоя напрямую зависит от величины обжатия в каждом проходе. При прокатке симметричного четырехслойного пакета в первых двух проходах с суммарным обжатием 24,4 % видно, что напряжение проходит на всю глубину слоев и деформация основного слоя незначительно превышает деформацию плакирующего слоя за счет непосредственного контакта с валками. После третьего и четвертого прохода с суммарным обжатием 32 % поля распределения напряжений стали проникать именно в плакирующий слой. Так же стоит отметить, что после пятого прохода с суммарным обжатием 39,2 % поля распределения эквивалентной пластической деформации в основном слое стали равномерно распре-

делены по поверхности слоя, при этом длина основного слоя стала незначительно больше плакирующего слоя. При прокатке пакета в шестом проходе поля распределения напряжений в очаге деформации в основном и плакирующем слое практически выровнялись.

После 7 прохода видно, что вытяжка плакирующего слоя на 20 % меньше вытяжки основного слоя. Деформация не проникает на всю глубину пакета и сосредоточена на приконтактных с валком слоях основного слоя. На основании этого рекомендуется при сборке пакета применять плакирующий слой, длина которого может быть увеличена за счет усовершенствования конструкции пакета и соответствовать длине основного слоя с учетом фиксирующей рамки, что позволит снизить торцевую обрезь на величину наплыва основного слоя.

Библиографический список

1. Биметаллический прокат [Текст] / П. Ф. Засуха и др. — М. : Металлургия, 1991. — 248 с.
2. Производство двухслойных листов [Текст]: монография / В. А. Луценко, А. И. Беседин, А. В. Сатонин. — Алчевск : ДонГТУ, 2010. — 423 с.
3. Теоретические исследования процессов обработки металлов давлением на основе метода конечных элементов [Текст] : учебное пособие / П. В. Боровик. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — 170 с.

© Денищенко Н. П.

© Бевз А. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М., пом. нач. сортопрокатного цеха ПАО «АМК» к.т.н. Чичканом А. А.

Статья поступила в редакцию 10.10.17.

Денищенко Н. П., Бевз А. А. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМОЗМІНИ СКЛАДОВИХ ПРИ ПРОКАТЦІ СИМЕТРИЧНОГО БІМЕТАЛЕВОГО ЧОТИРИШАРОВОГО ПАКЕТУ З ПОЄДНАННЯМ СТАЛІ ОСНОВНОГО ШАРУ СТ3, ПЛАКУЮЧОГО ШАРУ СТАЛІ 15Х13

Було змодельовано обтиснення біметалевого пакета в чорновій кліті стана 3000 за 7 проходів з сумарним обтисненням 52 %. Досліджувалася спільна деформація двох різнорідних металів з метою аналізу напружено-деформованого стану.

Ключові слова: деформація двох різнорідних металів, біметалевий пакет, моделювання, формулювання Лагранжа-Ейлера, прокатка симетричного чотирьохшарового пакета, витягування плакуючого шару.

Denischenko N. P., Bevz A. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

MODELING OF THE PROCESS OF COMPONENTS FORMALIZATION WHEN ROLLING THE SYMMETRIC BIMETALLIC FOUR-LAYER SANDWICH WITH THE BASIC STEEL LAYER ST3, THE CLADDING STEEL LAYER 15X13

The compression of the bimetallic package was simulated in the roughing mill stand 3000 run for 7 passes with a total cobbing of 52%. The joint deformation of two dissimilar metals was studied to analyze the stress-strain state.

Key words: *deformation of two dissimilar metals, bimetallic package, modeling, Lagrange-Euler formulation, rolling the symmetrical four-layer package, stretching of the cladding layer.*

**СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**

**БУДІВНИЦТВО
І АРХІТЕКТУРА**

**CIVIL ENGINEERING
AND ARCHITECTURE**

УДК 691+69.059.643

д.т.н. Дрозд Г. Я.

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

ПЕРЕРАБОТКА И УТИЛИЗАЦИЯ РАЗРУШЕННЫХ ВОЙНОЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В ДОНБАССЕ

Рассматривается проблема переработки и утилизации строительных отходов, источником образования которых явились военные действия в Донбассе. Приведена структура и оценка объемов отходов при сносе разрушенных и ремонте поврежденных зданий. Обосновывается концепция переработки строительных отходов во вторичные ресурсы с последующим их использованием в строительной и дорожно-строительной отраслях при восстановлении Донбасса.

Ключевые слова: строительные отходы, утилизация, переработка, вторичные материалы, снос и ремонт зданий.

Постановка проблемы

Трехлетняя война в Донбассе привела к колоссальным разрушениям и потерям жилого фонда и инфраструктуры. Так, на 1 мая 2017 г. от военных действий в Донбассе пострадало: в ДНР более 24700 частных и 4750 многоэтажных домов, в ЛНР — более 17000 домов (только в Станицно-Луганском районе повреждено около 3700 домов, из которых 300 (8 %) не подлежит восстановлению) [1, 2].

Кроме того, в Донбассе повреждено или разрушено 217 объектов образования, 45 — здравоохранения, 51 — культурного и спортивного назначения, 81 — административные здания, 14 крупных объектов торговли и 132 промышленных объекта.

Подверглись разрушениям 962 км автомобильных дорог общего пользования (250,5 км — в Донецкой области и 711,5 км — в Луганской области), 24 моста и путепроводы длиной более 2394 погонных метра.

В результате боевых действий полностью разрушена инфраструктура «Международного аэропорта Донецк им. С. Прокофьева» и «Международного аэропорта Луганск». По информации Минэнергоугля (Киев), в результате боевых действий нанесены повреждения объектам инфраструктуры (здания, коммуникации) всех ТЭС Донбасской энергосистемы.

Из 93 шахт региона, подчиненных Минэнергоуглю, 24 работают в нормальном режиме, 58 — в режиме жизнеобеспечения (вентиляция и водоотведение), 11 — полностью обесточены.

Убытки, связанные с боевыми действиями в Донбассе на данный момент точно оценить невозможно (по оценке ООН — ориентировочно 50 млрд долларов) (рис. 1).

Кроме непосредственно поврежденных строительных объектов, территория Донбасса захлавлена остатками фортификационных сооружений и блокпостов (рис. 2, 3).

Понятно, что все поврежденные и разрушенные объекты будут восстанавливаться или демонтироваться. Однако возникает закономерный вопрос — куда деть строительный мусор и бой материалов, а также отходы от сноса? Объем отходов приблизительно оценим следующим образом. Поврежденный жилой фонд составляет (см. выше): $24700 + 4754 + 17000 = 46450$ зданий. Приняв, что 8 % объектов не подлежат восстановлению и будут снесены, получим $46450 \times 0,08 = 3720$ зданий. Принимая минимальную массу сносимых зданий 100 т, получим 372 тыс. т. Просто ремонт поврежденных зданий сопровождается образованием минимум 5 т отходов.



Рисунок 1 Основные виды разрушений в Донбассе



Рисунок 2 Блокпосты, блиндажи и их остатки



Рисунок 3 Остатки фортификационных сооружений и блокпостов

Это составит примерно $42730 \times 5 = 214$ тыс. т отходов. Разрушенные промышленные предприятия, поврежденные железобетонные мостовые конструкции десятков мостов, сотни блокпостов и фортификационных сооружений по массе отходов составят не менее полумиллиона тонн. Таким образом, суммарная масса отходов, бывших когда-то строительными объектами, разрушенных боевыми дей-

ствиями, составит порядка 1 млн т (рис. 4) и может быть по источнику образования условно разделена на три группы: I — отходы от сноса, II — отходы от ремонта, III — отходы от разборки конструкций и сооружений. Приведенные ориентировочные данные по объему отходов в Донбассе, привнесенных войной, характеризуют актуальность и масштабность проблемы обращения с ними.

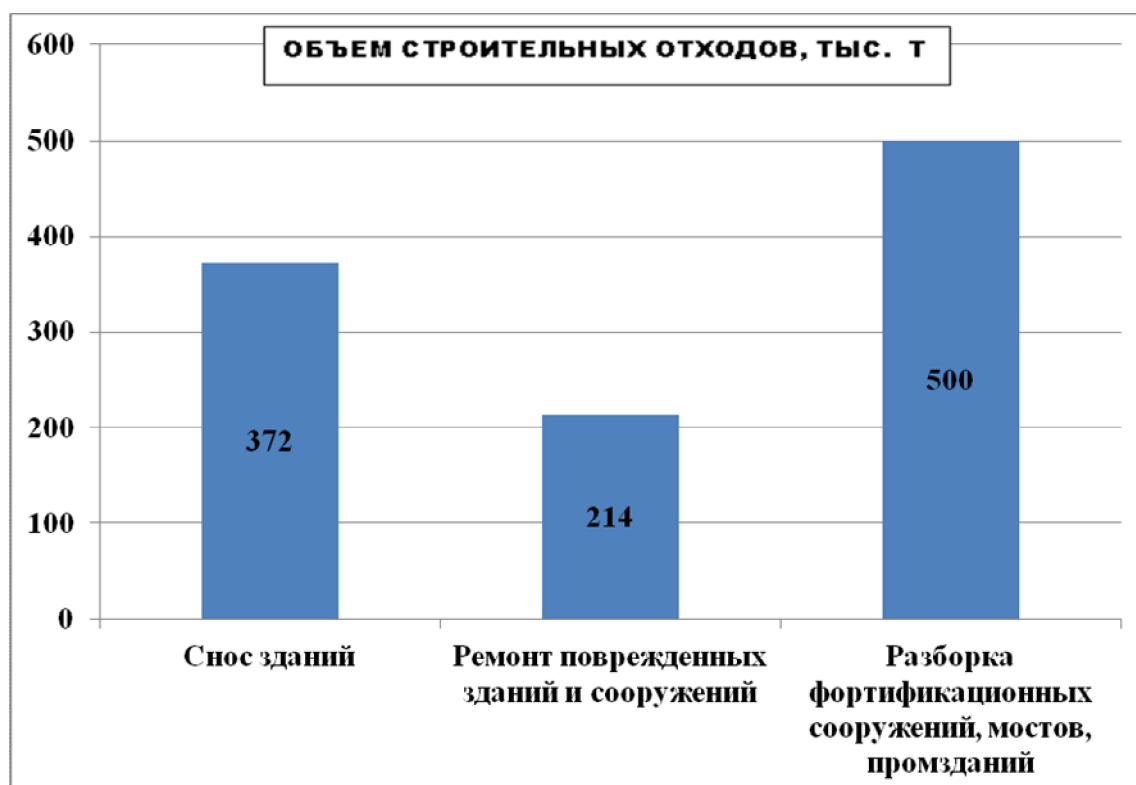


Рисунок 4 Объемы привнесенных войной разрушений в Донбассе

Цель работы — обосновать необходимость переработки строительных отходов от разрушенных объектов для получения вторичных материалов для последующего их использования в строительной сфере.

В мирное время строительные отходы на Украине, как правило, подлежали захоронению. Однако такое значительное образование разрушений и отходов в регионе в последнее время и дефицит свободных земель под их захоронение выдвигают необходимость изыскивать другие способы их утилизации. За рубежом с 50-х годов прошлого века разработаны специальные законы, эффективные технологии и механизмы, создана мощная сеть предприятий по переработке строительных отходов, что позволило к настоящему времени в мировом масштабе переработать их более 100 млрд м³ (200 млрд т).

В Российской Федерации наиболее обостренно проблемой переработки строительных отходов занимается строительный комплекс Москвы на протяжении примерно 20 лет. Накопленный им опыт

свидетельствует, что использование отходов вторичных ресурсов дает высокий экономический эффект. Сырье из отходов в 2–3 раза дешевле, чем сырье, специально изготавливаемое. Образующиеся строительные отходы состоят из лома железобетона и кирпича, отходов утеплителей, асбошифера, древесины, металла, гипсолита, полимерных материалов, битума, кровельных материалов, асфальта и т. п. Около 80 % отходов составляют тяжелый и легкий железобетон (примерное соотношение 4:1), которые после специальной переработки (дробления, сортировки, фракционирования) используются в дорожном строительстве, монолитном домостроении и при изготовлении ответственных железобетонных конструкций. Усредненная структура строительных отходов от сноса жилых зданий приведена на рисунке 5 (по данным [3]). Структура и объем отходов от ремонта поврежденных зданий в Донбассе по нашим натурным наблюдениям представлена в виде диаграммы на рисунке 6.

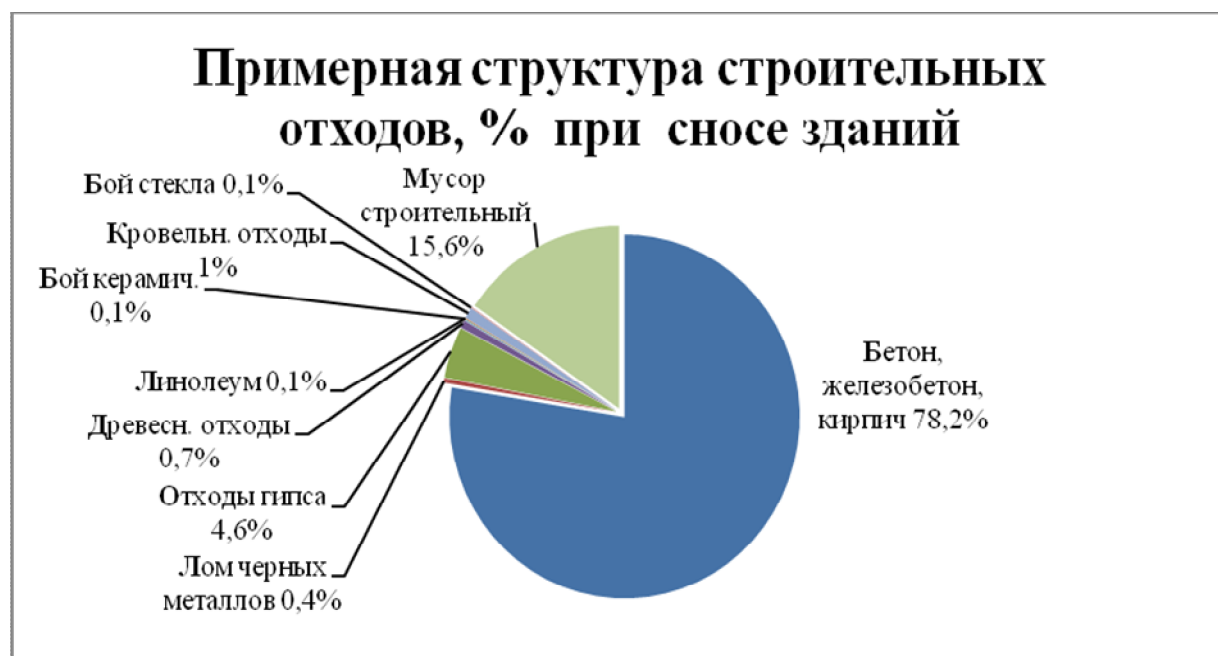


Рисунок 5 Усредненная структура строительных отходов от сноса жилых зданий

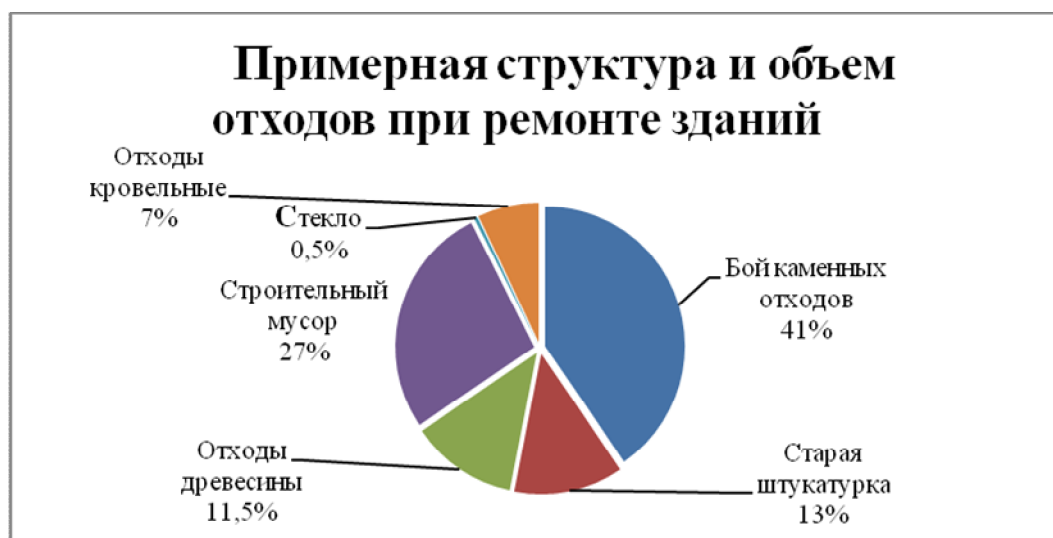


Рисунок 6 Отходы при ремонте поврежденных зданий

Обобщая приведенные сведения по отходам I и II групп (суммарно 586 тыс. т), оценим количество составляющих компонентов и возможность их дальнейшего использования. На рисунке 7 приведена структура отходов при сносе и ремонте зданий. Анализируя его, делаем предварительные выводы:

– строительный мусор, отходы штукатурки и гипса (около 200 тыс. т) как инертные материалы могут быть вывезены на захоронение;

– стеклобой (около 3 тыс. т) отправить на переработку на стекольный завод;

– древесные отходы (около 10 тыс. т) использовать как топливо или сырье для производства древесно-стружечных строительных материалов;

– кровельные материалы в зависимости от их вида (порядка 16 тыс. т) отправлять на соответствующую переработку (вторичный битум, асбестовую крошку и т. п.);

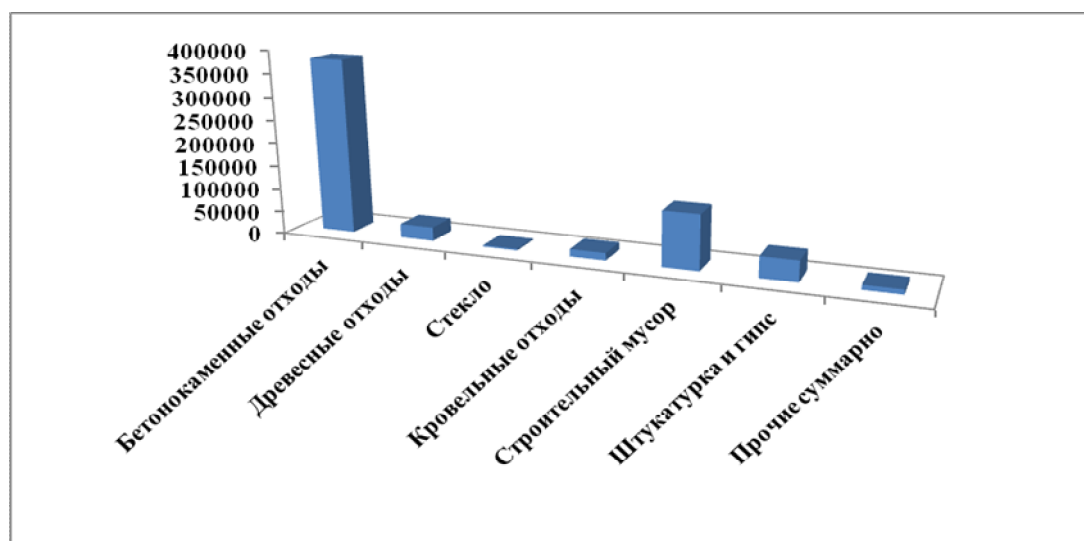


Рисунок 7 Структура и суммарные объемы отходов (т) от сноса и ремонта зданий

– прочие отходы (порядка 10 тыс. т) подвергнуть глубокой сортировке на фаянс, керамику, полимеры, утеплители, металл и т. д. и переработать по специальным технологиям.

Наибольшая по объему фракция каменных материалов (бетон, железобетон, кирпич, природный камень) в соответствии с мировым опытом должна быть переработана во вторичный заполнитель различных фракций для бетонных изделий или фракционный материал для дорожного строительства.

III группа отходов от разборки конструкций и сооружений составляет примерно 500 тыс. т. Часть неповрежденных конструкций может быть использована по своему функциональному назначению; строительный мусор — вывезен на свалку, а крупные обломки и поврежденные конструкции (ориентировочно 250 тыс. т) подлежат переработке во вторичный заполнитель по примеру каменных отходов от сноса и ремонта зданий.

Приведенные выше рассуждения предполагают при обращении со строительными отходами осуществлять их предварительную сортировку и дальнейшее применение по применению.

В мировой практике существует три основные схемы организации производства по переработке строительных отходов:

1 схема — установка технологического оборудования на месте сноса сооружения, сортировка отходов на месте и их вывоз, а также получение заполнителя с последу-

ющим его транспортированием на бетонный завод или объект;

2 схема — сортировка отходов и их вывоз, организация производства по переработке бетонного лома, получению щебня и приготовлению бетонной смеси на месте разборки сооружения;

3 схема — транспортирование бетонного лома на завод по производству щебня.

Учитывая отсутствие в настоящее время в Донбассе соответствующего технологического оборудования, необходимого опыта и нормативной базы для сферы отходов, на данном этапе все строительные отходы предлагается складировать на специальном полигоне. После решения всех организационных вопросов и создания соответствующей технической базы твердокаменные строительные отходы будут переработаны и вовлечены в строительный оборот в виде вторичного заполнителя для бетонных изделий или как подстилающее щебеночное основание под дороги.

Полигон строительных отходов и производство по их переработке размещаются, как правило, в промышленной зоне. Стационарное производство включает в себя первичное оборудование: приемные бункеры, транспортеры, пункты предварительной сортировки отходов, дробилки, магнитный сепаратор, грохот и оборудование вторичного дробления для получения необходимых фракций щебня и песка. На рисунке 8 представлена типовая щековая дробилка и получаемый щебень фракции 20–40 мм.



Рисунок 8 Щековая дробилка и получаемый на ней продукт — вторичный щебень фракции 20–40 мм

Оптовая цена щебня из природного сырья в Украине составляет 102–260 грн. [4], вторичный щебень из строительных отходов имеет ориентировочную цену вдвое меньше — 100–250 руб./т. Вторичный щебень используется для приготовления монолитных бетонных конструкций и неотвественных железобетонных изделий. Приготовление бетонов на вторичных заполнителях включает ряд особенностей по сравнению с бетонами на природных заполнителях: увеличение расхода воды на 12–16 %, снижение прочности бетона до 30 %, потерю подвижности смеси на 3–4 см, что необходимо учитывать при подборе и изготовлении бетонной смеси.

