

**ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**НАУКОЕМКИЕ
ТЕХНОЛОГИИ И
ОБОРУДОВАНИЕ В
ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

ВЫПУСК 7 (81)

АПЧЕВСК, 2025

Научноёмкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве

Научный журнал
Выходит 4 раза в год
Основан в июне 1999 г.
Выпуск 7 (81) 2025

Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building

Scientific journal
Publishing 4 times a year
Founded in June 1999
Issue 7 (81) 2025

Алчевск
2025

УДК 30.123 + 504.06 + 550.822 + 6 + 711.55

EDN: DOPXYQ

**Наукоёмкие технологии
и оборудование в промышленности
и строительстве**

Научный журнал

Выпуск 7 (81) 2025

**Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Донбасский
государственный технический
университет»**

*Свидетельство о регистрации
средства массовой информации
ПИ № ФС77-85961 от 11.09.2023*

*Журнал внесён в Перечень рецензируемых
научных изданий, в которых должны быть
опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание учёной степени
кандидата наук, на соискание учёной степени
доктора наук*

*Включён в наукометрическую
базу данных РИНЦ*

*Рекомендовано учёным советом
ФГБОУ ВО «ДонГТУ»
(Протокол № 8 от 25.03.2025)*

Формат 60×84¹/₈
Усл. печат. л. 11,75
Заказ № 74
Тираж 500 экз.

Дата выхода: 11.04.2025
Журнал распространяется бесплатно

Компьютерная вёрстка
Исмаилова Л. М.

Художественное оформление обложки
Чернышова Н. В.

Адрес учредителя, издателя и изготовителя:
ФГБОУ ВО «ДонГТУ»
294204, Луганская Народная Республика,
г.о. город Алчевск, г. Алчевск,
пр. Ленина, 16
E-mail: info@dontu.ru
Web-site: https://dontu.ru/

Главный редактор

Вишневецкий Д. А. — д.т.н., проф., ректор

Заместитель главного редактора

Смекалин Е. С. — к.т.н., доц.,
проректор по научной работе

Редакционная коллегия:

Литвинский Г. Г. — д.т.н., проф.
Коршунов Г. И. — д.т.н., проф.
Еременко В. А. — д.т.н., проф.
Борщевский С. В. — д.т.н., проф.
Корнеев С. В. — д.т.н., проф.
Леонов А. А. — к.т.н., доц.
Артюх В. Г. — д.т.н., проф.
Сотников А. Л. — д.т.н., проф.
Витренко В. А. — д.т.н., проф.
Кузин А. В. — д.т.н., доц.
Михайлов А. Н. — д.т.н., проф.
Козлов А. М. — д.т.н., проф.
Зинченко А. М. — к.э.н., доц.
Снитко С. А. — д.т.н., доц.
Корзун Е. Л. — д.т.н., проф.
Богатырева Е. В. — д.т.н., проф.
Яковченко А. В. — д.т.н., проф.
Гончарук А. В. — д.т.н., проф.
Куберский С. В. — к.т.н., проф.
Денищенко П. Н. — к.т.н., проф.
Сулейманова Л. А. — д.т.н., проф.
Смоляго Г. А. — д.т.н., 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, английский

16+

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

SUBSURFACE MANAGEMENT

Литвинский Г. Г.

Донбасский государственный технический университет

E-mail: ligag@ya.ru

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ АКСИАЛЬНОЙ ГИДРОМАШИНЫ С ЗУБЧАТО-ТОРЦЕВЫМ ВЫТЕСНИТЕЛЕМ

Рассмотрена проблема состояния и перспективы применения объемных поршневых гидромашин (ГМ) в тяжелых отраслях промышленности. Показана необходимость перехода к гибридным безредукторным приводам с использованием низкооборотных высокомоментных ГМ поршневого типа. Проанализированы достоинства и недостатки радиальных и аксиальных поршневых ГМ и намечены направления их совершенствования. Сформулированы требования, которым должны удовлетворять конструкции объемных ГМ. Целью работы являлось создание нового типа аксиально-поршневых ГМ многократного действия с широким диапазоном частот вращения и низкими габаритно-массовыми показателями. В результате разработана объемная аксиальная высокомоментная низкооборотная ГМ нового поколения, реверсивная, обратимая и многократного действия, ее главная отличительная особенность — принципиально новая конструкция вытеснителя, выполненного в виде диска с торцевыми зубьями, совершающего возвратно-поступательное и вращательное движение на валу. Предложена методика расчета ГМ, которая может быть запрограммирована в пакетах Mathlab и MathCad. У новой ГМ за один оборот вала происходит несколько циклов работы вытеснителя (до 50 и более), что дает высокое значение крутящих моментов (до 10 кН и более) и частоту вращения от 0,01 до 2..5 Гц при номинальном рабочем давлении 25...32 МПа. ГМ позволяет осуществить прямое соединение двигателя с исполнительным органом по прогрессивной гибридной схеме без громоздких и малонадежных редукторов и длинных валов. ГМ в схеме «статор — колесо» наиболее соответствует применению в тяжелой технике, особенно для горной промышленности при подземной (комбайны, лебедки, конвейеры и др.) и открытой (экскаваторы, бульдозеры, трейлеры, грузовики) разработке сырьевых ресурсов.

Ключевые слова: аксиальная гидромашинка, вытеснитель, крутящий момент, частота вращения, статор-колесо, гибридный привод, конструкция, расчеты, параметры.

1 Проблема и задачи исследований

В настоящее время в базовых отраслях тяжелой промышленности и в первую очередь в технике, связанной с подземным строительством и добычей сырьевых ресурсов в виде твердых, жидких и газообразных ископаемых, происходит дальнейшее развитие или качественная смена концепций и доктрин.

В горной промышленности также происходит, хотя и с определенным запаздыванием, отказ от традиционных организационных и технических решений, интенсивный поиск новых способов и средств производства предельно высокого технического уровня, кардинально повышающих безопасность, производительность и

условия труда при высоком качестве и эффективности достигаемых результатов.

Одним из наиболее эффективных направлений модернизации горного оборудования является его оснащение гидроприводом, чему посвящены многочисленные исследования и обзоры [1–10 и др.].

Практически любая мобильная и стационарная горная машина (выемочные и проходческие комбайны и агрегаты, буровое оборудование, лебедки, ленточные и скребковые конвейеры, подъемное оборудование и др.) может быть с высокой эффективностью улучшена путем замены электрического привода высокомоментным объемным гидроприводом.

Гидромашин (ГМ) нашли достаточно широкое применение в высокотехнологич-

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

ных отраслях промышленности (авиационный, морской и автомобильный транспорт, космонавтика и др.), поскольку обладают многими достоинствами:

- простота преобразования одного вида движения в другое, устранение понизительных редукторов и распределительных устройств;
- передача больших мощностей при небольших габаритах и массе, малая инерционность;
- быстроедействие и высокая точность управления;
- легкость и удобство реверсирования, простота разветвления потоков мощности;
- плавное (бесступенчатое) регулирование выходных показателей: мощности и скорости;
- свобода в компоновке при расположении гидроагрегатов и при размещении их узлов;
- простота конструкции передач и предохранительных устройств.

Однако следует указать и присущие ГМ недостатки:

- высокие требования к материалам и точности изготовления узлов и деталей;
- сложность, а в ряде случаев, невозможность ремонта в условиях эксплуатации;
- влияние чистоты и температуры рабочей жидкости на показатели работы, что требует ее постоянной фильтрации и охлаждения;
- необходимость обслуживания и контроля компетентными специалистами и пр.

Во многих отраслях промышленности для силовых приводов получили широкое применение объемные ГМ в основном двух различных типов [1–4, 6–8]: радиально- и аксиально-поршневые (рис. 1, 2). Эти ГМ являются обратимыми, т. е. могут работать как объемные гидронасосы или гидромоторы, в которых функцию вытеснителей выполняют поршни (плунжеры).

Как правило, радиально-поршневые ГМ (рис. 1) используют как высокооборотные насосы для маслостанций, тогда как аксиально-поршневые — в виде высокомоментных гидромоторов для гидроприводов. Эти ГМ меньше электродвигателей по массе в 15–30 раз, а по размерам в 3–4 раза [2] и

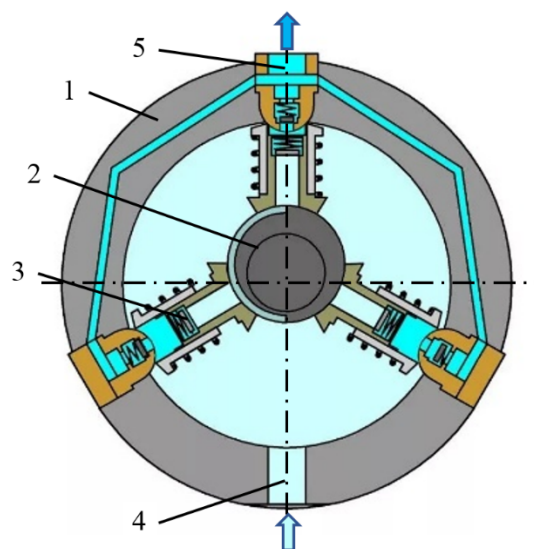
занимают лидирующее положение в безредукторных приводах горного и общепромышленного оборудования.

По числу разновидностей конструктивного исполнения насосы и гидромоторы с аксиальным (или близким к нему) расположением цилиндров (рис. 2) являются наиболее распространенными. В гидравлических системах (гидроприводах) они во много раз превосходят прочие типы ГМ.

Однако повсеместной замене электропривода на ГМ препятствует ряд их существенных недостатков.

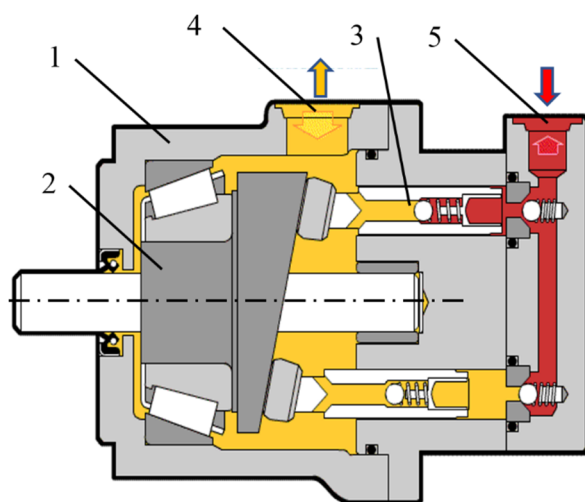
Радиально-поршневые ГМ, которые обладают многократным действием и высоким крутящим моментом, имеют ограниченное число оборотов, сложность конструкции и большие габаритные размеры.

Аксиальные ГМ относятся к классу машин однократного действия, что ведет к высоким оборотам выходного вала, наличию «мертвой точки», ограничению минимального числа оборотов. Кроме того, им присущи низкий крутящий момент и малый рабочий объем.



1 — статор, 2 — ротор; 3 — вытеснитель;
4, 5 — ввод и вывод рабочей жидкости
соответственно низкого и высокого давления

Рисунок 1 — Поперечное сечение конструктивной схемы радиально-поршневого гидронасоса



1 — статор, 2 — ротор; 3 — вытеснитель;
4, 5 — ввод и вывод рабочей жидкости
соответственно низкого и высокого давления

Рисунок 2 — Продольное сечение
конструктивной схемы аксиально-поршневого
гидродвигателя

Следует выделить общие недостатки, присущие объемным ГМ:

- главный вектор и главный момент всех сил между взаимодействующими элементами ГМ (в основном между статором и вытеснителем) сосредоточены либо в точках, либо по линиям или малым участкам контакта соприкасающихся поверхностей;
- не используется обратный ход поршня вытеснителя в рабочем цикле, что по крайней мере вдвое снижает технические характеристики ГМ;
- поршни вытеснителя, как правило, подвергаются боковым усилиям, что приводит к их изгибу и износу, резкому ограничению ресурса и работоспособности основных контактирующих элементов.

Аксиально-поршневая ГМ нуждается в коренной модернизации за счет перехода из класса ГМ однократного действия в класс многократных ГМ, что даст, при сохранении остальных ее преимуществ, высокий крутящий момент при малом числе оборотов и существенно расширит область целесообразного применения.

Отсюда становится понятным, что существующие объемные ГМ имеют большие

резервы совершенствования: упрощение конструкции, снижение габаритов и массы, стоимости изготовления и эксплуатации, повышение моторесурса до 20...30 тыс. часов работы и более.

Особенно следует обратить внимание на аксиально-поршневые ГМ, если обеспечить у них малые обороты при высоком крутящем моменте. Это заметно расширит область их применения в гибридных безредукторных трансмиссиях мобильных машин (например, в горных проходческих и выемочных комбайнах, буровом оборудовании, карьерных автосамосвалах, бульдозерах и т. д.) [11–13].

Таким образом, создание нового типа ГМ, способных объединить преимущества и исключить недостатки радиальных и аксиальных ГМ, является актуальной межотраслевой проблемой.

Целью данной работы является создание нового типа аксиально-поршневых ГМ многократного действия с широким диапазоном частот вращения и низкими габаритно-массовыми показателями. Поставленная цель достигается путем решения следующих **задач**:

- выполнить анализ существующих конструкций аксиальных ГМ, выявить их недостатки и пути совершенствования;
- создать новую конструкцию аксиальной ГМ многократного действия с низкими габаритно-массовыми показателями;
- разработать методику расчета ее параметров и выполнить оценочный расчет новой конструкции ГМ.

2 Анализ конструкции аксиальной гидромашины ГМАГ

В качестве аналога взята гидромашина аксиальная гармоническая ГМАГ [14], которая состоит (рис. 3, 4) из полого вала 1, установленного на радиальных подшипниках 2 в корпусе 3, и подвижных вытеснителей 4, расположенных на валу 1 с помощью шлицов 5. Поверхности торцов 6 вытеснителей 4 выполнены в виде конгруэнтно сдвинутых вдоль оси вала гармоничных волн.

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

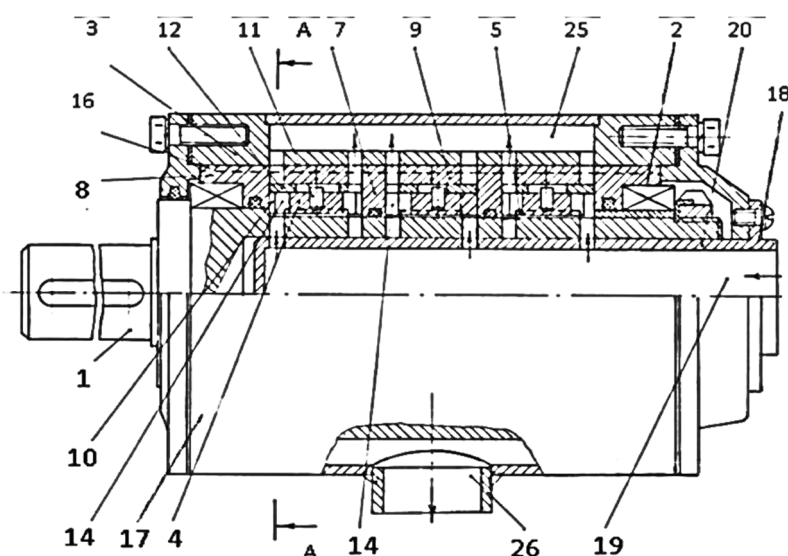


Рисунок 3 — Общий вид конструкции аксиальной гармонической гидромашины ГМАГ

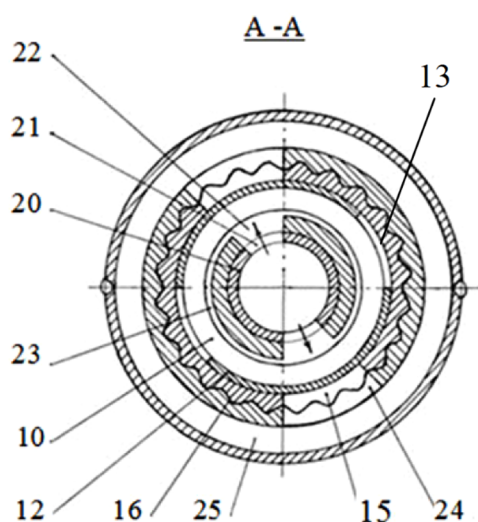


Рисунок 4 — Разрез ГМ по рабочей камере 14

На рисунке 5 представлена развертка ГМ по вытеснителям, где можно проследить за особенностями контакта торцевых поверхностей вытеснителей 4 и стенок 7 кольцевых втулок 8 и 9 в кольцевой полости 10.

На вытеснителях 4 установлены с помощью штифтов 11 распределительные кольца 12 с радиальными отверстиями 13. Вытеснители 4 расположены в неподвижной кольцевой полости 10 и герметично разделяют ее на две рабочие камеры 14.

Полость 10 образована с помощью внутренних цилиндрических поверхностей

кольцевых втулок 8 и 9, снабженных отверстиями 15. Эти кольцевые втулки имеют тавровое сечение с переменной по гармоническому закону толщиной стенки и выполнены зеркально-симметрично по отношению к гармонично-волновым поверхностям торцов 6 вытеснителей 4. Внешние цилиндрические поверхности этих втулок снабжены шлицами 16 и тем самым неподвижно закреплены на внутренней цилиндрической поверхности корпуса 3. Корпус 3 и находящиеся в нем кольцевые втулки 8 и 9 зафиксированы с помощью крышек 17 и 18.

Напорная гидромагистраль 19 (рис. 3) подведена к распределительной трубе 20, неподвижно установленной в центре полого вала 1. Труба 20 имеет радиальные отверстия 21, периодически соединяемые с отверстиями 22 при вращении вала 1 и с наружной кольцевой проточкой 23, что позволяет управлять движением потока рабочей жидкости в соответствии с движением вытеснителей.

Из каждой рабочей камеры 14 рабочая жидкость через отверстия 13 в распределительном кольце 12 движется через отверстия 15 во втулках 8 и 9 и отверстия 24 в корпусе в распределительную камеру 25, а из нее — в гидромагистраль низкого давления 26.

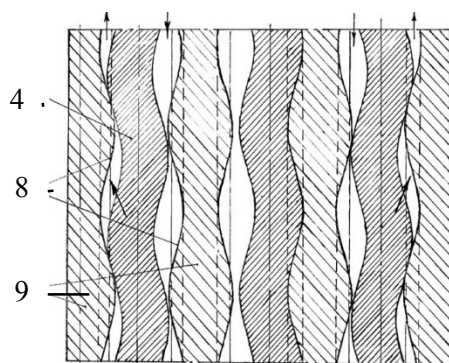


Рисунок 5 — Развертка ГМ по диаметру вытеснителей 4

Несмотря на очевидные достоинства ГМ-аналога, можно отметить и ряд ее недостатков:

- недостаточный объем рабочей камеры, что снижает производительность ГМ;
- контактирующие поверхности в виде радиальной линии между вытеснителем и кольцевыми втулками, что ведет к концентрации напряжений и их повышенному износу;
- работа распределительных колец 12 с радиальными отверстиями 13 не обеспечивает четкого переключения потоков из напорной и сливной магистралей, что приводит к излишним объемным потерям, заметно снижает объемный КПД ГМ.

Для устранения указанных недостатков целесообразно разработать новую ГМ с принципиально иным вытеснителем и способом его взаимодействия со статором.

3 Разработка новой конструкции аксиальной гидромашины

Исходя из анализа состояния проблемы, приоритетными направлениями совершенствования конструкции аксиальной ГМ являются:

- обеспечение работы поршня вытеснителя как гидроцилиндра двустороннего действия;
- изменение принципа работы вытеснителя за счет совмещения возвратно-поступательного и вращательного движений;
- использование преимуществ класса ГМ многократного действия;

- удобство перехода от режима насоса к гидромотору и наоборот (реверсивность);
- возможность работы по схемам с постоянным и переменным гидропотоками в напорной и сливной магистралях рабочей жидкости (аналог постоянного и переменного токов);
- многовариантность конструкторских решений и модификаций в разных типах агрегатов и мобильных машин от статор- до ротор-колеса.

В первую очередь при конструировании ГМ необходимо уделить внимание конфигурации ее исполнительного органа — вытеснителя. В целях достижения максимальной производительности ГМ необходимо обеспечить его движение по осевому направлению с возможно большей площадью рабочей камеры.

Кроме того, с целью устранения точечных или линейных контактов вытеснителя, выполняющего роль ротора, при его вращательном движении в рабочей камере следует выполнить контактные участки с выступами статора, закрепленного на торцах корпуса, в виде плоских поверхностей.

Поставленной цели можно достигнуть, если рабочие поверхности вытеснителя 1 (ротора) и им соответствующие поверхности статора 2 выполнить в виде зеркальных друг к другу торцевых зубьев (рис. 6). При развертке контура рабочей камеры по ее наибольшему диаметру торцевые зубья вытеснителя и ответные зубья статора видны как прямолинейные отрезки.

Такая конструкция поверхностей ротора и статора обеспечивает соблюдение постоянной площади силового контакта при любом их взаимном расположении в процессе работы ГМ. При этом вытеснитель совершает вращательное и возвратно-поступательное движение относительно оси рабочей камеры, дозированно изменяя ее размеры вдоль оси. Тем самым работа вытеснителя с взаимно обратными рабочими поверхностями торцевых зубьев аналогична работе поршня гидроцилиндра двустороннего действия.

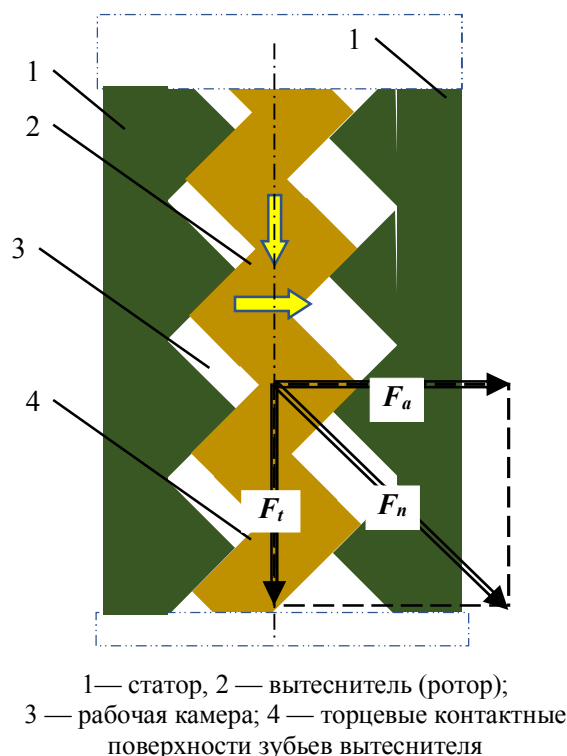


Рисунок 6 — Развертка внешней поверхности рабочей камеры 3 ГМ по диаметру вытеснителя 1

На рисунке 6 показан случай, когда слева от вытеснителя 2 к рабочей камере 3 подключена напорная магистраль, а справа — сливная гидромагистраль.

Сам вытеснитель 2 поступательно движется вдоль оси рабочей камеры 3 по шлицам направляющего вала (не показаны), что заставляет его скользить по торцевым поверхностям зубьев статора 1 и совершать поворотное движение (на рисунке 6 — вверх), передавая вращательный момент на вал ГМ. Здесь же показан параллелограмм усредненных по площади вытеснителя сил, с которыми торцевые зубья вытеснителя воздействуют на неподвижный статор ГМ:

F_a — аксиальная сила, которая воспринимается статором;

F_t — тангенциальная сила, передаваемая через вытеснитель на силовой вал;

F_n — нормальная к граням вытеснителя и статора результирующая сила.

Возможная конструктивная компоновка ГМ показана на рисунке 7. В результате

поступательного знакопеременного движения вытеснителя в ГМ с одной секцией неизбежно будут появляться вибрации. Для их компенсации целесообразно применять двухсекционную (или с четным числом секций) компоновку аксиальных ГМ.

Таким образом, в арсенале у конструктора имеется довольно большое разнообразие компоновочных схем ГМ: одно- и многосекционных, где секции могут быть подключены к гидромагистралям последовательно и параллельно. Кроме того, нельзя упускать из виду еще одну перспективную компоновку, ее условно можно назвать оппозитной, когда у гидромотора вытеснитель расположен не вне, а внутри выходного вала с внутренними шлицами, который одновременно частично выполняет роль внешнего корпуса.

4 Особенности работы новой аксиальной ГМ

Гидромашина аксиальная в режиме насоса работает следующим образом (рис. 7). Полый вал 1 вращается под действием внешнего крутящего момента M и через шлицы 5 сообщает вытеснителям 4 вращательное движение.

Вытеснители 2 находятся в зацеплении своими криволинейными торцами 4 с одной из торцевых радиально-зубчатых поверхностей неподвижного дискового статора 1, закрепленного на корпусе ГМ.

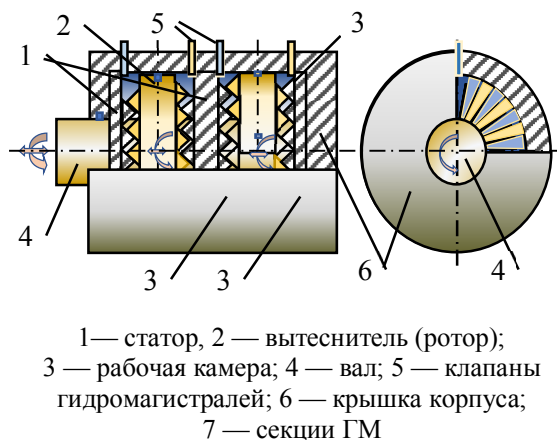


Рисунок 7 — Компоновочная схема аксиальной двухсекционной ГМ

В результате взаимодействия с торцевыми зубчатыми поверхностями статора вытеснителям сообщается дополнительно к вращательному аксиальное возвратно-поступательное перемещение в рабочей камере 3 с постоянной скоростью, пропорциональной скорости вращения приводного вала.

При этом вытеснитель 2 меняет объем примыкающих к нему с обеих сторон рабочих камер 3, создавая при этом разрежение в одной из них, объем которой увеличивается. При падении давления впускной клапан открывается и камера заполняется рабочей жидкостью низкого давления. Одновременно с этим происходит вытеснение рабочей жидкости из камеры по другую сторону вытеснителя через выпускной клапан 5 напорной гидромагистрали.

При обратном ходе вытеснителей 2 рабочие камеры 3 нагнетания и всасывания меняются местами. Это обеспечивает движение рабочей жидкости в ГМ с постоянной скоростью.

ГМ является обратимой и при работе в режиме гидромотора меняется только направление передачи усилий от поворота вытеснителей 2 к валу 4. Кроме того, ГМ является реверсивной, для изменения направления вращения необходимо произвести переключение потока рабочей жидкости в подводящих гидромагистралях.

Технические показатели ГМ во многом определяются числом торцевых зубьев на вытеснителе (рис. 8). Для ГМ с большим

числом оборотов следует предусматривать меньшее число торцевых зубьев. При минимальном их числе (оно равно двум) в гидромоторе каждый рабочий ход вытеснителя дает пол-оборота выходного вала.

Особенностью конструкции является возможность последовательного размещения в ней на одном валу нескольких силовых секций, каждая из которых включает в себя (см. рис. 7) два торцевых статора 1, закрепленных на корпусе, и подвижный между ними один вытеснитель 2, выполняющий роль ротора, передающий посредством шлицевого соединения с валом крутящий момент. Последний преобразуется посредством торцевых зубчатых контактов в осевое знакопеременное перемещение вытеснителей внутри рабочих камер.

Каждая секция ГМ снабжена одинаковыми торцевыми зубьями, обеспечивающими надежное зацепление и передачу крутящего момента валу 4 ГМ. При этом отличие конструкции ГМ состоит в том, что общая площадь плоских контактных поверхностей торцевых зубьев, служащих для передачи крутящего момента, у каждого вытеснителя остается всегда постоянной. Незменность суммарной площади силового контакта является одним из главных отличий предлагаемой конструкции ГМ и обеспечивает ей значительные преимущества по сравнению с иными ГМ: повышенная долговечность и надежность работы, компактность и высокие технико-экономические показатели.

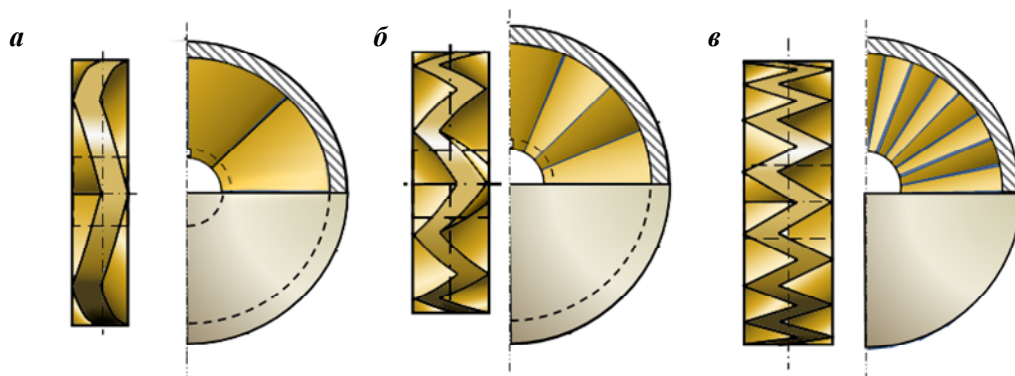


Рисунок 8 — Схемы вытеснителей с разным числом (2, 8 и 16) торцевых зубьев для ГМ со скоростью вращения: а — высокой, б — средней, в — низкой

Количество вытеснителей 2 в конструкции ГМ может быть разным (от 2 до 20–30 и более), при этом для снижения до минимума вибраций при работе ГМ следует предусматривать их четное число, добиваясь того, чтобы вытеснители 2 были с одинаковым числом зубьев и работали попарно антисимметрично, т. е. векторы скорости их поступательного движения по шлицам вала вдоль оси ГМ были всегда разного знака.

В общем случае угол поворота вала строго согласован с числом зубьев на вытеснителе:

$$\alpha_{\omega} = 2\pi / n_z, \quad (1)$$

где n_z — число торцевых зубьев на вытеснителе.

Число рабочих ходов возвратно-поступательного перемещения вытеснителя за один оборот вала m_z строго согласовано с числом торцевых зубьев на вытеснителе: $m_z = n_z$.

Надо отметить, что число зубьев на вытеснителях смежных секций ГМ не обязательно должно быть одинаковым, однако обязательным условием является то, что их число должно быть кратным, например 2:4:8 или 3:9 и т. д. Такая особенность компоновки гидросистем заметно расширяет возможности проектировщика и конструктора удовлетворять технические требования, предъявляемые к создаваемой ГМ.

Так как силовое взаимодействие торцевых зубьев статора и вытеснителя происходит под углом, то на плоскости контакта торцевых зубьев вытеснителя с зубьями статора эта сила раскладывается (см. рис. 6) на две составляющие: осевую $\vec{F}_a$ и тангенциальную $\vec{F}_t$, из которых тангенциальная $\vec{F}_t$ создает крутящий момент $\vec{M}_a$ относительно оси вала и приводит его во вращение, а осевая воспринимается статором, закрепленном на крышке корпуса:

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \vec{F}_a + \vec{F}_t, \\ \vec{M}_a &= \vec{F} \cdot \vec{R} = \vec{F}_t \cdot \vec{R}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\vec{M}_a$ и $\vec{F}$ — соответственно главный момент и главный вектор всех сил, действующих на вытеснитель;

$\vec{F}_a$ и $\vec{F}_t$ — усредненные по площади вытеснителя аксиальная и тангенциальная силы его взаимодействия с торцевыми зубьями статора;

$\vec{R}$ — радиус-вектор точки приложения распределенного по окружности главного вектора всех осевых сил, действующих на вытеснитель.