Вторичный щебень может быть использован при подготовке оснований под дорожное полотно и тротуары (рис. 9).



Рисунок 9 Подстилающее основание из вторичного щебня и разрез дорожной одежды автомобильной дороги

Полученный вторичный щебень в объеме 650 тыс. т позволит покрыть все потребности в заполнителях при восстановлении строительных объектов Донбасса и ремонте его дорожной сети. При этом бюджет региона будет сэкономлен примерно на 130 млн. руб. с заметным улучшением экологической ситуации за счет вовлечения строительных отходов в хозяйственный оборот.

Выводы.

1. Объем отходов в Донбассе от разрушенных боевыми действиями строительных объектов превышает 1 млн т.

2. По источникам образования строительные отходы можно разделить на три группы: отходы от сноса зданий, отходы от ремонта, отходы от разборки конструкций и сооружений. Часть из них после сортировки по виду и качеству материалов может быть отправлена на полигон для захоронения (200 тыс. т), использована в хозяйственных целях (150 тыс. т) и переработана во вторичный щебень (650 тыс. т) для последующего использования в строительной отрасли при восстановлении Донбасса.

3. Использование мирового опыта обращения со строительными отходами, подкрепленное созданием соответствующего нормативно-правового сопровождения и перенесения на отечественную почву специального технического оборудования и технологий по удалению и переработке строительных отходов позволит решить ряд важных для региона задач: очистить территорию, создать новые специализированные предприятия и рабочие места, эффективно использовать вторичные ресурсы в строительной отрасли.

Библиографический список

1. Более 23 000: в ДНР назвали количество разрушенных зданий [Электронный ресурс]. — Режим доступа: antifashist.com/.../bole-23-000-v-dnr-nazvali-kolichestvo-razrushennyh-i-unichtozh.
2. Военный Донбасс: в Красногоровке разрушено 42 здания [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://regnum.ru/news/polit/2280986.html>.
3. Олейник, С. П. Единая система переработки строительных отходов [Текст] / С. П. Олейник. — М. : СвР-Аргус, 2006. — 300 с.
4. Щебень известняковый в Украине [Электронный ресурс]. — Режим доступа: prom.ua/Scheben-izvestnyakovyi.html.

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

Статья поступила в редакцию 29.08.17.

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

ПЕРЕРОБКА ТА УТИЛІЗАЦІЯ ЗРУЙНОВАНИХ ВІЙНОЮ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ В ДОНБАСІ

Розглядається проблема переробки та утилізації будівельних відходів, джерелом утворення яких стали військові дії в Донбасі. Наведено структуру та оцінку обсягів відходів при знесенні зруйнованих і ремонті пошкоджених будівель. Обґрунтовується концепція переробки будівельних відходів у вторинні ресурси з подальшим їх використанням у будівельній і дорожньо-будівельній галузях при відбудові Донбасу.

Ключові слова: будівельні відходи, утилізація, переробка, вторинні матеріали, знесення і ремонт будівель.

Doctor of Tech. Sc. Drozd G. Ya. (V. Dahl ICEA and BCU LSU, Lugansk, LPR, drozd.g@mail.ru)

RECYCLING AND UTILIZATION OF BUILDING OBJECTS DESTROYED DURING THE WAR IN DONBASS

The paper addresses the problem of recycling and utilization of construction waste generated by warfare in Donbass. There has been given the structure and assessment of waste volumes at demolition and building renovation. There has been explained the concept of construction waste recycling into secondary resources with their subsequent using in building and road building industries in Donbass reconstruction.

Key words: construction waste, utilization, recycling, secondary materials, demolition and building renovation.

УДК 504.05

д.т.н. Дрозд Г. Я.

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

ФОРМИРОВАНИЕ СЕКТОРА ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ В ДОНБАССЕ

В результате обобщения европейского опыта организации и функционирования системы в сфере обращения с отходами выявлены основные недостатки отечественной системы. Предложена структурно-логическая схема для практической реализации системы — сектора обращения с отходами в Донбассе.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, утилизация, экологическая безопасность, вторичное сырье, сектор обращения с отходами.

Ранее нами было показано, что Луганщина обладает значительным экономическим потенциалом для развития сектора обращения с отходами [1].

Сегодняшняя ситуация выглядит следующим образом: в Луганске единственное предприятие «Луганский центр утилизации отходов» осуществляет сбор и транспортирование ТБО с городской территории на полигон для их захоронения. Кроме этого предприятия, имеется еще и «Втормет», ориентированный на прием и переработку различных металлических отходов, и ряд мелких полуофициальных контор по приему макулатуры и стеклотары, которые из общего объема отходов изымают менее 1 %. Таким образом, разные организации, работающие в сфере отходов и выполняющие отдельные операции по их утилизации, разобщены. Эти организации не имеют общей концепции и в целом не способны эффективно решить большую экологическую проблему на современном уровне.

Отсюда следует, что все этапы обращения с отходами должны быть объединены в единую эколого-экономически целесообразную, организационно устойчивую систему, влияющую на все этапы жизненного цикла отходов.

Целью данного исследования является обобщение европейского опыта в организации и функционировании такой системы в сфере обращения с отходами и переноса его на отечественную почву.

В международной практике наиболее распространенной является модель координационного центра как обособленной структуры или некоммерческой организации, обладающей эксклюзивным или частичным правом распоряжаться отходами, сформировавшись на определенной территории. Центр заключает договоры и осуществляет расчеты с организациями, оказывающими услуги и эксплуатирующими инфраструктуру [2].

Координационный центр наделяется полномочиями по распоряжению потоками отходов, определению исполнителей всех видов услуг и формированию тарифной политики для населения, а муниципалитет является лишь одним из заказчиков услуг (для вывоза мусора из общественных мест, уборки территорий, обслуживания бюджетной сферы). Применение такой модели возможно для Донбасса.

Модель объединяет усилия муниципалитетов для достижения целевых показателей переработки отходов и уменьшения размещения их на полигонах наиболее экономически эффективным образом. Использование оптимальной технологии переработки и эффект масштаба снижают удельные затраты на тонну перерабатываемых ТБО.

В таком подходе сочетается ряд характеристик, необходимых для реализации инновационного сценария:

1) единое видение конечного результата (эффективной системы), делающее рынок отходов более предсказуемым и прозрачным

для регуляторов, операторов и инвесторов;

2) многообразие подходов к выбору технологий, способов переработки и утилизации и механизмов финансирования в зависимости от конкретной экологической ситуации и экономических условий;

3) сохранение единого подхода к контролю факторов, непосредственно влияющих на экологическую обстановку (техническая и санитарная безопасность объектов инфраструктуры).

Таким образом, аналогично зарубежному опыту, в регионе возможно и необходимо создание в сравнительно короткие сроки специализированной отрасли — сектора по управлению и обращению с отходами: координационного центра, системы сбора, транспортировки, заготовки, переработки и утилизации отходов, с соответствующим законодательным сопровождением и финансовыми обязательствами, подчиненным принципам экологической безопасности и экономической эффективности.

Европейский опыт в сфере обращения с отходами свидетельствует, что основная цель решения проблем сборки, сортировки, транспортировки и переработки отходов заключается в получении на их основе вторичных ресурсов. Однако рынок вторичных ресурсов в Донбассе находится на начальной стадии становления и его развитие сдерживается рядом причин, основными из которых являются:

1) слабая законодательная база, регламентирующая отношения между отдельными субъектами и государством;

2) отсутствие инвестиций в создание технологий и высокотехнологичного оборудования.

Опыт зарубежья показывает, что даже развитые страны с их рыночной экономикой не смогли только с помощью рынка решить проблемы в сфере обращения с отходами без вмешательства государства [3].

Это вмешательство должно проявляться в:

– разумной политике взимания налогов на землю под свалками и полигонами;

– системе поощрения предприятий, перерабатывающих отходы;

– квотировании на реализацию остаточных материалов;

– штрафах за несанкционированное хранение отходов;

– государственной форме собственности на свалки и полигоны с направлением в бюджет всех доходов от их эксплуатации (по аналогии с западными странами).

На пути создания полноценного сектора обращения с отходами существуют следующие барьеры:

– организационно-административные;

– финансово-экономические;

– культурно-информационные.

К организационно-административным барьерам относятся: нечеткое разделение ответственности между участниками рынка; плохая адаптация механизмов государственно-частного партнерства; дефицит достоверных данных об отходах; проблемы технического регулирования и экологического надзора.

Финансово-экономические барьеры обусловлены в первую очередь сложностями обеспечения устойчивого финансирования как гарантии возврата инвестиций. К таким барьерам можно отнести проблемы установления и регулирования тарифов и других платежей, связанных с отходами, а также отсутствие экономических стимулов к развитию переработки.

Культурно-информационные барьеры выражаются в недостаточном осознании значимости качественного обращения с отходами самим обществом, вследствие чего спрос населения на услуги надлежащего качества фактически отсутствует.

Реализация мер по эффективному обращению с отходами требует изменения отношения, как со стороны населения, так и со стороны властей.

Необходимо сформировать принципиально иную культуру отношения к отходам и выработать новые правила и нормы поведения.

Основными документами, определяющими принципы обращения с отходами и приоритеты в данном направлении, являются законы Украины «Об отходах» и «Об охране окружающей природной среды». Все виды деятельности, связанные со сбором, транспортировкой, хранением, получением лицензий и утилизацией ТБО, регулируются Российскими Федеральными законами, строительными и санитарными правилами и нормами:

– Федеральный закон № 89 «Об отходах производства и потребления» закрепляет за муниципальной властью право решающего голоса в решении всех проблем, связанных с ТБО;

– ФЗ № 7 от 10.01.2002 года «Об охране окружающей среды» способствует, чтобы утилизация отходов на законодательном уровне производилась с соблюдением правил безопасности и при наличии лицензии;

– ФЗ № 96 «Об охране атмосферного воздуха» обязывает принять необходимые меры, чтобы исключить вероятность загрязнения воздуха вредными веществами;

– ФЗ № 52 и № 160, их цель обеспечить санитарно-эпидемиологическую безопасность населения, обеспечить полное соответствие всех циклов утилизации ТБО существующим санитарным нормам.

Это лишь небольшой перечень актов, которые дают представление, насколько пристально контролирует сбор и вывоз ТБО Закон Федерации. Существуют и другие документы, рекомендации и нормативы.

Утилизация бытовых отходов на законодательном уровне требует получения специальной лицензии для всех видов деятельности, связанных со сбором, транспортировкой, утилизацией, размещением.

Лицензия на деятельность с отходами выдается в соответствии с ФЗ № 99 от 04.05.11. Все индивидуальные предприниматели и юридические лица, работающие с отходами ниже 5 класса опасности, обязаны иметь лицензию. Стать обладателем лицензии и разрешительной документации возможно при наличии необходимого обо-

рудования для контроля экологической обстановки в зоне деятельности предприятия, производственных площадей, соответствующих санитарным нормам; специализированного оснащения и техники, сотрудников, имеющих соответствующую квалификацию; заключения санитарной службы; учредительных документов.

Таким образом, сектор обращения с отходами может рассматриваться как сложная динамическая система, состоящая из ряда подсистем, находящихся во взаимной связи друг с другом и представляющих единое целое сбора, сортировки, транспортирования и переработки отходов для получения вторичного сырья (материала).

В этой связи сложность системы заключается в ее многоаспектности и многовариантности решений, а динамический характер — в постоянном изменении временных ресурсных и пространственных параметров. Графическая интерпретация по [3] системы приведена на рисунке 1.



Рисунок 1 Структурно-логическая схема организации сектора обращения с отходами обработкой и обезвреживанием отходов, относящихся к 1–4 классам опасности

При этом состояние каждой из подсистем может быть оценено как состояние подсистемы

$$S_i^j = F^j(\Phi_i^j, T_i), \quad (1)$$

где S_i^j — состояние j -ой подсистемы;

Φ_i^j — влияющий i -ый фактор j -ой подсистемы;

T_i — временной период i -го фактора;

$I = 1, n, j = 1, 2, 3, 4$.

Кроме того, следует учитывать, что из перерабатываемых отходов $R(T)$ некоторая

их часть $\Delta R(T)$ может быть отправлена на захоронение, т. е.:

$$\Delta R(T) \geq 0. \quad (2)$$

В качестве основных подсистем следует принять следующие: организационно-техническая; сбор и сортировка отходов; контейнеризация, пакетирование и транспортирование; переработка отходов.

Организационно-техническая подсистема (O') должна характеризоваться, прежде всего, разработанной единой номенклатурой отходов (E'), общими для всех участников расчетными процедурами (Π'), едиными правилами взаимоотношений (B'), едиными унифицированными документами (Y'), едиными стоимостными показателями за услуги и работы (Γ'), т. е.:

$$(O^1) = F^1(E_1^1, \Pi_2^1, B_3^1, Y_4^1, \Gamma_5^1, T^1). \quad (3)$$

Подсистему сбора и сортировки отходов (C) следует ориентировать на разработку и унификацию организационно-технологических решений сбора отходов (P), их сортировку по номенклатуре (H), создание складских площадей (\mathcal{E}), решение вопросов погрузочно-разгрузочных работ (Γ), выполнение требований техники безопасности и охраны труда (B), т. е.:

$$(C^2) = F^2(P_1^2, H_2^2, \mathcal{E}_3^2, \Gamma_4^2, B_5^2, T^2). \quad (4)$$

В подсистеме контейнеризации, пакетирования и транспортирования отходов (D) следует предусмотреть решение задач по разработке типажа и унификации специализированных контейнеров (K), решений по пакетированию (I) и саморазгружающимся платформам (3), составлению схем доставки отходов (X), технологических карт на транспортирование отходов (Γ), т. е.:

$$D^3 = F^3(K_1^3, I_2^3, 3_3^3, X_4^3, \Gamma_5^3, T^3). \quad (5)$$

В подсистему переработки отходов (A) необходимо включать в число первоочередных следующие задачи: выбор метода переработки (M) и рациональной технологической схемы (\mathcal{C}), комплектация техно-

логического регламента (Π), развитие и поиск более совершенных технологических процессов (\mathcal{C}), т. е.:

$$A^4 = F^4(M_1^4, \mathcal{C}_2^4, \mathcal{C}_3^4, \Pi_4^4, \mathcal{C}_5^4, T^4). \quad (6)$$

Таким образом, система сбора, сортировки, транспортирования и переработки отходов может быть описана следующим уравнением связи:

$$S = F \left\{ \begin{array}{l} (E_1^1, \Pi_2^1, B_3^1, Y_4^1, \Gamma_5^1, T^1) \\ (P_1^2, H_2^2, \mathcal{E}_3^2, \Gamma_4^2, B_5^2, T^2) \\ (K_1^3, I_2^3, 3_3^3, X_4^3, \Gamma_5^3, T^3) \\ (M_1^4, \mathcal{C}_2^4, \mathcal{C}_3^4, \Pi_4^4, \mathcal{C}_5^4, T^4) \end{array} \right\} \quad (7)$$

Основные финансовые затраты на формирование системы будут включать: затраты на создание и функционирование каждой из подсистем — организационно-технической (Θ_1); сбора и сортировки отходов (Θ_2); контейнеризации, пакетирования и транспортирования (Θ_3); переработки отходов (Θ_4), т. е.:

$$\theta \quad \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + \theta_4. \quad (8)$$

Экономический эффект образуется за счет: экономии сырьевых ресурсов в результате использования вторичного сырья $\Delta \mathcal{E}_1$; уменьшения затрат на экологические мероприятия ввиду сокращения полигонов захоронения отходов $\Delta \mathcal{E}_2$; высвобождения земель для промышленных и сельскохозяйственных нужд $\Delta \mathcal{E}_3$. Таким образом, экономический эффект:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta \mathcal{E}_1 + \Delta \mathcal{E}_2 + \Delta \mathcal{E}_3. \quad (9)$$

Ограниченность возможностей государственного финансирования определяет ориентацию лишь на наиболее рентабельные проекты при быстрой окупаемости затрат. Составляющей мероприятий должно стать развитие внутреннего рынка вторичного сырья, содействие малому предпринимательству в этой сфере. Данная концепция по утилизации и переработке

отходов предполагает 10-летнюю стратегию развития утилизации и переработки отходов с реализацией в два этапа.

На *первом этапе* необходимо создать благоприятные условия производителям, потребителям и инвесторам для стимулирования их эффективного участия в решении поставленной проблемы в новых условиях хозяйствования, подготовить нормативно-правовую и техническую базу, реализовать ряд крупных проектов, выступающих примерами современного подхода к решению проблемы переработки, утилизации и обезвреживания ТБО.

На *втором этапе* необходимо обеспечить: рост объемов использования ТБО как вторичного сырья; сокращение объемов их образования и отрицательного влияния на окружающую среду; разработку и широкое внедрение малоотходных технологий; переход к замкнутым циклам использования материальных и энергетических ресурсов; дальнейшее развитие и совершенствование системы управления отходами.

В рамках концепции необходимо предусмотреть усиление нормативно-правового регулирования и экономического поощрения деятельности предприятий и организаций любых форм собственности по утилизации отходов, концентрации на этих направлениях финансовых и материальных ресурсов [4].

Экономическое обеспечение должно предусматривать внедрение механизмов льготного налогообложения и кредитования субъектов предпринимательской деятельности в области обращения с отходами.

Вывод. В Донбассе возможно и необходимо создание сектора обращения с отходами. С учетом зарубежного опыта его полноценное формирование и устойчивая работа может быть организована примерно в 10-летний срок путем решения организационно-административных, финансово-экономических и культурно-информационных задач.

Библиографический список

1. Дрозд, Г. Я. Развитие сектора обращения с твердыми бытовыми отходами на Луганщине — настоятельная необходимость [Текст] / Г. Я. Дрозд // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — Алчевск, 2017. — Вып. 5(48). — С. 16–28.
2. ТБО в Украине: потенциал развития / Отчет IFG в Украине [Текст]. — К. : 2014. — 103 с.
3. Олейник, С. П. Единая система переработки строительных отходов [Текст] / С. П. Олейник. — М. : СвР-Аргус, 2006. — 300 с.
4. Касимов, А. М. Современные проблемы и решения в системе управления опасными отходами [Текст] / А. М. Касимов, В. Т. Семенов. — Харьков : ХНАГХ, 2008. — 511 с.

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

Статья поступила в редакцию 29.08.17.

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

ФОРМУВАННЯ СЕКТОРА ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ В ДОНБАСІ

В результаті узагальнення європейського досвіду організації та функціонування системи у сфері поводження з відходами виявлено основні недоліки вітчизняної системи. Запропоновано структурно-логічну схему для практичної реалізації системи — сектору поводження з відходами в Донбасі.

Ключові слова: тверді побутові відходи, утилізація, екологічна безпека, вторинна сировина, сектор поводження з відходами.

Doctor of Tech. Sc. Drozd G. Ya. (*V. Dahl ICEA and BCU LSU, Lugansk, LPR, drozd.g@mail.ru*)

DEVELOPING OF WASTE MANAGEMENT SECTOR IN DONBASS

The generalization of European management and system operation in waste management sector has shown the main disadvantages of native system. There has been proposed a structural-logical scheme for the practical implementation of the system – waste management sector in Donbass.

Key words: *solid waste, utilization, environmental safety, secondary raw materials, waste management sector.*

**МАШИНОСТРОЕНИЕ
И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**МАШИНОБУДУВАННЯ
ТА МАШИНОЗНАВСТВО**

**MECHANICAL ENGINEERING
AND MACHINE SCIENCE**

УДК 669.02/09

д.т.н. Сидоров В. А.,
к.т.н. Ошовская Е. В.,
Агарков А. А.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

СТАЦИОНАРНЫЕ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В статье рассмотрены этапы развития стационарных систем вибрационного контроля. Проанализированы компоновка, элементы, выполняемые функции. Конфигурация систем наиболее приспособлена для работы с механическим оборудованием, работающим в длительном режиме. Сложность проектирования и эксплуатации системы мониторинга заключается в выборе и использовании диагностической информации. Показаны пути дальнейшего развития систем.

Ключевые слова: механическое оборудование, техническое диагностирование, стационарные системы, контроль технического состояния.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Одним из уровней использования средств технического диагностирования при контроле фактического состояния механического оборудования является применение стационарных систем [1...5]. Обеспечение непрерывного наблюдения за техническим состоянием механизмов, получение данных о параметрах вибрации в точках недоступных для измерения во время технологического процесса — основные функции стационарных систем вибрационного контроля. Кроме энергетического оборудования данные системы всё шире применяются для диагностирования металлургических машин.

Постановка задачи. На современном этапе развития круг решаемых задач и возможности стационарных систем постоянно расширяются, при этом их внешняя структура остается неизменной. Это требует обобщения для определения основных направлений дальнейшего развития данной приборной реализации вибрационной диагностики.

Изложение материала и его результаты. Одним из первых механических сигнализаторов о недопустимом уровне вибрации была монета, поставленная на ребро. Установка подвижного элемента (монеты) на упругом элементе позволяло обеспечить сигнализацию о высоких параметрах вибрации (рис. 1). В некоторых

конструкциях механизмов в качестве сигнализаторов используются элементы с частотой резонанса, соответствующей частоте наиболее вероятного повреждения.

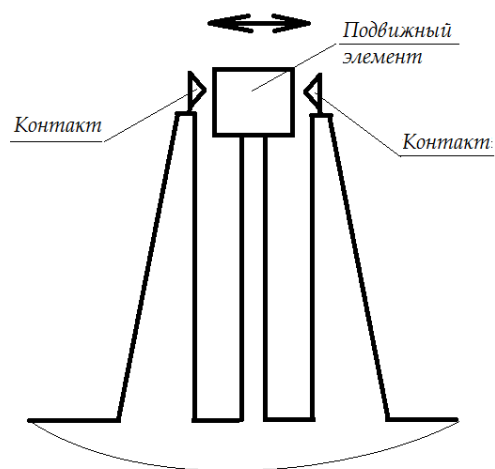


Рисунок 1 Механические системы непрерывного контроля вибрации с сигнализатором недопустимого размаха виброперемещения

Использование проксиметров и пьезоэлектрических датчиков при измерении параметров вибрации позволило создать одноканальные аналоговые системы вибрационной защиты. Одноканальные электронные вибрационные выключатели (рис. 2) выполняют предупреждение о повышении одного или нескольких параметров вибрации до опасного (заданного) уровня. Контролируемым параметром в таких системах

являются: среднеквадратичное значение (СКЗ) виброскорости, пиковое значение виброперемещения, СКЗ виброускорения, параметры состояния подшипников качения. Предупреждающий сигнал выдаётся

после реализации определённого количества превышений заданного уровня, при этом включается звуковая или световая сигнализация, возможна принудительная остановка оборудования.



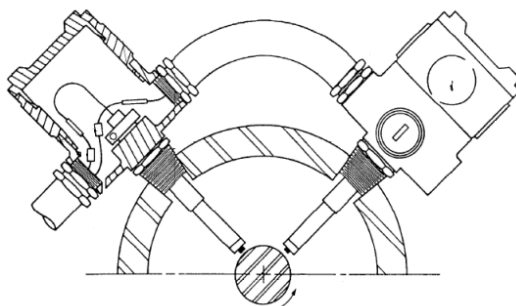
а



б



в



г

Рисунок 2 Компоненты одноканальных систем виброзащиты:

а) измерительный блок VIBROCONTROL 868; б) измерительный блок Machine Condition Transmitter (MCT) CMSS 530; в) измерительный блок ifm electronic и схема установки проксиметров для контроля перемещения вала (г)

Типичная конфигурация системы одноканальной защиты (рис. 3) включает один или два датчика и электронный модуль (система VIBROCONTROL 1000, система VIBROCONTROL 1100 и др.). Сигнал от датчика преобразуется в параметр контроля, устройство сравнивает измеренное значение с установленными ограничениями и при необходимости включает реле внешнего управления. Имеется возможность настройки двух пределов предупредительных сигналов. Регулируемое время задержки реле предотвращает ложные срабатывания. Возможно использование датчиков для измерения абсолютной или относительной вибрации, контроля осевого положения вала.

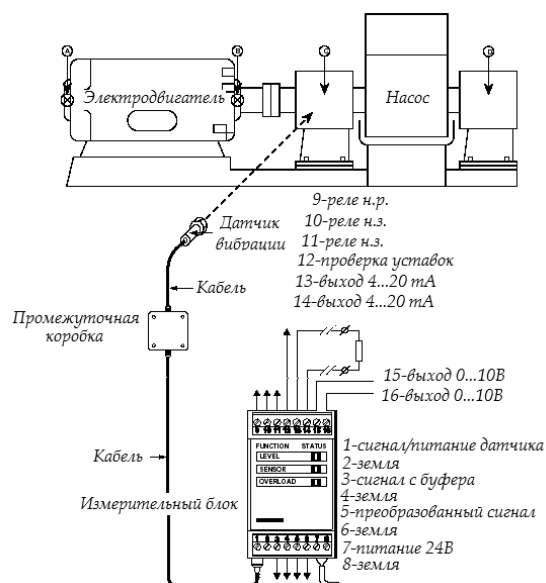


Рисунок 3 Одноканальная система контроля

Надёжность работы одноканальной системы контроля зависит от качества технического обслуживания коммутирующего оборудования, метрологического сопровождения датчиков и интенсивности использования информации.

При одновременном контроле нескольких взаимодополняющих параметров используют блочный принцип, основанный на единой элементной базе и конструкторском решении.

Наиболее характерно данное построение для стационарных систем диагностирования механизмов роторного типа. При этом контролируемые диагностическими параметрами являются: параметры вибрации корпусов подшипников, биения вала, орбита движения вала, частота вращения, температура смазочного материала. Сигнализирующая система встроенного контроля предполагает участие оператора и дополнительный спектральный анализ для точной постановки диагноза.

Измерительные блоки представляют собой независимые друг от друга устройства. Каждый блок индивидуально программируется. Измерительный и сигнализирующий блоки осуществляют сравнение зафиксированных значений параметра с запрограммированными. На основании данного сравнения выдается цветовой код состояния (зеленый, желтый, красный) и формируется сигнал для включения внешних устройств тревоги или отключения механизма.

Следующий этап развития стационарных систем контроля связан с возрастанием количества точек диагностирования. Однотипность алгоритмов контроля привело к соединению измерительной (датчики, линии связи, предусилители), коммутационной (промежуточные блоки связи) и вычислительной (персональный компьютер) подсистем в единую систему. По данной схеме (рис. 4) построены практически все многоканальные системы вибрационного контроля.

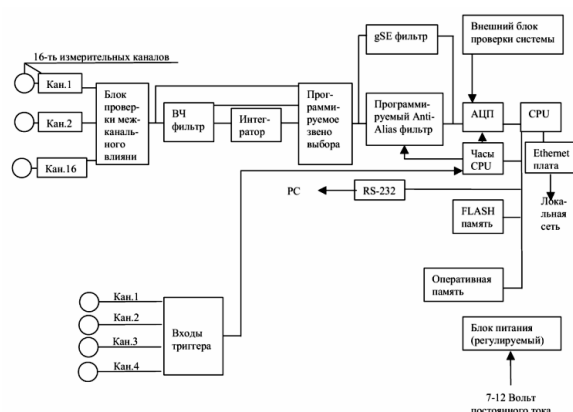


Рисунок 4 Принципиальная схема многоканальной системы

Система состоит из датчиков, устанавливаемых на контролируемых узлах оборудования, соединенных кабельными трассами с блоками коммутации, смонтированных в непосредственной близости от контролируемого оборудования. В состав блока коммутации входит одноплатный компьютер, аппаратные средства коммутации и цифровой обработки сигналов, а также программное обеспечение для измерений, определения технического состояния и выбора приоритета опроса контролируемого узла в зависимости от технического состояния. Информация от блоков коммутации по локальной промышленной сети Ethernet поступает на центральный компьютер, который располагается в помещении оператора. Компьютер выполняет функции отображения и хранения диагностической информации, прогнозирования технического состояния контролируемых узлов, контроля состояния измерительных трактов, внутренней и внешней сетей, создания отчетов и выполнения заданий оператора. Оператор в любой момент времени может прервать выполнение автоматических операций и дать задание на внеочередное измерение контролируемого узла. Информация из стационарной системы технического диагностирования может передаваться в любую сеть предприятия.

Рассмотрение и анализ применения стационарных систем диагностики выявили проблему, связанную с периодичностью измерений и объемами накапливаемой информации. Следует отметить, что в одноканальных системах цикл измерения составляет 0,25 с при работе с одним каналом измерения и 6...20 с для двух каналов. Увеличение количества датчиков приводит к возрастанию периода опроса, и многоканальные стационарные системы перестают быть системами непрерывного контроля. Из опыта практических работ на различных видах оборудования следует, что для механического оборудования не требуются дорогостоящие системы с функциями параллельного опроса каналов и защиты в режиме реального времени. Наиболее оптимальным решением по соотношению «цена – функциональность – достоверность диагностики» для эффективного решения задач мониторинга и оценки технического состояния в этом случае являются системы с последовательным опросом каналов, обеспечивающие периодичность сбора данных 15–20 мин. При этом предполагается, что в течение выбранного периода времени, определяющего периодичность измерений, возникновение аварийной ситуации маловероятно. Хотя в некоторых случаях возникает необходимость фиксации однократного механического удара в вибрационном сигнале (например, при обрыве клапана у компрессора, лопатки у турбины и т. д.).

В многоканальных стационарных системах вибрационного контроля последнего поколения отмечается расширение функций за счёт дополнительного модуля анализа спектров механических колебаний, что позволяет диагностировать подшипники качения, валы, зубчатые передачи и др. Кроме того предусматривается возможность контроля широкого перечня дополнительных «невибрационных» параметров, таких как температура, потребляемый ток, частота вращения и т.д., что позволяет получить дополнительную информацию о текущем состоянии контролируемого оборудования, что повышает эффективность работы системы. В современ-

ных системах на аппаратном и программном уровне предусмотрено подключение различных видов датчиков с разными выходными интерфейсами и получение информации непосредственно из АСУ ТП. Примером такой системы является система COMPASS, разработанная фирмой «Брюль и Кьер», в которой выполняется контроль диагностических (вибрация, температура) и технологических (расход, давление) параметров. Еще одной тенденцией развития является беспроводная связь датчиков с системой контроля (рис. 5). Беспроводной ввод данных по каналу Bluetooth позволяет измерять параметры подвижных и вращающихся объектов. Однако на промышленных предприятиях наличие параллельных радиоканалов может привести к сбоям в работе оборудования, а передача данных по одному каналу не обеспечивает необходимой скорости передачи информации. Накопление данных в промежуточных модулях приводит к обесцениванию оперативности использования параметров вибрации, поэтому данное направление требует дальнейшей проработки.

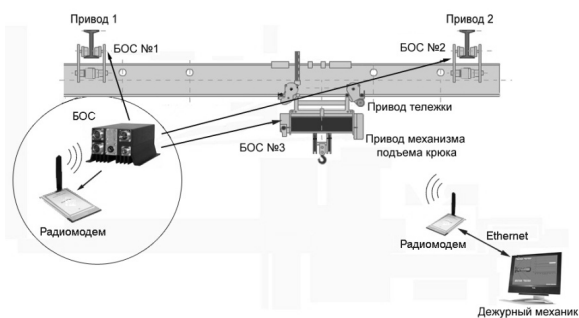


Рисунок 5 Структура беспроводной системы

Таким образом, обзор многоканальных стационарных систем вибрационного контроля показал, что их конфигурация наиболее приспособлена для работы с механическим оборудованием, работающим в длительном режиме.

В состав большинства систем входят следующие элементы:

1. Первичные датчики: акселерометры, таходатчики, датчики параметров технологического процесса.

2. Блоки коммутации измеряемых параметров, имеющие элементы защиты и возможность самостоятельной работы.

3. Блок преобразования информации и согласования входных сигналов с ЭВМ.

4. ЭВМ с программным обеспечением для мониторинга и диагностирования.

5. Анализаторы-сборщики информации, обеспечивающие дополнительную возможность сбора данных, в том числе с помощью переносных приборов.

6. Блоки контроля технологических параметров: температура, давление, расход и др.

Программное обеспечение, используемое в системах, обеспечивает сохранение, визуализацию и оценку результатов измерений, а также осуществляет связь с переносными приборами-сборщиками информации.

Высокий уровень надёжности стационарных систем контроля достигается за счет: самодиагностики, буферизации данных в случае сбоя компьютера, распределения вычислительных мощностей, защиты от несанкционированного доступа.

Сложности в использовании систем вибрационного контроля связаны с выбором и применением диагностической информации. Эта функция перекладывается на потребителя продукции. В качестве рационального решения данной проблемы можно рекомендовать следующий подход.

Для контроля технического состояния механического оборудования обычно достаточно использовать общие уровни виброскорости, виброускорения или виброперемещения, измеряемые в стандартных или пользовательских полосах частот. Для оборудования с лопаточным аппаратом (турбин и компрессоров) дополнительно можно выполнять контроль вектора вибрации. С целью выявления причин повышенной вибрации дымососов, вентиляторов, насосов и т.д. достаточно использовать спектральный анализ вибрации. Для этого система должна обеспечивать расчет прямых спектров виброскорости и виброускорения в диапазонах частот с разрешением от 6400 линий. При диагностировании многоступенчатых

редукторов дополнительно требуется выполнять ряд специальных замеров — временных реализаций этапов разгона, торможения, реверсирования и др.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Необходимо отметить, что использование стационарных систем диагностики механического оборудования всё ещё ограничивается из-за их высокой стоимости; больших объёмов накапливаемой информации, которая не используется для определения технического состояния машин; затрат на поддержание системы в работоспособном состоянии и требования высокого уровня квалификации специалистов.

Особенности металлургического производства накладывают также дополнительные требования к системам, связанных с возможностью функционирования в условиях повышенной влажности, запыленности, высоких температур, ударных нагрузок и существенных электромагнитных полей.

Несмотря на указанные факторы, применение стационарных систем контроля для защиты механического оборудования от превышения нормативных параметров работы является обоснованным в следующих случаях: 1) недоступность оборудования для осмотра; 2) многофакторная зависимость технического состояния машин; 3) необходимость постоянного наблюдения за параметрами технического состояния.

При этом рациональным вариантом функционирования систем следует признать двухуровневый контроль:

1) измерение общего уровня вибрации и временного сигнала любой длительности;

2) детальное диагностирование контролируемых узлов; спектральный анализ.

Для эффективного диагностирования необходимо применять специализированное программное обеспечение с функциями автоматизированного анализа и обработки данных, так называемого «экспертного» модуля, который позволяет в автоматическом режиме проводить фильтрацию и классификацию данных, а также рассчитывать основные ча-

стоты неисправностей, анализировать тренды и на основании заложенных диагностических моделей выдавать заключения о текущем состоянии оборудования и наличии развивающихся дефектов.

Получаемая от стационарных систем контроля информация должна использо-

ваться специалистами службы диагностирования совместно с персоналом ремонтных служб участка, цеха, предприятия для своевременного принятия решений о техническом обслуживании и ремонтах механического оборудования.

Библиографический список

1. Гайгемюллер, Г. Диагностика агрегатов в прокатных цехах [Текст] / Г. Гайгемюллер, У. Клаппорт, У. Лейтриц // Черные металлы. — 1996. — № 12. — С. 48–50.
2. Мекел, Дж. Применение компьютеризированных систем наблюдения и диагностики на прокатных станах [Текст] / Дж. Мекел, В. Геропт, А. Аш // Черные металлы. — 1999. — № 12. — С. 53–60.
3. Сушко, А. Е. Вибродиагностика в системах технического обслуживания по фактическому состоянию оборудования металлургических производств [Текст] / А. Е. Сушко, М. А. Деми // Вибрация машин: измерение снижение защита. — 2005. — № 1. — С. 6–9.
4. Сидоров, В. А. Выбор диагностических параметров стационарных систем контроля технического состояния металлургических машин [Текст] / В. А. Сидоров, А. Е. Сушко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль: ежеквартальный научно-технический и производственный журнал. — 2010. — № 4. — С. 46–50.
5. Сушко, А. Е. Методология внедрения аппаратно-программных средств мониторинга технического состояния и диагностики прокатных станов по различным параметрам вибрации [Текст] / А. Е. Сушко // Сталь. — 2011. — № 5. — С. 60–65.

© Сидоров В. А.

© Ошовская Е. В.

© Агарков А. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ОПМ ДонНТУ Ченцовым Н. А.,
д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.

Статья поступила в редакцию 28.09.17.

д.т.н. Сидоров В. А., к.т.н. Ошовська О. В., Агарков А. О. (ДонНТУ, м. Донецк, ДНР)

СТАЦІОНАРНІ СИСТЕМИ ВІБРАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

В статті розглянуті етапи розвитку стаціонарних систем віброконтролю. Проаналізовані компоновка, елементи, функції, що виконуються. Конфігурація систем найбільш підходить для роботи з механічним обладнанням, що працює в тривалому режимі. Складність проектування та експлуатації системи моніторингу полягає у виборі та використанні діагностичної інформації. Надані шляхи подальшого розвитку систем.

Ключові слова: механічне обладнання, технічне діагностування, стаціонарні системи, контроль технічного стану.

Doctor of Tech. Sc. Sidorov V. A., PhD Oshovskaya Ye. V., Agarkov A. A. (DonNTU, Donetsk, DPR)
STEADY-STATE SYSTEMS FOR VIBRATION CONTROL OF THE MECHANICAL EQUIPMENT

The paper concentrates on the development stages of the steady-state systems for vibration control. The layout, elements and functionality have been analyzed. The systems' configuration is best applicable for a work with mechanical equipment running in a long-term mode. Design and operation complicity of the monitoring system is in choosing and using the diagnostic information. The ways for further systems development are shown.

Key words: mechanical equipment, technical diagnostics, steady-state systems, technical state control.

УДК 669. 18: 621.746

д.т.н. Еронько С. П.,
к.т.н. Ткачев М. Ю.,
к.т.н. Ошовская Е. В.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ УДАРНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ПОДВИЖНО СОПРЯЖЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Приведены результаты аналитического исследования взаимного влияния кинематических и энергосиловых параметров (ускорение, сила прижатия огнеупоров, энергия удара) процесса динамического взаимодействия подвижно-сопряженных элементов переталкивающего устройства системы быстрой смены защитных огнеупоров, экранирующих струю стали от вторичного окисления на участке промежуточный ковш – кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок. Установлены регрессионные зависимости, описывающие отношения между рассматриваемыми переменными, полученными эмпирически в ходе физического моделирования соударения трех тел, одно из которых находится в заземленном (несвободном) состоянии.

Ключевые слова: сила, ускорение, энергия удара, физическая модель, погружной стакан, машина непрерывного литья заготовок, регрессионный анализ.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Особенностью работы систем быстрой смены погружных стаканов и стаканов-дозаторов, реализующих удаление изношенных защитных огнеупоров без прерывания разливки на МНЛЗ, является возникновение значительных динамических нагрузок. Эти системы получили широкое распространение в промышленности сравнительно недавно, поэтому ряд вопросов, связанных с их работой, не был решен до настоящего времени. Исследованием конструктивных и энергосиловых параметров систем быстрой замены погружных стаканов и стаканов-дозаторов промежуточного ковша соответственно слывовых и сортовых МНЛЗ занимался ряд ученых [1–5]. Влияние образующихся в канале сталевыпускного тракта неметаллических тугоплавких отложений на работу переталкивающего устройства системы рассмотрено в работе [6], а исследование конструктивных параметров его гидропривода раскрыто в статье [7]. При этом необходимо отметить, что авторам указанных научных трудов удалось оптимизировать конструктив-

ные параметры и получить ряд важных аналитических и эмпирических зависимостей, необходимых для проектирования указанной системы. К таким результатам следует отнести формулу для определения диаметра плунжера гидроцилиндра переталкивающего устройства, учитывающую его динамическую жесткость, математическую модель манипулятора, включающую зависимости для расчета момента сопротивления, действующего на привод механизма подачи нового стакана, и силы сопротивления, преодолеваемой приводом механизма уборки отработанного стакана. Безусловно, успехи в этой области базировались как на фундаментальных положениях общинженерных наук, так и на сравнительно недавно разработанных моделях продольного удара, полученных на основании исследований стержневых систем неоднородной структуры.

Однако до настоящего времени в отечественных и зарубежных источниках научнотехнической информации, несмотря на наличие значительного объема экспериментальных данных, отсутствуют сведения относительно взаимного влияния факторов,

определяющих работу системы, в частности, ее переталкивающего устройства.

Постановка задачи. Задачей анализа результатов ранее проведенных экспериментальных исследований энергосиловых параметров системы быстрой смены огнеупорных стаканов промежуточного ковша МНЛЗ, применяемых при серийной разливке стали, является установление регрессионных зависимостей между учитываемыми факторами.

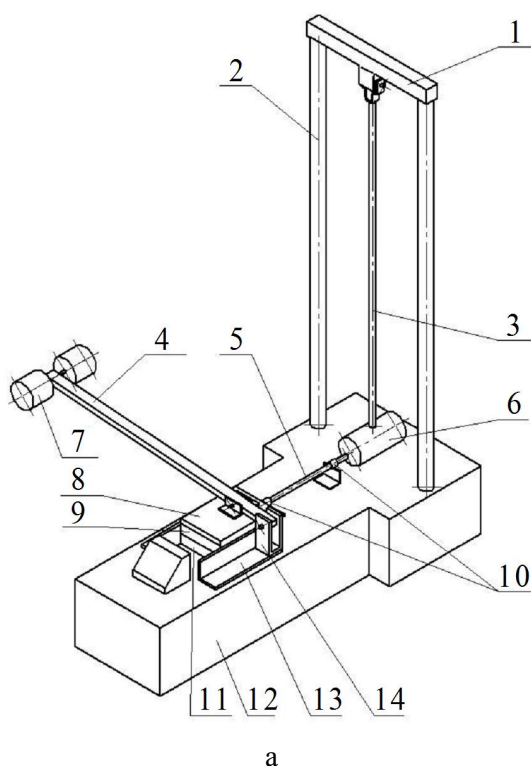
Изложение материала и его результаты. Обработанные экспериментальные данные (таблица 1) [1, 2] получены на испытательном стенде, имитирующем работу переталкивающего устройства, кон-

струкция которого защищена патентом на изобретение [3]. Устройство лабораторного стенда поясняет рисунок 1, а. В его состав входит коробчатая рама 12 с направляющими 13, между которыми размещены неподвижно закрепленная опорная плита 11 и имеющий возможность относительно продольного перемещения брусок 9, прижимаемый пластиной 8. Силу прижатия бруска 9 пластиной 8 обеспечивали комплектом грузов 7, закрепленных на большем плече рычага 4, посредством шарниров соединенного с пластиной 8 и кронштейном 14.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований энергосиловых параметров имитируемого процесса замены огнеупорных стаканов

№	Сила прижатия, Н	Ускорение, м/с ²	Энергия удара, Дж	Силы сопротивления, Н	
				Сила инерции	Суммарная сила трения
1 серия: $m_{\text{ш}} / m_{\text{б}} = 32, A = 8720$ кг/с					
1	1008	18	18,8	108	302
2	1008	23	28,2	138	302
3	1008	30	37,6	180	302
4	1377	25	18,8	150	413
5	1377	27	28,2	162	413
6	1377	33	37,6	178	413
7	1746	21	18,8	126	523
8	1746	24	28,2	144	523
9	1746	28	37,6	168	523
10	2116	16	18,8	96	634
11	2116	17	28,2	102	634
12	2116	18	37,6	108	634
2 серия: $m_{\text{ш}} / m_{\text{б}} = 1,6, A = 41250$ кг/с					
1	1008	10	18,8	100	302
2	1008	12	28,2	120	302
3	1008	15	37,6	150	302
4	1377	25	18,8	250	413
5	1377	26	28,2	260	413
6	1377	28	37,6	280	413
7	1746	24	18,8	240	523
8	1746	25	28,2	250	523
9	1746	26	37,6	260	523
10	2116	24	18,8	240	634
11	2116	25	28,2	250	634
12	2116	26	37,6	260	634



а



б

Рисунок 1 Общий вид (а) и схема (б) лабораторного стенда для исследования процесса ударного взаимодействия тел

Для создания силы принудительного перемещения бруса 9, защемленного между опорной плитой 11 и пластиной 8, служил молот 6, соединенный с нижним концом маятника 3, подвешенного на перемычке 1, которую крепили на двух вертикальных колоннах 2. Силовое взаимодействие между молотом 6 и бруском 9 осуществляли посредством промежуточного элемента 5, установленного в направляющих втулках 10.