5 Оценка параметров новой ГМ

Особенность расчета данной ГМ состоит в том, что параметры ГМ определяем исходя из требований механической прочности деталей (прочностной расчет) и пропускной способности ГМ при движении рабочей жидкости (гидравлический расчет). Расчет проводим без учета объемного и гидромеханического КПД, что в дальнейшем следует учесть при реальном проектировании ГМ (мощность будет меньше на 5...10 %) [10].

В качестве исходных данных для расчета ГМ приняты:

ω — частота вращения выходного вала ГМ, об/с;

M_a — максимальный момент на выходном валу гидромотора, кНЧм;

p — давление в напорной магистрали гидромотора, МПа.

Рабочий объем ГМ V_p , расход рабочей жидкости Q , максимальную мощность P определяем по известным формулам гидравлики [1, 4].

Определяем выходную мощность гидромотора:

$$P_G = 2\pi \cdot M_a \cdot \omega_{\max}, \quad (3)$$

где $\omega_{\max}$ — максимальная частота вращения выходного вала гидромотора, об/с.

Находим объем рабочей жидкости, проходящий через рабочую камеру ГМ за один оборот выходного вала, т. е. расчетный рабочий объем гидромотора:

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

$$q_{\Gamma} = 2\pi \cdot \frac{n_k \cdot M_a}{p \cdot \eta_{\Gamma}} \eta_o, \quad (4)$$

где η_{Γ} — общий КПД гидромотора, обычно $\eta_{\Gamma} \approx 0,75 \dots 0,85$, принимаем $\eta_{\Gamma} = 0,8$;

η_o — объемный КПД гидромотора, равный $\eta_o \approx 0,9 \dots 0,95$, принимаем $\eta_o = 0,92$;

n_k — кратность действия вытеснителя за один оборот вала, $n_k = 2n_z$.

Максимальный расход рабочей жидкости, потребляемой гидромотором:

$$Q_{\Gamma} = q_{\Gamma} \omega_{\max} / \eta_o. \quad (5)$$

Геометрический объем рабочей камеры равен:

$$V_p = (2h_z + t_d) \cdot A_p, \quad (6)$$

где h_z — высота торцевых зубьев на вытеснителе и статоре, мм;

t_d — толщина тела вытеснителя, мм;

A_p — площадь рабочей камеры $A_p = \pi r_p^2$, мм²;

r_p — радиус рабочей камеры, мм.

Объем рабочей камеры следует согласовать с максимальным расходом рабочей жидкости (5), для чего следует изменить либо число зубьев n_z , либо угол наклона их граней α_z к радиусу вала.

Рабочий ход вытеснителя l_x равен удвоенной максимальной высоте торцевого зуба $l_x = 2h_z$.

В свою очередь, высота зуба h_z определяется через число зубьев n_z и угол α_z между радиусом и гранью зуба вытеснителя:

$$h_z = \frac{\pi r_p}{n_z} \cos \alpha_z. \quad (7)$$

Осевое усилие, действующее на вытеснитель, определим по заданному рабочему номинальному давлению в рабочей камере:

$$F_a = p \cdot A_p = \pi p r_p^2. \quad (8)$$

Нормальное F_n и тангенциальное F_t усилия, действующие на грани торцевых зубьев, будут соответственно равны

$$\left| \frac{F_t}{F_n} \right| = F_a \left| \frac{\operatorname{tg} \alpha_z}{\cos^{-1} \alpha_z} \right|. \quad (9)$$

Внутренний диаметр трубы d_{TP} напорной магистрали определяем из условия ее пропускной способности при допустимой максимальной скорости потока $v_{II} = 3$ м/с.

Толщину стенки трубы напорной магистрали и ее наружный диаметр D_{TP} находим исходя из сопротивления материала трубы на разрыв.

Диаметры вала d_B вытеснителя и выходного вала гидромотора удобно принять одинаковыми и определять из условия прочности на кручение под действием максимального момента M_a .

Таким образом, методика расчета ГМАГ достаточно проста и может быть легко запрограммирована для вычислений в известных пакетах Mathlab и MathCad, что дает возможность проведения многовариантных расчетов с целью оптимизации параметров конструкции. Особенно это важно при выборе гибридного привода для самодвижущих тяжелых машин [11–13].

Пример расчета основных параметров низкооборотного гидромотора с высоким крутящим моментом

В качестве исходных данных примем:

– частота вращения выходного вала ГМ $\omega = 1$ об/с;

– максимальный момент на выходном валу гидромотора $M_a = 1$ кНЧм;

– давление в напорной магистрали гидромотора $p = 32$ МПа;

– число торцевых зубьев на вытеснителе $n_z = 8$.

Тогда с использованием зависимостей (1–9) получим следующие расчетные данные:

– выходная мощность гидромотора $P_{\Gamma} = 62,8$ кВт;

– расчетный рабочий объем гидромотора $q_{\Gamma} = 0,226$ л;

– кратность действия вытеснителя за один оборот вала $n_k = 16$;

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

– максимальный расход рабочей жидкости, потребляемой гидромотором, $Q_{\Gamma}=0,245$ л/с.

Для определения объема рабочей камеры гидродвигателя найдем диаметр трубчатого вала ГМ, который воспринимает крутящий момент $M_a=1$ кНЧм. Расчеты дают следующие данные о вале, который работает на кручение с допускаемым напряжением $[\tau]=30$ МПа и модулем сдвига для стали $G=8 \cdot 10^4$ МПа.

Наружный диаметр вала $D=80$ мм, толщина стенки $S=5$ мм; полярный момент сопротивления $W_p=33,1$ см³, полярный момент инерции $J_p=166$ см⁴, площадь поперечного сечения $A=11,8$ см².

В результате расчета вала получаем касательные напряжения $\tau=30$ МПа $=[\tau]$, угол закручивания вала $\theta=0,0075$ рад/м (что меньше допустимого, равного 0,017 рад.) и большой запас (2, 3) по углу закручивания.

Произведем расчет на прочность корпуса ГМ, который выполним из трубы, способной выдержать давление рабочей жидкости $p=32$ МПа.

Исходные данные:

- расчетное давление $p=32$ МПа;
- наружный диаметр $D_T=180$ мм;
- внутренний диаметр $d_T=160$ мм;
- толщина стенки $S_T=15$ мм;
- марка стали трубы 20;
- допускаемое напряжение $[\sigma]=180$ МПа.

Результаты расчета следующие:

– коэффициент запаса прочности трубы по толщине стенки $1,09 > 1$;

– расчетная толщина стенки трубы корпуса 14 мм (меньше принятой 15 мм), запас прочности 1,2;

– допустимое рабочее давление в трубе $[p]=36,85$ МПа, что дает запас прочности $32/36,85=1,15$ (табл. 1).

Определим внутренний диаметр напорной гидромагистральной и толщину ее стенки по

известному потоку Q_{Γ} и его скорости 3 м/с: $d_t=0,032$ м. После расчета получаем:

- наружный диаметр трубы 50 мм;
- внутренний диаметр трубы 38 мм;
- расчетная толщина стенки трубы 6 мм.

Осталось определить геометрические размеры гидромотора.

Длина хода вытеснителя в рабочей камере равна максимальной высоте торцевых зубьев в мм:

$$l_x = \pi \cdot D n_z^{-1} \sin \alpha = \pi \cdot 200 \cdot 8^{-1} \sin 45 = 55,6.$$

Общая длина рабочей камеры равна:

$$L_k = 2l_x + \Delta_{\epsilon} = 137 \text{ мм},$$

где $\Delta_{\epsilon}=25$ мм — толщина тела вытеснителя возле стенки рабочей камеры.

Объем рабочей камеры тогда составит

$$V_k = L_k \cdot A_k = 25 \cdot \pi \cdot (160/2)^2 = 5,03 \cdot 10^5 \text{ мм}^3.$$

Общая длина корпуса гидромотора складывается из толщин двух крышек $t_k=20$ мм и статора $t_s=t_x + \Delta_{\epsilon}=55+25=80$ мм.

Объем гидромотора по корпусу составит в литрах:

$$V_K = (L_k + t_s) \cdot A_K = (137 + 80)\pi(100)^2 = 6,82.$$

В этом объеме выделим размер пустот, который складывается из объема рабочей камеры и объема внутренней полости вала, что в сумме дает $V_{\Pi}=0,5$ л.

Теперь можно оценить общую массу гидродвигателя:

$$m = \gamma(V_K - V_{\Pi}) = 7,8(6,82 - 0,5) = 51 \text{ кг}.$$

Вычислим силы взаимодействия вытеснителя со статором согласно (8, 9), полагая угол наклона торцевых зубьев равным $\alpha_z=45^\circ$:

$$F_a = F_t = 186 \text{ кН}, F_n = 263,9 \text{ кН}.$$

Таблица 1

Результаты расчета трубы корпуса ГМ на прочность

Труба D, S, мм	P, МПа	T, °C	Марка стали	Ресурс, час.	$[\sigma]$, МПа	D _a , мм	sR+c, мм	$[p]$, МПа
250, 25	32	50	20	30 тыс.	180	180	14,3 < 15 выполнено	36,8 > 32 выполнено

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Таблица 2
Сравнение показателей гидромоторов

Показатели	МРФ-250/250	Новая зубчато- торцевая ГМ	Отличия, разы
Рабочий объем, см ³	250	226	0,8
Частота вращения, об/с	8	8	1,0
Давление, МПа	32	32	1
Крутящий момент, Н·м	932	1000	1,07
Мощность, кВт	45,9	50,3	1,47
Масса, кг	84	45	0,54

Таким образом, произведена оценка технических параметров зубчато-торцевой ГМ. Сравним ее показатели с примерно равным по мощности гидромотором МРФ-250/250 (табл. 2).

Как следует из таблицы 2, масса новой ГМ оказывается почти в два раза меньше за счет иной конструкции вытеснителя. Очевидно, новая конструкция после оптимизации способна достигнуть еще больших технико-экономических преимуществ.

Задачи дальнейших исследований — нахождение закономерностей и параметрических зависимостей изменения технических показателей новой ГМ при оптимизации ее конструкции, сопоставление различных конструкций ГМ с использованием критериев технической эффективности, которые удовлетворяют требованиям измеримости, полноты, безразмерности, минимальности и избыточности по методике, предложенной в работе [15].

Выводы

Существующие конструкции объемных ГМ в основном исчерпали возможности своего дальнейшего совершенствования, их интенсивные и экстенсивные параметры не вполне удовлетворяют возросшим требованиям промышленности. На основе проведенного анализа выявлены основные недостатки

существующих объемных ГМ и сформулированы главные требования, которым должны удовлетворять их конструкции.

Разработана объемная аксиальная высокомоментная низкооборотная ГМ нового поколения; она является реверсивной, обратимой и многократного действия; главная отличительная особенность — принципиально новая конструкция вытеснителя, выполненного в виде диска с лучевыми торцевыми зубьями, совершающего возвратно-поступательное и вращательное движение на валу. Следует отметить, что вытеснитель является единственным подвижным элементом в ГМ, что заметно упрощает ее конструкцию, делает ее надежной и долговечной.

Новая конструкция аксиальной высокомоментной гидромашины с зубчато-торцевым вытеснителем имеет следующие отличия:

1. Простое преобразование вращательного движения в поступательное и наоборот, обеспечение реверсивности, т. е. изменение направления вращения, простота конструкции немногочисленных деталей и узлов, удобство монтажа и обслуживания, обусловленная этим относительно низкая стоимость изготовления и эксплуатации.

2. Многократное действие, когда за один оборот вала происходит несколько циклов работы вытеснителя (до 50 и более), что позволяет получить высокое значение крутящих моментов (до 10 кН и более) и работать с частотой вращения от 0,01 до 2...5 Гц при номинальном рабочем давлении 25...32 Мпа.

3. Большой диапазон изменения интенсивных параметров — крутящего момента, мощности и числа оборотов — при низких значениях экстенсивных параметров (габаритов и массы); изменение основных параметров ГМ можно обеспечить путем варьирования числа и наклона зубьев на торце вытеснителя, что ведет к пересмотру лишь ее габаритно-массовых показателей.

4. Свойство обеспечивать высокий крутящий момент при низких оборотах вращения делает данную ГМ наиболее соответствующей для использования в тяжелой технике, особенно для горной промышленности при

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

подземной (комбайны, лебедки, конвейеры и др.) и открытой (экскаваторы, бульдозеры, трейлеры, грузовики) разработке сырьевых ресурсов.

5. Возможность комплектации ГМ из набора унифицированных секций путем последовательного или параллельного их соединения, причем при четном числе секций достигается минимальный уровень вибраций.

6. Технические показатели ГМ за счет малых габаритных размеров и большой мощности на единицу массы позволяют осуществить прямое соединение двигателя с исполнительным органом по прогрессивной

гибридной схеме, отказаться от громоздких и малонадежных редукторов и длинных валов, широко использовать схемы «статор — колесо», допуская применение при эксплуатации негорючих водосодержащих (огнестойких) рабочих жидкостей.

7. Широкая область промышленного применения — от стационарных установок вплоть до транспортных машин с безредукторными приводами, в том числе в гусеничных тракторах, экскаваторах, карьерных автосамосвалах в качестве гидромотор-колес бортового хода и др.

Список источников

1. Башта Т. М. Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем. М. : Машиностроение, 1974. 605 с.
2. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Я. Н. Вильнер [и др.] ; под общ. ред. Б. Б. Некрасова. Мн. : Выш. шк., 1985. 382 с.
3. Никитин О. Ф., Холин К. М. Объемные гидравлические и пневматические приводы М. : Машиностроение, 1981. 269 с.
4. Эрнст В. Гидропривод и его промышленное применение : пер. с англ. М. : Машигиз, 1963. 492 с.
5. Roux N. Design of a Hydraulic Axial Piston Pump. Cranfield University, School of Engineering, Design of Rotating Machines, 2008. 92 p.
6. Лозовецкий В. В. Гидро- и пневмосистемы транспортно-технологических машин : учеб. пособие. СПб. : Лань, 2012. 560 с.
7. Лепешкин А. В., Михайлин А. А. Гидравлические и пневматические системы : учебник. М. : Академия, 2004. 336 с.
8. Mackay R. C. The Practical Pumping Handbook. 1st ed. Oxford : Elsevier Advanced Technology, 2004. 384 p.
9. Петров В. А. Гидрообъемные трансмиссии самоходных машин. М. : Машиностроение, 1988. 248 с.
10. Объемные гидропривод и гидропневмоавтоматика / Г. А. Аврунин [и др.]. Харьков : ХНАДУ, 2008. 416 с.
11. Chen J.-Sh. Energy Efficiency Comparison between Hydraulic Hybrid and Hybrid Electric Vehicles // Energies. 2015. No. 8 (6). P. 4697–4723. DOI: 10.3390/en8064697
12. Hellsing J. Electric hybrids — also for heavy vehicles and machines // Volvo Technology : Presentation at IFS meeting in Eskilstuna. 2008. 23 p.
13. Design and validation of a novel hydraulic hybrid vehicle with wheel motors / H. Zhou [et al.] // Science Progress. 2020. Vol. 103 (1). 25 p. DOI: 10.1177/0036850419878024
14. Литвинский Г. Г. Высокомоментные объемные гидромашины многократного действия // Избранные научные труды. Алчевск : ДонГТУ, 2018. С. 411–417.
15. Литвинский Г. Г. Обоснование критериев технической эффективности объемных гидромашин // Промислова гідроліка і пневматика. 2011. № 2. С. 24–26.

© Литвинский Г. Г.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ЭМС ДонГУ Кононенко А. П.,
д.т.н., проф. каф. ГЭС ДонГТУ Корнеевым С. В.

Статья поступила в редакцию 11.03.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Литвинский Гарри Григорьевич, д-р техн. наук, профессор каф. геотехнологии и безопасности производств

Донбасский государственный технический университет,

г. Алчевск, Россия,

e-mail: ligag@ya.ru

Litvinsky G. G. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, e-mail: ligag@ya.ru)

DEVELOPMENT OF AXIAL HYDRAULIC MACHINE DESIGN WITH TOOTHED-END DISPLACER

There has been considered the problem of state and prospects for applying volumetric piston hydraulic machines (HM) in heavy industries. It is shown that there is a need to move to hybrid gearless drives using low-speed, high-torque piston type HMs. The advantages and disadvantages of the radial and axial-piston type HMs are analyzed, and the directions for their improvement are pointed out. The requirements to be met by the designs of volumetric HMs are formulated. The work aimed to create a new type of axial-piston HM of multiple action, with a wide range of speeds and low overall and mass indicators. As a result, a volumetric axial high-torque low-speed HM of a new generation, inversed, reversed and repeated, whose main distinguishing feature is a fundamentally new design of the displacer, made in the form of a disk with end teeth, performing reciprocating and rotary motion on the shaft, has been developed. Methodology for calculating HM is proposed, which can be programmed using Mathlab and MathCad packages. The new HM has several displacer operation cycles (up to 50 and more) per one shaft revolution, which results in high-torque values (up to 10 kN and more) and rotation frequency from 0,01 to 2...5 Hz at nominal working pressure of 25...32 MPa. The HM allows the motor to be directly connected to the operating member in an advanced hybrid scheme without bulky and unreliable gearboxes and long shafts. The HM in the scheme "stator-wheel" is the most suitable for application in heavy machinery, especially for mining industry in undermining (harvesters, winches, conveyors, etc.) and open (excavators, bulldozers, trailers, trucks) development of raw materials resources.

Key words: axial hydraulic machine, displacer, torque moment, rotational speed, stator-wheel, hybrid drive, construction, accounts, parameters.

References

1. Bashta T. M. Volumetric pumps and hydraulic motors for hydraulic systems [Ob'emnye nasosy i gidravlicheskie dvigateli gidrosistem]. M. : Mashinostroenie, 1974. 605 p. (rus)
2. Vil'ner Ya. N. [et al.] Reference book on hydraulics, hydraulic machine and hydraulic drives [Spravochnoe posobie po gidravlike, gidromashinam i gidroprivodam]. Under the general editorship of Nekrasova B. B. Minsk : Vyssh. shk., 1985. 382 p. (rus)
3. Nikitin O. F., Holin K. M. Volumetric hydraulic and pneumatic drives [Ob'emnye gidravlicheskie i pnevmaticheskie privody]. M. : Mashinostroenie, 1981. 269 p. (rus)
4. Ernst W. Hydraulic drive and its industrial applications [Gidroprivod i ego promyshlennoe primeneniye]. Translated from English. M. : Mashgiz, 1963. 492 p. (rus)
5. Roux N. Design of a Hydraulic Axial Piston Pump. Cranfield University, School of Engineering, Design of Rotating Machines, 2008. 92 p.
6. Lozovetskiy V. V. Hydro- and pneumatic systems of transport-technological machines : study letter [Gidro- i pnevmosistemy transportno-tekhnologicheskikh mashin: ucheb. posobie]. SpB. : Lan', 2012. 560 p. (rus)
7. Lepeshkin A. V., Mihajlin A. A. Hydraulic and pneumatic systems : textbook [Gidravlicheskie i pnevmaticheskie sistemy : uchebnyk]. M. : Akademia, 2004. 336 p. (rus)
8. Mackay R. C. The Practical Pumping Handbook. 1st Edition Oxford : Elsevier Advanced Technology, 2004. 384 p.
9. Petrov V. A. Hydraulic transmissions of self-propelled machines [Gidroob'yomnye transmissii samohodnykh mashin]. M. : Mashinostroenie, 1988. 248 p. (rus)

10. Avrunin G. A. [et al.] *Volumetric hydraulic drive and hydropneumatic automatics [Ob''emnye gidroprivod i gidropnevmoavtomatika]*. Har'kov : KhNADU, 2008. 416 p. (rus)
11. Chen J.-Sh. *Energy Efficiency Comparison between Hydraulic Hybrid and Hybrid Electric Vehicles*. *Energies*. 2015. No. 8 (6). Pp. 4697–4723. DOI: 10.3390/en8064697
12. Hellsing J. *Electric hybrids — also for heavy vehicles and machines*. *Volvo Technology : Presentation at IFS meeting in Eskilstuna*. 2008. 23 pp.
13. Zhou H. [et al.] *Design and validation of a novel hydraulic hybrid vehicle with wheel motors*. *Science Progress*. 2020. Vol. 103 (1). 25 pp. DOI: 10.1177/0036850419878024
14. Litvinsky G. G. *High-torque volume hydraulic machines of multiple action [Vysokomomentnye ob''emnye gidromashiny mnogokratnogo dejstviya]*. *Izbrannye nauchnye trudy. Alchevsk : DonSTU*, 2018. Pp. 411–417. (rus)
15. Litvinsky G. G. *Justifying the technical efficiency criteria for volumetric hydraulic machines [Obosnovanie kriteriev tekhnicheskoy effektivnosti ob''emnyh gidromashin]*. *Promislova gidravlika i pnevmatika*. 2011. No. 2. Pp. 24–26. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Litvinsky Garry Grigorievich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Russia,
e-mail: ligag@ya.ru

УДК 550.822:622.838

EDN: GJZXJM

^{1,*}Полозов Ю. А., ²Лазебник А. Ю., ¹Смекалин Е. С.¹Донбасский государственный технический университет,²Антрацитовский факультет горного дела и транспорта ЛГУ им. В. Даля

*E-mail: uapolozov@mail.ru

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ВЫБОР СПОСОБА ЛИКВИДАЦИИ АВАРИЙНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

В статье приведен анализ технических решений при проектировании закладочных работ с целью ликвидации затопленного в результате катастрофического прорыва подземных вод вентиляционного квершлага горизонта минус 350 м рудника «Октябрьский» ГМК «Норильск-Никель». Научно обоснован выбор эффективного безлюдного способа выполнения закладочных работ с применением специальных тампонажных растворов.

Ключевые слова: рудник «Октябрьский», ликвидация горных выработок, тампонаж, тампонажные растворы, закладочные скважины.

Введение. Программой горных работ рудника «Октябрьский» ГМК «Норильск-Никель» при строительстве восстающего вентиляционного закладочного горизонта минус 350 м предусматривалось сооружение вентиляционного квершлага (ВК) на ствол ВС-2 (рис. 1). При прохождении квершлага ВК на отметке 392,99 м от сопряжения № 10 из опережающего шпура в центре выработки был получен водоприток $20 \text{ м}^3/\text{ч}$, который через семь суток увеличился до катастрофической величины $2000 \text{ м}^3/\text{ч}$ [1].

Горная выработка ВК проходила в породах мантуровской свиты среднего девона, горные породы которой представлены мергелями и кавернозными доломитами, подверженными процессам карстообразования (рис. 2).

При проходке шахтных стволов рудника из этих отложений никаких водопритоков встречено не было, поэтому любые негативные предпосылки проходки ВК полностью отсутствовали [1].

С целью предупреждения затопления всего вентиляционно-закладочного горизонта минус 350 м в 19 м от сопряжения № 10 была обустроена гидроизоляционная перемычка.

Однако надежная локализация аварийной ситуации может быть достигнута только при

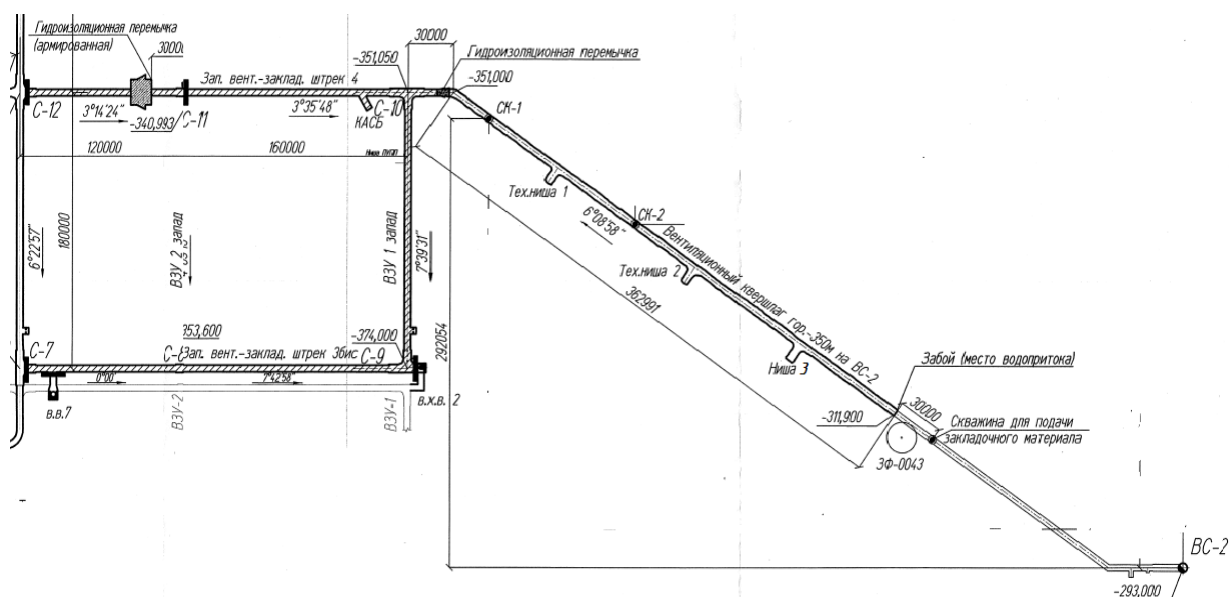
полной закладке квершлага ВК от места устройства гидроизоляционной перемычки до забоя выработки. Это позволит исключить возможность прорыва подземных вод из затопленного квершлага ВК на нижележащие горные работы в случае нарушения сплошности горного массива при отработке запасов полезного ископаемого.

На примере ликвидации аварийной ситуации при затоплении квершлага ВК горизонта минус 350 м на ствол ВС-2 рудника «Октябрьский» приведено обоснование технических решений при выборе способов и технологии закладки затопленных протяженных горных выработок.

Актуальность работы. Актуальность данной работы связана с выбором эффективного способа и технологии нагнетания закладочных смесей при ликвидации затопленной аварийной выработки для обеспечения безопасных условий вскрытия и отработки запасов на нижних горизонтах.

Цель работы — анализ горно-геологических и гидрогеологических условий в районе сооружения вентиляционного квершлага ВК на ствол ВС-2, установление причин катастрофического прорыва подземных вод в выработку и обоснование способа и технологии ликвидации аварийных работ при закладке затопленной подземной горной выработки.

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ



НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

в рамках строительства вентиляционно-закладочного комплекса горизонта минус 350 м. Крезь выработки комбинированная (набрыз-гбетон, ж/б анкера и сетка).

Вентиляционный квершлаг на всем своем протяжении от сопряжения С-10 западного уклона пройден по породам мантуровской свиты среднего девона D_{2mt} без каких-либо осложнений и водопритокков. При подходе горной выработки к почве Юктинской свиты среднего девона, представленной известняками, доломитами и мергелями с прослоями гипсов и ангидритов, был получен водоприток, который за несколько дней увеличился до катастрофических значений порядка $2000 \text{ м}^3/\text{час}$ (рис. 2).

Для безопасного ведения горных работ вблизи места прорыва техническими решениями ГМК «Норильский никель» в настоящее время реализовано сооружение герметизированной перемычки мощностью 10 м с последующим заполнением прилегающих к квершлагу выработок закладочным материалом, осуществлено бурение семи тампонажных скважин ТМП1–ТМП7 с поверхности вокруг зоны прорыва и нагнетание вокруг зоны прорыва тампонажных растворов [1]. Выполненными работами положительного результата достигнуто не было.

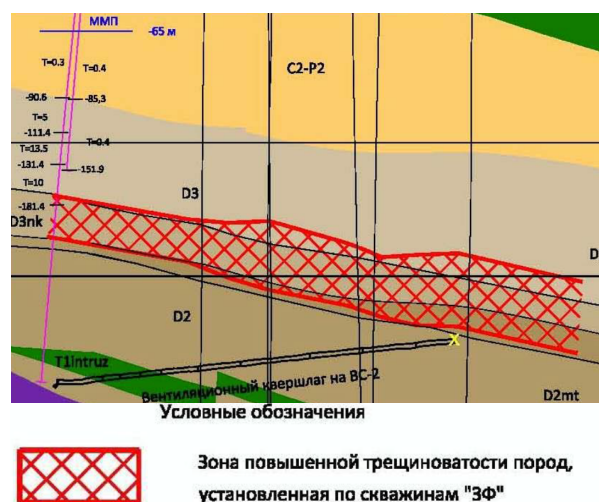


Рисунок 2 — Геологический разрез по оси квершлага ВК-2 в месте прорыва подземных вод

Анализ причин аварийной ситуации с катастрофическими прорывами подземных вод в квершлаг показывает следующее:

1. Встреча квершлагом ВК-2 интенсивно трещиноватых и закарстованных пород Юктинской свиты среднего девона.

2. Наличие крупных тектонических нарушений, ранее прослеженных по кровле девона и имеющих направление север — юг.

3. Наличие, предположительно, протяженных карстовых зон, обладающих большими объемами заполненных водой пустот и имеющих гидравлическую связь с тектоническими нарушениями и вмещающими трещиноватыми породами.

Опасность ведения очистных горных работ под квершлагом № 2 определяется развитием процессов сдвижения горного массива над очистными выработками в результате извлечения руды. Деформация горного массива приведет к развитию зоны открытых водопроводящих трещин, в пределах которой происходит многократное увеличение фильтрационных свойств вмещающих пород. Поэтому руководством ГМК «Норильский никель» было принято решение о консервации горизонта минус 350 м.

При обосновании технических решений по закладке и выборе способа ликвидации затопленной горной выработки были приняты во внимание следующие специфические условия рудника «Октябрьский»:

– вентиляционный квершлаг на ствол ВС-2 вентиляционного закладочного горизонта минус 350,0 м проходил с подъемом под углом 6° к горизонту.

По длине ликвидируемой части квершлага имеются три технологические ниши между пикетами ПК 5–6, ПК 17–18, ПК 26–27;

– вентиляционный квершлаг от установленной гидроизоляционной перемычки до забоя (абс. отм. — 308 м) полностью затоплен;

– зафиксированное давление (напор) подземных вод в квершлаг на уровне изоляционной перемычки составляет 2,4 МПа;

– вентиляционный квершлаг свободен от оборудования на всем протяжении;

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

– вмещающие вентиляционный квершлаг горные породы — водоносные, с наличием систем трещин и карстовых пустот, это значительно усложнит процесс сооружения закладочных скважин;

– температурный режим подземных вод, по данным информационного отчета ООО «Норильскгеология», не превышает 2,5 °С. Температура воды из разведочного шпура, пробуренного в забое вентиляционного квершлага горизонта минус 350 м, составила порядка 5 °С;

Учитывая перечисленные выше горно-технические условия, применение сухой механической закладки путем засыпки через скважины с поверхности земли невозможно. Также не представляется возможным вариант гидравлической закладки путем прокладки по выработке нагнетательного трубопровода для закачки через перемычку тампонажного раствора.

В конкретных горно-геологических условиях рудника «Октябрьский» наиболее оптимальным и надежным способом закладки является заполнение внутреннего пространства вентиляционного квершлага твердеющим тампонажным раствором через закладочные скважины, пробуренные с поверхности земли по оси выработки.

На основании этого предусматривается использование для закладки квершлага Комплексного метода тампонажа НПО «Спец-тампонажгеология», нашедшего широкое применение при погашении старых горных работ под гражданскими и промышленными объектами, а также при ликвидации наклонных шахтных стволов [5–7].