Также в состав стенда входил контрольно-измерительный комплекс, показанный на его общем виде (рис. 1, б), включающий тензорезисторный преобразователь, двухкоординатный акселерометр ADXL 210 фирмы ANALOG DEVICES, четырехканальный усилитель переменного тока УТ4-1 (ТУ 25.06.1377-82), многоканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) фирмы L-CARD и ЭВМ.

В ходе исследования выполняли варьирование таких параметров, как сила прижатия F_{np} огнеупорного изделия к гнездовому блоку промежуточного ковша и длительность его замены, предопределяющая ускорение a подвижно сопряженных элементов системы. В дополнение к этому проводили изменение отношения массы ударяющего тела m_m к массе ударяемого m_6 ($m_6 = \text{const}$) и динамической жесткости промежуточного элемента A , передающего ударную нагрузку (1 серия опытов: $m_m / m_6 = 32$, $A = 8720$ кг/с; 2 серия опытов: $m_m / m_6 = 1,6$, $A = 41250$ кг/с). В настоящей работе не рассматривается влияние на параметры системы последнего из указанных факторов, поскольку этот вопрос подробно изучен в [6].

Статистическую обработку результатов эксперимента выполняли в несколько этапов. Среди них основными являлись: построение моделей линейной и нелинейной регрессий, определение корреляционной матрицы зависимостей между переменными (ускорение a , сила прижатия F_{np} и энергия удара E), оценка степени соответствия значений величин, наблюдаемых в ходе эксперимента и предсказанных моде-

лю. При этом в регрессиях оценивали как нормальное распределение остатков, так и удаленных остатков величин, а также их расположение относительно доверительного интервала.

Обработка данных, полученных при проведении 1-й серии опытов, позволила установить следующее.

Модель линейной регрессии имеет вид:

$$a = 22,614 - 0,0065F_{np} + 0,386E,$$

однако коэффициент корреляции при необходимом уровне значимости ($p = 0,021 < 0,05$) имеет все же недостаточно высокое значение ($R = 0,758 < 0,9$).

Модель нелинейной регрессии имеет вид:

$$a = -39,6 + 0,07F_{np} + 0,52E - 2,2 \times 10^{-5}F_{np}^2 - 0,0004F_{np}E + 0,01E^2.$$

Прогнозируемые с ее помощью значения более близки к наблюдаемым, чем при использовании модели линейной регрессии. Сумма квадратов отклонений модели нелинейной регрессии $\Delta = 62,247$, а линейной $\Delta = 141,035$, то есть в 2,3 раза больше. Коэффициент корреляции имеет достаточно высокое значение ($R = 0,948 > 0,9$) при уровне значимости $p = 0,00025 < 0,05$, поэтому можно считать данную модель нелинейной регрессии удовлетворяющей условию адекватности.

Поверхность отклика имеет форму гиперболического параболоида.

Обработка данных, полученных при проведении 2-й серии опытов, позволила установить следующее.

Модель линейной регрессии имеет вид:

$$a = 2,167 + 0,00992F_{np} + 0,386E,$$

но коэффициент корреляции имеет недостаточно значение ($R = 0,73 < 0,9$).

Модель нелинейной регрессии имеет вид:

$$a = -60,3 + 0,09F_{np} + 0,22E - 2,57 \times 10^{-5}F_{np}^2 - 0,0001F_{np}E + 0,003E^2.$$

Сумма квадратов отклонений модели нелинейной регрессии $\Delta = 63,092$, а линейной — $\Delta = 192,16$, то есть примерно в 3 раза больше. Коэффициент корреляции имеет достаточное значение ($R = 0,92 > 0,9$) при уровне значимости $p = 0,00022 < 0,05$, поэтому можно считать эту модель нелинейной регрессии также удовлетворяющей условию адекватности.

Поверхность отклика последней модели нелинейной регрессии, имеющей форму гиперболического параболоида, приведена на рисунке 2.

Также с целью дальнейшей оптимизации значений параметров системы были исследованы уравнения поверхностей второго порядка. В 2-х сериях опытов были получены практически канонические уравнения гиперболических параболоидов. В первой серии опытов это уравнение имеет вид:

$$\frac{F_{np}^2}{0,293^2} - \frac{(E-1699)}{19,54^2} = 2(a + 2320),$$

во второй –

$$\frac{F_{np}^2}{8,303^2} - \frac{E^2}{0,32^2} = 2(a - 230,2).$$

Выводы и направление дальнейших исследований.

Проверенные на адекватность модели нелинейной регрессии могут использоваться при проектировании опытно-промышленных образцов систем быстрой смены погружных огнеупорных стаканов и стаканов-дозаторов МНЛЗ.

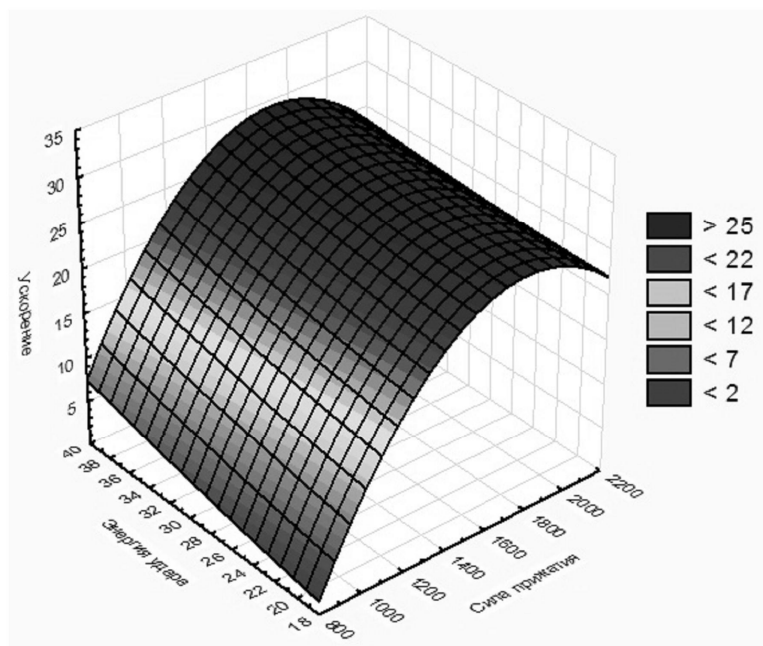


Рисунок 2 Поверхность отклика ускорения (a , м/с^2) в зависимости от силы прижатия (F_{np} , Н) и энергии удара (E , Дж) (модель нелинейной регрессии вида $a = -60,3 + 0,09F_{np} + 0,22E - 2,57 \times 10^{-5} F_{np}^2 - 0,0001F_{np}E + 0,003E^2$)

Проведенный регрессионный анализ результатов исследования энергосиловых параметров системы быстрой смены восполнил недостающие сведения в общей методике расчета систем данного класса, что будет способствовать созданию оте-

чественных конкурентоспособных образцов вспомогательного оборудования МНЛЗ, позволяющих поддерживать в стабильном режиме непрерывную разливку стали и повышать ее технико-экономические показатели.

Библиографический список

1. Еронько, С. П. Исследование характера передачи ударной нагрузки между подвижно сопряженными элементами механической системы [Текст] / С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, Д. А. Яковлев, В. В. Ошовский, С. В. Мечик // Металл и литье Украины. — Киев, 2008. — № 6. — С. 18–22.
2. Еронько, С. П. Совершенствование системы быстрой смены погружных стаканов для серийной разливки стали на слабовых МНЛЗ [Текст] / С. П. Еронько, А. Л. Сотников, М. Ю. Ткачев // Металлургические процессы и оборудование. — Донецк, 2012. — № 3. — С. 26–38.
3. Пат. 74507 Україна, МПК B22D 41/56. Пристрій для заміни стакан-дозатора проміжного ковша машини безперервного лиття заготовок / Єронько С. П., Смірнов О. М., Цупрун О. Ю., Штепан Є. В., Білобров Ю. М., Сусь Ю. В., Плугатарь В. С., Тіунов В. М.; заявник і патентовласник Наукове-виробниче товариство з обмеженою відповідальністю з іноземними інвестиціями «Донікс». — № 20040706155, заявл. 23.07.2004; опубл. 15.12.2005, Бюл. № 12. — 3 с.
4. Провоторов, Д. А. Системы автоматической замены стаканов-коллекторов на установках непрерывного литья заготовок [Текст] / Д. А. Провоторов // Сборник материалов международной конференции «Автоматизация: проблемы, идеи, решения». — Тула : Изд-во ТулГУ, 2006. — С. 138–141.
5. Eron'ko, S. P. Fast Replacement of Submersible Tundish Nozzles in a Continuous Slab-Casting Machine [Text] / S. P. Eron'ko, E. V. Oshovskaya, M. Yu. Tkachev // Steel in Translation. — Moscow, 2016. — Vol. 46, № 1. — P. 33–38.

6. Еронько, С. П. Разработка и исследование импортозамещающих разливочных систем промежуточных ковшей слывовых МНЛЗ [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев // Бюллетень научнотехнической и экономической информации «Черная металлургия». — Москва, 2016. — № 3. — С. 62–69.

7. Модели продольного удара [Текст]: монография / В. К. Манжосов. — Ульяновск: УлГТУ, 2006. — 160 с.

8. Моделирование продольного удара в стержневых системах неоднородной структуры: монография [Текст] / В. К. Манжосов, В. В. Слепухин. — Ульяновск: УлГТУ, 2011. — 208 с.

9. Ткачев, М. Ю. Аналитическое исследование конструктивных параметров гидропривода переталкивающего устройства системы быстрой смены погружных стаканов слывовой МНЛЗ [Текст] / М. Ю. Ткачев, Е. В. Ошовская // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». — Алчевск, 2017. — № 5. — С. 97–102.

© Еронько С. П.

© Ткачев М. Ю.

© Ошовская Е. В.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ОПМ ДонНТУ Ченцовым Н. А., д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.

Статья поступила в редакцию 26.09.17.

**д.т.н. Еронько С. П., к.т.н. Ткачев М. Ю., к.т.н. Ошовська О. В. (ДонНТУ, м. Донецьк, ДНР)
РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ
ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАЧІ УДАРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ РУХОМО
СПОЛУЧЕНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ**

Наведено результати аналітичного дослідження взаємного впливу кінематичних і енергосилових параметрів (прискорення, сила притиснення вогнетривів, енергія удару) процесу динамічної взаємодії рухомо сполучених елементів перекидуючого пристрою системи швидкої заміни захисних вогнетривів, що екранують струмінь сталі від вторинного окислення на ділянці проміжний ківш – кристалізатор машини безперервного лиття заготовок. Встановлено регресійні залежності, що описують відносини між розглянутими змінними, що були отриманими експериментально в ході фізичного моделювання удару трьох тіл, одне з яких знаходиться в затисненому (невільному) стані.

Ключові слова: сила, прискорення, енергія удару, фізична модель, занурювальний стакан, машина безперервного лиття заготовок, регресійний аналіз.

Doctor of Tech. Sc. Eron'ko S. P., PhD Tkachev M. Yu., PhD Oshovskaya Ye. V. (DonNTU, Donetsk, DPR)

**REGRESSION ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL STUDY RESULTS ON THE IMPACT
LOAD TRANSFER PROCESS BETWEEN THE MOVABLE COUPLING ELEMENTS OF
THE MECHANICAL SYSTEM**

There have been given the results of analytical study for interaction interference of kinematic and energy-force parameters (acceleration, pressing force of refractories, impact energy) of the dynamic interaction process between movable coupling elements of pushing device for a quick change protective refractories shielding the flow of steel after secondary oxidation at the tundish-crystallizer point of continuous casting machine. There have been found the regression dependencies describing the ratios between the studied variables obtained empirically during physical simulation of the impact of three bodies, one being in a fixed (constrained) position.

Key words: force, acceleration, impact energy, physical model, immersion nozzle, continuous casting machine, regression analysis.

УДК 669.02/09-192.001.24

к.т.н. Вишневский Д. А.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР, dimavish.79@mail.ru)

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РИСКА

Разработана математическая модель определения риска на конкретном рабочем месте и производственном участке, которая учитывает влияние на его величину и человеческого фактора путем введения вероятности вынужденных и невынужденных отказов (ошибок) как отдельных органов, так и организма работника в целом.

Ключевые слова: надежность, наработка на отказ, производственный риск, человеческий фактор, ошибки.

Анализ состояния вопроса.

Интенсивность отказа является наиболее удобной характеристикой надежности простейших элементов, так как позволяет просто вычислять количественные характеристики надежности сложных систем по критерию вероятности безотказной работы, поскольку:

- она входит как сомножество в другие, более общие характеристики систем, например, в эффективность и стоимость (цена и стоимость различаются);
- характеризует надежность с учетом изменения во времени [1];
- может быть определена в процессе проектирования систем и оценена в процессе их испытаний.

Такой подход к определению составляющих производственного риска является наиболее целесообразным, поскольку положения Рекомендаций МОТ по совершенствованию СУОТ на всех предприятиях предусматривают его осуществление на основе управления профессиональными рисками, а использование этого понятия является универсальной количественной и качественной мерой опасности. Это особенно важно на стадии стратегического планирования, так как развитие СУОТ путем использования соответствующих подходов к оценке рисков через различные математические модели, в т. ч. не только статистические, позволяет адекватно управлять качеством производственной среды [3].

Постановка задачи. Выполненный анализ показывает необходимость исследования надежности оборудования и производственного риска с учетом человеческих ошибок и машинных отказов совместно.

Материалы и результаты исследования.

Из большого разнообразия способов определения безопасности оборудования, учитывая достаточно большую сложность этого процесса, наиболее подходящим является метод «дерева неисправностей» или «дерева отказов», которое представляет собой топологическую модель надежности и безопасности, воспроизводит логико-вероятностные взаимосвязи между отдельными случайными исходными событиями в виде первичных или результирующих отказов, совокупность которых приводит к главному анализируемому действию.

Близким к приведенному является определение метода «дерева неисправностей» как организованного графического изображения условий и других факторов, которые вызывают нежелательное событие, называемое вершиной событий. Поскольку анализ «дерева неисправностей» связан с определением возможности проявления либо не проявления главного события — события конкретного типа, — то его условия устанавливаются путем выделения из всего массива исходных предпосылок двух подмножеств, реализация которых приводит либо не приводит к воз-

никновению главного события. Такие подмножества делятся на:

- аварийные сочетания, которые представляют определенный набор исходных событий, осуществление которых гарантирует, что конечное событие произойдет;
- отсекающие сочетания, которые также представляют набор исходных событий, но в отличие от предыдущих гарантируют отсутствие основного события при условии возникновения любой из составляющих этого набора событий.

Наиболее удобным способом выявления условий возникновения и предупреждения событий является выделение из таких подмножеств так называемых минимальных сочетаний событий или тех из них, появление которых минимально необходимо и достаточно для достижения желаемого результата.

Количественный анализ аварийности и травматизма за счет структурных функций по [1] можно осуществить в следующей последовательности:

- модель делится на отдельные блоки;
- в выбранных блоках выделяются подмножества событий, объединенных условиями «и» и «или»;
- начальное «дерево» и соответствующая ему структурная функция упрощаются за счет их укрупнения;
- рассчитывается мера возможности возникновения события.

При оценке исследуемых числовых характеристик «дерева неисправностей» необходимо учитывать ряд правил и предположений.

1. События «дерева», соединенные логическим условием «и», объединяются по принципу их умножения; при этом считается, что параметр главного события рассчитывается как множество из n параметров предпосылок (сомножителей):

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i.$$

2. События «дерева», соединенные логическим условием «или», объединяются по

принципу логического сложения, а их соответствующие параметры образуют следующую зависимость:

$$P = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) \dots (1 - P_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i),$$

которая в отдельных случаях, например, для $n = 2$ и $n = 3$, принимает вид:

$$\begin{aligned} P_{i=2} &= P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2; \\ P_{i=3} &= P_1 + P_2 + P_3 - P_1 \cdot P_3 - P_2 \cdot P_3 - \\ &\quad - P_3 \cdot P_1 + P_1 \cdot P_2 \cdot P_3. \end{aligned}$$

3. Преобразование и упрощение структурных функций осуществляется с соблюдением основных правил булевой алгебры. В соответствии с законом поглощения справедливы, например, следующие тождества:

$$\begin{aligned} A \cdot (A + B) &= A \cdot B; \\ A + (A \cdot B) &= A. \end{aligned}$$

4. При известных структурных схемах безотказности технических систем и безопасности функционирования они могут быть легко преобразованы в «дерево событий». При этом их параллельно соединенные элементы соответствуют логической операции «и», а последовательно соединенные – логической операции «или» [4].

Анализ методом «дерева неисправностей» позволяет выявлять комбинации отказов (неполадок) оборудования, ошибок персонала (объективных и субъективных) и внешних (техногенных, природных) воздействий, приводящих к основному событию (аварийной ситуации). Этот метод можно использовать для анализа возникновения аварийной ситуации и расчета вероятности отказа на основе установления значений вероятности исходных данных.

Наработка T (ч) на отказ пневмосистемы манипулятора в КПП определяется из:

$$T = \frac{1}{\lambda_{cl}},$$

где λ_{cl} — интенсивность отказа слабого элемента системы, ч⁻¹.

Недостаточная надежность оборудования приводит к огромным затратам на ремонт, простой оборудования, прекращению снабжения производственных участков электроэнергией, водой, газом, транспортными средствами, невыполнению ответственных задач, иногда к авариям, связанным с большими экономическими потерями, разрушениям больших объектов с человеческими жертвами.

Для определения причин возникновения отказов на производственном оборудовании применяется анализ методом «дерева неполадок». Оценка возможности отказа или безотказной работы отдельных элементов технических систем производится на основе статистических данных по интенсивности их отказа.

При этом вероятность безотказной работы каждого элемента определяется по формуле $P(t) = e^{-\lambda t}$ при заданном t , а соответственно, вероятность отказа каждого элемента будет соответствовать значению, полученному из $P(t) + Q(t) = 1$.

Следовательно, математическая модель определения риска на конкретном рабочем месте и производственном участке должна учитывать влияние на его величину и человеческого фактора путем введения вероятности вынужденных и невынужденных отказов (ошибок) как отдельных органов, так и организма работника в целом. Для этого

можно использовать экспериментальные значения характеристик безошибочности среднестатистического человека, то есть вероятность безошибочного выполнения им производственных функциональных действий [5] (табл. 1, рис. 1) путем их отдельного учета в перечне событий или введением поправочных коэффициентов. Таким образом, причинение вреда здоровью определяется на основе вероятности суммарного проявления не только «технических», но и «человеческих» отказов путем использования указанных коэффициентов в значениях вероятности события.

Такой подход к определению производственного риска является наиболее целесообразным в нынешних условиях эксплуатации КПО, поскольку позволяет учитывать не только степень износа технических систем и их отдельных элементов, но и состояние СУОТ на отдельном участке, включая как организационные, технические, санитарно-гигиенические составляющие, так и психофизиологические. Поэтому развитие и совершенствование системы управления охраной труда согласно OHSAS должны базироваться не только на нахождении новых методов и средств защиты от несчастных случаев и профессиональных заболеваний, но и на выявлении причин и предупреждении новых угроз от современных технологий и оборудования (рис. 1).

Таблица 1

Экспериментальные характеристики безошибочности среднестатистического человека по [5]

№ п/п	Наименование функциональных действий	Вероятность безошибочного выполнения
1.	Выявление декодирования сигнала	0,9700–0,9999
2.	Поиск органов управления и осуществление заданного управляющего действия	0,9610–0,9850
3.	Обнаружение сигнала и принятие решения	0,9380–0,9780
4.	Восприятие информации, ее оценка и принятие решения о работоспособности контролируемых подсистем: - число воспринимаемых признаков 3–5, задержка во времени их появления 10–12 с; - число воспринимаемых признаков 5–6, задержка во времени их появления 15–40 с; - число воспринимаемых признаков 1–2, задержка во времени их появления 10–12 с.	0,875–0,9950 0,4470–0,7830 0,8550–1,00

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Наименование функциональных действий	Вероятность безошибочного выполнения
5.	Считывание показаний стрелочного прибора: - одношкального; - двухшкального.	0,9900–0,9960 0,9850–0,9900
6.	Проверка логического условия типа «или»	0,9960
7.	Нажатие кнопки	0,9985–0,9999
8.	Считывание информации с табло	0,9950–0,9995
9.	Включение тумблера	0,9990–0,9995
10.	Простые реакции по превращению информации прямого или оперативного запоминания	0,9995
11.	Выдача или принятие голосовой команды	0,9998
12.	Поворот переключателя	0,9975–0,9990
13.	Снятие показаний с прибора: - с круговой шкалой; - с линейной шкалой; - с полукруговой шкалой; - электросчетчика; - шильдика.	0,9952–0,9999 0,9975–0,9980 0,9933–0,9975 0,9985–0,9995 0,9985–0,9999
14.	Выполнение действия (движения) за счет: - штурвала; - ручки управления; - маховика; - съемного рычага (ключа).	0,9965–0,9980 0,9936–0,9995 0,9994–0,9999 0,9920–0,9990
15.	Выполнение действия по: - соединению кабеля; - разъединению кабеля; - установке штифта; - открытию вентиля; - подсоединению шланга; - наладиванию прибора; - установке уплотнения; - установке штекера.	0,9986–0,9998 0,9995–0,9999 0,9989–0,9998 0,9980–0,9995 0,9955–0,9970 0,9920–0,9965 0,9910–0,9945 0,9970–0,9985
16.	Выполнение пункта должностной инструкции	0,9915–0,9955
17.	Перемещение человека по: - монтажной площадке; - временному настилу.	0,9990–0,9995 0,9940–0,9975
18.	Использование средств защиты: - страховочного пояса; - съемных ограждений; - переносного заземления.	0,9940–0,9980 0,7500–0,8500 0,8500–0,8900

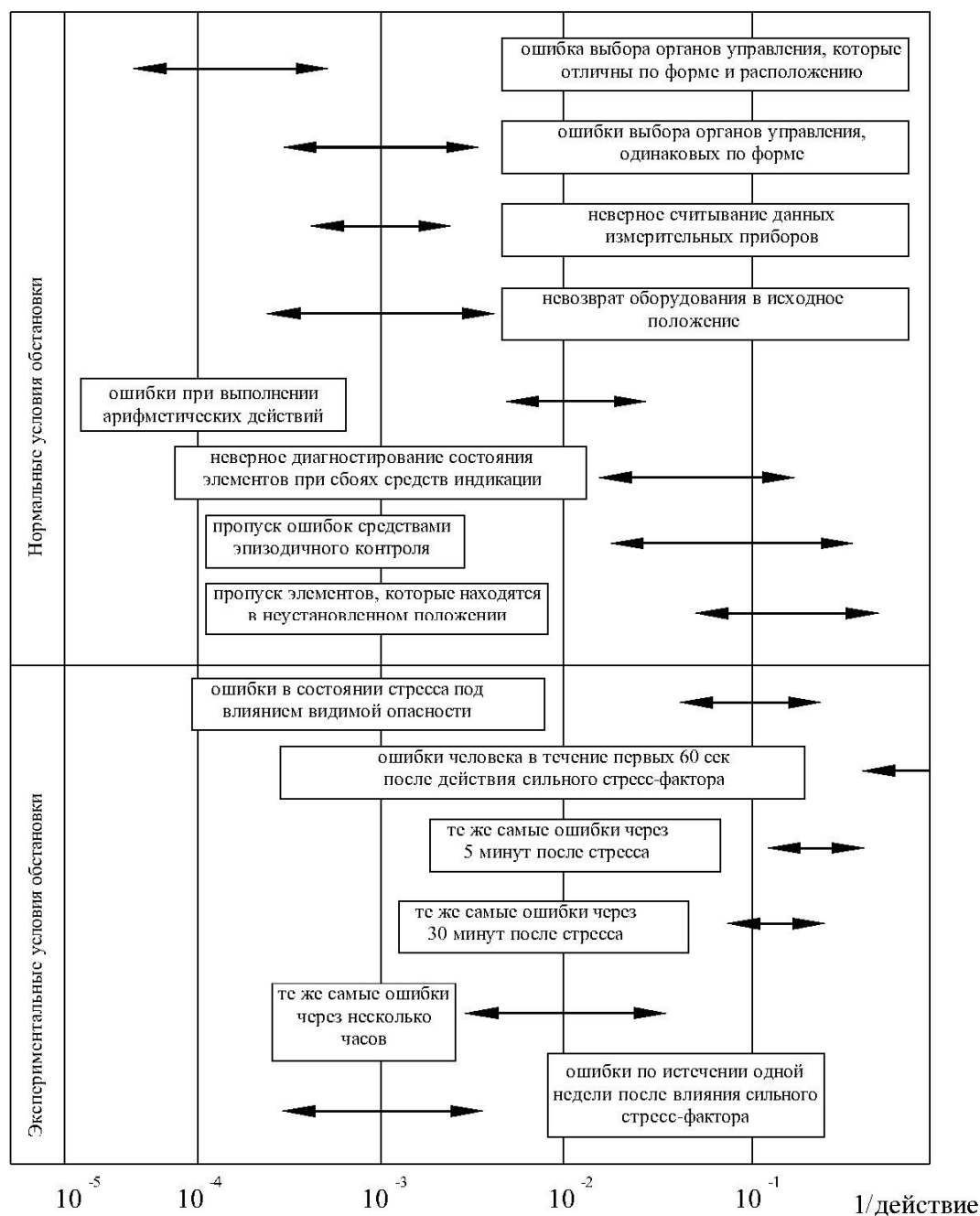


Рисунок 1 Структурная схема диапазонов вероятности возникновения различных ошибок путем отнесения их количества на действие человека-оператора

В связи с этим среди причин возникновения физических и психофизиологических опасностей на рабочем месте, кроме давно известных, но с более возрастающими последствиями, необходимо выде-

лить недостаточную профессиональную пригодность, склонность к опасностям, неудовлетворительную связь между восприятием сигналов и двигательной реакцией, волнение за возможную ошибку в

результате повышенной ответственности за качество работы, несоответствие эргономических показателей оборудования антропометрическим характеристикам работников, наличие бекграундного шума, необходимость значительного количества переналадок оборудования и т. д.

Среди известных угроз физических страданий особую актуальность приобретают те, которые связаны с физическим дискомфортом, нарушением функций систем организма, проявлением аллергических реакций, возникновением новообразований и вегетативных стрессовых реакций, нарушением защитных функций, снижением физической силы и выносливости. В наше время усиливаются и угрозы эмоционального волнения, обусловленные чувствами опасности и опасения, а также аффективными состояниями.

Выводы. Надежность оборудования в большей мере зависит от правильности принятия решений человеком, или, другими словами, от человеческих отказов. Выполняя ряд однообразных операций, рабочий обязан держать в голове множество инструкций при обычных условиях работы и инструкции для аварийной ситуации и, мало того, еще должен их выполнять. В стрессовой ситуации в большинстве случаев человек начинает реагировать после того, как авария уже произошла. В момент принятия решения в экстренной ситуации только стрессоустойчивый психотип смо-

жет выполнить необходимые инструкции. Есть множество рекомендаций по связям типа личностей и профессиональной средой; важно эти рекомендации применять на практике при трудоустройстве на рабочие точки в металлургической отрасли. Связав в единую систему машинные и человеческие отказы, мы научились получать значение производственного риска на рабочих местах, имея наработки на отказ ряда эксплуатируемого оборудования [4]. Аналогичным методом, имея наработки на отказ среднестатистического человека (вероятность совершения ошибки), мы сможем определять надежность оборудования с учетом человеческого фактора.

Для увеличения показателя надежности оборудования необходимо включить в экспертную систему [6] рекомендации по связям типа личностей с профессиональной средой в момент трудоустройства работника, что увеличит надежность оборудования на данном участке. Система будет видеть все психотипы работающего коллектива, в котором один сотрудник будет дополнять другого с психологической точки зрения, и выдавать рекомендации, у кого есть лидерские задатки или какого типа личности в данной бригаде не хватает для более надежной работы группы людей, что приведет к снижению производственного риска на рабочих местах и увеличит надежность оборудования.

Библиографический список

1. Корчагин, А. Б. Надежность технических систем и техногенный риск [Текст] : уч. пособие в 2-х ч; Ч. 2 : практикум / А. Б. Корчагин, В. С. Сердюк, А. И. Бокарев. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. — 140 с.
2. Системы менеджмента в области охраны труда и предупреждения профессиональных заболеваний: OHSAS 18002:2000. Руководящие указания по применению OHSAS 18001:1999. — М., 2000. — 122 с.
3. Минько, В. М. Математическое моделирование в управлении охраной труда [Текст] / В. М. Минько. — Калининград : ФГУИПП «Янтарный сказ», 2002. — 184 с.
4. Розрахонок надійності устаткування та ризику заподіяння шкоди здоров'ю ковальштампувальника [Текст] / М. А. Касьянов, В. О. Медяник, В. Н. Ульяницький, Д. О. Вишневецький // Збірник наукових праць НМАУ. — Дніпропетровськ, 2013. — С. 50–56.
5. Белов, П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере [Текст] / П. Г. Белов. — М. : Изд-во центр Академии ГЗ МЧС РФ, 2003. — 512 с.

6. Касьянов, М. А. Комп'ютерна програма «Інтелектуальна система підтримки прийняття рішень в управлінні охороною праці для зменшення травматизму у ковальсько-пресовому виробництві шляхом оцінки та прогнозування ризику на робочих місцях операторів з урахуванням «технічних» і «людських» відмов» [Текст] / М. А. Касьянов, Д. О. Вишневський, І. В. Савченко, О. М. Гунченко // Свідотство про реєстрацію авторського права на твір № 553958. — ДСВІУ. Дата реєстр. 05.03.2014.

© Вишневский Д. А.

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

Статья поступила в редакцию 10.10.17.

к.т.н. Вишневський Д. О. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ВИРОБНИЧОГО РИЗИКУ

Розроблено математичну модель визначення ризику на конкретному робочому місці і виробничій ділянці, яка враховує вплив на його величину і людського фактору шляхом введення імовірності вимушених і невимушених відмов (помилки) як окремих органів, так і організму працівника в цілому.

Ключові слова: надійність, напрацювання на відмову, виробничий ризик, людський фактор, помилки.

PhD Vishnevskiy D. A. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

CALCULATING THE RELIABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT AND PRODUCTION RISK

A mathematical model for determining the risk at a particular workplace and production site has been developed, which takes into account the impact on its value and the human factor by introducing the probability of forced and unforced failures (errors) of both individual organs and the organism of the worker as a whole.

Key words: reliability, time between failures, production risk, human factor, errors.

УДК 621.926.3/.8

к.т.н. Ульяницкий В. Н.,
Петров П. А.,
к.э.н. Ульяницкая О. В.,
Коробов Р. Ю.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВАЛКОВЫХ МЕЛЬНИЦ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

В статье рассмотрены вопросы сравнительного анализа конструктивных особенностей и опыта эксплуатации измельчительных устройств для приготовления пылеугольного топлива в металлургическом производстве.

Ключевые слова: мельница, тарель, размольный валок, размольный стол, бандаж, износ.

В энергетике и других отраслях для измельчения размола топлива применяют четыре типа мельниц: мельничные вентиляторы, среднеходовые валковые, быстроходные молотковые и шаровые барабанные мельницы [1].

Из всех показателей, характеризующих пылеугольное топливо (ПУТ), наиболее важным является тонина помола (измель-

чения). Она оказывает существенное влияние на распространение энергии струи и скорость горения ПУТ при выходе из фурмы доменной печи [2]. В конструкции каждой из перечисленных мельниц, использован один из основных (а иногда и более) методов механического измельчения (см. рис. 1) материала.

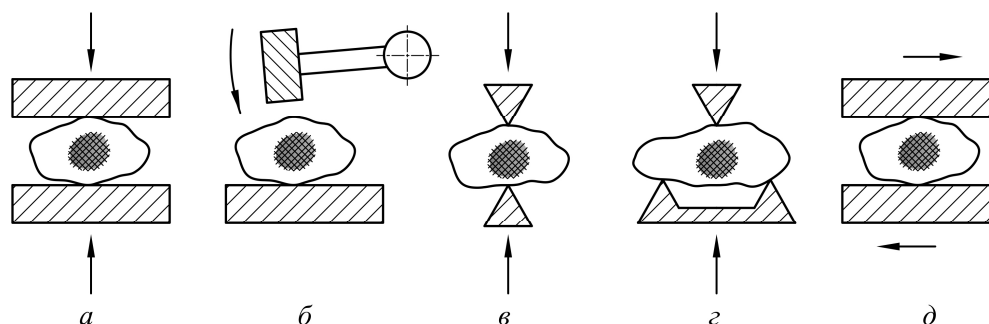


Рисунок 1 Схема основных методов механического измельчения: а — раздавливанием; б — ударом; в — раскалыванием; г — изломом; д — истиранием

Для приготовления пылеугольного топлива в металлургической отрасли используют три основных типа измельчительных устройств: шаровые, молотковые и валковые мельницы. Последние составляют практически 75 % от общего количества (рис. 2) применяемых мельничных установок в системах производства пылеугольного топлива.

Из рисунка 2 следует, что молотковые и шаровые барабанные мельницы находят значительно меньшее, соответственно 18 % и 7 %, применение в системах пригото-

вления ПУТ. Объяснение этому находим в тонине (крупности) помола. На молотковых дробилках измельчение осуществляется раскалыванием материала за счёт энергии удара частиц вращающимся молотком. Ситовый анализ показывает, что в продукте измельчения до 20–25 % наличествуют крупные куски при одновременном содержании мелких фракций 0–5 мм 14,8 %, отрицательно сказывающемся на интенсивности доменной плавки.

Современным измельчителям ударного действия присущи недостатки: высокий износ рабочих элементов и повышенные ударные затраты энергии на единицу готового продукта. В металлургии молотковые дробилки применяются в основном для измельчения известняка, который значительно тверже углей [3].

Уступают валковым измельчителям и шаровые барабанные мельницы по основным технико-экономическим показателям (рис. 3). Валковые мельницы экономичнее шаровых барабанных по удельному расходу электроэнергии на 34 %, установленной

мощности — на 51 % и по капиталовложениям — в среднем на 15 %. Этим обусловлено то, что для измельчения углей под ПУТ в мировой практике применяют валковые мельницы нескольких конструктивных конфигураций и типоразмеров.

По количеству мелющих валков дробилки делят на одно-, двух- и многовалковые (трех-, и четырехвалковые). Для крупного и среднего помола используют дробилки с рифленной рабочей поверхностью валков. В мельницах для приготовления ПУТ рабочая поверхность валков гладкая.

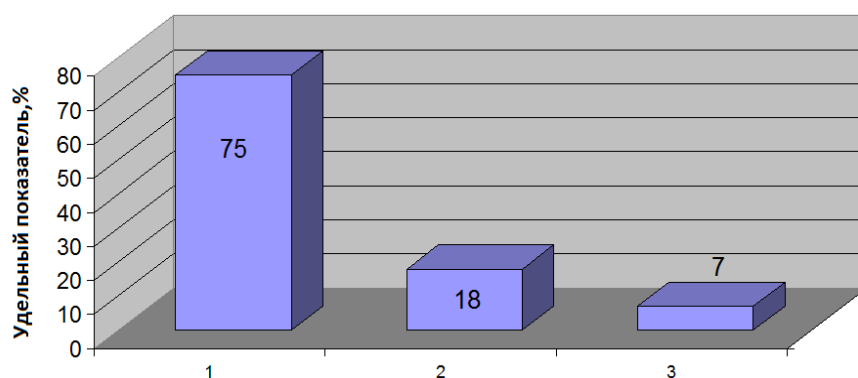


Рисунок 2 Удельный вес типов мельниц, используемых для приготовления ПУТ:
1 — валковые; 2 — молотковые; 3 — шаровые барабанные

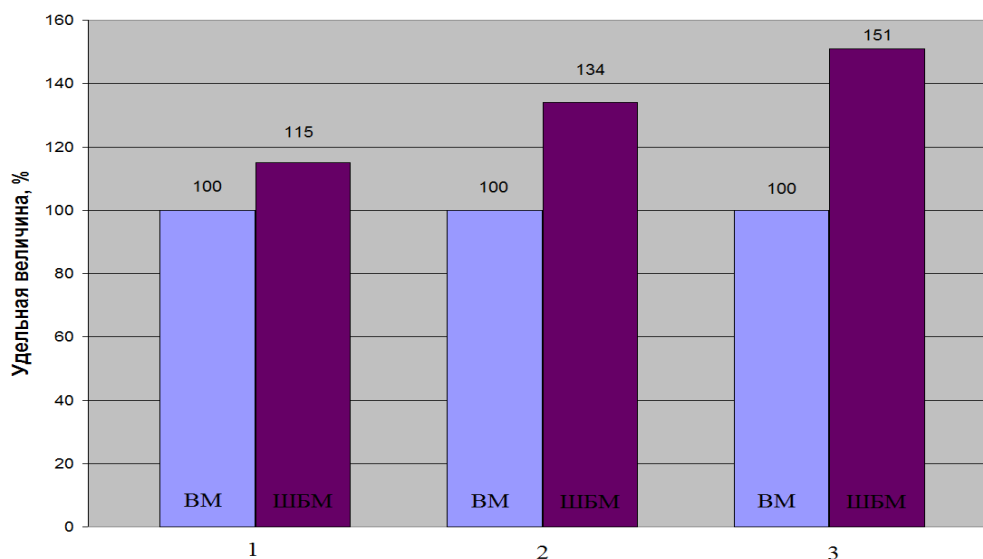


Рисунок 3 Гистограмма для сравнения показателей установок приготовления пылеугольного топлива: ВМ — валковые мельницы; ШБМ — шаровые барабанные мельницы; 1 — капитальные вложения; 2 — удельный расход электроэнергии; 3 — установленная мощность

Мельницы валковые среднеходовые предназначены для размола до пылевидного состояния каменных углей, полуантрацитов, тощих углей и некоторых отходов обогащения, устанавливаются на тепловых электростанциях и рассчитаны на непрерывную работу системы пылеприготовления котельных установок [4].

Процесс измельчения углей для приготовления ПУТ осуществляется путем раздавливания частицы (рис. 1 а) и частичного истирания (рис. 1 д) между приводной тарелью и холостыми валками мельницы.

В Российской Федерации изготавливают размерный ряд для мельниц типа МВС (мельница валковая среднеходовая) по стандарту ГОСТ Р 55853–13, который начинается с наименьшей МВС–90 и заканчивается наибольшей МВС–340 мельницами. Число после аббревиатуры обозначает расчётный диаметр размольного стола в сантиметрах [5].

Измельчение осуществляется в основном раздавливанием частиц угля под действием собственной массы Q узла вала (рис. 4) и усилия прижатия N вала к вращающейся тарели (столу).

Таким образом, общая сила P , действующая со стороны вала на измельчаемый материал, определяется:

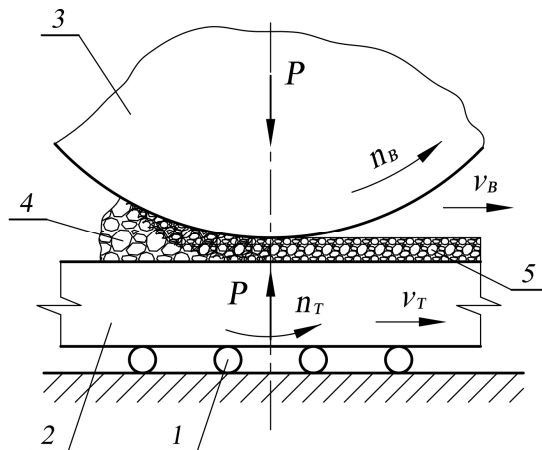
$$P = Q + N.$$

Усилие N образуется специальной регулируемой гидropневмосистемой с целью корректировки величины N в зависимости от свойств измельчаемой среды и степени износа рабочей поверхности вала и сегментов стола (тарели).

В доменных цехах системы приготовления ПУТ оборудованы среднеходовыми трехвалковыми мельницами с конусообразными (рис. 5 а) или торовидными (рис. 5 б) мелющими валками. Существенна разница между ними не только в геометрической форме, но и в способе прижатия их к столу (тарели) мельницы.

В мельницах по рисунку 5а гидроцилиндр 1 совместно с рычажной системой 2

образуют механизм двойного функционального назначения: прижатие вала 3 к размольному столу 4 в процессе измельчения и вывода узла вала наружу из корпуса мельницы с целью контроля износа, ремонта или замены.



1 — опора вращающейся тарели (стол);
2 — тарель; 3 — рабочий (мелющий) орган (валок);
4 — поступление дробимого материала;
5 — продукт измельчения; P — усилие прижатия вала к тарели; n_T , n_B — частота вращения тарели и вала; v_T , v_B — линейная скорость вращения тарели и вала

Рисунок 4 Упрощённая схема измельчения материала валковой мельницей

В мельнице по рисунку 5б прижимное устройство в виде гидроцилиндра и тяг действует на узел вала сверху. Замена узла вала выполняется с помощью подъемного механизма через открываемый проём в корпусе мельницы.

Металлургические предприятия Донбасса (ПАО «Алчевский металлургический комбинат» и ПАО «Енакиевский металлургический завод») для систем приготовления ПУТ приобрели валково-тарельчатые трехвалковые мельницы МВС вертикального типа немецкой фирмы «Pfeiffer» (г. Kaiserslautern).

Эти мельницы характеризуются еще некоторыми положительными качествами, например, малой занимаемой площадью, низким шумом, хорошей регулируемостью и небольшой инерционностью.

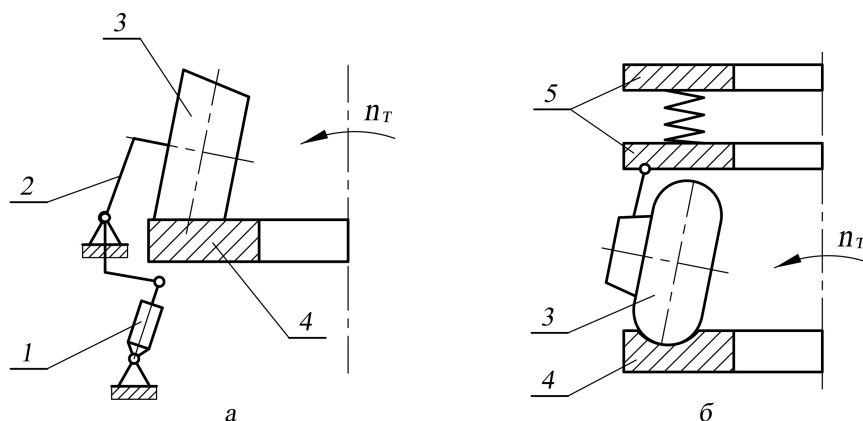


Рисунок 5 Принципиальная схема конусной (а) и тороидной (б) измельчительных мельниц:
1 — гидроцилиндр; 2 — рычажная система; 3 — размольный валок; 4 — размольный стол;
5 — элементы прижима размольного валка к столу

Отличительной чертой валковых мельниц MBS служат три стационарных мелющих валка, вращающихся по медленно движущейся помольной плите (рис. 6).

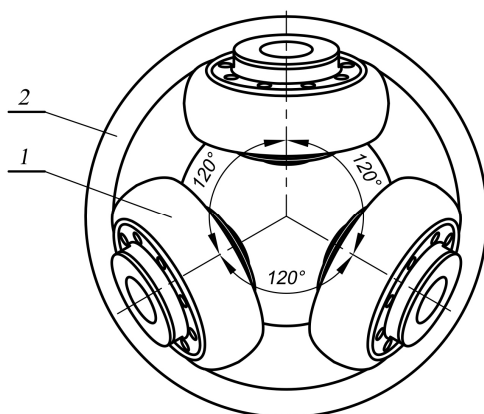


Рисунок 6 Конструктивная схема расположения мельничных валков на тарели (вид в плане): 1 — размольный валок; 2 — размольная плита (стол)

Мелющие валки, расположенные в плане под углом 120° , вместе с общей прижимной рамой и тремя тягами, образуют статически определимую систему, которая обуславливает равномерное распределение нагрузки на размольной плите.

Необходимая для измельчения материала сила вырабатывается путем нажатия мелющих валков на поверхность плиты. Сила создается гидropневматической системой натяжения тяг и при необходимо-

сти может изменяться в процессе измельчения. Для классификации размолотого материала используется воздушный лопастный сепаратор типа SLS 2560 BK [6].