Применение такого способа закладки позволяет все работы, включая бурение скважин, приготовление и нагнетание тампонажного раствора, выполнить с поверхности земли с использованием высокопроизводительного бурового и тампонажного оборудования в запланированные сроки.

Закладку вентиляционного квершлага предусматривается производить способом «снизу-вверх», т. е. в направлении от гидроизоляционной перемычки, возведенной за сопряжением С-10, до забоя квершлага

в месте прорыва воды. Это позволит повысить надежность изоляции вентиляционного квершлага со стороны изоляционной перемычки и уверенно ликвидировать квершлаг до его забоя.

При этом исключаются какие-либо дополнительные мероприятия по спуску из квершлага вытесняемой воды в процессе нагнетания тампонажного раствора. Фактически процесс вытеснения воды из выработки будет происходить по тем же каналам, по которым подземные воды поступали в забой квершлага.

Описание рецептуры раствора и принципа его выбора. Для закладки вентиляционного квершлага наиболее оптимальным, по нашему опыту, является применение глиноцементных тампонажных растворов. Глиноцементные тампонажные растворы представляют собой высококонсистентные стабильные системы на водной основе, в состав которых входят глина, вяжущее вещество-структурообразователь (цемент) и ускоритель схватывания (жидкое стекло). Рекомендуемый типовой состав, структурно-механические и реологические характеристики глиноцементных тампонажных растворов, разработанных на базе качественных каолиновых глин, которым должны соответствовать тампонажные растворы для закладки вентиляционного квершлага, приведены в таблице 1.

На интенсивность структурообразования влияет температура окружающей среды, что нужно учитывать при производстве закладочных работ. Кинетика изменения пластической прочности глиноцементных систем в зависимости от температуры окружающей среды приведена в таблице 2.

Методика расчета технологических параметров закладки. В первую очередь закладочный тампонажный раствор должен подаваться через закладочную скважину № 1, пробуренную сразу за изоляционной перемычкой. Раствор распространяется вверх по квершлагу к следующей закладочной скважине № 2, как показано на рисунке 3. В этом случае скважина № 2 будет выполнять функцию контрольной. Через

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

нее осуществляется контроль за распространением раствора по горной выработке.

Накопление тампонажного раствора на почве горной выработки в водной среде вокруг закладочной скважины происходит, как было установлено лабораторными и производственными исследованиями, с углом естественного растекания (откоса) порядка 30° по отношению к горизонтали.

В связи с тем, что процесс закладки производится порционно, по мере приготовления тампонажного раствора, то при нагнетании очередной порции раствору приходится преодолевать сопротивление, т. е. прорывать уже стабилизировавшийся тампонажный раствор для образования канала в нем, чтобы продолжить заполнение квершлага.

Учитывая характер растекания раствора в выработке, канал всегда образуется в

кровле, а его размеры условно будут равны диаметру закладочной скважины.

Перепад давления, необходимый для сдвига слоя стабилизировавшегося закладочного раствора с образованием канала в кровле выработки, позволяет рассчитать расстояние между закладочными скважинами, а следовательно, определить их необходимое количество:

$$\Delta P = \frac{2P_m(t) \cdot L}{r_c}, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где $P_m(t)$ — прочность структуры глиноцементного тампонажного раствора в зависимости от времени стабилизации, МПа;

L — длина канала, соответствующая расстоянию между закладочными скважинами, м;

r_c — радиус закладочной скважины, вскрывшей кровлю выработки.

Таблица 1

Характеристика типового глиноцементного тампонажного раствора

№ п.п.	Состав 1 м ³ тампонажного раствора	Плотность, кг/м ³	Структурная пластическая прочность, кПа				Динамическое напряжение сдвигу, Па	Допустимая пластическая прочность, МПа
			Время стабилизации, час					
			1	4	24	286		
1	Глинистый раствор — 0,96 м ³ , плотностью 1200 кг/м ³	1250	0,3	0,5	1,6	45	50–200	0,02
	Сульфатостойкий портландцемент М400м — 100 кг							
	Силикат натрия —10 кг							

Таблица 2

Кинетика изменения пластической прочности глиноцементных систем в зависимости от температуры окружающей среды

№ п.п.	Время стабилизации глиноцементного раствора	Пластическая прочность P_m , кПа	
		Температура, °С	
		5°	20°
1	1 мин	2,0–3,1	2,2–2,5
2	10 мин	2,2–3,4	3,1–3,6
3	30 мин	2,7–3,9	3,0–5,1
4	60 мин	2,9–4,8	4,1–7,9
5	120 мин	3,1–7,9	7,9–17,7
6	240 мин	3,6–11,6	33,1–72,5
7	1 сутки	45,2–77,5	348–742

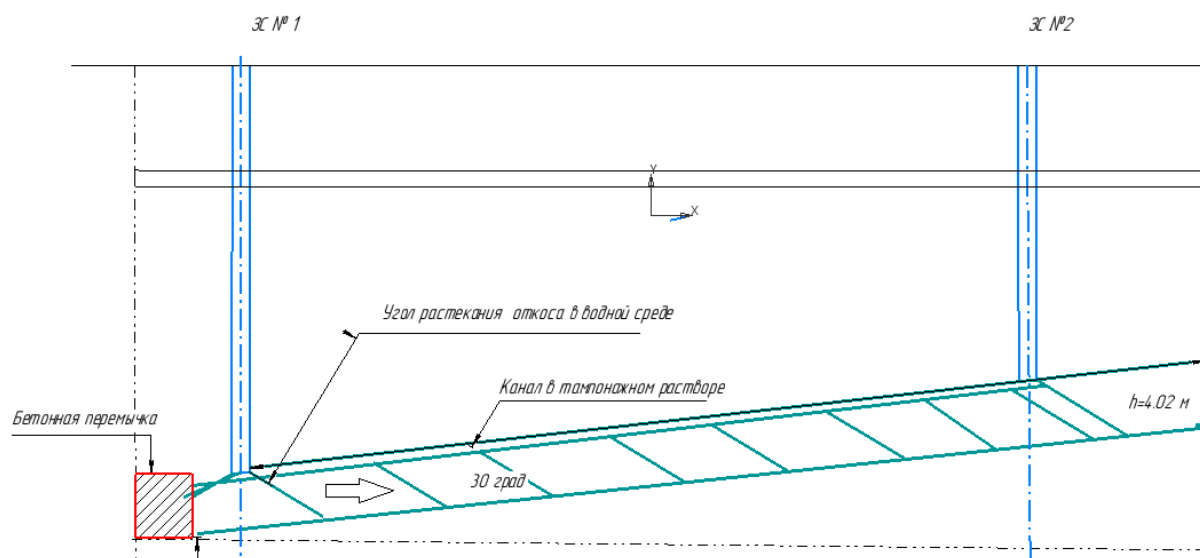


Рисунок 3 — Принципиальная схема закладки вентиляционного квершлага на ВС-2 через закладочные скважины

Решая уравнение (1) относительно L , определяем возможную длину канала, а следовательно, и максимальное расстояние между скважинами для конкретного тампонажного оборудования и времени стабилизации тампонажного раствора:

$$L = \frac{\Delta P \cdot r_c}{2P_m(t)}, \text{ м.} \quad (2)$$

Перепад давления на продольное сопротивление тампонажного раствора сдвигу в образуемом канале равен

$$\Delta P = P_{заб} - P_{г.с.}, \text{ МПа,} \quad (3)$$

где $P_{заб}$ — давление тампонажного раствора на забое закладочной скважины, вскрывшей кровлю горной выработки, МПа;

$P_{г.с.}$ — гидростатический напор подземных вод на глубине кровли горной выработки, МПа.

Давление тампонажного раствора на забое скважины $P_{заб}$ не должно превышать давление гидроразрыва горных пород на этой глубине $P_{г.с.}$ во избежание бесконтрольного его прорыва в вышележащие слои горных пород над кровлей выработки.

Тогда давление на устье закладочной скважины для образования канала в кровле горной выработки равно

$$P_y^k = P_{г.п.} + P_{г.с.}^g - P_{г.с.}^{m.p.}, \text{ МПа,} \quad (4)$$

где $P_{г.п.}$ — давление гидроразрыва для горных пород, МПа;

$P_{г.с.}^{m.p.}$ — гидростатическое давление столба тампонажного раствора на забое закладочной скважины, МПа.

Расчет давления гидроразрыва горных пород для практических задач может быть определен по эмпирической формуле [6]:

$$P_{г.п.} = 0,286 \cdot K_y \cdot H, \text{ кгс/см}^2 \quad (5)$$

где H — вышележащая над кровлей вентиляционного квершлага толща горных пород, м;

K_y — коэффициент условий работы, принимаем равным 1,0.

Результаты расчетов давления гидроразрыва по данной методике для мест пересечения закладочных тампонажных скважин с крепью квершлага приведены в таблице 3.

Обоснование количества закладочных тампонажных скважин. Расстояние между тампонажными скважинами зависит от возможности продавливания канала в стабилизированном тампонажном растворе в кровле выработки после каждой технологической остановки процесса нагнетания.

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Время остановки процесса нагнетания может достигать от нескольких часов до суток.

С учетом ограничения по подавлению гидроразрыва и гидрорасчленения горных пород, а также конкретных структурно-механических характеристик тампонажного раствора рассчитывается длина канала для принятия инженерного решения о расстоянии между скважинами. Выполним расчет длины канала по уравнению (2) для закладочной скважины № 10, находящейся в месте прорыва подземных вод, на основании следующих исходных данных:

$P_{зab}$ — минимальная величина допустимого давления нагнетания на уровне кровли выработки, составляет 11,21 МПа (табл. 3);

$P_{г.с.}$ — напор подземных вод, составляет 24 кг/см², т. е. 2,4 МПа;

r_c — радиус тампонажной скважины при перебурке кровли крепи квершлага колонкой диаметром 93 мм. Тогда $r_c = 4,65$ м;

P_m — пластическая прочность тампонажного раствора через 1 сутки при температуре 50 °С, составляет 0,432 МПа (табл. 1).

Подставляя численные значения указанных величин в уравнение (2), получим величину $L = 47$ м, что является критическим расстоянием между соседними скважинами.

Учитывая возможные отклонения в рецептуре и температурных условиях в

квершлага, что может увеличить пластическую прочность, принимаем расстояние между скважинами 40 м.

Определение мест заложения тампонажных скважин и их количество производится с учетом следующих факторов:

1. Протяженность вентиляционного квершлага от гидроизоляционной перемычки до аварийного забоя, согласно плану вентиляционного закладочного горизонта минус 350 м, составляет 362,991 м.

2. Гидроизоляционная перемычка расположена на расстоянии 30,0 м от центра сопряжения С-10 закладочного горизонта минус 350 м.

3. Абсолютная отметка почвы квершлага за гидроизоляционной перемычкой минус 351,00 м.

4. Вентиляционный квершлаг имеет три ниши, как показано на рисунке 1:

– технологическая ниша № 1 между пикетами ПК6 и ПК7 имеет длину 7,5 м и поперечное сечение 23,4 м². Объем — 175 м³;

– технологическая ниша № 2 между пикетами ПК17 и ПК18 имеет длину 10,5 м и поперечное сечение 20 м². Объем — 175 м³.

– технологическая ниша № 3 между пикетами ПК26 и ПК27 имеет длину 25 м и поперечное сечение 25,3 м². Объем — 620 м³.

Таблица 3

Результаты расчетов давления гидроразрыва

Номер закладочной скважины	Мощность вышележащей толщи пород над кровлей квершлага, м	Давление гидроразрыва, МПа	Примечания
1	2	3	4
1	433,0	12,38	Глубины закладочных скважин принимаются равными мощности горных пород над кровлей вентиляционного квершлага
2	431,5	12,33	
3	427,5	12,22	
4	423,0	12,09	
5	418,5	11,97	
6	414,0	11,84	
7	409,5	11,71	
8	404,02	11,56	
9	401,0	11,46	
10	392,2	11,21	
11	401,0	11,46	

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

С учетом вышеперечисленных факторов для полной закладки вентиляционного квершлага на ствол ВС-2 необходимо пробурить 10 закладочных скважин по его оси и одну дополнительную скважину для закладки глубокой, расположенной ближе к забою квершлага, ниши № 3.

В соответствии со схемой, весь квершлаг разбивается для закладки на 9 заходок, из которых крайняя I заходка имеет длину по почве квершлага 28 м, остальные заходки имеют длину по 40 м. Ниша № 3 имеет длину 22 м.

Расчетные объемы каждой из заходок приведены в таблице 4.

Таблица 4

Расчетные объемы тампонажного раствора для закладки вентиляционного квершлага

Номер заходки	Номера пикетов	Длина по кровле выработки, м	Среднее сечение в заходке, м ²	Объем тампонажного раствора, м ³	Примечание
I	1–2	28,0	16,0	450	Опрессовка тупиковой части выработки через закладочную тампонажную скважину № 10
II	2–6	44,5	15,95	865	
III	6–10	40,0+7,5	18,25	730+175	
IV	10–14	40,0	18,50	740	
V	14–18	40,0+10,5	17,95	690+230	
VI	18–22	40,0	17,75	710	
VII	22–26	40,0	18,75	750	
VIII	26–30	40,0	17,60	705	
IX	30–34	40,0	17,05	680	
X	Ниша № 3	422,0	16,0	620	
Итого:				7345	

Выполненные исследования позволили сделать следующие **выводы**:

1. Закладку затопленной части вентиляционного квершлага горизонта минус 350 м на вентиляционный ствол № 2 целесообразно выполнить путем нагнетания тампонажных растворов через вертикально-направленные скважины, что обеспечит надежную геомеханическую и гидроизоляционную безопасность горных работ рудника «Октябрьский».

2. Технология закладки затопленных наклонных горных выработок по методике, приведенной в настоящей работе, позволяет также выполнить безлюдным способом надежное погашение наклонных стволов шахт и рудников. Данная технология ранее успешно применялась для ликвидации целого ряда наклонных стволов, старых горных работ, ходков и сбоек на закрываемых шахтах в Донецком угольном бассейне.

Список источников

1. Проект (программа работ) на выполнение комплекса гидроизоляционных работ на объекте «Гидроизоляция зоны повышенного водопритока в вентиляционный квершлаг на вентиляционный ствол № 2 (ВС-2) рудника „Октябрьский“» / ООО «НПК „Геополимер“». СПб., 2021. 46 с.
2. РД 07-291-99. Инструкция о порядке ведения работ по ликвидации и консервации опасных производственных объектов, связанных с пользованием недрами // Охрана недр и геолого-маркшейдерский контроль : сборник документов. Сер. 07. М. : НТЦ ИППБ, 2009. Вып. 1. 132 с.
3. Полозов Ю. А., Лазебник А. Ю. Ликвидация затопленных наклонных стволов угольных шахт // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2023. Вып. 30 (73). С. 19–26.
4. Полозов Ю. А., Лазебник А. Ю. Ликвидация последствий техногенной катастрофы в районе провала земной поверхности на калийном руднике // Сборник научных трудов ДонГТИ. 2021. Вып. 23 (66). С. 5–12.

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

5. Комплексный метод тампонажа при строительстве шахт / Э. Я. Кипко [и др.]. М. : Недра, 1984. 243 с.

6. Тампонаж обводненных горных пород : справочное пособие / Э. Я. Кипко [и др.]. М. : Недра, 1989. 318 с.

7. Временная инструкция по тампонажу трещиноватых горных пород комплексным методом / МУП СССР. Ворошиловград, 1978. 88 с.

© Полозов Ю. А., Смекалин Е. С.

© Лазебник А. Ю.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СиГ АИГиТ ЛГУ им. В. Даля Дудка И. В.,
к.т.н., доц. каф. ГиБП ДонГТУ Леоновым А. А.*

Статья поступила в редакцию 09.01.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Полозов Юрий Аркадьевич, д-р техн. наук, профессор каф. геотехнологий и безопасности производств
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия,
e-mail: uapolozov@mail.ru

Лазебник Александр Юрьевич, старший преподаватель каф. строительства и геоконтроля
Антрацитовский факультет горного дела и транспорта ЛГУ им. В. Даля,
г. Антрацит, Россия

Смекалин Евгений Сергеевич, канд. техн. наук, доцент каф. геотехнологий и безопасности производств
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Polozov Yu. A. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, e-mail: uapolozov@mail.ru),
Lazebnik A. Yu. (Antracite Faculty of Mining and Transport of LSU named after V. Dahl, Antracite, Russia),
Smekalin Ye. S. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia)

JUSTIFYING TECHNICAL SOLUTIONS AND CHOOSING HOW TO ELIMINATE THE EMERGENCY MINE WORKINGS

The article analyzes technical solutions in the design of stowing operations aiming to eliminate the air crosscut of the minus 350 m horizon of the "Oktyabrsky" Mine of MMC "Norilsk Nickel", which was flooded as a result of the catastrophic groundwater intrusion. The choice of an effective unmanned method of performing stowing operations with the use of special plugging mortars has been scientifically substantiated.

Key words: "Oktyabrsky" Mine, elimination of mine workings, plugging, plugging mortars, stowing bore-holes.

References

1. Project (work program) for the implementation of the waterproofing complex at the site "Hydroisolation of zone of the increased water flow in the air crosscut No. 2 (BC-2) of the 'Oktyabrsky' Mine" [Proekt (programma rabot) na vypolnenie kompleksa gidroizolyacionnyh rabot na ob'ekte «Gidroizolyaciya zony povyshennogo vodopritoka v ventilyacionnyj kvershlag na ventilyacionnyj stvol № 2 (VS-2) rudnika „Oktyabr'skij“»]. ООО "NPK 'Geopolimer'". SPb., 2021. 46 p. (rus)

2. RD 07-291-99. *Instruction on the procedure for liquidation and preservation of hazardous production facilities associated with subsoil use* [RD 07-291-99. *Instrukciya o poryadke vedeniya rabot po likvidacii i konservacii opasnyh proizvodstvennyh ob"ektov, svyazannyh s pol'zovaniem nedrami*]. *Ohrana nedr i geologo-markshejderskij kontrol' : sbornik dokumentov. Ser. 07. M. : NTC IPPB, 2009. Iss. 1. 132 p. (rus)*
3. Polozov Yu. A., Lazebnik A. Yu. *Elimination of flooded inclined shafts of coal mines* [Likvidaciya zatoplenykh naklonnykh stvolov ugol'nyh shaht]. *Collection of Scientific Papers of DonSTI. 2023. Iss. 30 (73). Pp. 19–26. (rus)*
4. Polozov Yu. A., Lazebnik A. Yu. *Eliminating the consequences of a man-made disaster in the area of a potash mine ground failure* [Likvidaciya posledstvij tekhnogennoj katastrofy v rajone provala zemnoj poverhnosti na kalijnom rudnike]. *Collection of Scientific Papers of DonSTI. 2021. Iss. 23 (66). Pp. 5–12. (rus)*
5. Kipko E. Ya. [et al.] *Complex method of plugging in mine construction* [Kompleksnyj metod tamponazha stroitel'stve shaht]. M. : Nedra, 1984. 243 p. (rus)
6. Kipko E. Ya. [et al.] *Plugging of waterlogged rocks : a reference manual* [Tamponazh obvodnennykh gornyx porod : spravochnoe posobie]. M. : Nedra, 1989. 318 p. (rus)
7. *Temporary instruction on plugging of fractured rocks by complex method* [Vremennaya instrukciya po tamponazhu treshchinovykh gornyx porod kompleksnym metodom]. USSR MUP. Voroshilovgrad, 1978. 88 p. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Polozov Yuri Arkadievich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia,
e-mail: uapolozov@mail.ru

Lazebnik Aleksandr Yurievich, Senior Lecturer of the Department of Building and Geocontrol
Antracite Faculty of Mining and Transport of LSU named after V. Dahl,
Antracite, Russia

Smekalin Yevgeniy Sergeyeich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Geotechnology and Industrial Safety
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

УДК 622.837

EDN: IJXKWK

*Ларченко В. Г., Мележик А. И., *Коваленко Е. В.*
Донбасский государственный технический университет
**E-mail: ck@dontu.ru*

ЗАВИСИМОСТЬ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТ КАЧЕСТВА ПРОЕКТА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Приведены необоснованные технические решения на стадии планирования горных выработок, ставшие причиной концентрации максимальных деформаций земной поверхности, приведшие к сверхдопустимому крену шахтного копра, простоя шахты, разрыву трубы оросительной системы, образованию трещин земной поверхности шириной до 0,8 м и уступов высотой более 0,3 м.

Ключевые слова: *качество инженерного обеспечения проектных работ, причины концентрации деформаций земной поверхности, снижение потерь угля в целиках, экономическая эффективность шахт.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Эффективность работы угольных шахт Донбасса зависит от многих горнотехнических, геологических факторов и качества инженерного обеспечения на всех этапах разведочных, проектных и горных работ. Около 25 % оставшихся балансовых запасов угля в Донбассе находятся под застроенными территориями, коммуникациями и природными объектами, безопасная разработка которых возможна только с внедрением мер их защиты. Вертикальные шахтные стволы с копрами и подъемными машинами защищают от вредного влияния подземных разработок предохранительными целиками. Границы предохранительных целиков для охраны вертикальных стволов определяют от защищаемого участка, который должен включать стволы, копры, подъемные машины, надшахтные здания и берму, как и было сделано на шахте «Павлоградская». Но копер шахты наклонился на величину, больше допустимого крена. Причиной наклона копра явилось одновременное совмещение двух факторов: одностороннего отхода очистного забоя от границы предохранительного целика, вызвавшего оседание и наклон земной поверхности по направлению движения очистного забоя с последующим дренированием пльвунгов по образовавшимся трещинам основной кров-

ли пласта; бурения скважины над этой же лавой и использования воды из пльвунгов для технических нужд шахты. Работа шахты была остановлена. Только после восстановления копра в вертикальное положение, подъемной машины, рельсовых путей мостовых кранов промплощадки в горизонтальное положение результаты ошибочных решений были исправлены, и шахта возобновила добычу угля.

От разведки месторождений полезных ископаемых (МПИ), проектирования, работы горных предприятий качество технических решений влияет на параметры сдвижений и деформаций земной поверхности, выбор мер охраны подрабатываемых сооружений и на эффективность угольной отрасли. Выявление малоамплитудных тектонических нарушений на стадии детальной геологической разведки МПИ является полезным, необходимым при планировании подготовительных и очистных выработок, позволит исключить строительство зданий над выходами сместителей нарушений под наносы, чем минимум в два раза уменьшит деформации земной поверхности и обеспечит возможность своевременно внедрить меры защиты подрабатываемых сооружений и коммуникаций.

При выборе участка под промышленную площадку шахты необходимо учитывать: рельеф местности с целью исключе-

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

ния затопления стволов паводковыми или дождевыми водами; свести к минимуму объем земляных работ при строительстве зданий, проектировании железной и автодороги; розу ветров при планировании административно-бытового комбината, сооружений и коммуникаций, породного отвала, угольного бункера, что в совокупности позволит уменьшить стоимость строительства шахт и обеспечит более благоприятные условия в период рациональной добычи угля.

Целью работы является анализ влияния и повышение качества инженерных решений на всех этапах освоения полезных ископаемых для исключения концентрации деформаций земной поверхности и снижения стоимости мер защиты подрабатываемых сооружений и коммуникаций.

Объект исследования — концентрация максимальных деформаций подработанной земной поверхности при добыче угля подземным способом.

Предмет исследования — причины концентрации сдвижений и деформаций подработанного массива горных пород и земной поверхности при подземной разработке свиты угольных пластов.

Изложение материала. Анализ влияния технических решений и качества инженерных проектов на всех этапах подземной разработки угольных месторождений необходим для повышения эффективности горных предприятий, снижения потерь и себестоимости тонны угля. Определение малоамплитудных тектонических нарушений толщи горных пород на стадии детальной геологической разведки и выходов плоскостей сместителей нарушений под четвертичные отложения позволит определить участки концентрации максимальных сдвижений и деформаций земной поверхности при подработке над нарушениями, исключить строительство зданий и коммуникаций на этих участках или своевременно внедрить оптимальные меры защиты планируемых к подработке объектов, так как над выходами нарушений под

наносы горизонтальные деформации растяжений минимум в два раза больше растяжений над разрезной печью (рис. 1), которые считались максимальными. Этот, установленный инструментальными равноточными наблюдениями, факт необходимо учитывать при планировании сооружений и коммуникаций на подрабатываемых территориях.

При планировании зданий и коммуникаций за пределами промышленной площадки необходимо определять допустимые деформации по методике «Правил подработки...» [1] и ожидаемые деформации по методике ДонГТУ [2–5]. Если ожидаемые деформации земной поверхности превышают допустимые, то подработка зданий и коммуникаций должна производиться с применением мер их защиты. Если принятые меры защиты не обеспечивают нормальных условий эксплуатации подрабатываемых сооружений или экономически не являются целесообразными, то под такими объектами необходимо оставлять предохранительные целики. Размеры предохранительных целиков под вертикальные стволы с жесткой крепью, оборудованных постоянным подъемом, копрами, в соответствии с «Правилами ...» [1, 6] рекомендовано определять на вертикальных разрезах по углам охраны $\delta_1 = \gamma_1 = 75^\circ$; $\beta_1 = \delta_1 - 0,8\alpha$. $\delta = 63^\circ$ при $\alpha = 15^\circ$ независимо от глубины подработки Н, что противоречит теоретическим исследованиям [2–5] и натурным наблюдениям в антрацитовых районах Восточного Донбасса [7]. При глубине залегания пласта 1000 м, мощности пласта 1 м марки угля антрацит построен предохранительный целик под промышленную площадку шахты размером 100 на 100 метров с двумя вертикальными стволами, копрами, подъемными машинами по методике «Правил...» [1] (рис. 2, трапеция 1–4, показанная пунктирными линиями). Размер бермы 20 метров. Площадь предохранительного целика, построенного по методике [1], составила 623795 м^2 .

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

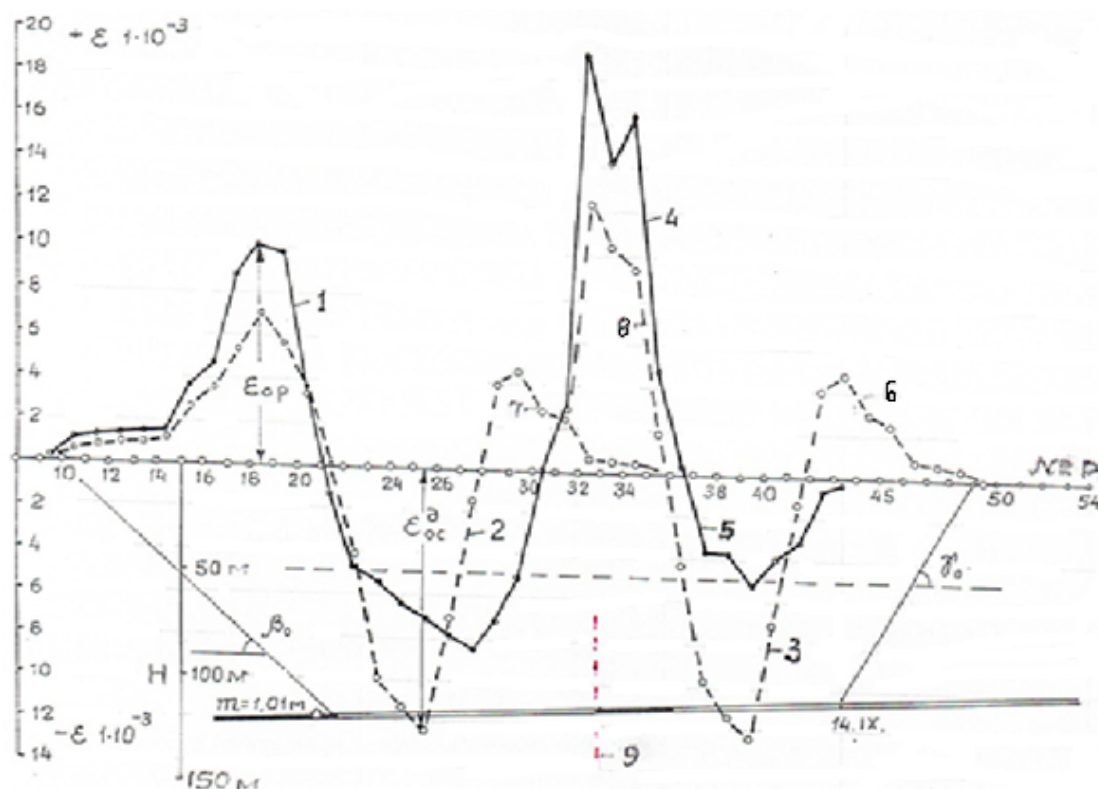


Рисунок 1 — Графики горизонтальных деформаций земной поверхности по станции № 12 шахты «Степная»: 1 — растяжений после окончания процесса сдвижения над разрезной печью; 2, 3 — сжатий при отношении $D_1/H=0,6-0,7$ в динамической полумульде; 4 — растяжений над целиком угля; 5 — сжатий после окончания процесса сдвижения; 6, 7 — растяжений над движущимся очистным забоем; 8 — растяжений новой образующейся полумульды; 9 — тектоническое нарушение

В тех же горно-геологических условиях в антрацитовых районах Донбасса построен предохранительный целик под промышленную площадку шахты аналогичных размеров с двумя вертикальными стволами по методике ДонГТУ [2–5] (рис. 2, трапеция 5–8). Площадь целика, построенного по методике ДонГТУ, равна 263625 м^2 . Разность площадей целиков по двум методикам составила 360170 м^2 . При плотности антрацита $1,5 \text{ т/м}^3$ потери угля в целиках по методике ДонГТУ на 540250 т меньше, чем по методике «Правил...» [1]. Значит, балансовые запасы угля шахты в этом случае на 540 тысяч тонн больше, чем по методике [1], что позволит существенно увеличить продолжительность и улучшить эффективность работы шахты.

Выемку запасов угля вокруг предохранительного целика под промышленную площадку целесообразно выполнить при подходе очистного забоя к целику, когда горизонтальные деформации растяжений земной поверхности над границей целика (рис. 1, ломаная 6) в два раза меньше, чем при отходе забоя от границы целика (рис. 1, ломаная 1), что целесообразно учитывать при планировании сооружений промышленной площадки шахты и позволит уменьшить деформации коммуникаций (железной и автомобильной дорог, трубопроводов, ЛЭП) над границей целика и увеличить срок их безаварийной эксплуатации. В случае прохода очистного забоя вдоль границы целика величины деформаций земной поверхности будут иметь промежуточные значения.