Путем изменения скорости вращения колеса сепаратора изменяют конечную тонину помола продукта. При повышенной скорости вращения колеса сепаратора происходит отделение материала с меньшей конечной тониной помола, при пониженной — с большей.

В процессе эксплуатации валково-тарельчатых мельниц поверхности, соприкасающиеся с измельчаемым материалом, изнашиваются. Поэтому они обеспечиваются защитной футеровкой различными износостойкими материалами. Наиболее изнашиваемыми являются рабочие поверхности размольных инструментов — бандажей валков и сегментов плиты (стола). Бандажи и сегменты выполняют способом литья из легированного износостойкого чугуна 300Cr15Mo3, химический состав которого представлен в таблице 1.

Однако механическое изнашивание рабочих поверхностей (см. рис. 5 б) размольных элементов протекает неодинаково по контуру бандажа валка и сегмента стола. В 2009 г. в доменном цехе ПАО «АМК» была введена в эксплуатацию тарельчато-валковая мельница MPS 3070 BK.

Таблица 1

Химический состав материала мелющих элементов бандажей валков и сегментов тарели

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

После начала эксплуатации системы подготовки ПУТ мельницей MPS 3070 ВК на штатных (новых) мелющих элементах было размолото 190 тыс. т угля, в составе которых преобладал антрацит. На этом отрезке времени (4387 часов), до замены мелющих элементов, проводились замеры

величины износа в контрольных точках маркировочных линий по контуру рабочей поверхности сегмента и бандажа.

Схема измерений и износа рабочих поверхностей мелющих элементов представлена на рисунках 7 и 8, результаты сведены в таблицу 2.

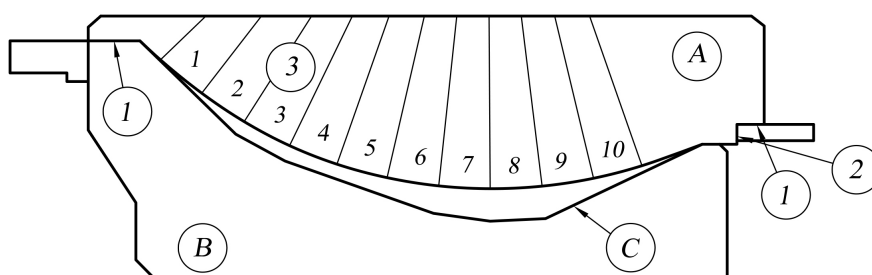


Рисунок 7 Схема измерения износа сегмента размольного стола мельницы: А — шаблон; В — размольный сегмент; С — граница износа рабочей поверхности сегмента; 1 — контрольные поверхности (базы) шаблона и сегмента; 2 — упорная (фиксирующая) поверхность; 3 — маркировочные линии, в направлении которых измеряют величину износа

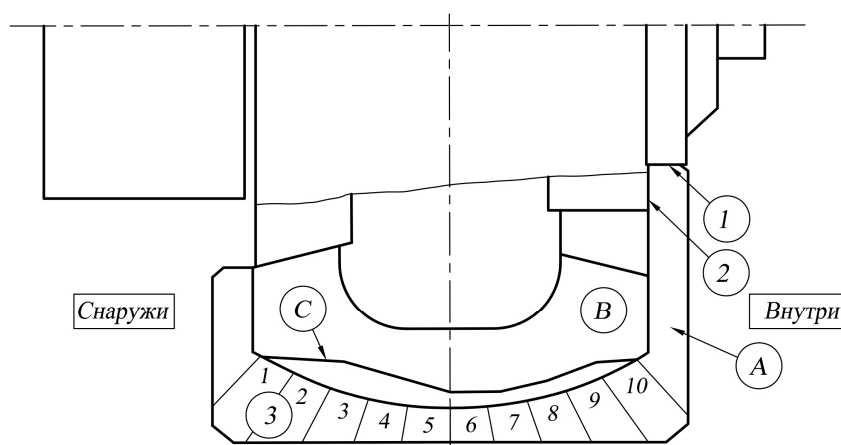


Рисунок 8 Схема измерения износа рабочей поверхности бандажа валка мельницы: А — шаблон для бандажа; В — бандаж мелющего валка; С — линия фронта износа бандажа; 1, 2 — базовые поверхности; 3 — маркировочные линии, в направлении которых измеряется величина износа; “внутри” — сторона бандажа валка относительно вертикальной оси мельницы

Таблица 2

Показатели измерения износа (мм) в контрольных точках бандажа и сегмента

Номер замера	От начала эксплуатации		Точки контроля (измерения)									
	прошло времени, часов	измельчено углей, т	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Бандажи валков												
1	1600	72000	0	3	6	13	15	12	7	3	0	–
2	3133	157950	11	17	23	26	26	23	18	15	10	–
3	4387	196000	11	17	23	27	30	27	18	15	10	–
Сегменты тарели												
1	1600	72000	0	3	7	12	15	12	7	4	0	0
2	3133	157950	9	13	16	22	25	32	26	20	13	5
3	4387	196000	9	13	24	31	38	42	45	42	35	21

Выводы.

Анализ измерений, осмотр и определение технического состояния трех бандажей и 13 сегментов показали следующее. Износ сегментов тарели равномерный без сколов и отслоений. Максимальный износ наблюдается в точках 5, 6, 7, 8 (см. табл. 2).

Износ бандажей валков неравномерный. Наибольший износ имеет место в зоне от оси, проходящей по максимальному диаметру, до внешней стороны вала в точках 3, 4, 5, 6, 7 (см. табл. 2).

Наименьший износ наблюдается по краям бандажей и сегментов.

Также выяснилось, что на внутренней стороне боковой грани бандажа имеются свежие сколы размером 30х40 мм, образовавшиеся в результате контакта бандажа и сегментов в момент отсутствия измельчаемого материала между ними, что не допускается документами по эксплуатации подобных установок.

Изношенные поверхности мелющих элементов подвергают восстановлению наплавкой износостойким композитным материалом, чем обеспечивается производительность мельницы в среднем 400 тыс. т до следующей реставрации.

Библиографический список

1. Делягин, Г. Н. Теплогенерирующие установки [Текст] : учебник для вузов / Г. Н. Делягин, В. И. Лебедев, Б. А. Пермяков. — М. : Стройиздат, 1968. — 599 с.
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. Власенко, Д. А. Энергозатраты ударных дробилок с жестким и шарнирным креплением бил к ротору [Текст] / Д. А. Власенко, О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко // Вестник ДонНТУ. — 2016. — № 3(3). — С. 21–26.
4. Клушанцев, Б. В. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации [Текст] / Б. В. Клушанцев, А. И. Косарев, Ю. А. Муйземнек. — М. : Машиностроение, 1990. — 320 с: ил.

5. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 55853–2013. Мельницы валковые среднеходные. Типы, основные параметры, технические требования.

6. 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.

© Коробов Р. Ю.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. МЧМ ДонГТУ Новохатским А. М.,
д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еренько С. П.*

Статья поступила в редакцию 10.10.17.

**к.т.н. Ульяницкий В. Н., Петров П. О., к.е.н. Ульяницкая О. В., Коробов Р. Ю. (ДонДТУ,
м. Алчевськ, ЛНР)**

ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВАЛКОВИХ МЛІНІВ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

У статті розглянуто питання порівняльного аналізу конструктивних особливостей і досвіду експлуатації подрібнювальних пристроїв для підготування пиловугільного палива в металургійному виробництві.

Ключові слова: млин, таріль, розмельний валок, розмельний стіл, бандаж, знос.

PhD Ulianitskii V. N., Petrov P. A., PhD Ulianitskaya O. V., Korobov P. Yu. (DonSTU, Alchevsk, LPR)
OPERATION FEATURES OF THE ROLLER MILLS FOR DUST COAL PREPARATION

The paper addresses the comparative analysis issues of design features and operation experience of the reducers for dust coal preparation in metal production.

Key words: mill, poppet valve head, grinding roll, grinding table, sleeve, wear.

УДК 531.31.15+669

Мороз В. В.,
к.ф.-м.н. Рубежанский В. И.,
к.т.н. Левченко Э. П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

АНАЛИЗ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ МНОГОСТАДИЙНОЙ РАБОТЫ ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКИ

Проведены исследования возможностей обеспечения подачи агломерата с помощью зубьев ротора на последующее многоступенчатое дробление по высоте рабочей камеры одновалковой зубчатой дробилки. В соответствии с поставленной задачей получен закон движения отдельного куска агломерата и зависимость высоты консольных колосников в верхней части рабочей камеры машины.

Ключевые слова: одновалковая зубчатая дробилка, колосники, многоступенчатое дробление, закон движения, аналитический расчет.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Одним из главных направлений снижения затрат на выплавку чугуна и повышение эффективности работы доменных печей является стабилизация фракционного состава агломерата, получаемого после дробления агломерационного спека [1].

Известно, что в настоящее время наиболее широко распространенная для дробления горячего агломерата типовая конструкция одновалковой зубчатой дробилки в полной мере не удовлетворяет технологическим требованиям доменной плавки с точки зрения рациональной крупности готового агломерата [1]. Это в значительной степени увеличивает расход кокса на плавку [2] и снижает экономическую эффективность производства чугуна.

Низкое потребительское качество доменного сырья обусловлено самим конструктивным решением одновалковой зубчатой дробилки, основным фактором которого, вероятно, послужила простота устройства данной широко распространенной машины.

По сути, в принятой схеме дробления осуществляется однократное продавливание агломерационного спека зубьями вращающегося ротора через колосники, расстояние между которыми достигает 200 мм, что и обуславливает неравномерность гранулометрического состава готового продукта.

Поэтому актуальным вопросом является создание возможности осуществления многостадийности дробления без существенных изменений основной конструкции типовой дробилки горячего агломерата.

Постановка задачи. Задачей исследований является установление возможности организации подачи кусков агломерата в верхнюю часть многоступенчатой модернизированной конструкции одновалковой зубчатой дробилки с помощью зубьев ротора.

Изложение материала и его результаты. Рассмотрим принципиальную схему многоступенчатой одновалковой зубчатой дробилки [3], модернизированной для обеспечения наложения многократных усилий разрушения на куски агломерата (рис. 1). В ней плоские колосники видоизменены на закругленные, которые выполняют функцию классификатора для выхода готового продукта необходимой, ограниченной по размерам крупности. Имеющиеся же на внутренней поверхности консольные колосники обеспечивают многоступенчатый циклический характер наложения усилий на крупные куски вплоть до их разрушения до размеров щелей между закругленными колосниками. Основным преимуществом данного способа является гарантированное обеспечение максимальной крупности до нужных размеров.

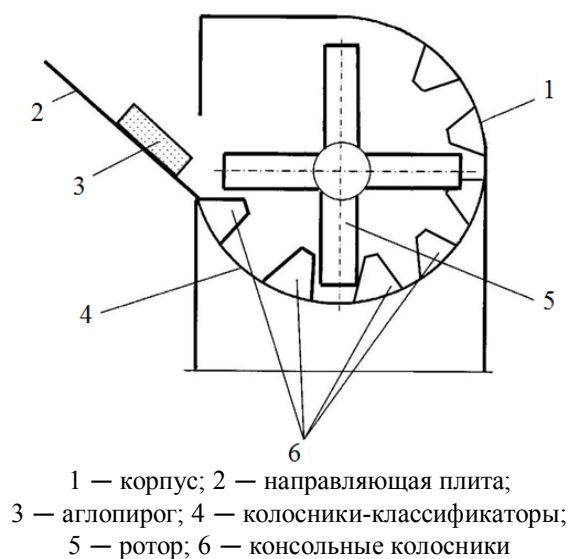


Рисунок 1 Многоступенчатая одновалковая зубчатая дробилка

Проведенный ранее анализ конструктивных особенностей данной схемы показал [4], что при размерах зазоров между закругленными колосниками, обеспечивающих желаемую крупность готового продукта для обеспечения эффективности работы машины возникает необходимость в размещении колосников консольного типа и в верхней части рабочей камеры. При этом подачу агломерата без существенного усложнения конструкции можно организовать с помощью зубьев ротора по их образующей поверхности. Однако в данном случае особую роль играет сила тяжести, которая затрудняет организацию подачи агломерата под действия консольных колосников, расположенных в верхней части рабочей камеры машины. Это требует рассмотрения особенностей такой возможности.

С учетом предложенных конструктивных особенностей актуальной становится задача математического описания движения отдельного куска агломерата по поверхности зуба одновалковой дробилки с целью определения закономерности его сползания по мере вращения ротора, что даст возможность выявить необходимую высоту консольного колосника в верхней части рабочей камеры дробилки и обосновать иные необходимые параметры рабочей зоны.

Рассмотрим условия равновесия куска агломерата на поверхности зуба при равномерном вращении ротора (рис. 2).

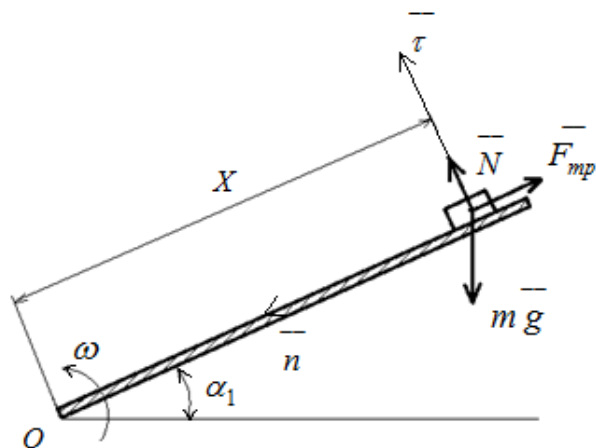


Рисунок 2 Расчетная схема движения куска агломерата

Дифференциальные уравнения движения покоящегося куска агломерата на плоской поверхности зуба в подвижной системе координат (τ, n) имеют вид:

$$\begin{aligned} m \frac{dV}{dt} &= N - m \cdot g \cdot \cos \alpha_1, \\ m \frac{V^2}{\rho} &= m \cdot g \cdot \sin \alpha_1 - F_{mp}, \\ F_{mp} &= f \cdot N, \end{aligned} \quad (1)$$

где m — масса куска агломерата; V — скорость куска; t — время движения куска; N — сила нормального давления; g — ускорение свободного падения; α_1 — начальный угол, при котором происходит движение куска; ρ — радиус кривизны; F_{mp} — сила трения; f — коэффициент трения агломерата о поверхность зуба ротора.

В качестве α_0 принят угол наклона неподвижной поверхности.

Уравнения (1), в случае отсутствия движения груза, преобразуются в зависимость для определения предельного расположения плоскости зуба:

$$\sin \alpha_1 - f \cdot \cos \alpha_1 - \frac{\omega^2 \cdot X}{g} = 0, \quad (2)$$

где X — расстояние от центра тяжести куска агломерата до центра вращения (точка O); ω — угловая скорость вращения ротора одновалковой зубчатой дробилки.

Сразу отметим, что угол α_l зависит также от угловой скорости ротора ω и места положения куска на поверхности зуба X .

Решением уравнения (2) является зависимость

$$\sin \alpha_1 = \frac{\omega^2 \cdot X \pm f \sqrt{g^2 (1+f^2) - \omega^4 \cdot X}}{g(1+f^2)}. \quad (3)$$

Отрицательное значение угла α_l в дальнейшем не рассматривается, так как не соответствует поставленной задаче.

Относительное движение.

Векторная форма уравнения относительного движения куска агломерата запишется как:

$$m \bar{a}_{отн} = m \bar{g} + \bar{N} + \bar{F}_{тр} + \bar{F}_{кор}^{ин} + \bar{F}_{пер}^{ин}, \quad (4)$$

где $\bar{a}_{отн}$ — относительное ускорение куска агломерата; $\bar{F}_{кор}^{ин}$ — кориолисова составляющая сила инерции куска; $\bar{F}_{пер}^{ин}$ — переносная составляющая силы инерции куска.

При этом модули кориолисовой и переносной сил инерции соответственно равны

$$F_{кор}^{ин} = 2 \cdot m \cdot \omega \cdot \dot{X}; \quad F_{пер}^{ин} = m \cdot \omega^2 \cdot X.$$

Уравнение (4) в проекциях на подвижные оси X, Y (рис. 3), связанные с плоскостью зуба, при сохранении в первом приближении зависимости для силы трения $F_{тр} = f \cdot N$ и отсутствия ускорения $\ddot{Y} = a_{пер}^{\tau} = 0$ дает окончательное дифференциальное уравнение относительного движения куска агломерата:

$$\ddot{X} + 2 \cdot \omega \cdot f \cdot \dot{X} - \omega^2 X = g[f \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha_1) - \sin(\omega \cdot t + \alpha_1)] \quad (5)$$

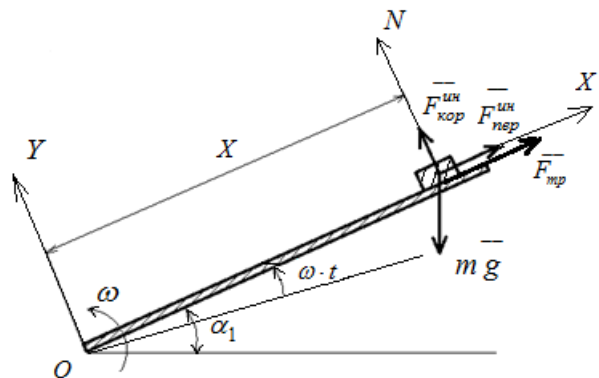


Рисунок 3 Расчетная схема движения куска агломерата в подвижных осях

Стандартная процедура интегрирования уравнения вида (5) приводит к общему решению:

$$X = C_1 e^{(k_1-b)t} + C_2 e^{-(k_1+b)t} + A \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha_1 - \beta_1) + A \cdot f \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha_1 - \beta_1), \quad (6)$$

где соответственно C_1 и C_2 постоянные интегрирования;

$$b = f \cdot \omega;$$

$$k_1 = \omega \sqrt{1+f^2};$$

$$\operatorname{tg} \beta_1 = -f;$$

$$A = \frac{g}{2 \cdot \omega^2 \sqrt{1+f^2}}.$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 находятся из начальных условий: $t=0$;

$X=X_0$; $\dot{X}=0$ и равны

$$C_1 = \frac{D_1}{2k_1}; \quad C_2 = \frac{D_2}{2k_1}. \quad (7)$$

При этом

$$D_1 = -A \cdot \omega \cdot \cos(\alpha_1 - \beta_1) +$$

$$+ A \cdot \omega \cdot f \cdot \sin(\alpha_1 - \beta_1) + \omega(f + \sqrt{1 + f^2}) \times$$

$$\times [X_0 - A \cdot \sin(\alpha_1 - \beta_1) - A \cdot f \cdot \cos(\alpha_1 - \beta_1)],$$

$$D_2 = \omega(\sqrt{1 + f^2} - f) \times$$

$$\times [X_0 - A \cdot \sin(\alpha_1 - \beta_1) - A \cdot f \cdot \cos(\alpha_1 - \beta_1)] +$$

$$+ A \cdot \omega \cdot \cos(\alpha_1 - \beta_1) - A \cdot \omega \cdot f \cdot \sin(\alpha_1 - \beta_1).$$

Решения (3) и (6) позволяют найти закон движения куска агломерата по поверхности рабочей части зуба ротора дробилки в зависимости от угловой скорости ω вращения ротора, начального положения куска и коэффициента трения f , зависящего от состава и физических свойств агломерата, а также от материала зубьев ротора и качества выполнения их рабочих поверхностей.

Зависимости закона движения куска агломерата при его подъеме в верхнюю часть рабочей камеры дробилки зубьями ротора приведены на рисунках 4–5.

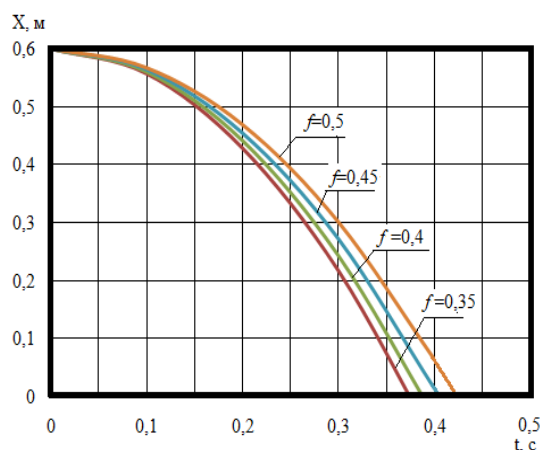


Рисунок 4 Зависимость величины сползания куска от времени при различных значениях коэффициента трения f при $n = 6$ об/мин

Из графика на рисунке 4 видно, что уменьшение коэффициента трения приводит к увеличению величины переме-

щения куска агломерата от конца зуба звездочки ротора к центру вращения. Наибольшая величина такого перемещения соответствует времени поворачивания ротора в пределах 0,4 с.

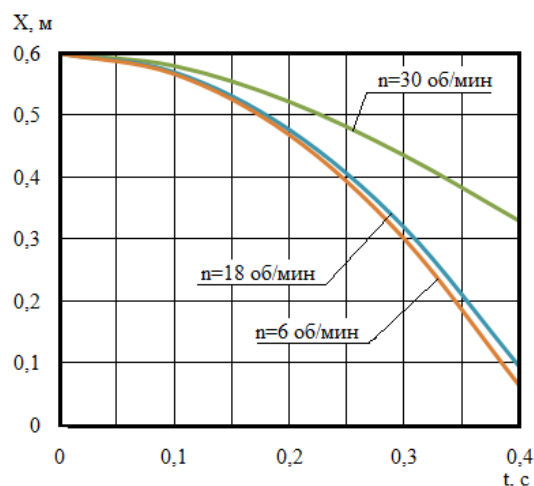


Рисунок 5 Зависимость величины сползания куска от времени при различных значениях частоты вращения ротора и коэффициенте трения $f = 0,35$

В таблице 1 приведены рассчитанные величины углов отклонения от горизонтали зуба ротора в зависимости от времени его поворота.

Таблица 1
Зависимость угла наклона зуба от времени

Время, t, с	Угол, град.
0,1	31,34
0,2	34,95
0,3	38,56
0,4	42,17

Выводы и направление дальнейших исследований.

Анализ полученных зависимостей дает возможность задать необходимую высоту консольных колосников в верхней части рабочей камеры дробилки для гарантированного контакта с ними кусков агломерата, поднимаемых по рабочей поверхности зубьев ротора.

Для более полного описания изучаемого процесса в дальнейших исследованиях планируется учесть непостоянство коэффициента трения движения.

Библиографический список

1. Мороз, В. В. Перспективы повышения эффективности доменной плавки путем стабилизации фракционного состава дробленого агломерата [Текст] / В. В. Мороз, Э. П. Левченко, О. А. Левченко // Современная наука: исследования, технологии, проекты: сборник материалов V международной научно-практической конференции. — М. : Издательство «Перо», 2015. — С. 471—476.
2. Развитие технического уровня одновалковых зубчатых дробилок горячего агломерата [Текст] : монография / О. А. Левченко и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — 190 с.
3. Мороз, В. В. Способ многостадийной обработки агломерата в одновалковой зубчатой дробилке [Текст] / В. В. Мороз, Э. П. Левченко, Н. А. Бондарь // Современная металлургия нового тысячелетия : сборник научных трудов II международной научно-практической конференции. — Липецк : Изд-во Липецкого гос. техн. ун-та, 2016. — С. 271—275.
4. Мороз, В. В. Инновационный способ многостадийной обработки агломерационного спека в одновалковой зубчатой дробилке [Текст] / В. В. Мороз, Э. П. Левченко // Инновационные технологии в промышленности, образование, наука и производство : сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — Уфа : Изд-во «Нефтегазовое дело», 2016. — С. 398—400.

© Мороз В. В.
© Рубежанский В. И.
© Левченко Э. П.

Рекомендована к печати зав. каф. МОЗЧМ ДонГТУ, д.т.н., проф. Еронько С. П., д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламовым Ю. А.

Статья поступила в редакцию 27.09.17.

Мороз В. В., к.ф.-м.н. Рубежанский В. И., к.т.н. Левченко Е. П. (ДонГТУ, м. Алчевськ, ЛНР) АНАЛІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ОРГАНІЗАЦІЇ БАГАТОСТАДІЙНОЇ РОБОТИ ОДНОВАЛКОВОЇ ЗУБЧАСТОЇ ДРОБАРКИ

Проведено дослідження можливостей забезпечення подання агломерату за допомогою зубців ротору на наступне багатоступеневе дроблення за висотою робочої камери одновалкової зубчастої дробарки. У відповідності до поставленої задачі отримано закон руху окремого шматка агломерату та залежність висоти консольних колосників у верхній частині робочої камери машини.

Ключові слова: *одновалкова зубчаста дробарка, колосники, багатоступеневе дроблення, закон руху, аналітичний розрахунок.*

Moroz V. V., PhD in Physics and math Sciences Rubezhansky V. I., PhD Levchenko E. P. (DonSTU, Alchevsk, LPR) ANALYSIS OF PROVIDING THE OPPORTUNITIES FOR THE MULTI-STAGE WORK OF A SINGLE-GEAR GRAVING CRUSHER

It has been investigated the possibility of providing the agglomerate feeding using rotor teeth for the subsequent multistage crushing along the height of the working chamber of a single-roll crusher. In accordance with the task, the law of motion has been obtained for the a separate piece of agglomerate as well as the dependence of the height of the cantilever grates in the upper part of the working chamber of the machine.

Key words: *single-shaft gear crusher, grate, multi-stage crushing, motion law, analytical calculation.*

УДК 622.734: 001.891.53

Тумин А. Н.,
Павлиненко О. И.,
к.т.н. Левченко Э. П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОПРИВОДА В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ РАЗГОННО-УДАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Представлена возможность модернизации конструкции центробежной мельницы разгонно-ударного типа путем замены в качестве привода трехфазного электрического двигателя переменного тока на гидродвигатель.

Ключевые слова: разгонно-ударная мельница, эффективность, диспергирование материалов, электропривод, гидродвигатель.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Центробежно-ударные дробильно-измельчительные машины обеспечивают благоприятные условия разрушения исходного материала, как правило, однократным ударом и на сегодняшний день получают все большее применение в различных отраслях производства. Принцип действия таких машин, по сути, является обратным принципу работы молотковой дробилки, т. к. измельчение материала происходит не в результате действия вращающихся сил ротора, а лишь за счет его разгона центробежным ускорителем с последующим ударом вылетевших частиц о неподвижную отбойную плиту. При этом преимуществом можно считать то, что практически вся кинетическая энергия, запасенная материалом при его разгоне, преобразуется в работу разрушения, а доля нежелательного переизмельчения снижается. Поэтому актуальными являются разработка и исследование машин такого типа.

Различные исследования данного класса мельниц и дробилок на разнообразных материалах показали, что эффективность работы машины зависит от многих факторов, из которых определяющую роль играют следующие: а) величина подачи сырья в рабочую камеру мельницы; б) скорость вылета зерна из ротора; в) расстояние полета частиц от ротора до отбойной поверхности; г) кон-

структивные особенности рабочих элементов и физико-химические свойства материалов, из которых они изготовлены.

Проведенный анализ источников технической информации [1–5] показал, что рассматриваемые разгонно-ударные дробильно-измельчительные машины обладают высокой производительностью, относительно низкими удельными энергетическими затратами, достаточно хорошей выравненностью гранулометрического состава готового продукта и возможностью его пневмотранспортирования на значительные расстояния.

Однако зачастую особое внимание следует уделять вопросам уравнивания ротора и его защите от повышенных вибраций, возникающих при работе машины со значительными окружными скоростями и сырьем с большим разбросом крупности гранулометрического состава исходных компонентов.

Постановка задачи. Задачей данного исследования является повышение эффективности работы центробежно-ударной дробильно-измельчительной машины путем изучения возможности применения гидравлического привода.

Изложение материала и его результаты. Установлено, что некоторые ограничения на широкое распространение данных машин накладывают высокие требования к балансировке ротора и применение износо-

стойких материалов, особенно для лопастей ротора, подверженных интенсивному воздействию сил трения о перерабатываемый материал. При этом для изготовления ударных элементов отбойных плит хорошо зарекомендовали себя марганцовистые материалы, например, сталь Гадфильда (110Г13Л), однако фактически не поддающиеся механической обработке после отливки. При значительной массе ротора возникает проблема его плавного разгона из-за большой инерционности до номинальной частоты вращения. Это достигается, например, за счет применения фрикционной муфты (рис. 1) или тиристорного преобразователя частоты переменного тока.



Рисунок 1 Фрикционная муфта центробежного типа

Однако фрикционная муфта из-за своих конструктивных особенностей не обеспечивает постоянного передаточного отношения, т. к. допускает проскальзывание не только при запуске электродвигателя, но и в режиме дробления, что резко понижает частоту вращения ротора, а следовательно, и скорость выброса материала из него на отбойные плиты, при этом процесс диспергирования резко ухудшается и может вообще прекратиться.

Стоимость бесступенчатого тиристорного преобразователя частоты переменного трехфазного тока (рис. 2) пока остается

достаточно высокой; кроме того, он требует дистанцированной установки вдали от источников пылеобразования, что несколько затрудняет контроль управления процессом дробления.

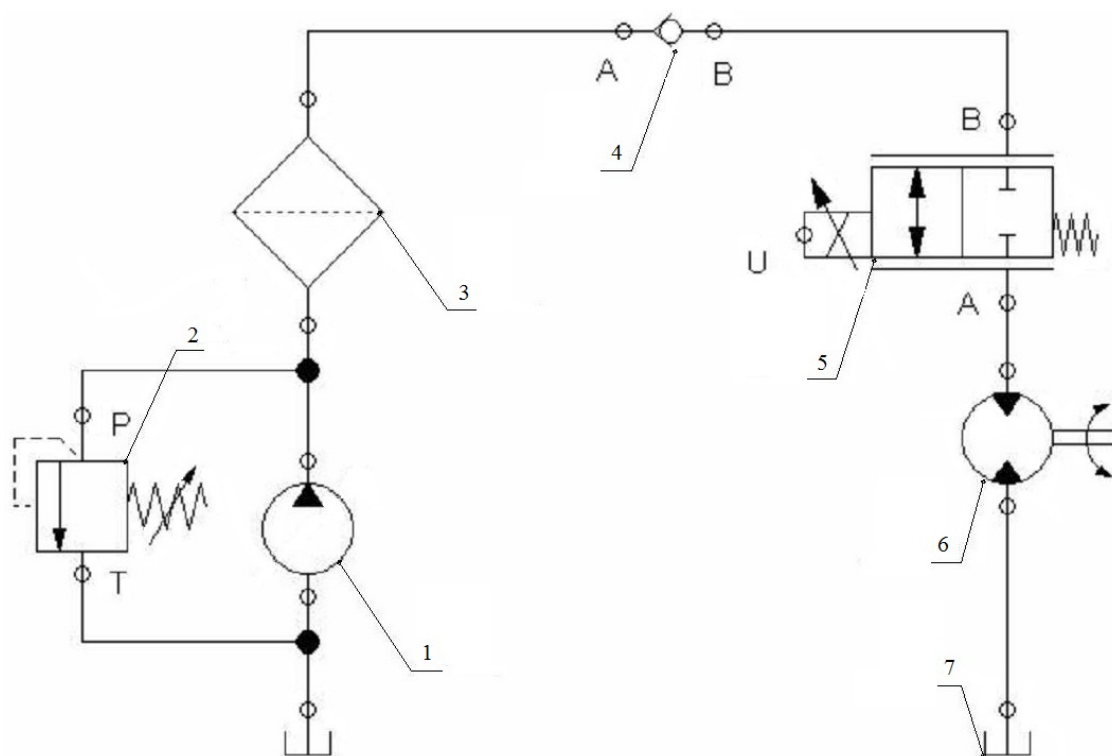


Рисунок 2 Электропривод ЭКТ2Д-63/380-50-АУХЛ4

Поэтому актуальным является рассмотрение вопроса рациональности установки гидропривода для передачи вращения ротору машины, существенно не изменяя её конструкции, вместо традиционно применяемого электропривода.

Предлагаемая для применения гидравлическая схема привода вращения ротора разгонного центробежно-ударного измельчителя представлена на рисунке 3.

Она включает в себя насос 1, предохранительный клапан 2, фильтр тонкой очистки 3, обратный клапан 4, пропорциональный дроссель 5, гидромотор 6, гидробак 7 и магистральный трубопровод.



1 — насос; 2 — предохранительный клапан; 3 — фильтр тонкой очистки; 4 — обратный клапан; 5 — пропорциональный дроссель; 6 — гидромотор; 7 — гидробак

Рисунок 3 Гидравлическая схема привода вращения ротора центробежно-ударной мельницы

Самая простая гидравлическая передача вращательного движения состоит из генератора энергии (насоса) и потребителя этой энергии (гидромотора), нередко той же конструкции и той же величины. В насосе механическая энергия преобразуется в энергию потока рабочей жидкости и направляется к гидромотору, где снова преобразуется в механическую энергию. После отдачи энергии жидкость возвращается в бак.

Регулирование числа оборотов выходного вала гидромотора производится чаще всего варьированием объема жидкости, поступающей от насоса. В общем случае теоретическая производительность насоса составляет:

$$Q_n = q_n \cdot n_n \cdot u_n, \quad (1)$$

где q_n — удельная производительность насоса;

n_n — число оборотов насоса;

u_n — параметр регулирования насоса.

Расход жидкости через гидромотор определяется уравнением:

$$Q_2 = q_2 \cdot n_2, \quad (2)$$

где q_2 — расход жидкости в гидромоторе при максимальной величине регулирования; n_2 — число оборотов гидромотора.

Величины q для насоса и гидромотора зависят от конструктивных особенностей устройств. Если насос и гидромотор лопастного или радиально-поршневого типа, то удельный расход зависит от величины эксцентриситета, т. е. относительного расположения оси ротора по отношению к оси статора. Для насосов и гидромоторов с осевым расположением поршней удельная производительность или удельный расход являются функцией угла наклона шайбы (диска) относительно оси выходного вала.

Для идеального привода ($Q_n = Q_c$), можно записать:

$$i = \frac{n_n}{n_c} = \frac{q_n \cdot u_n}{q_c}, \quad (3)$$

т. е. передаточное отношение привода зависит от отношения удельных характеристик и от параметра регулирования насоса.

Изменение числа оборотов гидромотора достигается изменением параметра регулирования только насоса.

Идеальная характеристика в случае регулирования передачи за счет изменения параметра насоса показана на рисунке 4.

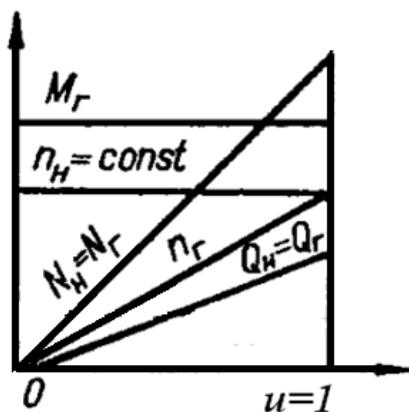


Рисунок 4 Идеальная характеристика гидравлической передачи, регулируемой пропорциональным клапаном

При постоянном числе оборотов насоса изменение регулировочного параметра в нем будет вызывать линейное изменение производительности, а следовательно, — частоты вращения гидромотора и мощности передачи.

Крутящий момент M_r на валу гидромотора зависит от внешней нагрузки, однако при постоянном удельном расходе жидкости в гидромоторе будет неизменным на всем диапазоне регулирования насоса. Это характерно для данного способа регулирования.

С помощью пропорционального регулирования обеспечивается автоматическое изменение подачи жидкости и, соответственно, скорости гидродвигателя. Частота вращения нерегулируемого гидромотора, питаемого от

нерегулируемого насоса, регулируется пропорциональными клапанами, устанавливаемыми на входе или выходе рабочей жидкости из гидромотора. Пропорциональный клапан представляет собой местное гидравлическое сопротивление, устанавливаемое на пути течения жидкости для ограничения (регулирования) ее потока путем создания сопротивления (перепада давления).

К. М. Великанов и Н. В. Решетихин [6], анализируя зависимость экономической эффективности объемного и пропорционального (дрессельного) гидропривода в металлорежущих станках от мощности, пришли к выводам, что, несмотря на малые капиталовложения при создании системы с дроссельным регулированием, целесообразно их применять для малой мощности в пределах до 2000–3000 Вт. При мощности привода до 8000 Вт народнохозяйственные расходы, обусловленные использованием гидропривода с объемным и дроссельным регулированием скорости в станках, существенно не отличаются по величине; при большей мощности привода разница в расходах за год значительно уменьшается для гидропривода с объемным регулированием.

Таким образом, принятая схема регулирования является наиболее приемлемой с точки зрения минимума финансовых затрат (регулируемый объемный привод дороже нерегулируемого), а применение пропорционального клапана позволяет получить такую же статическую характеристику, что и в случае применения регулируемого насоса. Нужно передаточное отношение привода достигается соответствующим выбором удельных производительностей насоса и гидромотора.

Выводы и направление дальнейших исследований.

Разгонно-ударные дробильно-измельчительные машины обладают высокой производительностью, относительно низкими энергозатратами, хорошей выравненностью гранулометрического состава готового продукта и возможностью его пневмотранспортировки.

При значительной массе ротора из-за большой инерционности возникает проблема его плавного разгона до номинальной частоты вращения.

Применение фрикционной муфты не обеспечивает постоянного передаточного отношения, а стоимость тиристорного преобразователя очень высокая, поэтому было бы рациональней поставить гидропривод в центробежно-ударный измельчитель для передачи вращения ротору машины, существенно не изменяя её конструкции.

Пропорциональное регулирование обеспечивает автоматическое изменение подачи жидкости и, соответственно, скорости гидродвигателя. Частота вращения нерегулиру-

емого гидромотора, питаемого от нерегулируемого насоса, регулируется пропорциональными клапанами, устанавливаемыми на входе или выходе рабочей жидкости из гидромотора.

Принятая схема регулирования гидропривода является наиболее приемлемой с точки зрения минимума финансовых затрат (регулируемый объемный привод дороже нерегулируемого), а применение пропорционального клапана позволяет получить такую же статическую характеристику, что и в случае применения регулируемого насоса.

Библиографический список

1. Диспергирование сыпучих материалов в разгонно-ударных дробильно-измельчительных машинах [Текст] : монография / Э. П. Левченко и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — 225 с.
2. Павлиненко, О. И. Анализ возможности использования существующих технических средств для получения стальной колотой дробы [Текст] / О. И. Павлиненко, Э. П. Левченко, В. Г. Чебан // Металлургические процессы и оборудование: специальный выпуск сборника научных трудов ДонГТУ. — Донецк : Донецкая политехника, 2016. — № 4 (3). — С. 38–44.
3. Левченко, Э. П. Применение разгонно-ударных мельниц для расклевывания стальной дробы и особенности их скоростных расчетов [Текст] / Э. П. Левченко, О. И. Павлиненко, Д. А. Власенко // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — Вып 3 (46). — С. 143–148.
4. Левченко, Э. П. Применение гидропривода в дробильно-измельчительных машинах [Текст] / Э. П. Левченко, А. Н. Тумин, Н. Г. Алферов, Н. Э. Онищенко // Инновационные технологии в промышленности: образование, наука и производство: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — Уфа : Изд-во «Нефтегазовое дело», 2016. — С. 393–394.
5. Пат. 2029618 Российская Федерация. МКИ В 02 С 13/14. Центробежная дробилка / А. Н. Онощенко, А. М. Зинченко, Э. П. Левченко, Р. М. Сухомлин; заявитель и патентообладатель Левченко Эдуард Петрович. — № 4882162/33; заявл. 16.11.90; опубл. 30.01.93, Бюл. № 6.
6. Великанов, К. М. Изменение экономической эффективности вариантов гидропривода металлорежущих станков в зависимости от мощности [Текст] / К. М. Великанов, Н. В. Решетихин // Научно-технический информационный бюллетень, 1960. — № 4.

© Тумин А. Н.

© Павлиненко О. И.

© Левченко Э. П.

**Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.,
д.т.н., проф. каф. АиПТМ ЛНУ им. В. Даля Замотой Т. Н.**

Статья поступила в редакцию 04.10.17.

к.т.н. Левченко Е. П., Тумін О. М., Павлиненко О. І. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОПРИВОДУ У ВІДЦЕНТРОВОМУ РОЗГІННО-УДАРНОМУ МЛИНІ

Представлено можливість модернізації конструкції відцентрового млина розгінно-ударного типу шляхом заміни у якості привода трьохфазного електричного двигуна змінного струму на гідродвигун.

Ключові слова: розгінно-ударний млин, ефективність, диспергування матеріалів, електропривод, гідропривод.

PhD Levchenko E. P., Tumin A. N., Pavlinenko O. I. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

USING THE HYDRAULIC DRIVE IN CENTRIFUGAL ROTOR-IMPACT MILL

There has been given the possibility for upgrading the design of centrifugal impact mill by changing the three-phase electric drive motor of alternative current with a hydraulic drive.

Key words: rotor-impact mill, efficiency, dispersion of materials, electric drive, hydraulic drive.

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 ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора (п.4)) и базовым издательским стандартам по оформлению статей по ГОСТ 7.5-98 «Журналы, сборники, информационные издания».

Сборник научных трудов издается 1-4 раза в год. Сборник формирует информационный отдел: 94204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16, ДонГТУ, тел/факс (06442) 2-68-87, e-mail: info@dstu.education (тема: для редакции сборника научных трудов ГОУВПО ЛНР «ДонГТУ»), секретарь редакционной коллегии Скомская Светлана Анатольевна.

Сборник содержит следующие разделы: «Науки о земле», «Металлургия и материаловедение», «Машиностроение и машиноведение», «Строительство и архитектура».

Содержание статей должно отвечать новым достижениям науки и техники, их практическому значению, соответствовать технической направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

В статье должно быть кратко изложено то новое и оригинальное, что разработано авторами, показано преимущество перед аналогами предлагаемых разработок, описаны их особенности и практическая значимость. Результаты работы не должны предоставляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, несоблюдение действующих стандартов и за недостоверность приведенных в статье данных полностью несут авторы статьи.

Статья должна сопровождаться:

- подписью корректора издательско-полиграфического центра (каб. 2115);
- 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 (210х297 мм), с полями: верхнее, нижнее — 27 мм; левое — 23 мм, правое — 25 мм. Различать колонтитулы четных и нечетных 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 версии 6.0 и не старше версии 11(2003)) шрифтом Times New Roman, размером 12 пт, одинарным интервалом, выравниванием по ширине, абзацным отступом 0,5 см. Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть активирована. Весь материал подается в черно-белом оформлении (без градиентов серого или цветовой палитры). Не допускается использование списков (маркированных и нумерованных) и элементов «Надпись». Запрещается вставлять в рукопись сканированные рисунки (графики, диаграммы) и другие неизменяемые объекты (формулы).

Оформление статей

Статья подается отдельным файлом «Статья.doc».

УДК проставляется вверху, выравнивание по левому краю, шрифт полужирный, без абзацного отступа.

Через один интервал — ученая степень, фамилия, инициалы, разделенные пробелом. С новой строки в круглых скобках — название организации, название города, страны, e-mail автора, через запятую. Шрифт полужирный, курсив, выравнивание по правому краю, без абзацного отступа.

С новой строки — название статьи, выравнивание по центру, шрифт Ariel, полужирный, видоизменение: все прописными, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца — 12 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. Не допускается набор всего названия заглавными буквами.

С новой строки — краткая аннотация на языке публикации, курсивом, размером 11 пт.

После аннотации с новой строки — ключевые слова (6–8 слов на языке статьи), курсивом, размером 11 пт, интервал после абзаца — (Авто). Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

С новой строки — текст статьи в две колонки, интервал между колонками 0.5 см.

Слова «рисунок» и «таблица» в упоминаниях по тексту пишутся полностью (Пример: «... на рисунке 2 ...»), а в ссылках в конце предложения пишется сокращенно в скобках (Примеры: «... схема инвертора (рис. 2).», «... получены экспериментальные данные (табл. 4).»).

После текста статьи полужирным шрифтом размером 11 пт, располагается заголовок «Библиографический список», интервал перед абзацем — 12 пт, после абзаца — 8 пт, выравнивание по левому краю.

Библиографический список оформляется согласно 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 заключаются в квадратные скобки. Рекомендованное количество ссылок — не более восьми источников с датой их издания не ранее чем 20 лет назад.

Через один интервал — ученая степень, фамилия, инициалы, полное название организации, название статьи, аннотации и ключевые слова приводятся на оставшемся языке из двух (русский, украинский), размером шрифта 11 пт.

Ученая степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. В круглых скобках, курсивом, 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.