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

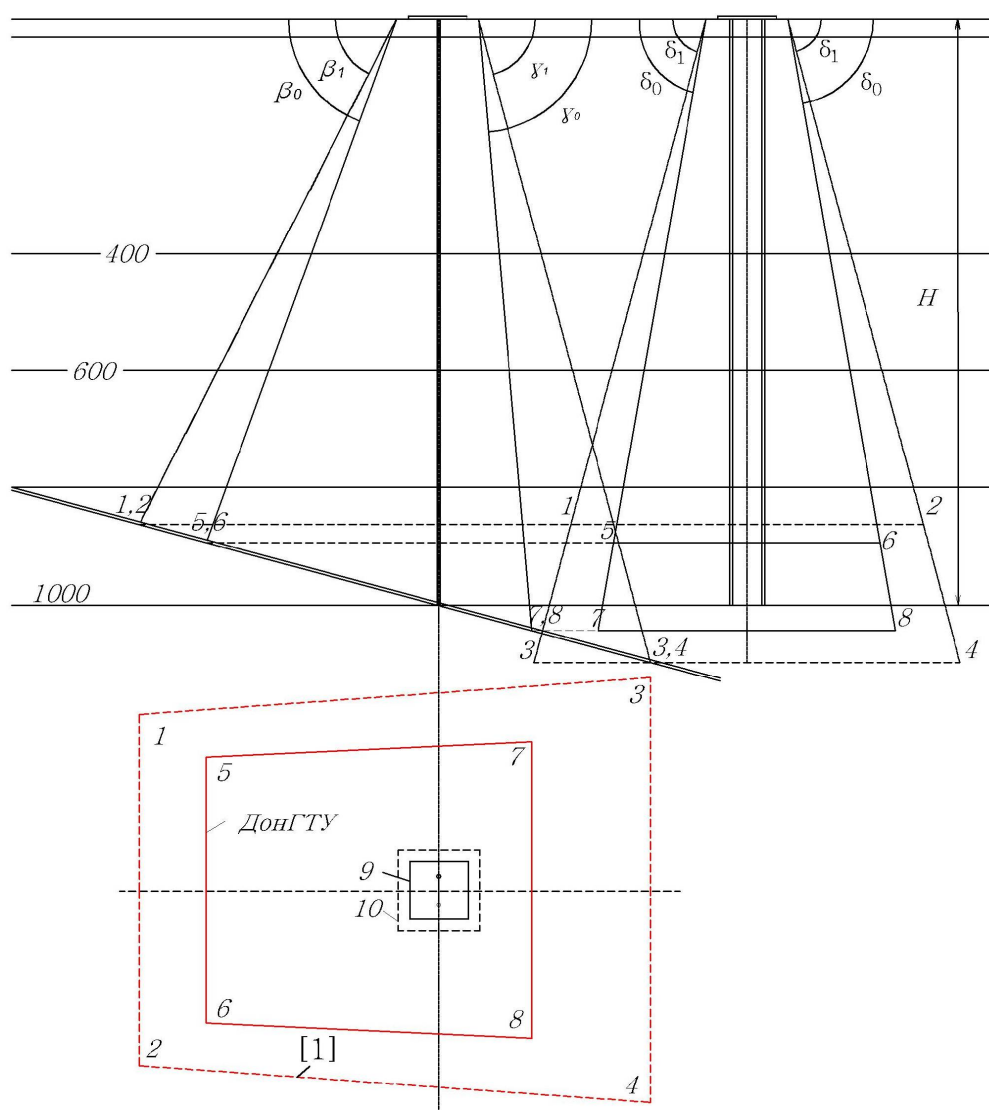


Рисунок 2 — Построение предохранительного целика под промышленную площадку шахты по методикам [1] (трапеция 1–4) и ДонГТУ (трапеция 5–8)

В процессе планирования подготовительных и очистных выработок следует избегать отношений размеров выработанного пространства D к глубине подработки H , равных 0,5, на длительное время, чтобы не произошло суммирование горизонтальных деформаций сжатий (и аналогично кривизны вогнутости) от двух полумульд (рис. 1, ломаные 2, 3; рис. 3), которые в 1,2 раза больше максимальных растяжений ϵ_p (рис. 1, ломаная 1) над монтажной камерой, принимаемых за максимальные при выборе мер защиты подрабатываемых объектов. При дальнейшем увеличении размеров вы-

работанного пространства, увеличении отношений D_1/H горизонтальные деформации сжатий на участке их концентрации уменьшаются в 2,3 раза (рис. 1, ломаная 5), что установлено частотными равноточными инструментальными наблюдениями над движущимися очистными забоями (наблюдательные станции № 12, 13 лавы 606, 604 шахты «Степная»).

Над оставленным у тектонического нарушения амплитудой менее одного метра целиком шириной 30 м произошло суммирование горизонтальных деформаций растяжений ϵ_p (рис. 1, ломаная 4;

станция № 12, лава 606) и аналогично кризисны выпуклости как результат сложения деформаций растяжений над остановленным забоем у целика и над вновь образующейся динамической полумульдой за целиком (рис. 3). Суммарное значение горизонтальных деформаций растяжений над целиком достигло величины $+19,3 \cdot 10^{-3}$, что более чем в четыре раза превысило растяжения над движущимся очистным забоем (рис. 1, ломаная 6) в аналогичных горно-геологических условиях, и указывает на необходимость выявления малоамплитудных тектонических нарушений геологической разведкой с целью исключения строительства сооружений и коммуникаций над ними или внедрения специальных мер защиты подрабатываемых объектов.

Особо ответственного планирования подготовительных и нарезных горных выработок требует разработка свиты сближенных пластов, где поднятие почвы дренажного штрека, расположенного на 10 м выше кровли разрабатываемого пласта труднодоступного репера № 7, на 15.05 достигло 470 мм (рис. 4). Процесс конвергенции пород продолжался, но проводить геометрическое нивелирование реперов № 7–11 в дренажном штреке на следующие даты наблюдений (рис. 4) не представилось возможным по причине активизации конвергенции в зоне опорного давления.

После разработки трех сближенных пластов с совпадающими в плане подготовительными и нарезными выработками шахтой «Первомайская» ПО «Павлоградуголь» происходило нарастающее увеличение сдвижений и деформаций при повторных подработках по образовавшимся трещинам от первичной подработки. Суммирование горизонтальных сдвижений и деформаций от повторных подработок вызвало образование трещины разрыва земной поверхности над разрезными печами на всю их длину шириной до 0,8 м [3, рис. 6], которые даже зерноуборочный комбайн обходил. Над совпадающими в плане бортовыми штреками после разработки трех угольных пла-

стов на глубинах 135–170 м в полумульдах по простиранию пластов от суммарных сдвижений и деформаций образовались трещины разрыва земной поверхности с уступом более 0,3 м и глубиной 2,5 м над всей длиной выемочного столба (рис. 5). Концентрация сдвижений и деформаций земной поверхности при разработке свиты сближенных пластов угля и совпадении в плане нарезных и подготовительных выработок приводит к повреждениям коммуникаций [3] с возможными тяжелыми последствиями, так как в Донбассе развита сеть железных дорог, автомагистралей с транспортировкой грузов различной опасности, газопроводы, водоводы, нефтепровод и плотины водохранилищ.

Исключить приведенные концентрации максимальных деформаций земной поверхности и подрабатываемых объектов можно смещением в плане нарезных выработок (монтажных камер) на половину длины полумульды по падению пластов L_1 (формула 1), границ остановок очистных забоев по восстановлению пластов на половину длины полумульды L_2 (формула 2) или смещением в плане бортовых подготовительных выработок на половину длины полумульды по простиранию пласта L_3 (формула 3):

$$L_1 = H_1 [\operatorname{ctg} \beta_0 + \operatorname{ctg} (\psi_1 + \alpha)], \text{ м,} \quad (1)$$

$$L_2 = H_2 [\operatorname{ctg} \gamma_0 + \operatorname{ctg} (\psi_2 - \alpha)], \text{ м,} \quad (2)$$

$$L_3 = H_{cp} (\operatorname{ctg} \delta_0 + \operatorname{ctg} \psi_3), \text{ м,} \quad (3)$$

где H_1 , H_2 , H_{cp} — глубины соответственно над разрезной печью в полумульде по падению и над границей целика в полумульде по восстановлению пласта; средняя глубина (рис. 2);

β_0 , γ_0 , δ_0 — граничные углы соответственно в полумульдах по падению, восстановлению и простиранию пластов [2];

ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 — углы полных сдвижений в полумульдах по падению, восстановлению и простиранию пластов [2];

α — угол залегания пластов.

Внедрение смещений в плане совпадающих нарезных и подготовительных выработок на половину длин полумульд при повторных подработках более чем в два раза позволит уменьшить максимальные деформации земной поверхности, сооружений и коммуникаций. При синхронной разработке двух сближенных пластов и

смещении в плане монтажных камер на половину длины полумульды L_1 , а бортовых подготовительных выработок на половину L_3 в итоге получим компенсацию деформаций земной поверхности с разными знаками (растяжений со знаком «+», сжатий со знаком «-», кривизны выпуклости и вогнутости).

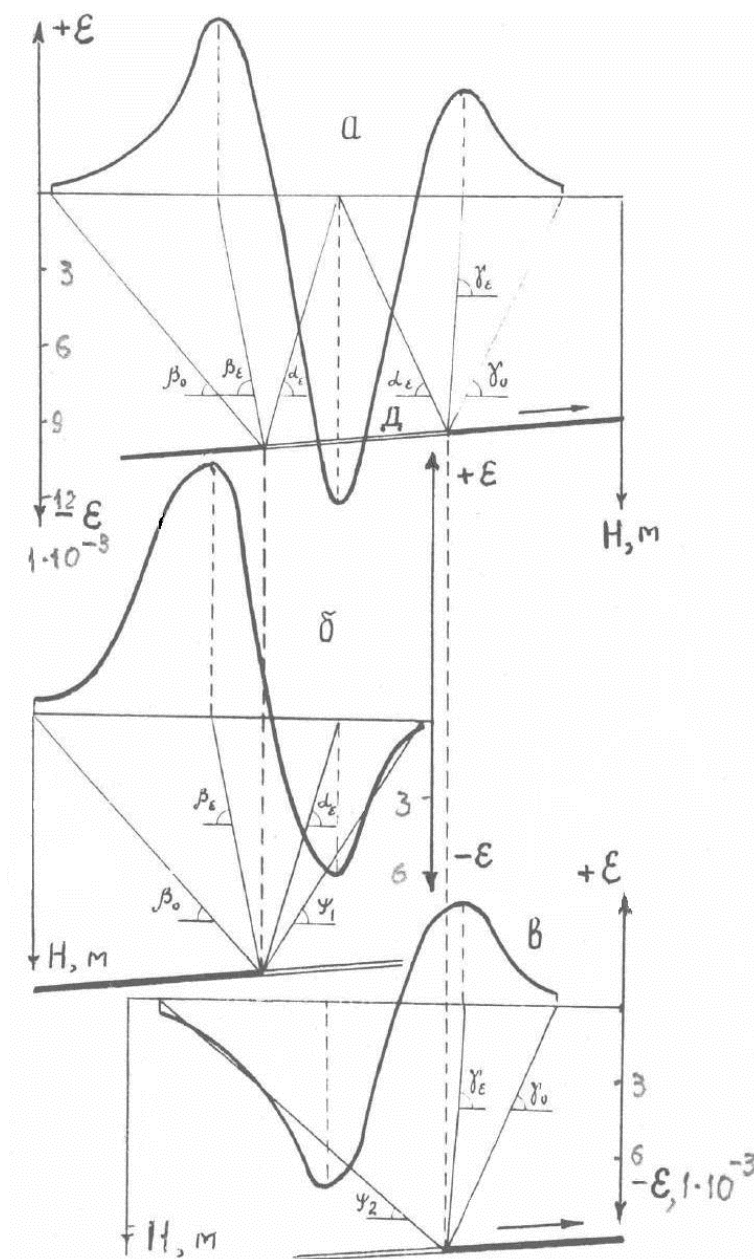


Рисунок 3 — Схема концентрации горизонтальных деформаций сжатий ϵ_c земной поверхности (а); кривые горизонтальных деформаций при отходе очистного забоя от целика (б); кривые деформаций над движущимся очистным забоем в процессе образования динамической полумульды (в)

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

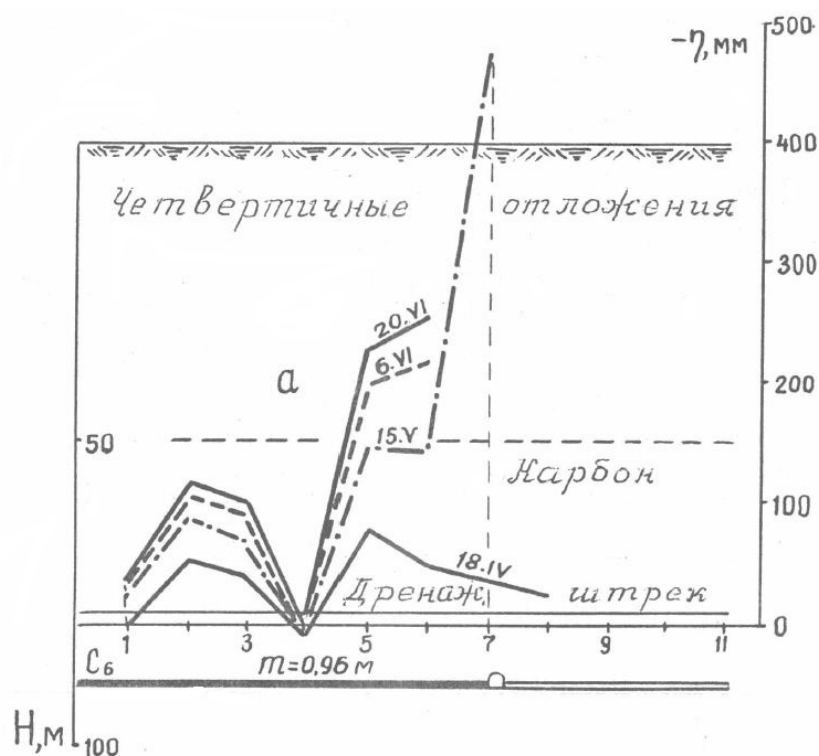


Рисунок 4 — Графики поднятий (пучения) пород почвы дренажного штрека в зоне опорного давления по станции № 12, лава 606 шахты «Степная»



Рисунок 5 — Трещина с уступом над совмещенными в плане бортовыми штреками после разработки трех сближенных пластов шахтой «Первомайская», станция № 11

Равноточными инструментальными наблюдениями установлено, что граничные углы γ_0 и углы полных сдвижений ψ_2 по критерию наклонов больше, чем по критерию горизонтальных деформаций. Следовательно, длины полумульд L_ϵ по критерию горизонтальных деформаций на

40 % больше длин полумульд по критерию наклонов L_i (рис. 6), что необходимо учитывать при выборе мер защиты сооружений различного вида (башенного копра, которому опасными являются наклоны, или газопровод, для которого опасны горизонтальные деформации).

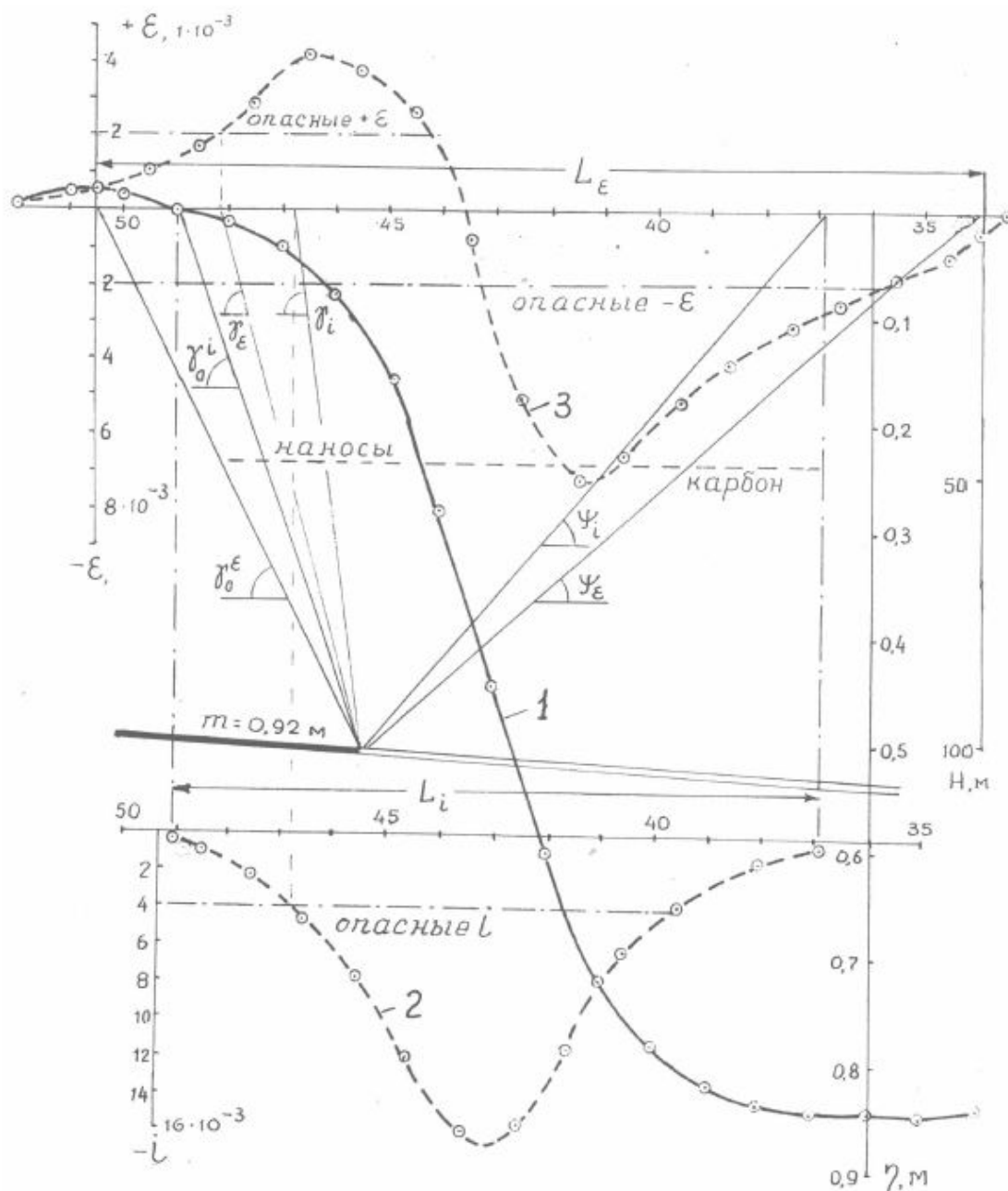


Рисунок 6 — Графики оседаний земной поверхности (1), наклонов (2) и горизонтальных деформаций (3) над движущимся очистным забоем по станции № 13, лава 604 шахты «Степная» ПО «Павлоградуголь»

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Расчет ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности на подрабатываемых территориях Восточного Донбасса после исключения из реестра действующих нормативных документов РФ устаревших «Правил...» [1, 6] рекомендуем выполнять по методике ДонГТУ [2–5] с предварительным анализом горно-геологических факторов и инженерных решений на всех этапах освоения угольных месторождений. Убедительным примером такого анализа являются смежные лавы № 606 и 604 шахты «Степная», где над лавой 606 максимальные горизонтальные деформации растяжений земной поверхности, засеянной пшеницей Петропавловского района Днепропетровской области, достигли величины $+19,3 \cdot 10^{-3}$ (рис. 1) по причине необоснованного оставления целика у нарушения с амплитудой менее одного метра, что почти на порядок (в 9,65 раза) больше опасных горизонтальных

деформаций и в 4,6 раза больше деформаций растяжений земной поверхности над соседней лавой 604 на участках плоского дна в главном сечении динамической полумульды (рис. 1, ломаная б). После образования динамической полумульды на участках плоского дна мульды сдвигения и деформации земной поверхности, подобно волне, синхронно перемещаются над движущимся очистным забоем (рис. 7), где каждая точка (репер) земной поверхности в первых двух частях траектории движется по дуге окружности определенного радиуса, вначале навстречу очистному забою, затем за ним [3].

После остановки очистного забоя у границы шахты (блока) оседания земной поверхности за счет уплотнения подработанной толщи и дренирования плывунов увеличились на 3 %, горизонтальные деформации растяжений — до 4 %, а наклоны земной поверхности уменьшились на 5 %.

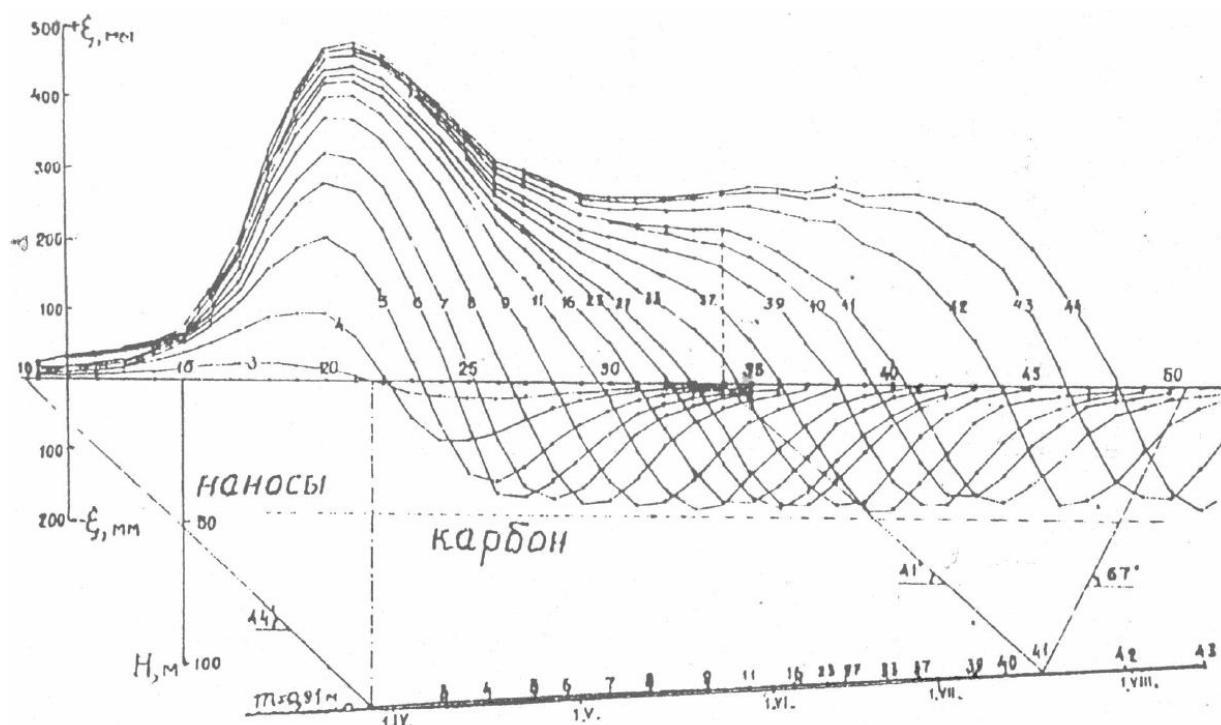


Рисунок 7 — Кривые горизонтальных сдвижений ξ в главном сечении мульды над лавой № 604 по станции № 13 шахты «Степная»

Выводы:

1. В период отсутствия действующих нормативных «Правил ...» [1, 6] и с ежегодным увеличением глубины очистных работ для расчета ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности, необходимых для выбора мер защиты подрабатываемых зданий, сооружений, коммуникаций и природных объектов в Восточном Донбассе, рекомендуем использовать скорректированную и подтвержденную натурными наблюдениями [7] методику ДонГТУ [2–5], внедрение которой только на одной шахте позволит сократить потери антрацита в целике под промышленную площадку по пласту мощностью 1 м на глубине 1000 м на 540 тысяч тонн (рис. 2).

2. Приведенные факты необоснованных инженерных решений, которые вызвали концентрацию деформаций земной поверхности и причинили экономический ущерб аграрному сектору после разрыва трубы водоема для полива овощных культур при повторной подработке [3] (станция № 8 шахты «Степная»), привели к простоя шахты «Павлоградская» и затратам на устранение крена копра, образованию трещин разрыва земной поверхности шириной до 0,8 м [3] и с уступом более 0,3 м (рис. 5) после разработки трех сближенных пластов над совпадающими в плане нарезными и подготовительными выработками (станция № 11, шахта «Первомайская»), вызывают дополнительные затраты средств и могут привести к тяжелым последствиям при подработке сооружений и разветвленной сети коммуникаций в Донбассе.

3. Для обучающихся по специализации «Маркшейдерское дело» и маркшейдеров-

производственников в работах [2–5] приведены угловые параметры процесса сдвижения, вычисленные по методике ДонГТУ длины полумульд L_1 , L_2 , L_3 , величины сдвижений и деформаций земной поверхности в главных сечениях мульд вкрест и по простиранию пологих угольных пластов марок А, Ж, Д, Г, мощностью 1 м, при отношениях мощности наносов h к глубине H менее 0,3, в условиях полной подработки и глубинах от 100 до 1300 м с целью оптимального планирования очистных работ под застроенными территориями, исключения концентрации деформаций под сооружениями, выбора эффективных мер защиты подрабатываемых объектов, сокращения потерь балансовых запасов угля, повышения рентабельности шахт Донбасса.

4. Относительные величины максимальных оседаний земной поверхности q_o , горизонтальных сдвижений α_o , коэффициентов остаточных расслоений подработанного массива пород K_p , увеличения угловых параметров при глубинах очистных работ более 600 м K_y требуют подтверждения по мере накопления результатов натуральных инструментальных наблюдений.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на организацию и проведение натуральных инструментальных наблюдений для определения параметров процесса сдвижения земной поверхности при добыче угля на больших глубинах, подтверждения коэффициентов формул расчета ожидаемых сдвижений и деформаций подрабатываемых сооружений q_o , α_o , K_p и K_y , зависящих от степени метаморфизма толщи горных пород, глубины очистных работ и, при необходимости, на их корректировку.

Список источников

1. ГСТУ 101.00159226.001-2003. *Отраслевой стандарт Украины. Правила подработки зданий, сооружений и природных объектов при добыче угля подземным способом*. К. : УкрНИМИ НАН Украины, 2004. 128 с.
2. Ларченко В. Г., Коваленко Е. В., Маталкина Ю. А. *Корректировка методики расчета ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности при подработке на больших глубинах // Наукоемкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2024. Вып. 3 (77). С. 30–40. EDN HAJRFF*

3. Ларченко В. Г., Коваленко Е. В., Хоружая Н. В. Методика расчета ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности в полумульдах вкрест простирания пластов // *Наукоемкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве*. 2024. Вып. 5 (79). С. 33–46. EDN MKKBPJ

4. Ларченко В. Г., Коваленко Е. В., Маталкина Ю. А. Зависимость сдвижений и деформаций земной поверхности от глубины подработки // *Труды РАНИМИ: VI международная научно-техническая конференция «Горная геология, геомеханика и маркшейдерия»* : сб. науч. тр. Донецк : РАНИМИ МО и Науки ДНР, 2019. № 8 (23). Ч. 1. С. 125–134.

5. Ларченко В. Г., Маталкина Ю. А. Сдвижение горных пород при добыче угля подземным способом : учебное пособие. Алчевск : ФГБОУ ВО ДонГТУ, 2024. 147 с.

6. ПБ 07-269-98. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. СПб. : Межотраслевой науч. центр ВНИМИ, 1998. 291 с.

7. Посыльный Ю. В., Джулай А. А., Тетерин Е. А. Максимальные оседания земной поверхности в антрацитовых районах Донбасса // *Сборник науч. трудов ШИЮФ ГТУ (НПИ) Ч. 2 Перспективы развития Восточного Донбасса*. Новочеркасск : Набла, 2007. С. 282–284.

© Ларченко В. Г., Мележик А. И., Коваленко Е. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. ГБП ДонГТУ Леоновым А. А.,
главным маркшейдером ООО «НПК Перспектива» Трезневой Д. С.**

Статья поступила в редакцию 25.02.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Ларченко Виталий Григорьевич, канд. техн. наук., доцент
г. Алчевск, Россия

Мележик Александр Иванович, канд. техн. наук., доцент каф. геотехнологий и безопасности
производств
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Коваленко Елена Владимировна, директор Центра карьеры
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: ck@dontu.ru

Larchenko V. G., Melezhik A. I., *Kovalenko E. V. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: ck@dontu.ru)

DEPENDENCE OF SHIFTS AND DEFORMATIONS OF THE EARTH'S SURFACE ON THE QUALITY OF THE DESIGN OF MINE WORKINGS

Unsubstantiated technical decisions at the planning stage of mine workings are given, which caused the concentration of maximum deformations of the Earth's surface, resulting in excessive roll of the mine headframe, downtime of the mine, rupture of the irrigation system pipe, formation of cracks in the Earth's surface up to 0,8 m wide and hitches over 0,3 m high.

Key words: quality of engineering support for design works, causes of the concentration of surface deformations, reduction of coal losses in abutments, economic efficiency of mines.

References

1. GSTU 101.00159226.001-2003. Industry standard of Ukraine. Rules of undermining buildings, structures and natural objects during coal mining by underground method [Otraslevoj standart

Ukrainy. Pravila podrobotki zdanij, sooruzhenij i prirodnyh ob''ektov pri dobyche uglya podzemnym sposobom]. K. : UkrNIMI NAN Ukraine, 2004. 128 p. (rus)

2. Larchenko V. G., Kovalenko E. V. Matalkina Yu. A. Adjustment of calculation procedure of the expected shifts and deformations of the Earth's surface during undermining at great depth [Korrektirovka metodiki rascheta ozhidaemyh sdvizhenij i deformacij zemnoj poverhnosti pri podrobotke na bol'shih glubinah]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2024. Iss. 3 (77). Pp. 30–40. EDN HAJRFF (rus)

3. Larchenko V. G., Kovalenko E. V. Khoruzhaia N. V. Calculation procedure for the expected Earth's surface shifts and deformations in half-moulds across the strike of strata [Metodika rascheta ozhidaemyh sdvizhenij i deformacij zemnoj poverhnosti v polumul'dah vkrest prostiraniya plastov]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2024. Iss. 5 (79). Pp. 33–46. EDN MKKBPJ (rus)

4. Larchenko V. G., Kovalenko E. V. Matalkina Yu. A. Dependence of shifts and deformations of the Earth's surface on the undermining depth [Zavisimost' sdvizhenij i deformacij zemnoj poverhnosti ot glubiny podrobotki]. Transactions of RANIMI: VI mezhdunarodnaya nauchno tekhnicheskaya konferenciya "Gornaya geologiya, geomekhanika i markshejderiya" : the collection. Donetsk : RANIMI Ministry of Education and Science of the DPR, 2019. No. 8 (23). Ch. 1. Pp. 125–134. (rus)

5. Larchenko V. G., Matalkina Yu. A. Rock displacement in underground coal mining : textbook [Sdvizhenie gornyh porod pri dobyche uglya podzemnym sposobom : uchebnoe posobie]. Alchevsk : FSBEI HE "DonSTU", 2024. 147 p. (rus)

6. PB 07-269-98. Rules for the protection of structures and natural objects from the harmful effects of underground mining operations at coal deposits [Pravila ohrany sooruzhenij i prirodnyh ob''ektov ot vrednogo vliyaniya podzemnyh gornyh razrabotok na ugol'nyh mestorozhdeniyah]. SPb. : Mezhotraslevoj nauch. centr VNIMI, 1998. 291 p. (rus)

7. Posyl'nyj Yu. V., Dzhulaj A. A., Teterin E. A. Maximum Earth's surface subsidence in anthracite areas of Donbass [Maksimal'nye osedaniya zemnoj poverhnosti v antracitovyh rajonah Donbassa]. Sbornik nauch. trudov Shakhtinskiy in-t (filial) YuRGU (NPI). Ch. 2. Perspektivy razvitiya Vostochnogo Donbassa. Novocherkassk : Nabla, 2007. Pp. 282–284. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Larchenko Vitaliy Grigoriyevich, PhD in Engineering, Associate professor
Alchevsk, Russia

Melezhik Aleksandr Ivanovich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department
of Geotechnology and Industrial Safety
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Kovalenko Elena Vladimirovna, Director of Career Centre of DonSTU
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia,
e-mail: ck@dontu.ru

МЕТАЛУРГИЯ

METALLURGY

Русанов И. Ф., *Куберский С. В., Проценко М. Ю., Кононенко Г. И.

Донбасский государственный технический университет

**E-mail: Skuberskiy@yandex.ru*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛЫ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ МЕТОДАМИ ПИРОМЕТАЛЛУРГИИ

Сделан анализ работы ТЭС России и народных республик Донбасса. Приведены состав золы ТЭС Донбасса, существующие направления их переработки. Предложено для извлечения полезных компонентов из золы использовать метод металлургического восстановления.

Ключевые слова: зола ТЭС, состав золы, использование золы, металлургическое восстановление, ферросилиций.

По данным British Petroleum, опубликованным в ежегодном Статистическом обзоре мировой энергетики 2023 (Statistical Review of World Energy 2023), в 2022 году в мире было выработано 29165,1 тераватт-часов (ТВт·ч) электроэнергии, в том числе странами Евросоюза — 2812 ТВт·ч (9,6 %) [1].

Россия входит в пятерку крупнейших в мире стран производителей электроэнергии (табл. 1).

В 2022 году основная доля всей электроэнергии в мире (60,6 %) выработана на тепловых электростанциях, а в странах Евросоюза — 37,7 %.

При этом ТЭС, работающие на нефти, выработали 728,8 (2,5 %), газе — 6531,4 (22,7 %) и угле — 10317,2 (35,4 %) ТВт·ч.

Мировым лидером по числу ТЭС, работающих на угле, является Китай (табл. 1). Он потребляет около половины мирового объема энергетического угля, а доля угольной генерации в стране превышает 70 % [2].

В единой энергетической системе России тепловые электростанции (ТЭС и ТЭЦ) также несут основную нагрузку по обеспечению спроса на электроэнергию. При их общей установленной мощности, равной 167 тыс. МВт (без учета мощностей электростанций Донбасса), они генерируют около 62,5 % от общего количества вырабатываемой электроэнергии. Основная масса тепловых электростанций работают на природном газе (около 73 %) и только 16 % — на угле (табл. 1).

В народных республиках Донбасса практически вся электроэнергия вырабатывается тепловыми электростанциями, работающими на местных энергетических углях марок ГСШ, АШ, Т и Г.

Удельный расход условного топлива (топлива при сгорании 1 кг которого выделяется 29,3 МДж или 7000 ккал тепла) при отпуске электрической энергии с учетом комбинированного производства электрической и тепловой энергии составляет около 300 г у.т./кВт·ч. Теплота сгорания используемых углей находится в пределах 22–27 МДж/кг, и поэтому фактический расход топлива составляет 325–400 г у.т./кВт·ч.

Так как уголь обязательно содержит в своем составе негорючие минеральные примеси (золу), его сжигание неизбежно приводит к образованию зольных отходов. Несмотря на предварительное обогащение угля, содержание золы в нем остается значительным.

Таблица 1

Количество выработанной за 2022 год электроэнергии [1]

№ п.п.	Страна	Выработка		На угле	
		ТВт·ч	%	ТВт·ч	%
1	Китай	8848,7	30,3	5397,8	61
2	США	4547,7	15,6	904,2	20
3	Индия	1858,0	6,4	1380,1	74
4	Россия	1166,9	4,0	192,3	16
5	Япония	1033,6	3,5	309,0	30

Регламентируемая ГОСТ 32347-2013 зольность (содержание негорючих примесей) может составлять от 13 до 40 %, а средняя — 25 % [3], то есть из тонны угля образуется в среднем 250 кг золы.

Не весь уголь сгорает, и в зависимости от технологического процесса сжигания часть угля остается в золе в виде недожога (потери массы при прокаливании). Высокая степень недожога невыгодна для электростанций, но полностью сжигать уголь тоже не получается — для зол разных видов углей нормативные показатели по недожогу составляют от 2 до 24 %, причем значения 2–3 % зачастую достигаются путем предварительной подготовки золы уноса к использованию.

Образующиеся на ТЭС техногенные отходы называют золошлаковыми отходами (ЗШО).

Мировое производство электроэнергии ТЭС всего мира сопровождается образованием 200–250 млн т ЗШО.

В России ежегодно образуется 25–30 млн т ЗШО, а общий их накопленный объем оценивается в 1,5–2 млрд т. Они занимают площадь порядка 28 тыс. га, что сопоставимо с территорией таких городов, как Иркутск, Красноярск или Томск [4].

При годовой выработке ТЭС республиками Донбасса 25 млрд кВт·ч электроэнергии образуется около 1,5 млн т золы.

Во многих странах утилизации образованных отходов топливно-энергетического комплекса уделяется большое внимание. В США и Великобритании утилизируется около 60 %, во Франции и Германии — 70 %, в Финляндии — 84 %, а в Нидерландах и Дании и вовсе 100 %, в Японии — практически 100 % текущего выхода ЗШО [5].

Использование отходов топливно-энергетического комплекса осуществляется в различных направлениях [6–13]. Их подробное описание сделано в работе [14].

Особого внимания заслуживают работы по разработке технологий комплексной переработки ЗШО, позволяющие получить различные виды товарной продукции на

основе железа, алюминия, титана и других элементов, выделить редкоземельные металлы и даже золото [15, 16].

Перспективными технологиями комплексного извлечения из золы ТЭС полезных компонентов могут рассматриваться такие, которые основаны на пирометаллургическом восстановлении оксидов. Однако таким технологиям пока уделяется мало внимания. В результате даже их теоретическое обоснование отсутствует.

В связи с этим **целью** работы являлось проведение анализа возможности комплексной переработки ЗШО способами пирометаллургии.

Объект исследования — золошлаковые отходы ТЭС Донбасса.

Предмет исследования — теоретические основы комплексной переработки ЗШО при высоких температурах.

Задачи исследования:

- оценка возможности использования ЗШО в качестве заменителя природных материалов в существующих восстановительных высокотемпературных металлургических процессах;

- исследование механизма алюмотермического восстановления железа и кремния ЗШО в присутствии твердого углерода.

Изложение материала. Химический состав ЗШО определяется главным образом видом топлива, а также технологией его подготовки и сжигания.

В энергетических углях Донбасса содержание золы в пересчете на сухую массу составляет 17–23 % [16]. Основными компонентами ЗШО являются оксиды SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (50–58, 18–25 и 11–17 % соответственно) и незначительное содержание CaO , MgO (по 1,5–3,0 %), TiO_2 (около 1,0 %), щелочей Na_2O , K_2O , пятиоксида фосфора P_2O_5 и серы (в сумме 3–5 %). В малых количествах (иногда меньше грамма на тонну) в зависимости от свойств сжигаемого угля содержатся практически все элементы таблицы Менделеева: щелочные и щелочноземельные металлы, различные переходные металлы (в том числе ценные, ред-

МЕТАЛЛУРГИЯ

кие и редкоземельные), кларки которых позволяют рассматривать их в качестве подлежащих извлечению (табл. 2).

Состав ЗШО разнообразен и неоднороден. Он существенно зависит от состава поставляемого угля, района его добычи и метаморфизма [15]. В связи с этим для выбора процесса комплексной переработки ЗШО необходим тщательный предварительный анализ.

Первостепенной задачей анализа является установление в каком пирометаллургическом процессе и в качестве какого природного сырьевого материала может использоваться ЗШО.

Поскольку химический состав ЗШО представлен в основном оксидами, процесс должен быть восстановительным.

Простой перерасчет показывает, что в золе среднего состава содержится около 10 % железа и 25 % кремния. Соотношение между *Fe* и *Si* равно примерно 1:3, что, согласно ГОСТ 1415-93, соответствует ферросплаву марки ФС 65 [17], и поэтому ЗШО могут рассматриваться в качестве сырья для его производства.

В пирометаллургических процессах высокотемпературное восстановление металлов производится как неметаллическими (твердый углерод, оксид углерода, водород) восстановителями, так и металлическими (алюминий, магний, кальций и другие металлы), сродство которых к кислороду больше, чем у восстанавливаемого металла.

В зависимости от восстановителя процесс называют карботермией (восстановитель *C* и *CO*), металлотермией (алюмотермия, кальцийтермия, магнийтермия, силикотермия) и водородотермией.

Карботермия и водородотермия — наиболее распространенные технологии. Они являются основой получения черных металлов в доменных печах, в процессах получения железа прямого восстановления DRI (от англ. *Direct Reduced Iron*), а также в электротермии.

В цветной металлургии с помощью карботермии получают *Pb*, *Sn*, часть *Zn* и некоторые другие металлы.

Таблица 2
Содержание химических элементов
в отвальных породах

Элемент	Содержание, мг/кг	Кларк
<i>Hg</i>	0,28–1,32	0,04
<i>Pb</i>	38,8–497,5	20
<i>Cu</i>	21,3–63,7	57
<i>As</i>	12,8–57,2	6,6
<i>V</i>	133–241,7	130
<i>Mn</i>	371– 87	650
<i>Cr</i>	112,1–159,2	100
<i>Mo</i>	2–4	2
<i>Li</i>	53,9–109,4	6
<i>Cd</i>	1,55–2,3	0,3
<i>Zn</i>	100–121,7	80
<i>C</i>	15–25 %	–

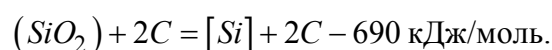
В целом до металлического состояния могут восстанавливаться только оксиды металлов, имеющих сродство к кислороду меньше, чем у восстановителя, т. е. прочность которых ниже прочности образующихся оксидов восстановителя.

При этом степень восстановления тех или иных оксидов и их распределение между жидкой, твердой и газообразной фазами определяются физико-химическими условиями конкретного процесса.

Как известно из теории и практики доменного процесса [18], помимо оксидов железа легко восстанавливаемы высшие оксиды *Mn* (*MnO*₂ и *Mn₂O₃*), *Cu₂O* и *NiO*, прочность которых ниже соответствующих оксидов *Fe*. Они восстанавливаются газами (косвенным путем) при сравнительно невысоких температурах.

Оксиды, прочность которых выше оксидов *Fe* (*Cr₂O₃*, *MnO*, *SiO₂*, *TiO₂*), восстанавливаются при высоких температурах исключительно прямым путем (твердым углеродом). Восстановленные металлы, в зависимости от их растворимости в железе, переходят в чугун или шлак.

Восстановление кремния в доменной печи идет при температурах выше 1500 °С по реакции



Так как реакция эндотермическая, выплавка ферросилиция ведется с повышенным расходом кокса (1300–1400 кг/т сплава). При этом степень восстановления Si составляет 35–50 % (содержание в сплаве не более 12–15 % Si).

Для реализации доменного процесса необходима добыча коксующихся углей, производство кокса, обогащение и окускование сырья и т. д. Все это помимо производственных затрат оказывает неблагоприятное влияние на экологическую обстановку промышленно развитых регионов.

В DRI-процессах получения железа и стали непосредственно из рудных материалов (минуя стадию выплавки чугуна в доменных печах) металл восстанавливается газами (CO , H_2), твердым углеродом или газами и твердым углеродом совместно. Процесс ведется при температуре около 1000 °С, при которой примеси (Si , Mn , P , S), содержащиеся в пустой породе руды, не восстанавливаются [19].

Электротермическая рудовосстановительная плавка является основным металлургическим процессом производства различных ферросплавов, в том числе и ферросилиция (электропечным способом выплавляют около 96 % от общего объема производства ферросплавов).

Процесс заключается в восстановлении шихты (состоящей из кварца, коксика и металлической стружки) углеродом при высоких температурах, которые создаются главным образом за счет электрической дуги в рудотермических печах мощностью до 100 МВА [20, 21].

Процесс восстановления обычно непрерывный. По мере проплавления подготовленную шихту загружают в ванну, а полученные продукты периодически выпускают из электропечи.

Все проанализированные выше процессы связаны с затратами большого количества тепловой энергии, так как реакции углетермического восстановления металлов в основном эндотермические, а получаемый продукт науглероживается, что приводит к снижению его качества.

При металлотермическом восстановлении процесс идет с выделением тепла (экзотермический), и может быть получен низкоуглеродистый продукт.

Наиболее простым и доступным методом металлотермии является алюмотермия.

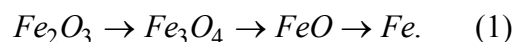
Важным этапом процесса является подготовка оксидов металлов, заключающаяся в их тщательном измельчении и смешивании с алюминиевым порошком.

Эффективность и качество процесса алюмотермии зависят от правильного подбора смеси оксидов восстанавливаемых металлов, алюмосодержащего сырья, температуры и времени проведения процесса.

При анализе процессов металлотермии обычно рассматривают восстановление одним каким-либо металлом. В случае же металлотермии оксидов ЗШО на протекание процесса и его тепловой режим будет оказывать влияние дополнительное восстановление твердым углеродом недожога.

Присутствующие в ЗШО оксиды железа, как известно, легко восстанавливаются газами CO и H_2 при умеренных температурах (до 1000 °С). Однако в системе «ЗШО — алюмосодержащий продукт» и до начала металлотермического восстановления, и в ходе его интенсивного развития газообразный восстановитель отсутствует. Поэтому восстановление железа в соответствии с основными положениями теории металлургических процессов может быть представлено следующим образом.

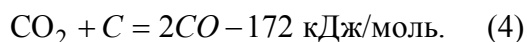
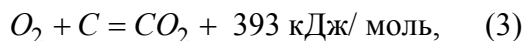
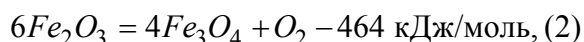
Согласно принципу последовательности превращений А. А. Байкова, восстановление железа проходит с понижением его валентности по кислороду (отношения количества атомов кислорода, приходящихся на один атом металла) по схеме



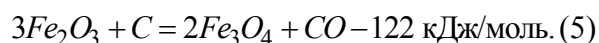
Высший оксид железа Fe_2O_3 непрочный и при нагревании подвергается термической диссоциации с переходом в Fe_3O_4 без участия восстановителя по реакции (2). Далее в результате протекания реакций (3)

МЕТАЛЛУРГИЯ

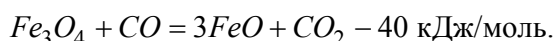
и (4) будет газифицирована часть углерода недожога:



Суммарная реакция (5) процессов первого этапа восстановления Fe имеет вид



На втором этапе Fe_3O_4 восстанавливается до FeO косвенным путем: вначале CO , образовавшимся на первом этапе, а затем газом газификации углерода недожога по реакции (4):



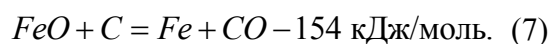
Итоговая реакция этапа имеет вид



По аналогии на третьем этапе FeO восстанавливается до металлического Fe по реакции



а итоговое уравнение реакции этого этапа имеет вид



В целом в результате суммирования реакций (5), (6) и (7) восстановление Fe ЗШО будет описываться уравнением реакции (8):



Уравнение (8) не отражает механизма процесса, а лишь показывает, что восстановление идет с расходом твердого углерода недожога с образованием CO и с поглощением большого количества тепла.

В соответствии с уравнением (8) в расчете на 100 кг ЗШО из содержащегося в них оксида Fe_2O_3 количество восстановленного углеродом недожога (C_o) железа будет равно

$$Fe = 0,7 \cdot Fe_2O_3 \text{ кг}.$$

При этом будет газифицировано

$$C_{Fe} = 0,225 \cdot Fe_2O_3 \text{ кг}$$

твердого углерода с образованием оксида углерода в количестве

$$CO_{Fe} = 0,525 \cdot Fe_2O_3 \text{ кг}$$

или

$$CO_{Fe} = 0,42 \cdot Fe_2O_3 \text{ м}^3.$$

Затраты тепла на восстановление Fe составят

$$Q_{Fe} = -3068,75 \cdot Fe_2O_3 \text{ кДж}.$$

На восстановление железа расходуется только часть углерода недожога.

Оставшийся углерод в количестве, равном

$$C_{Si} = C_{зшо} - 0,225 \cdot Fe_2O_3 \text{ кг},$$

расходуется на прямое восстановление кремния.

Возможное количество восстановленного углеродом кремния составит

$$Si_c = 1,17 \cdot (C_{зшо} - 0,225 \cdot Fe_2O_3) \text{ кг}.$$

На его восстановление будет израсходовано

$$SiO_{2c} = 2,5 \cdot (C_{зшо} - 0,225 \cdot Fe_2O_3),$$

а затраты тепла составят

$$Q_{Si} = -11500 \cdot SiO_{2c} \text{ кДж}.$$

В результате газификации твердого углерода выделится оксид углерода в количестве

$$CO_{Si} = 2,32 \cdot (C_{зшо} - 0,225 \cdot Fe_2O_3) \text{ кг}$$

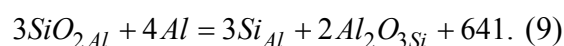
или

$$CO_{Si} = 1,86 \cdot (C_{зшо} - 0,225 \cdot Fe_2O_3) \text{ м}^3.$$

Оставшееся количество SiO_2 , равное

$$SiO_{2Al} = SiO_{2зшо} - SiO_{2c} \text{ кг},$$

должно быть восстановлено алюминием по реакции



МЕТАЛЛУРГИЯ

Тепловой эффект реакции (9) составляет +640 кДж/моль.

Расход Al на восстановление кремния равен

$$Al = 0,6 \cdot SiO_{2Al} \text{ кг.}$$

При этом образуется

$$Al_2O_3 = 1,133 \cdot SiO_{2Al} \text{ кг.}$$

Выход ферросилиция составит

$$FC = 0,7 \cdot Fe_2O_3 + 0,47 \cdot SiO_2 \text{ кг,}$$

а шлака

$$U = 100 - Fe_2O_3 - SiO_2 + Al_2O_{3Al} \text{ кг.}$$

Содержание Al_2O_3 в шлаке будет составлять 75–90 %, что в 1,3–1,5 раза больше, чем в природных бокситах и глиноземе. Поэтому такой шлак будет ценным сырьем для производства алюминия.

В результате алюмотермии выделяется

$$Q_{Al} = +3561 \cdot SiO_{2Al} \text{ кДж}$$

тепла.

Согласно правилу С. Ф. Жемчужного [22], величина $\Delta H / (M_{Si} + M_{Al_2O_3})$ для реакции (9) равна 2465 Дж/г. Такое численное значение величины приемлемо для самопроизвольного управляемого процесса металлотермии, и выделяющегося тепла достаточно для расплавления продуктов реакции и их нагрева до температуры, при которой реализуется процесс восстановления. В целом для пирометаллургического процесса переработки ЗШО методом алюмотермии при условии сжигания выделившегося CO над слоем образовавшегося шлака и с учетом дополнительного тепла, необходимого на расплавление металла и шлака, обеспечение их высокой жидкоподвижности на выпуске, а также покрытие других неучтенных расходов тепла Q_{don} , уравнение теплового баланса имеет следующий вид:

$$Q_{SiAl} + Q_{CO} = Q_{Fe} + Q_{Si} + Q_{don}. \quad (10)$$

После подстановки в уравнение (10) выражений Q , приведенных выше, приняв,

что $Q_{don} = 15 \%$ и произведя простейшие преобразования, получим следующее уравнение:

$$C_{зшо} = 0,103 \cdot SiO_2 - 0,05 \cdot Fe_2O_3 \text{ \%}.$$

Последнее уравнение позволяет установить предельное содержание недожога в ЗШО, при котором возможна пирометаллургическая переработка ЗШО алюмотермией.

Например, при среднем содержании в ЗШО $SiO_2 = 54 \%$ и $Fe_2O_3 = 14 \%$ недожог углерода может быть не более 4,8 %, что позволяет сделать заключение о необходимости удаления излишка углерода перед переработкой отхода.

При рассмотрении комплексной переработки ЗШО особое внимание уделяют возможности извлечения из них ценных, редких и редкоземельных металлов.

Наиболее распространенными методами переработки золошлаков являются магнитная сепарация, гидроциклонирование, обогащение на концентрационных столах и в концентраторах, с помощью которых может быть извлечено железо, золото, серебро и кремнезем, используемый в дальнейшем в строительной индустрии [12, 14]. Показатель извлечения редких и редкоземельных элементов с использованием указанных методов не превышает 12–15 % [15, 16].

В данном анализе этим направлениям переработки ЗШО внимания не уделено, но несомненно, что металлы и их оксиды, плавящиеся и испаряющиеся при низких температурах, в частности щелочные металлы (например, литий: $t_{пл} = 180,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_{кип} = 1342 \text{ }^\circ\text{C}$ — самые высокие из всех щелочных металлов) при алюмотермии золошлаков будут переходить в газовую фазу, из которой они могут быть успешно извлечены.

Следует отметить, что проведенный анализ носит предварительный характер, хотя и показывает возможность переработки ЗШО методом металлотермического восстановления с получением ферросилиция.

В ходе дальнейшей работы в этом направлении необходимо проанализировать кине-

тические особенности процесса, определить степень завершения реакций как расчетным, так и опытным путем, провести теплотехнические расчеты, а также разработать технологию производственного процесса.

Выплавку ферросилиция целесообразно вести в закрытых электропечах с периодическим выпуском сплава и шлака и непрерывным удалением печных газов.

Кроме того, ЗШО могут быть использованы в технологиях дугового глубинного восстановления (ДГВ) полезных для черной металлургии элементов непосредственно в жидкий чугун и сталь [23]. Наличие в составе ЗШО большого количества оксидов кремния, алюминия и железа делает их достаточно ценным сырьем для утилизации по данному методу.

Выводы и направления дальнейших исследований. Проведенный анализ показывает, что переработка золошлаковых отходов тепловых электростанций методами пирометаллургии с использованием алюмотермического восстановления принципиально возможна. Наиболее перспективными являются выплавка ферросилиция и глиноземистого шлака, а также ДГВ полезных элементов непосредственно в железоуглеродистый расплав.

Такой подход будет способствовать не только энерго- и ресурсосбережению, но и

улучшению экологической обстановки промышленно развитых регионов.

Показано, что выделяемого при алюмотермии ЗШО тепла достаточно для протекания самопроизвольного управляемого процесса (расплавления продуктов реакции и их нагрева до температуры, при которой реализуется процесс восстановления).

Установлена зависимость, позволяющая установить предельное содержание недожога в ЗШО, при котором возможна их пирометаллургическая переработка алюмотермией, и предложены направления подготовки ЗШО к переделу.

Показано, что при алюмотермии кремния возможно восстановление РЗМ и ЦЗМ, входящих в состав ЗШО. Часть этих элементов может переходить в ферросплав, сталь или чугун (в зависимости от схемы переработки ЗШО) и улучшать их свойства, а часть — в газовую фазу для последующего извлечения существующими стандартными способами.

После проведения дополнительных теоретических исследований планируются лабораторные эксперименты для разработки технологии производства ферросилиция алюмотермией кремния из ЗШО и опытно-промышленное её опробование в производственных условиях.

Список источников

1. *Statistical Review of World Energy 2023 / Energy Institute. 72nd edition. London : EI Statistical Review of World Energy, 2023. P. 52–53.*
2. Belyakov N. *Sustainable Power Generation: Current Status, Future Challenges, and Perspectives. London : Academic Press, 2019. 598 p. URL: <https://www.overdrive.com/media/4616508/sustainable-power-generation> (date of treatment: 01.03.2025).*
3. ГОСТ 32347-2013. Угли каменные и антрациты Кузнецкого и Горловского бассейнов для энергетических целей. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2013. 12 с.
4. *Энциклопедия технологий. Эволюция и сравнительный анализ ресурсной эффективности промышленных технологий / под ред. Д. О. Скобелев ; ФГАУ «НИИ „ЦЭПП“». М. ; СПб. : Реноме, 2019. 824 с.*
5. Путилин Е. И., Цветков В. С. *Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. М. : СоюздорНИИ, 2003. 60 с.*
6. *Комплексное использование золошлаковых отходов / О. В. Афанасьева, Г. Р. Мингалеева, А. Д. Добронравов, Э. В. Шамсутдинов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 7–8. С. 26–36. EDN UYCP TJ*

7. Проблемы и перспективы утилизации золошлаковых отходов ТЭЦ. Ч. 1 / Г. С. Подгородецкий [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2018. Т. 61. № 6. С. 439–446. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-439-446. EDN XSKGNF
8. A comprehensive review on the applications of coal fly ash / Z. T. Yao [et al.] // Earth-Science Reviews. 2015. Vol. 141. P. 105–121. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.11.016. EDN UOMXTL
9. Blissett R. S., Rowson N. A. A review of the multicomponent utilisation of coal fly ash // Fuel. 2012. Vol. 97. P. 1–23. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.03.024. EDN PGGOXF
10. Sett R. Flyash: characteristics, problems and possible utilization // Advances in Applied Science Research. 2017. Vol. 8 (3). P. 32–50.
11. Адеева Л. Н., Борбат В. Ф. Зола ТЭЦ — перспективное сырье для промышленности // Вестник Омского университета. 2009. № 2. С. 141–151. EDN KYSMSR
12. Анализ возможности использования золошлаковых отходов ТЭС ДНР в строительстве / С. Е. Гулько [и др.] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Инженерные системы и техногенная безопасность. 2023. Вып. 5 (163). С. 103–112. EDN PEAXSL
13. The fine high-calcium fly ash as the basis of composite cementing material / O. M. Sharonova, V. V. Yumashev, L. A. Solovyov, A. G. Anshits // Magazine of Civil Engineering. 2019. Vol. 91. No. 7. P. 60–72. DOI: 10.18720/MCE.91.6. EDN BWNRWJ
14. Худякова Л. И., Залуцкий В. А., Палеев П. Л. Использование золошлаковых отходов тепловых электростанций // XXI век. Техносферная безопасность. 2019. Т. 4. № 3 (15). С. 375–391.
15. Власова В. В., Артемова О. С., Фомина Е. Ю. Определение направлений эффективного использования отходов ТЭС // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 11. С. 36–41. DOI: 10.18412/1816-0395-2017-11-36-41. EDN ZQUBCF
16. Закономерности формирования и перспективы комплексного использования металлоносных углей восточного Донбасса / М. И. Гамов [и др.] // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 8. С. 1477–1487. DOI: 10.15372/GiG20160804. EDN WHAIFR
17. ГОСТ 1415-93 Ферросилиций. Технические требования и условия поставки. М. : Стандартинформ, 2005. 14 с.
18. Ефименко Г. Г., Гиммельфарб А. А., Левченко В. Е. Металлургия чугуна. К. : Вища школа, 1988. 212 с.
19. Товаровский И. Г., Лялюк В. П. Эволюция доменной плавки : монография. Днепрпетровск : Пороги, 2001. 424 с.
20. Рысс М. А. Производство ферросплавов. М. : Металлургия, 1985. 344 с.
21. Лякишев Н. П., Гасик В. Я., Дашевский М. И. Металлургия ферросплавов. Ч. 1. Металлургия сплавов кремния, марганца и хрома : учеб. пособие. М. : МИСиС, 2006. 117 с.
22. Теория металлургических процессов : учебник для вузов / Д. Н. Рыжонков [и др.]. М. : Металлургия, 1989. 392 с.
23. Куберский С. В. Технологические особенности дугового глубинного восстановления полезных примесей металлургических отходов для обработки железоуглеродистых расплавов // Металлург. 2024. № 4. С. 100–105. DOI: 10.52351/00260827_2024_4_100. EDN LMZPLL

© Русанов И. Ф., Куберский С. В., Проценко М. Ю., Кононенко Г. И.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МТ ДонГТУ Должиковым В. В.,
начальником патентного отдела ООО «ЮГМК» Великоцким Р. Е.**

Статья поступила в редакцию 03.03.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Русанов Игорь Фаустович, канд. техн. наук, доцент каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Куберский Сергей Владимирович, канд. техн. наук, профессор каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия, e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

Проценко Михаил Юрьевич, канд. техн. наук, доцент каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Кононенко Геннадий Иосифович, аспирант каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Rusanov I. F., *Kuberskii S. V., Protsenko M. Yu., Kononenko G. I. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: Skuberskiy@yandex.ru)

THEORETICAL ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF PROCESSING THE THERMAL POWER PLANTS ASHES BY PYROMETALLURGY METHODS

The work of TPPs in Russia and the People's Republics of Donbass was analyzed. The composition of ash from TPPs of Donbass, existing directions of their processing are given. It is proposed to use the method of metal-thermal reduction for extraction of useful components from ash.

Key words: thermal power plant ash, ash composition, ash utilization, metallothermic reduction, ferrosilicon.