Ученая 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*», размером шрифта 11 пт, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть выключена.

Фамилия, имя, отчество оформляются полужирным шрифтом.

С новой строки — ученая степень, должность.

С новой строки — название подразделения.

С новой строки 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 — реферат. Реферат объемом от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель, методика, результаты, научная новизна, практическая значимость. Фразы «Цель.», «Методика.», «Результаты.», «Научная новизна.», «Практическая значимость.» (на русском языке), «Мета.», «Методика.», «Результати.», «Наукова новизна.», «Практична значущість.» (на украинском языке), «Aim.», «Technique.», «Results.», «Scientific novelty.», «Practical significance.» (на английском языке) размещаются с новой строки и выделяются полужирным начертанием. Реферат не должен повторять название статьи.

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.

Рисунки, выполненные в программах Corel, CAD, Word и др., переводятся в один из описанных выше форматов, предпочтительно векторные.

Графический материал следует располагать непосредственно после текста, в котором он упоминается впервые или на следующей странице. Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте и нанесены слева направо, сверху вниз. Перед рисунком интервал 12 пт. Выравнивание по центру, ширина в одну колонку (большие рисунки располагают на ширину страницы, вверху или внизу страницы). Рисунки размещают в тексте (не в таблицах), обтекание рисунка — «в тексте». Все рисунки подаются дополнительно отдельными файлами.

Допускается размещение пояснительных данных под иллюстрацией (подрисуночный текст) с выравниванием по центру без абзацного отступа, размером 10 пт.

Под каждым рисунком (подрисуночным текстом) располагается надпись в формате «Рисунок № Название» с выравниванием по центру без абзацного отступа, интервалом перед и после абзаца — (Авто), размером 11 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. Статья не должна заканчиваться рисунком. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25% общего объема.

Формулы

Абзац, содержащий формулы, должен иметь следующие параметры: выравнивание по левому краю, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца 6 пт, позиции табуляции — 3,75 см по центру (для расположения формулы) и 7,85 см по правому краю (для расположения номера формулы). Формулы целиком (включая размерности) выполняются с помощью редактора формул Microsoft Equation 3 математическим стилем, обычное начертание шрифта (нормальный), со следующими размерами:

Full (обычный).....	12 pt
Subscript/Superscript (крупный индекс)	9 pt
Sub-Subscript/Superscript (мелкий индекс)	7 pt
Symbol (крупный символ).....	14 pt
Sub-Symbol (мелкий символ).....	12 pt
Формат	по центру
Междустрочный интервал	200%

Недопустимо масштабирование формул и размещение формул в табличном формате. В одном блоке формулы, попадающем на границу колонок, допускается только одна строка (многострочные формулы разбиваются на блоки). Упоминание элементов формул по тексту статьи также выполняется в редакторе формул.

Таблицы

Все таблицы располагаются после упоминания в тексте и должны иметь 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, интервал после абзаца — 6 пт с запретом автоматического переноса слов в абзаце.

Таблица выравнивается по центру контейнера, в книжной ориентации, шириной в 1 колонку (большие таблицы располагаются на ширину страницы, вверху или внизу страницы). Текст в таблице оформляется размером шрифта 11 пт или 12 пт, без абзацного отступа. Не допускается заливка ячеек таблицы цветом. Запрещается располагать таблицу в альбомной ориентации. После таблицы отступается один интервал.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

<i>Литвинский Г. Г.</i> АНТАГОНИЗМ И БОРЬБА НАУЧНЫХ ДОКТРИН В ГОРНОМ ДЕЛЕ	7
<i>Литвинский Г. Г.</i> СТАТИКА РАЗРУШЕНИЯ И ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД ВОКРУГ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ	19
<i>Дрибан В. А., Дуброва Н. А.</i> ФИЛЬТРАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ МНОГОКРАТНО ПОДРАБОТАННОГО МАССИВА	31
<i>Рутковский Ю. А., Рутковский А. Ю.</i> РЕЗОНАНСНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ	38
<i>Шубин Ю. П.</i> ГЕОАРХЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ДОНБАССКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ	47
<i>Ларченко В. Г., Маталкина Ю. А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЛУБИНЫ ПОДРАБОТКИ НА ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА СДВИЖЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ	53

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Ивасенко В. В., Кобзев В. К., Новохатский А. М., Падалка В. П.</i> РЕКОНСТРУКЦИЯ РУДНОГО ДВОРА АГЛОМЕРАЦИОННОГО ЦЕХА ФИЛИАЛА № 2 «ЕНАКИЕВСКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД» ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС»	61
<i>Новохатский А. М., Блинов А. М.</i> ХАРАКТЕР ВЫПУСКА ПРОДУКТОВ ПЛАВКИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛА ЧУГУННОЙ ЛЕТКИ	67
<i>Рябичева Л. А.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ	72
<i>Куберский С. В.</i> АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДА ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКЕ РАСПЛАВА ДВУМЯ РУДНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫМИ БЛОКАМИ	79
<i>Лукьянов А. В., Зубенко А. В., Ивасенко В. В.</i> ЭФФЕКТИВНАЯ РАБОТА АГЛОДОМЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ФИЛИАЛА № 2 «ЕМЗ» ЗАО «ВНЕШТОРГСЕРВИС» ПРИ РАСШИРЕНИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ШИХТЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ И ОКАТЫШЕЙ	86
<i>Карпов А. В., Карпова К. С., Новохатский А. М., Диментьев А. О.</i> АНАЛИЗ ВЕЛИЧИНЫ КОЛЕБАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ЧУГУНА ПО ОКРУЖНОСТИ ГОРНА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ	92
<i>Коробко Т. Б., Рыбалко Е. М.</i> МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ СО ЗНАКОПЕРЕМЕННЫМ НАГРУЖЕНИЕМ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ	98
<i>Денищенко Н. П., Бевз А. А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРИ ПРОКАТКЕ СИММЕТРИЧНОГО БИМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЧЕТЫРЕХСЛОЙНОГО ПАКЕТА С СОЧЕТАНИЕМ СТАЛИ ОСНОВНОГО СЛОЯ СТЗ, ПЛАКИРУЮЩЕГО СЛОЯ СТАЛИ 15Х13	103

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Дрозд Г. Я.</i> ПЕРЕРАБОТКА И УТИЛИЗАЦИЯ РАЗРУШЕННЫХ ВОЙНОЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В ДОНБАССЕ	111
<i>Дрозд Г. Я.</i> ФОРМИРОВАНИЕ СЕКТОРА ОБРАЩЕНИЯ С ОТХОДАМИ В ДОНБАССЕ	119

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

<i>Сидоров В. А., Ошовская Е. В., Агарков А. А.</i> СТАЦИОНАРНЫЕ СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ	127
<i>Еронец С. П., Ткачев М. Ю., Ошовская Е. В.</i> РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕДАЧИ УДАРНОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ПОДВИЖНО СОПРЯЖЕННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	133
<i>Вишневский Д. А.</i> РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВЕННОГО РИСКА	139
<i>Ульяницкий В. Н., Петров П. А., Ульяницкая О. В., Коробов Р. Ю.</i> ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВАЛКОВЫХ МЕЛЬНИЦ ДЛЯ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА	146
<i>Мороз В. В., Рубежанский В. И., Левченко Э. П.</i> АНАЛИЗ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ МНОГОСТАДИЙНОЙ РАБОТЫ ОДНОВАЛКОВОЙ ЗУБЧАТОЙ ДРОБИЛКИ	153
<i>Тумин А. Н., Павлиненко О. И., Левченко Э. П.</i> ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИДРОПРИВОДА В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ РАЗГОННО-УДАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ	158

ЗМІСТ

НАУКИ ПРО ЗЕМЛЮ

<i>Литвинський Г. Г.</i> АНТАГОНІЗМ І БОРотьБА НАУКОВИХ ДОКТРИН В ГІРНИЦТВІ.	7
<i>Литвинський Г. Г.</i> СТАТИКА РУЙНУВАННЯ І ДЕФОРМУВАННЯ ПОРІД НАВКОЛО ГІРНИЧОЇ ВИРОБКИ... 19	19
<i>Дрібан В. О., Дуброва Н. О.</i> ФІЛЬТРАЦІЙНА МОДЕЛЬ БАГАТОРАЗОВО ПІДРОБЛЕНОГО МАСИВУ	31
<i>Рутковський Ю. О., Рутковський О. Ю.</i> РЕЗОНАНСНІ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОРШНЕВИХ КОМПРЕСОРИВ.	38
<i>Шубін Ю. П.</i> ГЕОАРХЕОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ДОНБАСЬКОМУ ДЕРЖАВНОМУ ТЕХНІЧНОМУ УНІВЕРСИТЕТІ.	47
<i>Ларченко В. Г., Маталкіна Ю. А.</i> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГЛИБИНИ ПІДРОБКИ НА ПАРАМЕТРИ ПРОЦЕСУ ЗРУШЕННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ	53

МЕТАЛУРГІЯ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

<i>Івасенко В. В., Кобзєв В. К., Новохатський О. М., Падалка В. П.</i> РЕКОНСТРУКЦІЯ РУДНОГО ДВОРУ АГЛОМЕРАЦІЙНОГО ЦЕХУ ФІЛІЇ № 2 «ЄНАКІЇВСЬКИЙ МЕТАЛУРГІЙНИЙ ЗАВОД» ЗАТ «ВНЕШТОРГСЕРВІС».....	61
<i>Новохатський О. М., Блинов О. М.</i> ХАРАКТЕР ВИПУСКУ ПРОДУКТІВ ПЛАВКИ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КАНАЛУ ЧАВУННОЇ ЛЬОТКИ	67
<i>Рябічева Л. О.</i> ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ ОТРИМАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ.....	72
<i>Куберський С. В.</i> АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ МЕТОДУ ДУГОВОГО ГЛИБИННОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЗА ОДНОЧАСНОЇ ОБРОБКИ РОЗПЛАВУ ДВОМА РУДНО-ВІДНОВНИМИ БЛОКАМИ.	79
<i>Лук'янов А. В., Зубенко О. В., Івасенко В. В.</i> ЕФЕКТИВНА РОБОТА АГЛОДОМЕНОГО ВИРОБНИЦТВА ФІЛІЇ № 2 «ЄМЗ» ЗАТ «ВНЕШТОРГСЕРВІС» ПРИ РОЗШИРЕННІ ВИКОРИСТАННЯ В ШИХТІ ВТОРИННИХ РЕСУРСІВ І ОБКОТИШІВ	86
<i>Карпов А. В., Карпова К. С., Новохатський О. М., Діментєєв О. О.</i> АНАЛІЗ ВЕЛИЧИННИ КОЛИВАННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЧАВУНУ ПО ОКРУЖНОСТІ ГОРНА ДОМЕННОЇ ПЕЧІ.	92
<i>Коробко Т. Б., Рибалко К. М.</i> МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ГЛИБОКОГО ВИТЯГУВАННЯ ІЗ ЗНАКОЗМІННИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ВІСЕСИМЕТРИЧНИХ ДЕТАЛЕЙ	98
<i>Денищенко Н. П., Бєвз А. А.</i> МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ФОРМОЗМІНИ СКЛАДОВИХ ПРИ ПРОКАТЦІ СИМЕТРИЧНОГО БІМЕТАЛЕВОГО ЧОТИРИШАРОВОГО ПАКЕТУ З ПОЄДНАННЯМ СТАЛІ ОСНОВНОГО ШАРУ СТЗ, ПЛАКУЮЧОГО ШАРУ СТАЛІ 15Х13.....	103

Будівництво та архітектура

<i>Дрозд Г. Я.</i> ПЕРЕРОБКА ТА УТИЛІЗАЦІЯ ЗРУЙНОВАНИХ ВІЙНОЮ БУДІВЕЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ В ДОНБАСІ.	111
<i>Дрозд Г. Я.</i> ФОРМУВАННЯ СЕКТОРА ПОВОДЖЕННЯ З ВІДХОДАМИ В ДОНБАСІ	119

Машинобудування та машинознавство

<i>Сидоров В. А., Ошовська О. В., Агарков А. О.</i> СТАЦІОНАРНІ СИСТЕМИ ВІБРАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	127
<i>Єронько С. П., Ткачов М. Ю., Ошовська О. В.</i> РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАЧІ УДАРНОГО НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ РУХОМО СПОЛУЧЕНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ МЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ	133
<i>Вишневський Д. О.</i> РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ МЕТАЛУРГІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ТА ВИРОБНИЧОГО РИЗИКУ	139
<i>Ульяницький В. Н., Петров П. О., Ульяницька О. В., Коробов Р. Ю.</i> ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВАЛКОВИХ МЛИНІВ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ПИЛОВУ- ГІЛЬНОГО ПАЛИВА.	146
<i>Мороз В. В., Рубежанський В. І., Левченко Е. П.</i> АНАЛІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ОРГАНІЗАЦІЇ БАГАТОСТАДІЙНОЇ РОБОТИ ОДНОВАЛКОВОЇ ЗУБЧАСТОЇ ДРОБАРКИ.	153
<i>Левченко Е. П., Тумін О. М., Павлиненко О. І.</i> ВИКОРИСТАННЯ ГІДРОПРИВОДУ У ВІДЦЕНТРОВОМУ РОЗГІННО-УДАРНОМУ МЛИНІ	158

CONTENT

GEOSCIENCES

<i>Litvinskiy G. G.</i> ANTAGONISM AND THE CONFLICT OF SCIENTIFIC DOCTRINES IN MINING ENGINEERING	7
<i>Litvinskiy G. G.</i> STATIC OF DESTRUCTION AND DEFORMATION OF ROCK AROUND THE MINE WORKING	19
<i>Driban V. A., Dubrova N. A.</i> FILTRATION MODEL OF A REPEATEDLY WORKED-OUT MASSIF	31
<i>Rutkovskiy Yu. A., Rutkovskiy A. Yu.</i> RESONANT OPERATIONAL CHARACTERISTICS OF PISTON COMPRESSOR	38
<i>Shubin Yu. P.</i> GEOARCHEOLOGICAL RESEARCH IN DONBAS STATE TECHNICAL UNIVERSITY	47
<i>Larchenko V. G., Matalkina Yu. A.</i> DEPENDENCE OF THE MAXIMUM EARTH SURFACE SUBSIDENCE FROM THE MAIN DEFINITIVE FACTORS	53

METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES

<i>Ivasenko V. V., Kobzev V. K., Novokhatsky A. M., Padalka V. P.</i> RECONSTRUCTION THE RAW-ORE STOCKYARD OF AGGLOMERATION SHOP OF BRANCH № 2 AT "ENAKIYEVO IRON-AND-STEEL WORKS" CJSC "VNESHTORGSERVICE"	61
<i>Novokhatskiy A. M., Blinov A. M.</i> TYPE OF MELTING PRODUCTS TAPPING ACCORDING TO GEOMETRIC PARAMETERS OF TAPHOLE CHANNEL	67
<i>Riabicheva L. A.</i> PROSPECTS OF DEVELOPING THE METHODS OF NANOMANUFACTURING	72
<i>Kuberskiy S. V.</i> ANALYSIS OF THE PARAMETERS OF THE ARC DEEP REDUCTION METHOD AT THE SIMULTANEOUS PROCESSING OF MELT WITH TWO ORE-REDUCING BLOCKS	79
<i>Lukyanov A. V., Zubenko A. V., Ivasenko V. V.</i> EFFICIENT OPERATION OF THE AGGLOMERATION SECTION OF BRANCH NO. 2 "EISW" OF CJSC "VNESHTORGSERVICE" WITH THE EXPANSIVE USE OF SECONDARY RESOURCES AND PELLETS IN THE CHARGE	86
<i>Karpov A. V., Karpova K. S., Novokhatskiy A. M., Dimentiev A. O.</i> ANALYSIS OF VALUE OF THE CHEMICAL COMPOSITION VARIATIONS ALONG THE CIRCUMFERENCE OF THE BLAST FURNACE HEARTH	92
<i>Korobko T. B., Rybalko E. M.</i> CALCULATING METHOD FOR TECHNOLOGICAL PROCESS OF DEEP DRAWING WITH ALTERNATING LOADING OF AXISMETRIC DETAILS	98
<i>Denischenko N. P., Bevez A. A.</i> MODELING OF THE PROCESS OF COMPONENTS FORMALIZATION WHEN ROLLING THE SYMMETRIC BIMETALLIC FOUR-LAYER SANDWICH WITH THE BASIC STEEL LAYER ST3, THE CLADDING STEEL LAYER 15X13	103

CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

Drozd G. Ya.

RECYCLING AND UTILIZATION OF BUILDING OBJECTS DESTROYED DURING THE WAR IN DONBASS 111

Drozd G. Ya.

DEVELOPING OF WASTE MANAGEMENT SECTOR IN DONBASS 119

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

Sidorov V. A., Oshovskaya Ye. V., Agarkov A. A.

STEADY-STATE SYSTEMS FOR VIBRATION CONTROL OF THE MECHANICAL EQUIPMENT 127

Eron'ko S. P., Tkachev M. Yu., Oshovskaya Ye. V.

REGRESSION ANALYSIS OF THE EXPERIMENTAL STUDY RESULTS ON THE IMPACT LOAD TRANSFER PROCESS BETWEEN THE MOVABLE COUPLING ELEMENTS OF THE MECHANICAL SYSTEM 133

Vishnevskiy D. A.

CALCULATING THE RELIABILITY OF METALLURGICAL EQUIPMENT AND PRODUCTION RISK 139

Ulianitskii V. N., Petrov P. A., PhD Ulianitskaya O. V., Korobov P. Yu.

OPERATION FEATURES OF THE ROLLER MILLS FOR DUST COAL PREPARATION 146

Moroz V. V., Rubezhansky V. I., Levchenko E. P.

ANALYSIS OF PROVIDING THE OPPORTUNITIES FOR THE MULTI-STAGE WORK OF A SINGLE-GEAR GRAVING CRUSHER 153

Levchenko E. P., Tumin A. N., Pavlinenko O. I.

USING THE HYDRAULIC DRIVE IN CENTRIFUGAL ROTOR-IMPACT MILL 158

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 7 (50) 2017

**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, затверджений наказом
Міністерства освіти і науки Донецької Народної
Республіки від 1 листопада 2016 р № 1134, згідно
з додатком І.*

*Рекомендовано Вченою радою
ДСУ ВПО ЛНР «ДонДТУ»
(Протокол № 2 від 27.10.2017)*

Включений до наукометричної бази даних РИНЦ

Формат 60×84¹/₈.
Ум. друк. арк. 11
Зам. № 252
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](http://www.dstu.education)

ВИДАВНИЧО-ПОЛІГРАФІЧНИЙ ЦЕНТР,
ауд. 2113, т / факс 2-58-59
Свідоцтво про державну реєстрацію видавця,
виготовлювача
і розповсюджувача засобу масової інформації
МІ-СГР ВД 000055 від 05.02.2016.

Головний редактор

Зінченко А. М. — к.е.н., в.о. ректора

Заступник головного редактора

Новохатський А. М. — д.т.н., проф.

Редакційна колегія:

Литвинський Г. Г. — д.т.н., проф.
Фінкельштейн З. Л. — д.т.н., проф.
Корнєєв С. В. — д.т.н., проф.
Леонов А. О. — к.т.н., доц.
Харламов Ю. А. — д.т.н., проф.
Ульяницький В. Н. — к.т.н., проф.
Зелінський А. М. — к.т.н., проф.
Куберський С. В. — к.т.н., проф.
Денищенко П. М. — к.т.н., доц.
Дрозд Г. Я. — д.т.н., проф.
Шолух М. В. — д. арх., проф.
Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.
Псюк В. В. — к.т.н., доц.
Скомська С. А. — секретар редакційної
колегії.

Для наукових співробітників, аспірантів,
студентів вищих навчальних закладів.

Мова видання:

російська, українська та англійська

Ісмаїлова Л. М. — коректор

© ДСУ ВПО ЛНР «ДонДТУ», 2017
© Чернишова Н. В., художнє
оформлення обкладинки, 2017

**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 7 (50) 2017

**Establisher: Donbass
State Technical
University**

*Certificate of Ministry of Information,
Press and Mass Communication of LPR
for mass media registration
MI-SGR PI 000003
dated 05.02.2016*

*By order of the Department of Education and
Science of Donetsk People Republic of 2 May
2017 № 464 the Collection of scientific papers
is being offered in the list of peer-reviewed
scientific editions with required publications
of the main scientific PhD and Doctor's thesis
results, approved by an order of the Department
of Education and Science of Donetsk People
Republic of 1 November 2016 № 1134,
according to annex 1.*

*Recommended by academic council of DonSTU
(Record № 2 dated 27.10.2017)*

Added to scientometrical data base of RSCI

Format 60×84%.
Conventional printed sheet 11
Order № 252

Circulation 100 copies
Publishing office is not responsible for
material content giving by author for
publishing.

Address of editorial office, publishing and
establishing:

Donbass State Technical University
Lenin avenue, 16, Alchevsk, LPR
94204

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

PUBLISHING AND PRINTING CENTER,
Room 2113, tel/fax 2-58-59
Certificate of State registration for mass media
publisher, owner and distributor
MI-SGR ID 0000055 dated 05.02.2016

Editor-in-chief

Zinchenko A. M. — PhD in Engineering,
acting rector

Deputy chief editor

Novohatskyi A. M. — Doctor of tech. sc., prof.

Editorial board:

Litvinskyi G. G. — Doctor of tech. sc., prof.

Finkelstein Z. L. — Doctor of tech. sc., prof.

Korneiev S. V. — Doctor of tech. sc., prof.

Leonov A. A. — PhD in Engineering

Kharlamov Yu. A. — Doctor of tech. sc., prof.

Uliianitskyi V. N. — PhD in Engineering, prof.

Zelinskyi A. N. — PhD in Engineering, prof.

Kuberskyi S. V. — PhD in Engineering, prof.

Denisschenko P. N. — PhD in Engineering

Drozd G. Ya. — Doctor of tech. sc., prof.

Sholukh N. V. — Doctor of arch., prof.

Bondarchuk V. V. — PhD in Engineering

Psjuk V. V. — PhD in Engineering

Skomskaia S. A. — Secretary to the editorial board.

For research scientists, PhD seekers, students
of higher educational institutions.

Issue language:

Russian, Ukrainian, English

Ismailova L. M. — proofreader

© SEIHPE «DonSTU», 2017

© Chernyshova N.V., graphic, 2017