References

1. Statistical Review of World Energy 2023. Energy Institute. 72nd edition. London : EI Statistical Review of World Energy, 2023. P. 52–53.
2. Belyakov N. Sustainable Power Generation: Current Status, Future Challenges, and Perspectives. London : Academic Press, 2019. 598 p. URL: <https://www.overdrive.com/media/4616508/sustainable-power-generation> (date of treatment: 01.03.2025).
3. GOST 32347-2013. Stone coals and anthracites of Kuznetsk and Gorlovsky basins for energy purposes. Technical conditions. M. : Standardinform, 2013. 12 p.
4. Encyclopedia of technologies. Evolution and comparative analysis of resource efficiency of industrial technologies [Ed-in-Ch. Skobelev D. O.] [Enciklopediya tekhnologij. Evolyuciya i sravnitel'nyj analiz resursnoj effektivnosti promyshlennyh tekhnologij]. FSAI "SRI 'CEIP'". M. ; St. Petersburg : Renome, 2019. 824 p. (rus)
5. Putilin E. I., Tsvetkov V. S. Review information of domestic and foreign experience of solid fuel combustion waste application at TPP. [Obzornaya informaciya otechestvennogo i zarubezhnogo opyta primeneniya othodov ot szhiganiya tverdogo topliva na TES]. M. : SoyuzdornII, 2003. 60 p. (rus)
6. Afanasieva O. V., Mingaleeva G. R., Dobronravov A. D., Shamsutdinov E. V. Integrated utilization of ash and slag waste [Kompleksnoe ispol'zovanie zoloshlakovyh othodov]. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki. 2015. No. 7–8. Pp. 26–36. (rus) EDN UYCPTJ
7. Podgorodetskiy G. S. [et al.]. Problems and prospects of utilization of ash and slag wastes from TPPs. Ch. 1 [Problemy i perspektivy utilizacii zoloshlakovyh othodov TEC. Ch. 1]. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Chernaya metallurgiya. 2018. Vol. 61. No. 6. Pp. 439–446. (rus) DOI: 10.17073/0368-0797-2018-6-439-446. EDN XSKGNF
8. Yao Z. T. [et al.]. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. Earth-Science Reviews. 2015. Vol. 141. P. 105–121. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.11.016. EDN UOMXTL
9. Blissett R. S., Rowson N. A. A review of the multicomponent utilization of coal fly ash. Fuel. 2012. Vol. 97. P. 1–23. DOI: 10.1016/j.fuel.2012.03.024. EDN PGGOXF
10. Sett R. Flyash: characteristics, problems and possible utilization. Advances in Applied Science Research. 2017. Vol. 8 (3). P. 32–50.
11. Adeeva L. N., Borbat V. F. TPP ash is a promising raw material for industry [Zola TEC — perspektivnoe syr'e dlya promyshlennosti]. Herald of Omsk University. 2009. No. 2. Pp. 141–151. (rus) EDN KYMSMR

12. Gulko S. E. [et al.]. Analysis of the possibility of using ash and slag wastes from TPPs of DPR in construction [Analiz vozmozhnosti ispol'zovaniya zoloshlakovykh othodov TES DNR v stroitel'stve]. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2023. Iss. 5 (163). Pp. 103–112. (rus) EDN PEAXSL
13. Sharonova O. M., Yumashev V. V., Solovyov L. A., Anshits A. G. The fine high-calcium fly ash as the basis of composite cementing material. *Magazine of Civil Engineering*. 2019. Vol. 91. No. 7. Pp. 60–72. (rus) DOI: 10.18720/MCE.91.6. EDN BWNRWJ
14. Khudyakova L. I., Zalutsky V. A., Paleev P. L. Utilization of ash and slag wastes from thermal power plants [Ispol'zovanie zoloshlakovykh othodov teplovykh elektrostancij]. *XXI century. Technosphere safety*. 2019. Vol. 4. No. 3 (15). Pp. 375–391. (rus)
15. Vlasova V. V., Artemova O. S., Fomina E. Yu. Determination of directions for the effective utilization of TPP waste [Opredelenie napravlenij effektivnogo ispol'zovaniya othodov TES]. *Ecology and Industry of Russia*. 2017. Vol. 21. No. 11. Pp. 36–41. (rus) DOI: 10.18412/1816-0395-2017-11-36-41. EDN ZQUBCF
16. Gamov M. I. [et al.]. Regularities of formation and prospects for complex utilization the metal-bearing coals of eastern Donbass [Zakonomernosti formirovaniya i perspektivy kompleksnogo ispol'zovaniya metallonosnykh uglei vostochnogo Donbassa]. *Geology and Geophysics*. 2016. Vol. 57. No. 8. Pp. 1477–1487. (rus) DOI: 10.15372/GiG20160804. EDN WHAIFR
17. GOST 1415-93. Ferrosilicon. Technical requirements and delivery conditions. M. : Standardinform, 2005. 14 p.
18. Efimenko G. G., Gimmelfarb A. A., Levchenko V. E. *Iron Metallurgy [Metallurgiya chuguna]*. K. : Vishcha shkola, 1988. 212 p. (rus)
19. Tovarovsky I. G., Lyalyuk V. P. *Evolution of blast-furnace smelting : a monograph [Evoluciya domennoj plavki : monografiya]*. Dnepropetrovsk : Porogi, 2001. 424 p. (rus)
20. Ryss M. A. *Ferroalloys production [Proizvodstvo ferrosplavov]*. M. : Metalurgija, 1985. 344 p. (rus)
21. Lyakishev N. P., Gasik V. Ya., Dashevskiy M. I. *Metallurgy of ferroalloys. Ch. 1. Metallurgy of silicon, manganese and chromium alloys : textbook [Metallurgiya ferrosplavov. Ch. 1. Metallurgiya splavov kremniya, marganca i hroma : ucheb. posobie]*. M. : MISIS, 2006. 117 p. (rus)
22. Ryzhonkov D. N. [et al.]. *Theory of metallurgical processes : textbook for universities [Teoriya metallurgicheskikh processov : uchebnik dlya vuzov]*. M. : Metalurgija, 1989. 392 p. (rus)
23. Kuberskii S. V. Technological features of arc deep recovery of useful impurities of metallurgical wastes for the treatment of iron-carbon melts [Tekhnologicheskie osobennosti dugovogo glubinnogo vosstanovleniya poleznykh primesej metallurgicheskikh othodov dlya obrabotki zhelezouglerodistykh rasplavov]. *Metallurg*. 2024. No. 4. Pp. 100–105. (rus) DOI: 10.52351/00260827_2024_4_100. EDN LMZPLL

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rusanov Igor Faustovich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University
Alchevsk, Russia

Kuberskii Sergey Vladimirovich, PhD in Engineering, Professor of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University
Alchevsk, Russia, e-mail: Skuberskiy@yandex.ru

Protsenko Mikhail Yuriyevich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University
Alchevsk, Russia

Kononenko Gennady Iosifovich, Postgraduate of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University
Alchevsk, Russia

Митичкина Н. Г., *Кравцова С. И.

Донбасский государственный технический университет

**E-mail: kravtsovasvetlaya@yandex.ru*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СМАЗОК В ЧИСТОВОЙ КЛЕТИ ТЛС 3000

Методом математического эксперимента получены математические зависимости для определения коэффициента трения при установившемся процессе горячей прокатки ряда сталей в чистой клети толстолистостанов 3000 Алчевского металлургического комбината, учитывающие влияние скорости прокатки, смазки и температуры прокатки. Полученные результаты позволяют уточнить энергосиловые параметры процесса при проектировании технологии прокатки в чистой клети с применением технологических смазок и могут быть использованы в системах автоматизированного проектирования стана для прогнозирования его работы.

Ключевые слова: коэффициент трения, толстолистовой стан, технологическая смазка, скорость прокатки, температура прокатки.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Одним из главных направлений повышения эффективности толстолистовых станов является ресурсо- и энергосбережение [1]. Тенденция совмещения нескольких процессов в технологии производства толстолистовой стали, таких как прокатка и термомеханическая обработка для получения заданных свойств, требует от стана выдерживать повышенные величины моментов прокатки, так как необходимо контролировать температуру конца прокатки в сочетании с высокими степенями деформации для обеспечения надлежащего качества проката. С этой точки зрения важны любые способы уменьшения нагрузки на клети, например, снижение сил трения при прокатке. Этого можно достичь, применяя технологическую смазку [2, 3]. При этом важным является не только применение смазочных средств, но и уточненный расчет для конкретных условий стана коэффициента трения.

Методы расчета коэффициента трения для процесса горячей прокатки основываются на температурной зависимости, предложенной Эжелундом. В этих методах также учитываются различные факторы,

такие как материал и состояние поверхности валков, химический состав прокатываемого материала, скорость прокатки, а также наличие и тип смазки.

В работах [4, 5] авторы предложили методику определения коэффициента контактного трения в условиях установившегося процесса горячей прокатки стали. Эта методика принимает во внимание такие параметры, как состояние поверхности, химический состав стали, угол захвата, скорость прокатки, температуру деформации, влияние типа смазки и толщину смазочной пленки. Представляет интерес адаптация данной зависимости к конкретным условиям стана методом вычислительного эксперимента, что может упростить зависимость, при этом не снижая ее точности.

Постановка задачи. Адаптацию можно произвести методом математического эксперимента на основании данных, полученных в работе [5].

В данной работе проведем исследование коэффициента трения при горячей прокатке применительно к условиям толстолистостанов 3000 Алчевского металлургического комбината. С помощью электронных таблиц по методике [5] создана программа

расчета коэффициента трения для реальных условий процесса прокатки в чистой клети стана 3000.

В связи с этим **целью** настоящей работы явилось определение зависимости коэффициента трения в условиях установившегося процесса горячей прокатки толстых листов с применением смазки в чистой клети толстолистного стана 3000 Алчевского меткомбината.

Объект исследования — технологический процесс прокатки толстых листов на толстолистном стане 3000.

Предмет исследования — закономерности определения коэффициента трения в условиях установившегося процесса горячей прокатки толстых листов.

Задачи исследования:

- на основе многофункциональной зависимости коэффициента трения при горячей прокатке стали получить адаптивную модель для конкретных условий чистой клети стана 3000;
- проверить адекватность предложенной модели;
- получить полиномы для сталей, наиболее часто прокатываемых на стане 3000.

Методика исследования. Исследование проводилось методом вычислительно-го полного факторного эксперимента. С помощью модели изучили влияние следующих параметров на значение коэффициента трения f в условиях установившегося процесса горячей прокатки: температуры прокатки T (°C), скорости прокатки v (м/с) и коэффициента $K_{вс}$, обозначающего различные виды смазки. Приняты следующие диапазоны изменения значений перечисленных параметров в соответствии с технологической инструкцией для чистой клети стана 3000:

- температура прокатки изменяется от 1050 до 720 °C;
- скорость прокатки от 2 до 5,65 м/с, согласно принятой технологии прокатки в чистой клети стана 3000;
- коэффициент, учитывающий вид смазки, изменяется от 0,25 до 0,9, согласно [4].

Остальные параметры, применяемые для расчета на примере стали 45 (средние значения химических элементов): абсолютное обжатие 1,4 мм, что обеспечивало соблюдение захвата, среднеарифметическое отклонение профиля валков 1,6 мкм, диаметр валков 900 мм, толщина смазочной пленки 1 мкм.

Изложение материала. Обозначим через μ коэффициент трения при установившемся процессе горячей прокатки между заготовкой и валками. Для определения количества опытов примем модель полного факторного эксперимента с тремя факторами, число опытов определяется как 2^3 [6]:

$$N = 2^3 = 8.$$

Однако для проверки адекватности модели этого количества недостаточно. Необходимо добавить опыт на нулевом уровне, то есть $N=9$. Основные уровни варьирования факторов представлены в таблице 1.

Кодированные значения факторов вычисляем из выражения

$$X_i = \frac{(x_i - x_{i0})}{\Delta x_i},$$

где X_i — кодированное значение фактора, x_i — натуральное значение фактора, x_{i0} — натуральное значение на нулевом уровне, Δx_i — интервал варьирования, $i=1, 2, 3$ — номер фактора.

Тогда математическая модель будет иметь вид

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_1 X_2 + b_5 X_1 X_3 + b_6 X_2 X_3 + b_7 X_1 X_2 X_3. \quad (1)$$

Значения кодированных факторов занесем в таблицу 2.

Значения y_n получим по зависимости (2.7) [5] и занесем в соответствующий столбец, затем с помощью методов математической статистики проведем вычислительный эксперимент.

МЕТАЛЛУРГИЯ

Таблица 1
Основные уровни варьирования факторов

Уровень варьируемых факторов	Кодовое обозначение	Температура раската, °C	Скорость прокатки, м/с	Коэффициент, учитывающий вид смазки
		X ₁	X ₂	X ₃
Нулевой уровень	0	885	3,825	0,575
Интервал варьирования	Δ	165	1,825	0,325
Верхний уровень	+	1050	5,65	0,9
Нижний уровень	–	720	2,0	0,25

Значение коэффициентов b_i находим по следующей формуле

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X_{ki} y_k.$$

Тогда в кодированных переменных уравнение (1) примет вид

$$y = 0,1072 - 0,0034X_1 - 0,0038X_2 + 0,0454X_3 + 0,0007X_1X_2 - 0,0014X_1X_3 - 0,0016X_2X_3 + 0,0003X_1X_2X_3. \quad (2)$$

Для проверки адекватности модели используем F -критерий Фишера, который определяется по формуле

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2},$$

$m = N - (k + 1) = 5$ — число степеней свободы;

$S_{ad}^2 = \sum \Delta y_i^2 / m = 0,00000344$ — дисперсия адекватности,

$S_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 = 0,0021$ — дисперсия ошибок эксперимента;

k — количество факторов эксперимента.

При выборе коэффициента Фишера принимаем уровень значимости, равный 0,05, тогда его табличное значение $F_{табл} = 5,41$. В результате расчета $F = 0,0016$. Поскольку табличное значение больше полученного, это свидетельствует о том, что построенная модель является адекватной.

Кроме того, оценим эффективность и информационную ценность модели. Вычислим дисперсию относительно среднего значения отклика:

$$S_c^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 = 0,0021.$$

Рассчитаем остаточную дисперсию:

$$S_{ост}^2 = \frac{1}{N-p} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 = 0,0000172,$$

где p — количество оцениваемых коэффициентов регрессии модели.

Таблица 2
Матрица планирования и результаты вычислительного эксперимента

Номер п/п	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ X ₂	X ₁ X ₃	X ₂ X ₃	X ₁ X ₂ X ₃	y _n
1	+	+	+	+	+	+	+	0,1428
2	+	-	+	-	+	-	-	0,1516
3	-	+	+	-	-	+	-	0,1505
4	-	-	+	+	-	-	+	0,1632
5	+	+	-	+	-	-	-	0,0575
6	+	-	-	-	-	+	+	0,0610
7	-	+	-	-	+	-	+	0,0606
8	-	-	-	+	+	+	-	0,0657
9	0	0	0	0	0	0	0	0,1119

Тогда коэффициент эффективности

$$F_u = \frac{S_c^2}{S_{ост}^2} = 121,87.$$

Это показывает, что полученная модель эффективна, так как коэффициент эффективности больше 5.

Среднее относительное отклонение значений по рассматриваемой и предложенной модели

$$\bar{A} = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{y - \hat{y}}{y} \right| \cdot 100 = 0,6 \, \%.$$

Для проверки значимости коэффициентов модели доверительный коэффициент определяем по формуле

$$\Delta b_j = \pm t \cdot S_{bj} = \pm 0,0026,$$

где $S_{bj}^2 = \frac{1}{N} \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 = 0,00000191$ —

среднеквадратичная ошибка коэффициента регрессии; t — табличное значение критерия Стьюдента, при надежности 0,9 и 9 опытах оно равно 1,9. Таким образом, в уравнении (2) значимыми являются коэффициенты линейной части уравнения, однако для повышения точности модели будем учитывать их все.

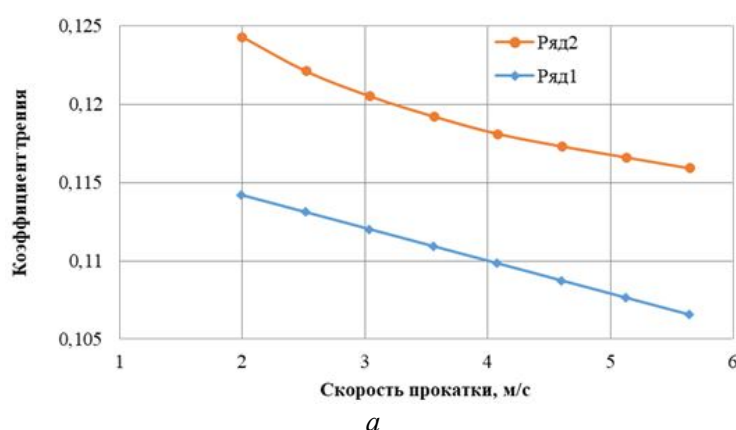
Преобразуя уравнение (2) к размерному виду, производя декодирование модели, получим зависимость коэффициента трения в размерных переменных

$$f = 0,0353 - 7,4 \cdot 10^{-6} T - 0,00102v + 0,1838K_{ec} + 5,9 \cdot 10^{-7} Tv - 3,8 \cdot 10^{-5} TK_{ec} - (3) - 0,0053vK_{ec} + 2,9 \cdot 10^{-6} TvK_{ec},$$

где T изменяется от 720 до 1050 °С, v — от 2 до 5,65 м/с и K_{ec} — от 0,25 до 0,9.

Графическую интерпретацию результатов приведем на рисунке 1 на примере стали 45, рассчитанную по полученной регрессионным способом формуле (3) и по формулам автора работы [5].

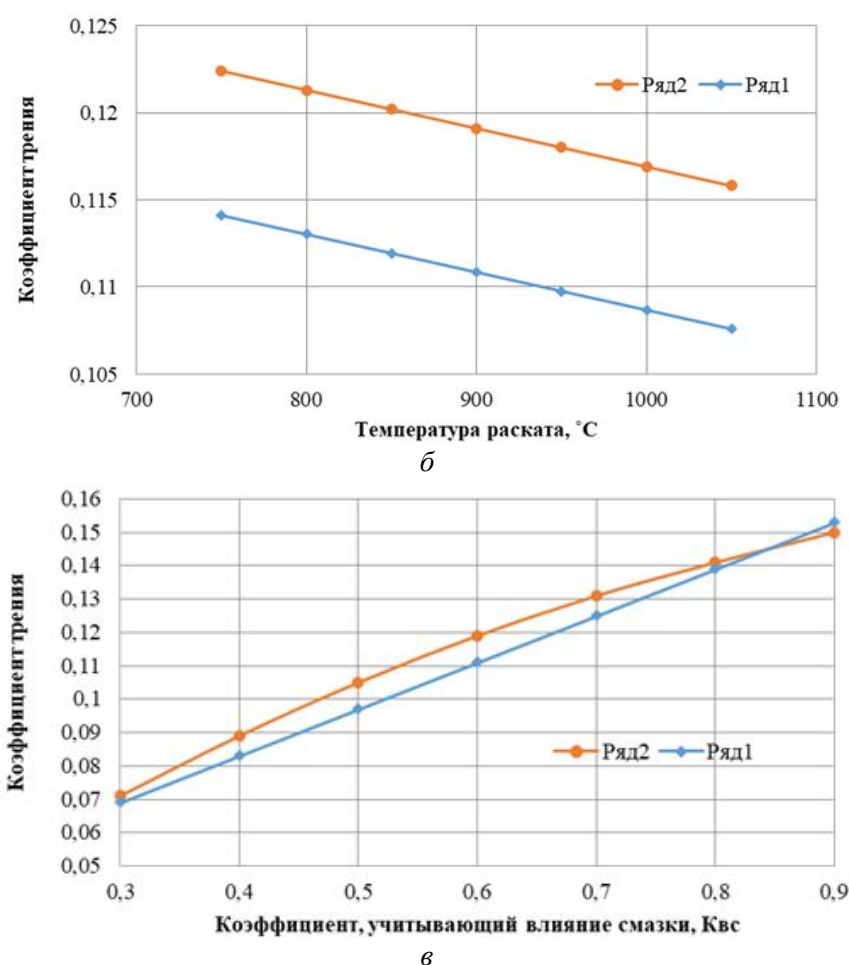
Приведенные зависимости показали, что предложенная регрессионная модель повторяет исследуемую зависимость, а относительная ошибка не превышает 8 %, что делает ее пригодной для использования в технологических расчетах. Для выполнения регрессионного анализа была сделана программа на ЭВМ, что позволило, используя приведенный алгоритм, получить полиномы для сталей, наиболее часто прокатываемых на стане 3000 Алчевского меткомбината. Результаты исследований сведены в таблицу 3.



Ряд 1 — регрессионная модель; ряд 2 — расчетные значения по [5]

Рисунок 1 — Зависимость коэффициента трения в условиях установившегося процесса горячей прокатки от скорости прокатки (а: $T = 900$ °С; $K_{ec} = 0,6$ — соответствует применению эмульсии масла), температуры раската (б: $v = 3,6$ м/с; $K_{ec} = 0,6$ — соответствует применению эмульсии масла) и коэффициента, учитывающего влияние смазки (в: $T = 900$ °С; $v = 3,6$ м/с)

МЕТАЛЛУРГИЯ



Продолжение рисунка 1

Таблица 3

Кoeffициенты полученных полиномов для сталей

Сталь	Кoeffициенты полиномов							
	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅	b ₆	b ₇
09Г2С	0,0434	-8,9·10 ⁻⁶	-0,0012	0,2226	6,8·10 ⁻⁷	-4,6·10 ⁻⁵	-0,0065	3,6·10 ⁻⁶
Ст3сп	0,0313	-6,8·10 ⁻⁶	-0,0010	0,1586	6,0·10 ⁻⁷	-3,2·10 ⁻⁵	-0,0045	2,4·10 ⁻⁶
17Г1С	0,0412	-8,2·10 ⁻⁶	-0,0011	0,2131	6,0·10 ⁻⁷	-4,4·10 ⁻⁵	-0,0063	3,6·10 ⁻⁶
10ХСНД	0,0427	-8,5·10 ⁻⁶	-0,0012	0,2220	6,5·10 ⁻⁷	-4,7·10 ⁻⁵	-0,0065	3,7·10 ⁻⁶
РСД-32	0,0434	-8,8·10 ⁻⁶	-0,0012	0,2234	6,5·10 ⁻⁷	-4,7·10 ⁻⁵	-0,0065	3,7·10 ⁻⁶

Выполненные исследования позволили сделать следующие **выводы**:

1. Методом вычислительного эксперимента получены математические модели для расчета коoeffициента трения в условиях установившегося процесса горячей прокатки с использованием технологических смазок, адаптированные к условиям чистовой клетки стана 3000 Алчевского ме-

таллургического комбината для сталей 45, 09Г2С, Ст3сп, 17Г1С, 10ХСНД, РСД-32.

2. Полученные результаты в достаточной степени согласуются с моделью работы [5]. Максимальная относительная погрешность не превышает 8 % для всех рассмотренных сталей. Адекватность модели проверена по критерию Фишера ($F_{расч} < F_{табл}$).

3. Полученные зависимости могут быть использованы для технологических расчетов энергосиловых параметров при прокатке в чистовой клети толстолистового стана 3000 Алчевского металлургического

комбината при применении различных видов технологических смазок.

Дальнейшие исследования будут направлены на экспериментальное уточнение полученных зависимостей.

Список источников

1. Шабалов И. П., Шафигин З. К., Муратов А. Н. Ресурсосберегающие технологии производства толстолистового проката с повышенными потребительскими свойствами. М. : Металлургиздат, 2007. 351 с. : ил.
2. Скляр В. О. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии : учебное пособие. Донецк : ДонНТУ, 2014. 224 с.
3. Данько А. В. Современное развитие листопрокатного производства : учебное пособие. Алчевск : ДонГТУ, 2010. 161 с.
4. Капланов В. И., Курпе А. Г. Многофункциональная зависимость коэффициента трения при горячей прокатке стали // Производство проката. 2006. № 11. С. 6–9.
5. Курпе А. Г. Моделирование технологического процесса прокатки толстых листов на стане 3600 ОАО «МК „Азовсталь“» : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мариуполь, 2006. 24 с.
6. Юдин Ю. В., Майсурадзе М. В., Водолазский Ф. В. Организация и математическое планирование эксперимента : учебное пособие. Екатеринбург : изд-во Урал. ун-та, 2018. 124 с.

© Митичкина Н. Г., Кравцова С. И.

*Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. МТ ДонГТУ Денищенко П. Н.,
зам. начальника по технологии ТЛЦ 2 ООО «ЮГМК» Осипенко А. А.*

Статья поступила в редакцию 11.03.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Митичкина Наталия Геннадиевна, канд. техн. наук, доцент, зав. каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Кравцова Светлана Игоревна, ассистент каф. металлургических технологий
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия,
e-mail: kravtsovasvetlaya@yandex.ru

Mitichkina N. G., *Kravtsova S. I. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: kravtsovasvetlaya@yandex.ru)

MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE FRICTION COEFFICIENT FOR PLATE ROLLING WITH TECHNOLOGICAL LUBRICANTS IN THE PM 3000 FINISHING STAND

By the method of mathematical experiment, the mathematical dependences for determining the friction coefficient at steady-state process of hot rolling a number of steels in the finishing stand of plate mill 3000 of Alchevsk Iron-and-Steel Works, considering the influence of rolling speed, lubrication and temperature of rolling, have been obtained. The obtained results allow to specify the energy and power parameters of the process when designing rolling technology in the finishing stand with the use of technological lubricants and can be used in the systems of computer-aided design of the mill for predicting its operation.

Key words: friction coefficient, plate mill, technological lubricants, rolling speed, rolling temperature.

References

1. Shabalov I. P., Shafigin Z. K., Muratov A. N. Resource-saving technologies for production of heavy plate rolled products with enhanced consumer properties [Resursosberegayushchie tekhnologii proizvodstva tolstolistovogo prokata s povyshennymi potrebitel'skimi svojstvami]. M. : Metallurgizdat. 2007. 351 p. : ill. (rus)
2. Sklyar V. O. Innovative and resource-saving technologies in metallurgy: textbook [Innovacionnye i resursosberegayushchie tekhnologii v metallurgii: uchebnoe posobie]. Donetsk : DonNTU, 2014. 224 p. (rus)
3. Dan'ko A. V. Modern development of sheet rolling production : textbook [Sovremennoe razvitie listoprokatnogo proizvodstva : uchebnoe posobie]. Alchevsk : DonSTU, 2010. 161 p. (rus)
4. Kaplanov V. I., Kurpe A. G. Multifunctional dependence of friction coefficient at hot-rolling steel [Mnogofunkcional'naya zavisimost' koefficienta treniya pri goryachej prokatke stali]. Proizvodstvo prokata. 2006. No. 11. Pp. 6–9. (rus)
5. Kurpe A. G. Modeling of technological process of thick plates rolling at the mill 3600 of OAO "AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS": synopsis of a thesis of PhD in Engineering [Modelirovanie tekhnologicheskogo processa prokatki tolstyh listov na stane. 3600 OAO "MK 'AZOVSTAL'" : avtoref. dis. kand. tekhn. nauk.]. Mariupol'. 2006. 24 p. : ill. (rus)
6. Yudin Yu. V., Maisuradze M. V., Vodolazsky F. V. Organization and mathematical planning of experiment : textbook [Organizaciya i matematicheskoe planirovanie eksperimenta : uchebnoe posobie]. Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2018. 124 p. (rus)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mitichkina Natalia Gennadiyevna, PhD in Engineering, Assistant Professor, Acting Head of the Department of Metallurgical Technologies
Donbas State Technical University,
Alchevsk, Russia

Kravtsova Svetlana Igorevna, Assistant lecturer of the Department of Metallurgical Technologies
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia,
e-mail: kravtsovasvetlaya@yandex.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ

MECHANICAL ENGINEERING

Зинченко А. М., Белозерцев В. Н., *Пипкин Ю. В.
Донбасский государственный технический университет
*E-mail: tmsi_pipkin@mail.ru

АНАЛИЗ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ТОЧНОСТЬЮ И СЕБЕСТОИМОСТЬЮ ЛЕЗВИЙНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

В статье проведены обоснование и теоретические исследования взаимосвязи гиперболического типа между параметрами точности и себестоимости технологических процессов лезвийной механической обработки. Получены формулы для определения величины изменения параметров.

Ключевые слова: механическая обработка, точность обработки, себестоимость обработки.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Развитие технических систем часто связывают с переходом между технологическими укладами [1–3] в том числе в результате промышленных революций [4, 5]. При этом исследователями феноменов «технологический уклад» и «промышленная революция» особо уделяется внимание цикличности инновационных и экономических процессов, имеющих концептуальное сходство для разных переходных стадий смены технического уровня социально-экономических отношений. Как один из показательных результатов анализа условий смены технологических укладов можно отметить применение в стандартах менеджмента качества, таких как ГОСТ Р ИСО 9001-2015, ГОСТ Р ИСО 10006-2019 и других, цикла непрерывного улучшения Деминга — Шухарта [6] (выражаемого формулой PDCA или PDSA: Plan — Do — Check — Act, т. е. «планируй — делай — оценивай — внедряй»), либо Plan — Do — Study — Act, т. е. «планируй — делай — исследуй — внедряй»). Для машиностроительной отрасли внедрение стандартов качества является важным элементом развития [7, 8]. Таким образом, для решения задач повышения эффективности и развития технических систем, обеспечиваемых машиностроительной отраслью, актуальным является выявление и формирование циклических взаимосвязей в производственной системе, технологических системах и технологических процессах.

Постановка задачи. В рамках научно-исследовательской работы «Разработка системы опорных и зажимных элементов фрезерных приспособлений на основе моделирования силового замыкания» проводятся исследования, направленные на повышение эффективности технологической операции фрезерования плоских поверхностей. При этом уделяется внимание как точности [9], так и производительности [10]. **Целью** данной работы является теоретическая оценка возможности выявления циклических взаимосвязей между результатами улучшения работы технологической системы для задачи дальнейшего анализа практических результатов исследований по моделированию силового замыкания фрезерных приспособлений.

Анализ стратегий улучшения операций лезвийной механической обработки. Работами ведущих ученых-машиностроителей, таких как А. И. Каширин, Б. С. Балакшин, В. М. Кован, А. П. Соколовский, А. А. Маталин, В. С. Колесов и других, установлено, что основными задачами, решаемыми технологией машиностроения при изготовлении деталей машин, являются:

- достижение требуемой геометрической точности изготовления;
- обеспечение требуемой производительности (выпуск заданного количества деталей в заданный период времени);
- достижение наименьшей себестоимости (то есть наименьших затрат труда живого и овеществленного).

При этом задачи обеспечения качества материала по его химическому составу и его свойствам решаются также в машиностроении, но в области металлургии и материаловедения.

Выделенным выше основным задачам, в свою очередь, соответствуют научно обоснованные технологические показатели:

– квалитет геометрической точности, выражаемый численно допуском T_A на заданный рабочим чертежом размер детали (англ. — tolerance admeasurement); допуском формы T_F поверхности (англ. — tolerance form); допуском взаимного расположения поверхностей T_{RP} (англ. — tolerance relative position), мм;

– техническая норма штучного $T_{шт}$ (штучно-калькуляционного $T_{шт-к}$) времени изготовления одной детали T (англ. — time), мин;

– себестоимость изготовления одной детали C (англ. — cost price), условных денежных единиц.

Взаимосвязи между основными задачами технологии машиностроения можно укрупненно охарактеризовать диаграммой Эйлера — Венна (рис. 1), показывающей отношение между множествами решений задач качества (уменьшения допуска $T_{A,F,RP}$ = повышение качества K), производительности (уменьшение трудоемкости $T_{шт(шт-к)}$ = повышение производительности Π) и эффективности (уменьшение себестоимости C = повышение эффективности $\mathcal{E}$). Диаграмма на рисунке 1 показывает основные варианты взаимосвязанного решения задач машиностроительного производства, которые можно разбить по уровням управленческого риска (УУР):

– низкий уровень управленческого риска (НУУР) соответствует множеству отдельных решений (области, заштрихованные одним типом штриховки), когда задачи рассматриваются несвязанно;

– средний уровень управленческого риска (СУУР) соответствует множеству пересечения двух из трех показателей

(области, заштрихованные двумя типами штриховки);

– высокий уровень управленческого риска (ВУУР) соответствует множеству пересечения всех трех показателей (область, заштрихованная тремя видами штриховки).

В области механической обработки в технологии машиностроения по данным, полученным на основе наблюдений за действующим производством, может быть определена зависимость между точностью изготовления x и себестоимостью машины y . По оценке [11] эта зависимость близка к кривой гиперболического типа (рис. 2) и может быть выражена формулой

$$y = \frac{m}{x},$$

где y — себестоимость изделия, x — допуск на изготовление на данной операции (количество точных размеров, выдерживаемых на операции), m — постоянная.

Причем, как указывается в [11], эта зависимость распространяется как на изготовление машины в целом, так и на изготовление отдельных деталей, выполнение операций. К такому же выводу приходят и другие авторы [12, 13].

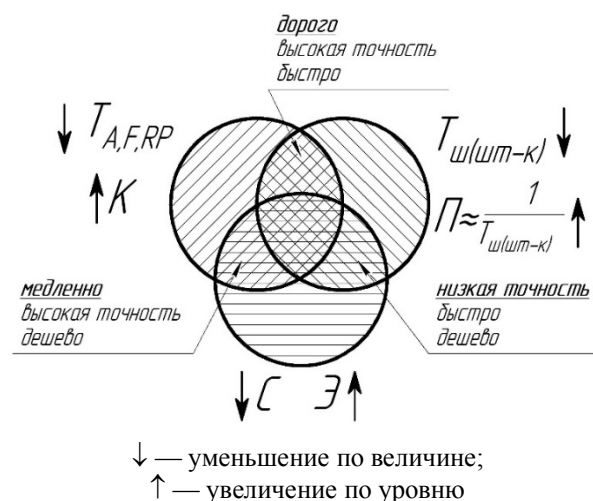


Рисунок 1 — Диаграмма Эйлера — Венна для взаимоотношений между основными задачами технологии машиностроения

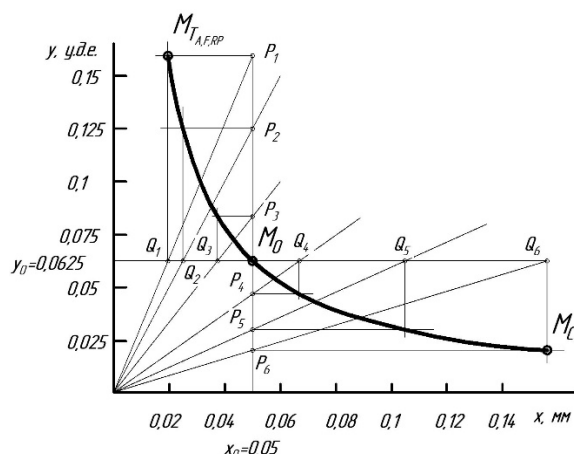


Рисунок 2 — Кривая зависимости себестоимости обработки от точности обработки

Используя рекомендации [11, 14, 15] для построения равнобочной гиперболы по ее асимптотам на основе данных в одной точке, по себестоимости какого-либо одного процесса (или группы процессов) можно определить себестоимость аналогичного другого процесса, выполненного при других условиях (т. е. другом уровне точности). Построение гиперболы включает в себя проведение из начала отсчета произвольных лучей до пересечения с ординатой и абсциссой начальной точки (точки M_0 по рис. 2) в точках P_i и затем Q_i , получая затем точки пересечения вертикальных и горизонтальных линий, проведенных из полученных точек.

Рассматривая гиперболическую зависимость между точностью механической обработки и ее себестоимостью (рис. 2), можно отметить, что она соответствует диаграмме Эйлера — Венна для основных задач технологии машиностроения в том смысле, что улучшение одного из показателей приводит к ухудшению второго, и можно выделить два типа задач в зависимости от варианта положения начальной точки:

1) решается задача повышения точности обработки (уменьшение величины допуска на обработку), когда начальная точка двигается в верхнюю часть графика с наименьшей величиной допуска на обработку в

точку $M_{T_{A,F,RP}}$ (большая точность), перебор вариантов идет снизу вверх, и при этом себестоимость изготовления растет (задача первого типа);

2) решается задача снижения себестоимости, когда начальная точка двигается к нижней части графика до меньшей себестоимости в точку M_C , перебор вариантов идет сверху вниз по гиперболе, и при этом точность изготовления падает (задача второго типа).

Задача обеспечения геометрической точности является первоочередной, поэтому выполним укрупненный анализ возможного увеличения точности механической обработки при сохранении уровня себестоимости, что возможно при внедрении наукоемких инновационных решений.

Задача повышения точности (задача первого типа). Рассмотрим построение гиперболы для зависимости себестоимости от точности механической обработки (рис. 3). В отличие от рисунка 2 на рисунке 3 построение ведем от нижней точки в такой последовательности.

Сначала проводим из точки M_C вертикальную линию параллельно оси y . На этой линии отмечаем произвольно точки P_1-P_n .

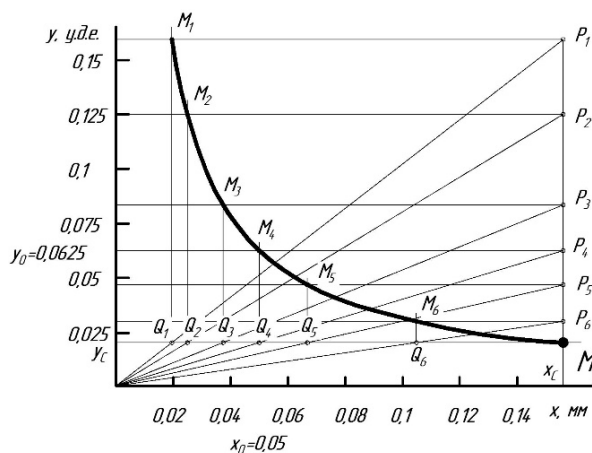


Рисунок 3 — Построение исходной гиперболы зависимости себестоимости от точности механической обработки для стратегии повышения точности обработки

Затем через центр системы координат и точки P_i проводим отрезки для пересечения с горизонтальной линией, проведенной из точки M_C .

Из полученных точек пересечения проводим вертикальные линии, а из точек P_i — горизонтальные. На пересечении горизонтальных и вертикальных линий получаем точки M_i графика гиперболы.

Выполним укрупненную оценку ожидаемого экономического эффекта при увеличении степени экономической точности метода обработки. Пусть известны данные об экономической точности обработки x_C , себестоимость метода составила y_C . Таким образом, на кривой (рис. 3) получена точка $M_C(x_C; y_C)$, соответствующая достигнутому уровню экономической точности.

Примем, что благодаря инновациям достигнуто повышение экономической точности метода обработки до уровня x_1 при сохранении уровня себестоимости y_C , что соответствует точке M_1 (рис. 4).

Для новой точки также построим гиперболу. Видно, что она не пересекает кривую для точки M_C . Величина Δy показывает, на сколько вследствие инноваций удалось уменьшить себестоимость обработки при увеличении точности обработки на величину Δx .

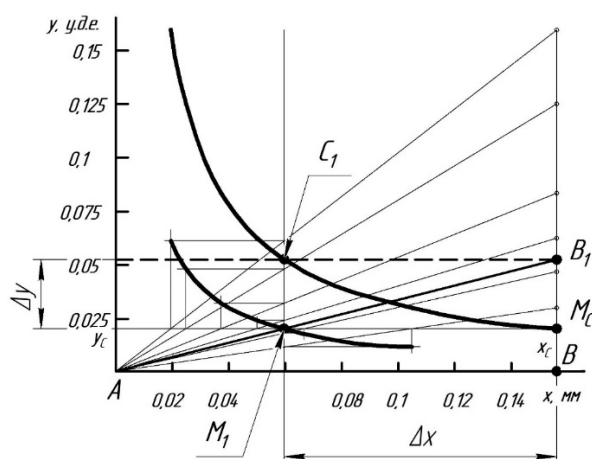


Рисунок 4 — Построение гиперболы зависимости себестоимости от точности механической обработки для точки стабильной себестоимости

Определим величину Δy при известном Δx . Из подобия треугольников (по равенству углов) AB_1B и MB_1M_0 запишем соотношение

$$\frac{y_C + \Delta y}{\Delta y} = \frac{x_C}{\Delta x}. \quad (1)$$

Принимая y_C — начальную себестоимость обработки, а $\Delta x = k_T \cdot x_C$, где k_T — дольный коэффициент увеличения точности обработки (уменьшения допуска на обработку), лежащий в интервале от 0 до 1, после преобразований окончательно получаем формулу для определения ожидаемого эффекта от увеличения точности:

$$\Delta y = \frac{y_C \cdot k_T \cdot x_C}{x_C - k_T \cdot x_C}. \quad (2)$$

Вынесем x_C в знаменателе за скобку:

$$\Delta y = \frac{y_C \cdot k_T \cdot x_C}{x_C \cdot (1 - k_T)}.$$

После сокращения на x_C имеем

$$\Delta y = y_C \cdot \frac{1 \cdot k_T}{(1 - k_T)}. \quad (3)$$

Принимая $\Delta y = k_C \cdot y_C$, где k_C — дольный коэффициент сокращения себестоимости, лежащий в интервале от 0 до 1, преобразуем (3) в вид

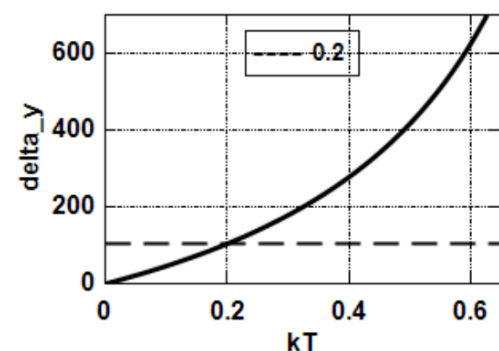
$$k_C = \frac{1 \cdot k_T}{(1 - k_T)}. \quad (4)$$

Таким образом, ожидаемый экономический эффект при повышении точности механической обработки можно определить в натуральном выражении по формуле (3), задаваясь начальной себестоимостью обработки при заданной точности, или в дольном выражении по формуле (4).

Принимая во внимание прямую зависимость между точностью механической обработки и затратами труда, можно укрупненно считать, что себестоимость механической обработки в зависимости от точности обработки приближенно равна или кратна заработной плате рабочего. Если принять за

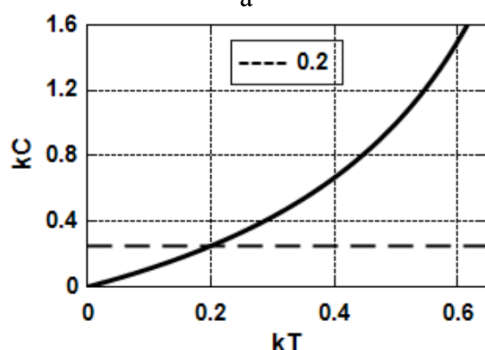
минимальную заработную плату 80000 у. д. е. в месяц, а количество рабочих часов при работе в одну смену 192 часа (24 рабочих дня), то минимальная часовая тарифная ставка составит около 416,7 у. д. е. Подставив это значение в (3), (4) в математическом пакете SMATH Solver, получим графики, показанные на рисунке 5.

Тогда, в соответствии с имеющимися графиками (рис. 5), ожидаемый экономический эффект от повышения точности в 0,2 раза (на 20 %) составит около 104,2 у. д. е. в час (25 % от начальных затрат), около 20000 у. д. е. в месяц, 240000 у. д. е. в год на одну операцию механической обработки. Программу для проверки расчета, сформированную с помощью SMATH Solver, можно скачать в облаке [16].



$\left\{ \begin{array}{l} \Delta y (\bullet) \\ \Delta y (k_{T1}) \end{array} \right\}$

а



$\left\{ \begin{array}{l} k_C (\bullet) \\ k_C (k_{T1}) \end{array} \right\}$

б

Рисунок 5 — Графики зависимости экономии по точности обработки, рассчитанные в пакете SMATH Solver: а) в натуральном измерении; б) в дольном соотношении

Полученную величину следует рассматривать как максимально возможный экономический эффект от инвестиций в повышение точности механической обработки на операции.

Также для установления циклических взаимосвязей в рамках концепции диаграммы Эйлера — Венна и цикла PDCA интерес представляет и рассмотрение обратного перехода: на сколько потребуется увеличить допуск на обработку (т. е. понизить точность) при направленном уменьшении себестоимости обработки. Для этого, подобно рассмотренному выше варианту с повышением точности (рис. 4), выполним построения для уменьшения себестоимости (рис. 6).

Задача уменьшения себестоимости (задача второго типа). На рисунке 6 начальная точка $M_T(x_T, y_T)$ находится в верхней части графика. Уменьшение себестоимости обработки на величину Δy_T без дополнительных затрат означает переход в точку $M_1(x_1, y_1)$ с увеличением допуска на обработку (снижением точности обработки) на величину Δx (на рисунке 6 движение по стрелкам с номером 1). Определить величину Δx можно следующим образом. Так как точки M_T и M_1 принадлежат одной и той же равнобокой гиперболе, для них можно записать функцию в следующем виде:

$$y_T = \frac{m}{x_T} \text{ и } y_1 = \frac{m}{x_1},$$

откуда

$$y_T \cdot x_T = y_1 \cdot x_1,$$

далее

$$x_1 = x_T \cdot \frac{y_T}{y_1} = x_T \cdot \frac{y_T}{y_T - \Delta y_T}.$$

Принимая $\Delta y_T = k_C \cdot y_T$, получаем величину большего допуска

$$x_1 = x_T \cdot \frac{1}{1 - k_C} \text{ в мм} \quad (5)$$

и, принимая $k_T = x_1/x_T$, получаем

$$k_T = \frac{1}{1 - k_C}. \quad (6)$$

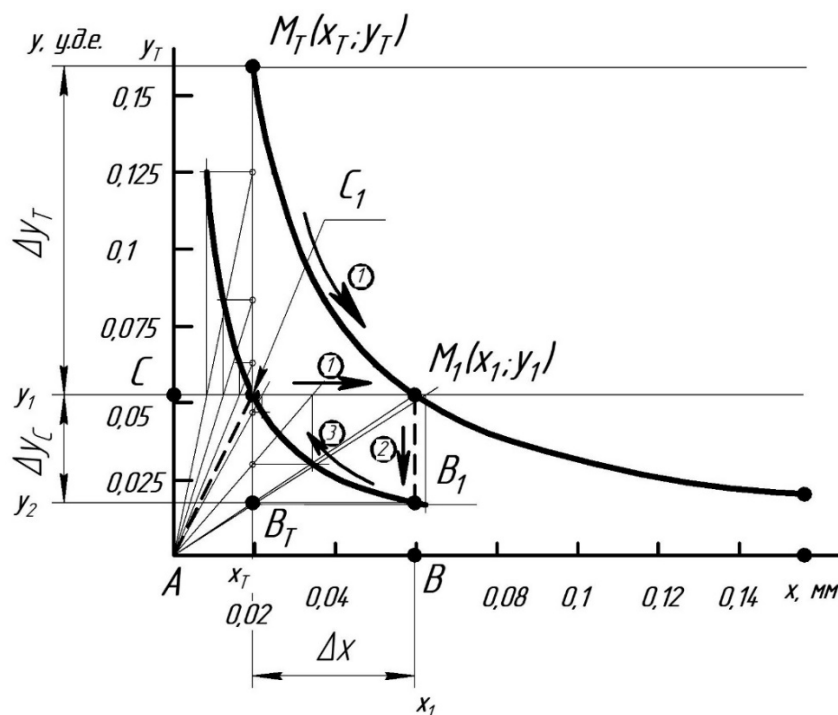


Рисунок 6 — Построение гиперболы в точке с сохранением точности лезвийной механической обработки

Далее определяем Δx как

$$\Delta x = x_1 - x_T = x_T \cdot \frac{1}{1 - k_C} - x_T.$$

Выносим x_T за скобки, получаем

$$\Delta x = x_T \cdot \left(\frac{1}{1 - k_C} - 1 \right), \text{ мм}$$

или, приводя выражение в скобках к общему знаменателю, получаем далее

$$\Delta x = x_T \cdot \left(\frac{k_C}{1 - k_C} \right), \text{ мм.} \quad (7)$$

Также, учитывая, что $\Delta x = x_T \cdot k_{\Delta T}$, имеем

$$k_{\Delta T} = \frac{k_C}{1 - k_C}. \quad (8)$$

Расчет по формулам (5) и (7) показывает, что при начальном допуске, равном 0,2 мм, и предполагаемом снижении себестоимости обработки на 50 % ($k_C = 0,5$) увеличение допуска на обработку составит 0,2 мм (по

формуле (7)), допуск будет равен 0,4 мм (по формуле (5)), что на 100 % больше начального допуска (по формулам (6) и (8)).

Стратегию, соответствующую движению вдоль кривой на рисунке 6 к точке $M_1(x_1; y_1)$ по направлению стрелки 1 можно рассматривать как НУУР.

Вариантом СУУР или ВУУР является случай, когда при планируемом снижении себестоимости обработки требуется сохранить уровень заданной точности. То есть следует выполнить построение новой кривой для точки $C_1(x_T; y_1)$. Для новой кривой точка $M_1(x_1; y_1)$ как бы смещается в направлении стрелки 2 на рисунке 6 в точку $B_1(x_1; y_2)$. Для сохранения уровня исходной точности потребуются затраты, эквивалентные увеличению себестоимости обработки от точки B_1 до точки C_1 по направлению стрелки 3, которые равны Δy_C по рисунку 6. В этом случае для точек B_1 и C_1 можно записать

$$y_1 = \frac{m_1}{x_T} \text{ и } y_2 = \frac{m_1}{x_1},$$

откуда

$$y_1 \cdot x_T = y_2 \cdot x_1,$$

далее

$$y_2 = y_1 \cdot \frac{x_T}{x_1}.$$

Затем учитываем, что

$$y_1 = y_T - \Delta y_T = y_T - k_C \cdot y_T = y_T \cdot (1 - k_C)$$

и

$$x_1 = x_T + \Delta x = x_T + k_{\Delta T} \cdot x_T = x_T \cdot (1 + k_{\Delta T}),$$

определяем величину Δy_C :

$$\Delta y_C = y_1 - y_2 = y_1 - y_1 \cdot \frac{x_T}{x_1} = y_1 \cdot \left(1 - \frac{x_T}{x_1}\right).$$

После подстановки получаем

$$\Delta y_C = y_T \cdot (1 - k_C) \cdot \left(1 - \frac{x_T}{x_T \cdot (1 + k_{\Delta T})}\right).$$

После сокращения на x_T получаем

$$\Delta y_C = y_T \cdot (1 - k_C) \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + k_{\Delta T}}\right),$$

после приведения к общему знаменателю в правой скобке

$$\Delta y_C = y_T \cdot (1 - k_C) \cdot \left(\frac{k_{\Delta T}}{1 + k_{\Delta T}}\right),$$

далее окончательно

$$\Delta y_C = y_T \cdot \frac{(k_{\Delta T} - k_{\Delta T} \cdot k_C)}{1 + k_{\Delta T}}, \quad (9)$$

и после подстановки (7) имеем сокращенный вариант:

$$\Delta y_C = y_T \cdot (k_C - k_C^2). \quad (10)$$

Также представляет интерес отношение величины затрат на удержание точности обработки неизменной к величине планируемого уменьшения себестоимости обработки:

$$\frac{\Delta y_C}{\Delta y_T} = \frac{y_T \cdot (k_C - k_C^2)}{k_C \cdot y_T} = 1 - k_C. \quad (11)$$

Для исходных данных, соответствующих области определения переменных по заданной на рисунке 6 системе координат, выполним ориентировочный расчет.

Исходные данные для расчета:

- начальная себестоимость $y_T = 0,1625$ у. д. е.;
- начальный уровень точности обработки $x_T = 0,02$ мм;
- запланированное снижение себестоимости обработки до уровня $y_1 = 0,0536$ у. д. е., откуда коэффициент снижения себестоимости $k_C = 0,67$.

Расчет величины увеличения допуска на обработку по формуле (7) дает значение $\Delta x = 0,0406$ мм.

Величина допуска, соответствующего снижению себестоимости обработки по формуле (5) равна $x_1 = 0,0606$ мм, что соответствует сумме исходного допуска x_T и величине интервала Δx .

В случае СУУР (ВУУР), означающего сохранение уровня точности при плановом снижении себестоимости, потребуются дополнительные затраты, определяемые по формулам (9) или (10), $\Delta y_C = 0,0359$ у. д. е., что меньше запланированного уменьшения себестоимости на 0,1089 у. д. е. и соотносится с ним по формуле (11) как 0,33 (т. е. 1/3).

Полученные расчетные данные соответствуют построенному предварительно по данным [11] графику гиперболы, что указывает на верность представленных выкладок.

Программу для проверки расчетов, сформированную в пакете SMATH Solver, можно скачать в облаке [17].

Следует отметить, что пропорции между коэффициентами, определяемые по формулам (4), (6), (8), (11), не зависят от единиц измерения как точности, так и себестоимости. Что позволяет выполнять анализ независимо от масштаба данных.

В целом проведенный теоретический анализ на основе гипотезы о гиперболи-

ческой взаимосвязи между точностью обработки и себестоимостью показывает, что при проектировании технологических процессов изготовления деталей, в частности механической обработки, характерны УУР, при которых происходит перебор множества решений в соответствии с диаграммой Эйлера — Венна (рис. 1). Причем, как показал анализ для случая решения задачи второго типа (рис. 6), взаимосвязь между множествами решений имеет циклический характер (показанный стрелками с номерами 1, 2, 3).

Так как рассмотрена только одна из пар задач технологии машиностроения «точность — себестоимость», требуются дальнейшие теоретические исследования остальных сочетаний: «точность — производительность» и «себестоимость — производительность».

Предварительное сопоставление анализа теоретических закономерностей взаимосвязи точности и себестоимости с результатами, полученными при исследованиях силового замыкания фрезерных приспособлений при обработке плоских поверхностей [9, 10], показывает качественное сходство. Так, в работе [9] рассматривается достигнутое повышение точности обработки до 60 %, опираясь на которое, в работе [10] предлагается выполнить корректировку режимов резания с целью повышения производительности.

Выводы. Проведенный теоретический анализ на основе гипотезы о гиперболической зависимости между основными

задачами технологии машиностроения, в частности технологическими показателями геометрической точности и себестоимости методов лезвийной механической обработки, подтверждает наличие циклических взаимосвязей между множествами решений качества, производительности и эффективности технологических процессов изготовления деталей. Основные результаты исследования заключаются в следующем:

1) установлено, что зависимость гиперболического типа для исследования взаимосвязи в паре «точность — себестоимость» соответствует логике диаграммы Эйлера — Венна, описывающей пересечения множеств решений основных задач технологии машиностроения при производстве деталей машин;

2) выявлен циклический характер выбора управленческих решений для случая планируемого снижения себестоимости обработки, что создает предпосылки для выявления циклов PDCA (Деминга — Шухарта) и дальнейшего улучшения качества технологических систем;

3) на основе диаграммы Эйлера — Венна для основных задач технологии машиностроения предложены три уровня управленческих решений, разделяемых по степени управленческого риска;

4) сформулированы зависимости для оценки взаимосвязанного изменения точности и себестоимости в натуральном выражении (формулы (3, 5, 7, 9, 10)) и в виде пропорций между безразмерными дольными коэффициентами (формулы (4, 6, 8, 11)).

Список источников

1. Елецких П. Е. Эволюция технологических укладов // Актуальные вопросы экономики и информационных технологий : сборник тезисов и статей докладов 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. Минск, 2023. С. 332–334. URL: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/52906> (дата обращения: 18.02.2025).
2. Останин В. А. Техника в эволюции технологических укладов : монография / под ред. С. Е. Ячина. Владивосток : изд-во Дальневосточного федерального университета, 2023. 185 с. DOI: 10.24866/7444-5523-1. EDN LAWVEX
3. Панышина О. Ю. Методы и модели управления сменой технологических укладов в машиностроении : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Уфа, 2009. 16 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003478923> (дата обращения: 18.02.2025). EDN NLBFQN

4. Буддыгин С. С. Концепция промышленной революции: от появления до наших дней // Вестник Томского государственного университета. 2017. № 420. С. 91–95. DOI: 10.17223/15617793/420/12. EDN ZGPXUZ
5. Аверина И. С. Промышленная революция и технологический уклад: сущностные характеристики, сходства и отличительные черты // Вестник Волгоградского государственного университета. Экономика. 2021. Т. 23. № 1. С. 52–63. DOI: 10.15688/ek.jvolsu.2021.1.4. EDN ARJOJK
6. Управление качеством на основе цикла Деминга — Шухарта в условиях изменений / В. В. Филатов, И. А. Рамазанов, В. В. Безпалов, С. Ю. Федорук // Журнал прикладных исследований. 2022. Т. 4. № 8. С. 336–341. DOI: 10.47576/2712-7516_2022_8_4_336. EDN QUJPEN
7. Денисова Я. В. Управление качеством процессов производства продукции машиностроения в сети // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 28–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-28-34. EDN CBZQOE
8. Кунаков Е. П. Совершенствование системы менеджмента качества машиностроительного производства на основе развития цикла PDCA: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Иркутск : ФГБОУ ВО «ИНИТУ», 2024. 126 с. URL: <https://www.istu.edu/deyatelnost/nauka/dissertatsii/elementy/74846> (дата обращения: 18.02.2025). EDN PBZHFM
9. Пипкин Ю. В., Зинченко А. М. Повышение точности механической лезвийной обработки как драйвер внедрения инновационных систем станочных приспособлений на примере фрезерования плоскостей // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : сборник тезисов докладов. Алчевск : ФГБОУ ВО «ДонГТУ», 2023. С. 81–83. EDN NETJLB
10. Пикалова М. В., Желтобрюхова О. Е., Онощенко В. Н. Начальные условия для корректировки режимов фрезерования плоскостей с учетом силового замыкания станочного приспособления // Наукоемкие технологии и оборудование в промышленности и строительстве. 2024. № 5 (79). С. 86–95. EDN XIGCVX
11. Картавов С. А. Технология машиностроения (специальная часть). К. : Вища школа. Головное изд-во, 1984. 272 с.
12. Крейдич Е. А., Скуратов Д. Л., Рязанов А. И. Нормирование точности машиностроительного производства : учебное пособие. Самара : Самарский университет, 2021. 115 с. URL: <https://e.lanbook.com/book/256916> (дата обращения: 18.02.2025). Режим доступа: для авториз. пользователей.
13. Ефимов В. В. Улучшение качества продукции, процессов, ресурсов : учебное пособие. М. : Компания КноРус, 2007. 223 с. EDN QRZOBL
14. Геометрические построения кривых линий : учебно-методическое пособие / сост. Т. В. Шустикова, И. В. Сергеева. Владивосток : Изд-во Дальневосточного федерального университета, 2019. 27 с. URL: https://www.dyfu.ru/upload/medialibrary/1f3/Shustikova_T.V.,_Sergeeva_I.V._Geometricheskie_postroeniya_krivykh_linij.pdf (дата обращения: 18.02.2025).
15. Денисова О. В. Кривые линии : методические указания к выполнению графических работ. Оренбург : ГОУ «ОГУ», 2008. 22 с. URL: <http://elib.osu.ru/handle/123456789/7302> (дата обращения: 18.02.2025).
16. Расчет экономии на точности : электронная программа. URL: <https://disk.yandex.ru/d/Cy4aJBjY-OU4Ew>.
17. Расчет затрат на точности : электронная программа. URL: <https://disk.yandex.ru/d/IAkok51X2kKEgw>.

© Зинченко А. М., Белозерцев В. Н., Пипкин Ю. В.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ТМИК ЛГУ им. В. Даля Витренко В. А.,
к.т.н., доц. каф. ММК ДонГТУ Изюмовым Ю. В.**

Статья поступила в редакцию 14.03.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Зинченко Андрей Михайлович, канд. экон. наук, доцент, зав. каф. технологии и организации машиностроительного производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Белозерцев Валерий Николаевич, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник управления перспективных научных исследований
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Пипкин Юрий Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры технологии и организации машиностроительного производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия,
e-mail: tmsi_pipkin@mail.ru

Zinchenko A. M., Belosertsev V. N., *Pipkin Yu. V. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: tmsi_pipkin@mail.ru)

ANALYSIS OF HYPERBOLIC INTERDEPENDENCE BETWEEN ACCURACY AND PRIME COST OF EDGE CUTTING MACHINING

The article provides a rationale and theoretical studies of the hyperbolic type interdependence between the parameters of accuracy and prime cost of technological processes of edge cutting machining. Formulas for determining the magnitude of change in parameters are obtained.

Key words: mechanical processing, processing accuracy, processing prime cost.

References

1. Eleckih P. E. Evolution of technological modes [E`volyuciya texnologicheskix ukladov]. Aktual'nye voprosy ekonomiki i informacionnyh tekhnologij: sbornik tezisov i statej dokladov 59-oj nauchnoj konferencii aspirantov, magistrantov i studentov BSUIR. Minsk. 2023. Pp. 332–334. URL: <https://libeldoc.bsuir.by/handle/123456789/52906> (date of treatment: 18.02.2025).
2. Ostanin V. A. Technology in the evolution of technological modes: monograph [Tekhnika v evolyucii tekhnologicheskix ukladov: monografiya]. Under the editorship Yachina S. E. Vladivostok : Publishing House Far Eastern Federal University. 2023. 185 p. DOI: 10.24866/7444-5523-1. EDN LAWVEX
3. Pan'shina O. Yu. Methods and models for managing the change of technological structures in mechanical engineering : synopsis of a thesis... of PhD in Engineering [Metody i modeli upravleniya smenoi tekhnologicheskix ukladov v ma-shinostroenii : avtoreferat dis. ... kandidata tekhnicheskix nauk]. Ufa, 2009. 16 p. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003478923> (date of treatment: 18.02.2025). EDN NLBFQN
4. Buldygin S. S. The concept of industrial revolution: from its emergence to the present day [Konceptiya promyshlennoj revolyucii: ot poyavleniya do nashih dnei]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. 2017. No. 420. Pp. 91–95. DOI: 10.17223/15617793/420/12. EDN ZGPXUZ
5. Averina I. S. Industrial revolution and technological structure: essential characteristics, similarities and distinctive features [Promyshlennaya revolyuciya i tekhnologicheskij uklad: sushchnostnye harakteristiki, skhodstva i otlichitel'nye cherty]. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika. 2021. Vol. 23. No. 1. Pp. 52–63. DOI: 10.15688/ek.jvolsu.2021.1.4. EDN ARJOJK
6. Filatov V. V., Ramazanov I. A., Bezpalov V. V., Fedoruk S. Yu. Quality management based on the Deming-Shewhart cycle in the context of change [Upravlenie kachestvom na osnove cikla Deminga — Shuxarta v usloviyax izmenenij]. Journal of Applied Research. 2022. Vol. 4. No. 8. Pp. 336–341. DOI: 10.47576/2712-7516_2022_8_4_336. EDN QUIPEN

7. Denisova Ya. V. Quality management of manufacturing processes of mechanical engineering products in the network [Upravlenie kachestvom processov proizvodstva produkci mashinostroeniya v seti]. Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). Pp. 28–34. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-28-34. EDN CBZOQE

8. Kunakov E. P. Improving the quality management system of mechanical engineering production based on the development of the PDCA cycle : synopsis of a thesis ... of PhD in Engineering [Sovershenstvovanie sistemy menedzhmenta kachestva mashinostroitel'nogo proizvodstva na osnove razvitiya cikla PDCA : avtoref. diss. ... kand. texn. nauk]. Irkutsk : FSBEI HE "Irkutskij nacional'nyj issledovatel'skij tekhnicheskij universitet", 2024. 126 p. URL: <https://www.istu.edu/deyatelnost/nauka/dissertatsii/elementy/74846> (date of treatment: 18.02.2025). EDN PBZHFH

9. Pipkin Yu. V., Zinchenko A. M. Improving the accuracy of edge cutting machining as a driver for the implementation of innovative systems of machine tools using the example of plane milling [Povyshenie tochnosti mekhanicheskoy lezviynoj obrabotki kak drajver vnedreniya innovacionnyh sistem stanochnyh prispособlenij na primere frezerovaniya ploskostej]. Puti sovershenstvovaniya tekhnologicheskikh processov i oborudovaniya promyshlennogo proizvodstva : sbornik tezisov dokladov. Alchevsk : FSBEI HE "DonSTU". 2023. Pp. 81–83. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_57629112_31835000.pdf (date of treatment: 18.02.2025). EDN: NETJLB

10. Pikalova M. V., Zheltobryuhova O. E., Onopchenko V. N. Initial conditions for adjusting modes of planes milling considering the force closure of workholding fixture [Nachal'nye usloviya dlya korrekcirovki rezhimov frezerovaniya ploskostej s uchetom silovogo zamykaniya stanochnogo prispособleniya]. Knowledge-intensive technologies and equipment in industry and building. 2024. No. 5(79). Pp. 86–95. URL: [download/elibrary_75108769_89099862.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_75108769_89099862.pdf) (date of treatment: 18.02.2025). EDN XIGCVX

11. Kartavov S. A. Mechanical engineering technology (special part) [Tekhnologiya mashinostroeniya (special'naya chast')]. K. : Vishha shkola. Golovnoe izd-vo, 1984. 272 p. (rus)

12. Krejdich E. A., Skuratov D. L., Ryazanov A. I. Standardization of accuracy of mechanical engineering production : a study letter. [Normirovanie tochnosti mashinostroitel'nogo proizvodstva: uchebnoe posobie]. Samara : Samara University, 2021. 115 p. URL: <https://e.lanbook.com/book/256916> (date of treatment: 18.02.2025). Access mode: for authorized users.

13. Efimov V. V. Improving the quality of products, processes, resources: a study letter [Uluchshenie kachestva produkci, processov, resursov : uchebnoe posobie] M. : Kompaniya KnoRus. 2007. 223 p. (rus) EDN QRZOBL

14. Geometric constructions of curved lines : a study guide [Geometricheskie postroeniya krivykh linij : uchebno-metodicheskoe posobie]. Contrib. Shustikova T. V., Sergeeva. I. V. Vladivostok : Publishing House Far Eastern Federal University, 2019. 27 p. URL: https://www.dvfu.ru/upload/medialibrary/1f3/Shustikova_T.V.,_Sergeeva_I.V._Geometricheskie_postroeniya_krivykh_linij.pdf (date of treatment: 18.02.2025).

15. Denisova O. V. Curved lines: guidelines for performing graphic works [Krivyje linii: metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu graficheskikh rabot]. Orenburg : SEI "OSU", 2008. 22 p. URL: <http://elib.osu.ru/handle/123456789/7302> (date of treatment: 18.02.2025).

16. Calculation of savings on accuracy : electronic program. URL: <https://disk.yandex.ru/d/Cy4aJBjY-OU4Ew> (date of treatment: 18.02.2025).

17. Calculation of costs on accuracy : electronic program. URL: <https://disk.yandex.ru/d/1Ak0k51X2kKEgw> (date of treatment: 18.02.2025).

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zinchenko Andrey Mikhailovich, PhD in Economic Sciences, Assistant Professor, Acting Head of the Department of Technology and Machine-building Production
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Belosertsev Valery Nikolaevich, PhD in Engineering, Senior Researcher of the Advanced Research Department
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Pipkin Yury Vladimirovich, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Technology and Machine-building Production
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia,
e-mail: tmsi_pipkin@mail.ru

УДК 621.785:669.15

EDN: WLPYHS

Зинченко А. М., *Кучма С. Н., Стародубов С. Ю.
Донбасский государственный технический университет
*E-mail: kuchmalana@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ДОСТАРИВАНИЯ ПРУТКОВ МАЛОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ СПЛАВА 44НХМТ

Работа посвящена разработке программы, позволяющей определять оптимальный режим достаривания прутков из элинварного дисперсионно-твердеющего сплава 44НХМТ с различным содержанием основных легирующих элементов: никеля, хрома, титана на заготовительном этапе производства изделий.

Ключевые слова: элинварный сплав, добротность, температурный коэффициент частоты, достаривание, заготовительное производство, прутки малого сечения, оптимальный режим, блок-схема, переменные алгоритма.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Для изготовления ряда специфических изделий, применяемых в системах связи, радиоэлектронная промышленность нуждается в малогабаритных прутках элинварного сплава 44НХМТ, обладающих высокой (более 25000 ед.) добротностью Q при значениях температурного коэффициента частоты (ТКЧ) в пределах $\pm 3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ в широком климатическом интервале температур от -60 до $+85 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Исследования сплава 44НХМТ показали возможность получения малогабаритных прутков с малыми значениями ТКЧ и высокой добротностью [1]. Однако необходимые значения ТКЧ, лежащие в пределах $\pm 3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, обеспечиваются в узком интервале температур окончательного старения. При этом экспериментальные исследования, выполненные на различных образцах, показали, что выбор оптимального режима термического упрочнения должен определяться индивидуально, опытным путем с учетом химического состава партии заготовок. Это сопряжено со значительными производственными издержками.

Целью работы является автоматизация выбора оптимального режима достаривания для прутков из сплава 44НХМТ с различным содержанием основных легирую-

щих элементов, обеспечивающего оптимальный комплекс требуемых свойств (добротности более 30000 единиц и ТКЧ в пределах $\pm 3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

Объект исследования — процесс автоматизации выбора оптимального режима достаривания прутков малого сечения из элинварного дисперсионно-твердеющего сплава 44НХМТ на заготовительном этапе производства изделий.

Предмет исследования — зависимость режимов достаривания прутков малого сечения из элинварного дисперсионно-твердеющего сплава 44НХМТ от колебаний основных легирующих элементов никеля Ni, хрома Cr, титана Ti.

Задачи исследования:

- выбор и обоснование математической модели зависимости добротности Q и температурного коэффициента частоты ТКЧ элинварного дисперсионно-твердеющего сплава 44НХМТ от концентраций основных легирующих элементов: Ni, Cr, Ti и температур достаривания;

- разработка алгоритма выбора оптимального температурного режима достаривания от колебаний концентраций основных легирующих элементов Ni, Cr, Ti;

- реализация разработанного алгоритма в одной из систем программирования.

Методика исследования. Для определения элинварных свойств дисперсионно-

твердеющего сплава 44НХМТ в работе использован метод подсчета числа свободных колебаний (метод измерения декремента затухания).

Испытываемые образцы (заготовки резонаторов ЭМФ), в зависимости от величины резонансного сигнала, намагничивали током от 1 до 2 А.

Нагрев образцов осуществляли в климатической камере с точностью поддержания температуры $\pm 1^\circ\text{C}$.

Для повышения точности определение резонансной частоты f проводили по III гармонике.

ТКЧ определяли по температурному уходу резонансной частоты в интервале температур $+5\dots+55^\circ\text{C}$, $+25\dots-60^\circ\text{C}$ и $+25\dots+85^\circ\text{C}$ по формуле

$$TKЧ = \frac{df}{dT} = \frac{f_2 - f_1}{f_1(t_2 - t_1)},$$

где f_1 — резонансная частота при комнатной температуре, Гц;

f_2 — резонансная частота при температуре нагрева (охлаждения), Гц;

t_1 — комнатная температура, $^\circ\text{C}$;

t_2 — температура нагрева (охлаждения), $^\circ\text{C}$.

Для определения добротности был выбран метод подсчета числа периодов свободных колебаний (или метод измерения декремента затухания). Выбранный метод реализует формулу

$$Q = \frac{\pi \cdot N}{\ln \frac{A_1}{A_2}},$$

где N — произвольное целое число периодов,

A_1, A_2 — амплитуды напряжения затухающего колебательного процесса.

При соотношении амплитуд, равном $\frac{A_1}{A_2} = L^{0,1\pi}$, показания счетчика будут соответствовать значению $0,1Q$ (L — длина образца). В этом случае погрешность измерения

зависит от погрешности счета и неточности установки порогов компараторов.

Испытания осуществляли на специально разработанном измерительном комплексе, реализующем выбранный метод определения добротности и включающем прибор ПКП-17, работающий совместно с частотомером ЧЗ-34А. Структурная схема измерительного комплекса для определения эливарных свойств представлена на рисунке 1.

Прибор ПКП-17 предназначен для контроля добротности цилиндрических резонаторов, работающих на крутильных колебаниях, и пластинчатых резонаторов, работающих на продольных колебаниях. В основе работы прибора лежит принцип возбуждения магнитострикционных резонаторов гармоническим сигналом и получения свободно затухающих колебаний. Измерение добротности осуществляется частотомером.

Прибор ПКП-17, структурная схема которого представлена на рисунке 2, работает следующим образом. Для получения максимальной величины добротности перед измерением резонатор необходимо обязательно намагнитить током величиной в 1 А в течение 30 секунд. После намагничивания резонатор вставляется в датчик таким образом, чтобы площадь соприкосновения резонатора с его установочной поверхностью была максимальной. Переключаемый генератор обеспечивает девиацию частоты в требуемом диапазоне. Сигналы с перестраиваемого генератора управляются импульсами тактового генератора и подаются на датчик измерительного прибора с исследуемым резонатором.

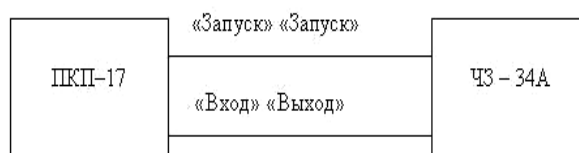
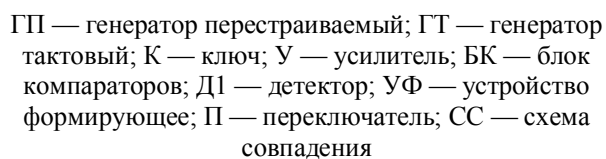


Рисунок 1 — Структурная схема измерительного комплекса для определения эливарных свойств



О проведении контроля свидетельствует свечение светодиода на лицевой панели прибора. На табло частотомера должно появиться значение контролируемого параметра.

режима измерения служит для выбора режима измерения. В режиме измерения добротности на ключ подается сигнал с блока компараторов, длительность которого пропорциональна величине добротности резонатора. Сходимость контроля добротности составляет $\pm 7\%$.

Так как экспериментально установлено, что на комплекс физических и эливарных свойств влияют колебания концентрации основных элементов сплава: никеля, хрома и титана (в пределах марочного состава), то температура достаривания для каждой партии заготовок подбирается индивидуально.

В работе [4] установлено, что зависимость между элинварными свойствами и концентрацией основных легирующих элементов сплава описывается полиномом вида

где $a_0(T) - c_3(T)$ — коэффициенты регрессии;

$\bar{x}_{Ni}$, $\bar{x}_{Cr}$, $\bar{x}_{Ti}$ — средние концентрации никеля, хрома и титана согласно марочному составу.

77

Каждый ввод контролируется процедурой обработчика ошибок, что предотвращает ввод значений, выходящих за пределы максимальной и минимальной концентрации элементов (блоки 6–7).

В блоке 9 вычисляются отклонения фактических концентраций элементов от их средних значений по формулам:

$$Cr.D = ABS(Cr.F - Cr.Mid);$$
$$Ni.D = ABS(Ni.F - Ni.Mid);$$

$$Ti.D = ABS(Ti.F - Ti.Mid).$$

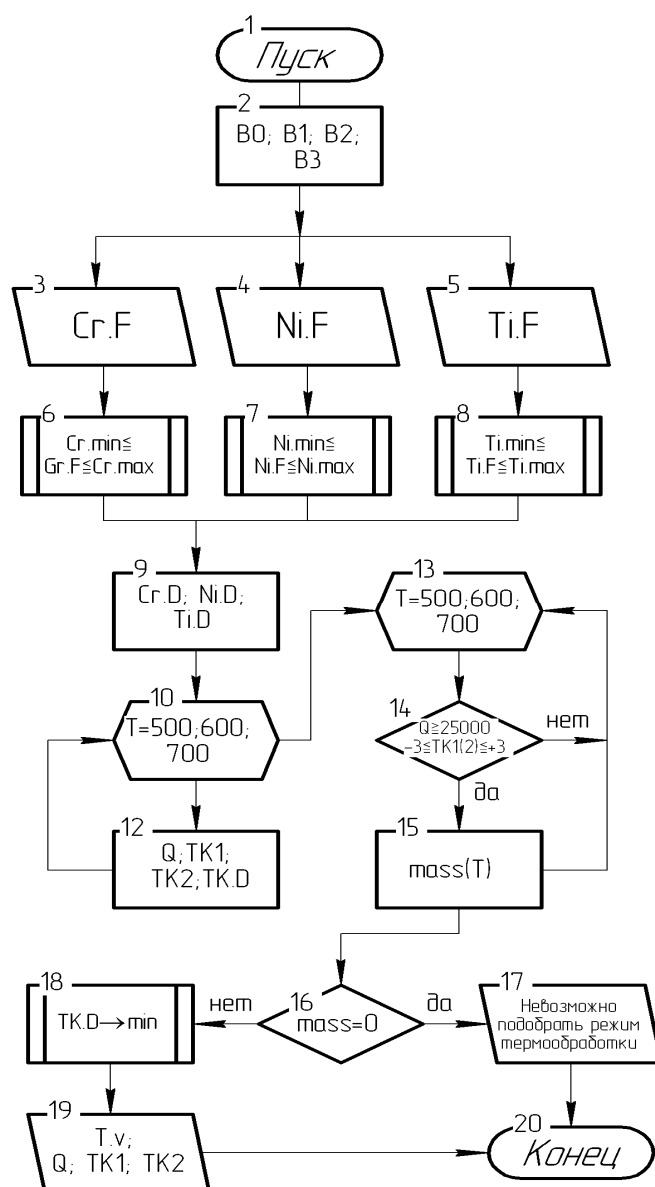


Рисунок 3 — Блок-схема алгоритма выбора режима термообработки

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Затем последовательно в цикле (блоки 10 и 11) для фиксированных значений температуры старения вычисляются значения добротности, ТКЧ и интервала изменения ТКЧ по формулам:

$$\begin{aligned} Q[T] &= B0[Q] + B1[Q] \cdot Ni.D + B2[Q] \cdot Cr.D + B3[Q] \cdot Ti.D; \\ TK1[T] &= B0[TK1] + B1[TK1] \cdot Ni.D + B2[TK1] \cdot Cr.D + B3[TK1] \cdot Ti.D; \\ TK2[T] &= B0[TK2] + B1[TK2] \cdot Ni.D + B2[TK2] \cdot Cr.D + B3[TK2] \cdot Ti.D; \\ TK.D &= ABS(TK1 - TK2). \end{aligned}$$

В блоках 13–15 формируется массив значений температур старения, обеспечивающий заданный уровень свойств. С этой целью для полученных значений Q[T], TK1[T], TK2[T] проверяется выполнение условия

$$Q[T] \leq 25000 \text{ AND } ABS(TK1[T]) \leq 3 \text{ AND } ABS(TK2[T]) \leq 3.$$

Таблица 1

Описание переменных алгоритма и программы

Идентификатор	Обозначаемый параметр	Начальное значение	Размерность	Тип данных
Cr.F	Фактические концентрации хрома, никеля и титана в изучаемом сплаве	43,75	%	real
Ni.F		4,65		
Ti.F		2,70		
Cr.Mid	Средние значения концентраций хрома, никеля и титана	43,75	%	real
Ni.Mid		4,65		
Ti.Mid		2,70		
Cr.Min	Минимальные значения концентраций хрома, никеля и титана	43,0	%	real
Ni.Min		3,9		
Ti.Min		2,3		
Cr.Max	Максимальные значения концентраций хрома, никеля и титана	44,5	%	real
Ni.Max		5,4		
Ti.Max		3,1		
Cr.D	Отклонения фактических концентраций хрома, никеля и титана от средних	0	%	real
Ni.D		0		
Ti.D		0		
B0	Массивы значений коэффициентов полиномиальных моделей	–	–	array [1..3]
B1				
B2				
B3				
T	Температура старения сплава	500; 600; 700	°C	Integer
Q	Расчетное значение добротности	–	–	real
TK1	Температурный коэффициент частоты в интервале температур –60...+20 °C	–	–	real
TK2	Температурный коэффициент частоты в интервале температур +20 ... +85 °C	–	–	real
TK.D	Разность значений ТКЧ в интервале температур –60...+20 и +20...+85 °C	–	–	real
massT	Массив значений температуры старения, при которых физические свойства сплава находятся в заданных пределах	0	–	array [1..3]
T.v	Рекомендуемое значение температуры старения			

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Если для текущего значения температуры условие выполняется, то это значение температуры записывается в служебную переменную-массив *mass*.

В блоке 16 обрабатывается полученный массив. Если его размерность 0 (нет элементов), то формируется сообщение для пользователя «Невозможно подобрать режим термообработки» (блок 17).

Если в массиве есть значения температур (в общем случае более 1), то запускается процедура блока 18. Эта процедура выбирает из всех температур старения, обеспечивающих заданный комплекс свойств, ту, для которой интервал изменения ТКЧ минимальный. Затем формируется сообщение для пользователя, содержащее найденную температуру старения, а также расчетные значения ТКЧ и добротности сплава при этой температуре, после чего алгоритм завершает свою работу.

На основании вышеприведенных математических моделей и алгоритма разработана прикладная программа для выбора оптимального режима старения. Программа написана на языке программирования Object Pascal и реализована в среде программирования Delphi.

Программа имеет графический интерфейс и работает в оконном режиме на персональных компьютерах под управлением операционной системы семейства Windows. Программа не требует инсталляции.

Пусковым файлом программы является исполняемый файл *Termo.exe*, расположенный на одном из дисков компьютера. После запуска указанного файла на выполнение на дисплей выводится окно ввода исходных данных программы (рис. 4).

Исходными данными для программы являются фактические концентрации в сплаве 44НХМТ никеля, хрома и титана. Пользователь вводит указанные концентрации в соответствующие поля ввода. После ввода указанных величин для получения результатов расчета пользователь должен нажать кнопку <Рассчитать!>, и на

экране дисплея будет выведено окно результатов расчета (рис. 5).

Результатами работы программы являются:

- рекомендуемая температура старения;
- расчетные значения добротности Q , ТКЧ_{-60...+20}, ТКЧ_{+20...+85}, достигаемые при рекомендуемом режиме термообработки.

Нажатие кнопки <Вернуться> закрывает окно результатов и возвращает пользователя в главное окно программы, где он может либо повторить расчет, либо завершить работу программы нажатием кнопки <Выход>.

Для оценки адекватности результатов работы программы были определены концентрации легирующих элементов для четырех образцов с помощью масспектрометра OES 8000S. Полученные значения концентраций легирующих элементов приведены в таблице 2.

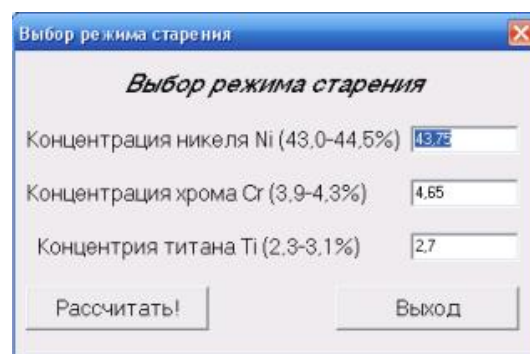


Рисунок 4 — Окно ввода исходных данных программы

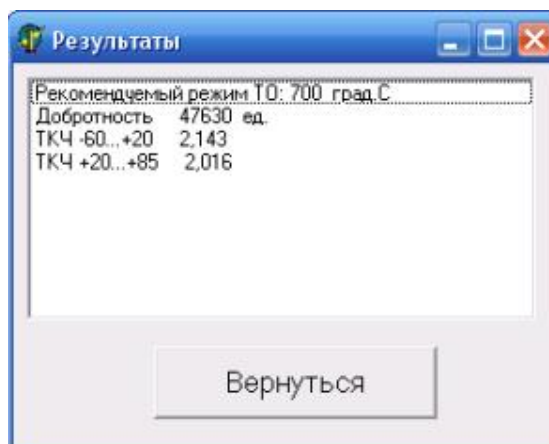


Рисунок 5 — Окно вывода результатов расчета

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Таблица 2
Концентрация легирующих элементов
в экспериментальных плавках

Номер образца	Концентрация легирующих элементов, %		
	Ni	Cr	Ti
1	43,5	4,58	3,10
2	44,0	4,70	2,74
3	44,1	3,90	2,50
4	43,8	4,15	3,0

Динамическое старение проводили в печи лабораторной муфельной LF-9/13 при температуре 700 °С с приложением растягивающих напряжений 40 МПа и выдержкой при заданной температуре в течение 25 минут. Степень деформации полученных прутков Ø3,4 мм составила 63–67 %.

Температуру окончательного искусственного старения (достаривания) для каждого образца определяли индивидуально по разработанной программе, с учетом содержания в образце основных легирующих элементов: никеля, хрома, титана.

Температура окончательного старения (достаривания), обеспечивающая требуе-

мый комплекс эливарных свойств (близкие к нулевым значения ТКЧ при высокой добротности), составила:

для 1-го образца — 600 °С,
для 2-го образца — 550 °С,
для 3-го образца — 700 °С,
для 4-го образца — 600 °С.

Таким образом, используя разработанную программу, определили температуру достаривания и получили ожидаемые значения добротности и ТКЧ.

Фактические значения добротности и ТКЧ были определены на образцах после достаривания при температуре, установленной расчетом по программе, на измерительном комплексе определения эливарных свойств по методу измерения декремента затухания.

В таблице 3 приведены данные по расчетным и измеренным значениям добротности и ТКЧ для вышеприведенных образцов.

Таким образом, разработанная программа дает возможность расчетным путем определять режим достаривания для заготовок из сплава 44НХМТ с различным содержанием основных легирующих элементов.

Таблица 3
Физические и эливарные свойства экспериментальных образцов

Номер образца	Температура достаривания, °С	Добротность		ТКЧ _{-60...+20 °С}		ТКЧ _{+20...+85 °С}	
		расчетная	измеренная	расчетная	измеренная	расчетная	измеренная
1	600	53089	50500	1,98	2,08	1,63	1,55
2	600	48086	45700	2,04	2,14	1,89	1,80
3	700	42758	40600	3,23	3,06	3,22	3,10
4	600	51547	49000	2,40	2,50	2,27	2,16

Выводы и направление дальнейших исследований. Разработанная программа и проведенные исследования на прутках из эливарного сплава 44НХМТ позволили:

1) определить оптимальный режим окончательного старения (достаривания) для прутков с различным содержанием основных легирующих элементов Ni, Cr, Ni;

2) обеспечить оптимальный комплекс требуемых свойств (добротности более

30000 единиц и ТКЧ в пределах $\pm 3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) для прутков малого сечения из эливарного сплава 44НХМТ;

3) достичь высокой стабильности качества термомеханической обработки прутка, что в производственных условиях ведет к сокращению брака по эливарным свойствам;

4) сократить сроки технологической подготовки производства.

Список источников

1. Кучма С. Н. Улучшение комплекса свойств эливарного сплава 44НХМТ методом комбинированной деформационно-термической обработки : дисс. ... канд. техн. наук. Харьков, 2010. 186 с.
2. Спосіб отримання малогабаритних прутків з дроту еліварного сплаву : пат. 30882 Україна / С. М. Кучма ; №и200714161, заявл. 17.12.2007 ; опубл. 11.03.2008, Бюл. № 5. 4 с.
3. Кучма С. Н., Стародубов С. Ю. Получение малогабаритных прутков из сплава 44НХМТ методом динамического старения // Стратегия качества в промышленности и образовании : сборник трудов IV международной конференции: в 2 т. Днепропетровск — Варна : Фортуна-ТУ-Варна, 2008. Т. 1. С. 350–352.
4. Оптимизация химического состава сплава 44НХМТ применительно к пруткам, полученным методом динамического старения / С. Н. Кучма, А. П. Любченко, Д. Б. Глушкова, С. Ю. Стародубов // Восточно-европейский журнал новых технологий. 2008. № 35-1. С. 53–65.

© Кучма С. Н., Зинченко А. М., Стародубов С. Ю.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. железнодорожного транспорта
ЛГУ им. В. Даля Киреевым А. Н.,
к.т.н., проф. каф. металлургических технологий ДонГТУ Куберским С. В.*

Статья поступила в редакцию 14.03.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Зинченко Андрей Михайлович, канд. экон. наук, доцент, зав. каф. технологии и организации машиностроительного производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Кучма Светлана Николаевна, канд. техн. наук, доцент каф. технологии и организации машиностроительного производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия,
e-mail: kuchmalana@mail.ru

Стародубов Сергей Юрьевич, старший преподаватель каф. технологии и организации машиностроительного производства
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

Zinchenko A. M., *Kuchma S. N., Starodubov S. Yu. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: kuchmalana@mail.ru)

AUTOMATED SELECTION OF THE OPTIMUM FINAL AGEING MODE FOR LIGHT SECTION BARS MADE OF 44 HXMT ALLOY

The work is devoted to the development of programme allowing to determine the optimum mode of final ageing bars from elinvar dispersion-hardening 44 HXMT alloy with different con-tent of the main alloying elements: nickel, chromium, titanium at the preparatory stage of prod-ucts manufacturing.

Key words: elinvar alloy, quality, temperature coefficient of frequency, final ageing, blank production, light section bars, optimum mode, block-scheme, algorithm variables.

References

1. Kuchma S. N. *Improvement of complex properties of elinvar alloy 44 HXMT by the method of combined deformation and heat treatment : thesis ... PhD in Engineering [diss. ... kand. tekhn. nauk.].* Har'kov, 2010. 186 p. (rus)
2. *Method for producing small-sized bars from elinvar alloy wire : pat. 30882 Ukraine / S. M. Kuchma ; No. u200714161 ; submitted 17.12.2007; published 11.03.2008, Bulletin No. 5. 4 p.*
3. Kuchma S. N., Starodubov S. Yu. *Obtaining of small-sized bars from 44 HXMT alloy by dynamic ageing method [Poluchenie malogabaritnyh prutkov iz splava 44NHMT metodom dinamicheskogo stareniya]. Strategiya kachestva v promyshlennosti i obrazovanii : sbornik trudov IV mezhdunarodnoj konferencii : v 2-h tomah. Dnepropetrovsk — Varna : Fortuna-TU-Varna, 2008. Vol. 1. Pp. 350–352. (rus)*
4. Kuchma S. N., Lyubchenko A. P., Glushkova D. B., Starodubov S. Yu. *Optimisation of the chemical composition of 44HXMT alloy as applied to bars obtained by dynamic ageing method [Optimizaciya himicheskogo sostava splava 44 HXMT primenitel'no k prutkam, poluchennym metodom dinamicheskogo stareniya]. Eastern European Scientific Journal. 2008. No. 35-1. Pp. 53–65. (rus)*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zinchenko Andrey Mikhailovich, PhD in Economic Sciences, Assistant Professor, Acting Head of the Department of Technology and Machine-building Production
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

Kuchma Svetlana Nikolayevna, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Technology and Machine-building Production
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia,
e-mail: kuchmalana@mail.ru

Starodubov Sergey Yuriyevich, Senior lecturer of the Department of Technology and Machine-building Production
Donbass State Technical University,
Alchevsk, Russia

СТРОИТЕЛЬСТВО

CIVIL ENGINEERING

***Шевченко А. А., Николаева Е. К.**

Донбасский государственный технический университет

**E-mail: rigorevich@inbox.ru*

АДАПТИВНАЯ МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА ЗОНИРОВАНИЯ ДВОРОВЫХ ТЕРРИТОРИЙ

В статье рассматривается проект-предложение создания адаптивной модульной системы зонирования для благоустройства дворовых территорий. С помощью метода комбинаторики по принципу периодической мозаики проектируемая система позволяет создавать различные уникальные многофункциональные организации дворов, подходящие для многообразных конфигураций дворовых участков.

Ключевые слова: благоустройство дворовых территорий, адаптивная модульная система зонирования дворовых территорий, SWOT-анализ, дизайн-код проектирования, функциональное зонирование, модульные формы.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Человек неотделим от социума и созданного им пространственно-урбанистического окружения. Ежедневно он получает большое количество эстетической информации, которая формирует его мировоззрение, опыт, настроение и жизненную позицию как в широком смысле — гражданина страны, так и в узком — члена семьи.

Одним из направлений государственной политики РФ является эстетически грамотное благоустройство городских дворов [1]. Это то пространство, через порог которого изо дня в день переступает человек, с первых шагов формируя свой настрой на день.

Кроме того, дворовое пространство многоквартирных зданий — это архитектурно-ландшафтный многокомпонентный объект городской среды, направленный на длительное времяпрепровождение и сплочение людей разных возрастов и интересов.

В своём архитектурно-планировочном смысле дворовое пространство выполняет автономичную функцию: создаёт пересечение тихого и активного отдыха разных возрастных групп. Придомовые площадки различного назначения призваны обеспечить разнообразные варианты досуга вблизи мест проживания [2].

К проблематике устоявшихся городов в сфере благоустройства городских дворов относится невозможность преобразования имеющихся зон дворовых пространств в современные многофункциональные объединения пространства, отвечающие сегодняшним запросам человека. Многие дворы имеют нетиповые конфигурации и ряд особенностей формообразования, сложившегося определенным образом по ряду множественных причин. Таким образом, создание глобального типового благоустройства дворов является сложной и весьма неэффективной и затратной задачей.

Постановка задачи. Каждый архитектор в своей жизни стремится создать уникальный объект, но «обжигается» о ряд экономических и социальных вопросов, что приводит его идею к типизации и, как следствие, — к потере уникальности. Решением данной проблемы может стать создание такого типового, которое при различных обстоятельствах будет создавать уникальное и идентичное.

Поэтому в представленной работе была поставлена задача разработать универсальную систему зонирования дворовых территорий, которая могла бы адаптироваться и под различные особенности дворового пространства, и под запрашиваемые жителями функции.

Изложение материала. Для решения поставленной задачи предлагается применить проект на основе адаптивной модульной системы зонирования дворовых территорий (далее — АМСЗ). Это позволит комплексно и эффективно устранить описанную выше проблему и найти новый подход к современному городскому благоустройству.

Проектом подразумевается создание универсальной системы зонирования дворовых территорий, которая могла бы адаптироваться под различные конфигурации и особенности формообразования двора, трансформируясь и выполняя множественные запрашиваемые жителями функции.

Для удачного и перспективного жизненного цикла проекта благоустройства дворовой территории в ходе предпроектного анализа необходимо определить его целевые группы, т. е. всех участников данного проекта. При этом должны быть учтены семьи различного состава, дети, молодежь, пенсионеры, МГН и работники коммунальных служб. После определения целевых групп проекта возникает идеология проекта, на основе которой выстраивается вся цепочка проектирования, направленная на создание воспитывающей среды. В результате от взрослого идет насыщение среды смыслами и ценностями, от взаимодействия взрослого и ребенка — раскрытие этих смыслов и ценностей, а в последствии у ребенка происходит осмысление всех этих процессов.

Концепция проекта АМСЗ заключается в создании трех модулей из правильных 2Д-фигур, у которых все стороны будут равняться одной единой величине (модулю). Таким образом, с помощью метода комбинаторики данные фигуры могут создавать различные конфигурации по горизонтали и вертикали как между одинаковыми геометрическими формами, так и путем сочетания различных форм модулей (рис. 1).

В основу комбинаторики проекта АМСЗ взят принцип периодической мозаики. Модули могут быть представлены как

в виде отдельно стоящих малых архитектурных форм, так и в виде объединенной многокомпонентной системы зонирования.

На этапе предпроектного анализа для определения эффективных методов развития проекта АМСЗ, а также устранения несовершенств, которые могут возникнуть на всех его этапах формирования, был проведен SWOT-анализ [3], в ходе которого выявлены сильные и потенциально слабые стороны проекта, а также угрозы и возможности внешней среды (рис. 2).

На основании всех изученных вопросов в рассмотренном SWOT-анализе АМСЗ был выведен универсальный дизайн-код проектирования для различных типов дворов, основу которого составляют следующие компоненты благоустройства (рис. 3):

- элементы озеленения;
- площадки различного назначения;
- многофункциональное и трансформируемое пространство;
- цветовое решение, где цвет будет выступать одним из самых сильных «законов красоты», воздействующим на психику человека, а также создающим оптические иллюзии, которые будут влиять на формообразование объектов.

В проекте АМСЗ предлагаются следующие функциональные зоны, способствующие формированию воспитывающей среды:

- зона тихого отдыха старших возрастных групп с обособленной локализацией в зеленой зоне для воссоединения с природой, отдыха и настольных игр;
- удаленная игровая зона по интересам для детей различных возрастных групп;
- зона коворкинга — принципиально новая ячейка в современной структуре двора, представляющая объединяющее пространство для совместной работы;
- прогулочная зона.

Зонирование дворовой территории выполняется при помощи модульных форм на основе трех правильных 2Д-фигур (треугольник, квадрат и шестиугольник), у которых все стороны равны единой величине —

СТРОИТЕЛЬСТВО

модулю (рис. 4). Размеры и вес модульных форм обеспечивают их мобильность, и как следствие формообразующие способности. Это позволяет создавать новые простран-

ства из МАФ, например, праздничную среду, выставочный уголок, уединенный уголок для коммуникации, территорию для дворовых мероприятий.

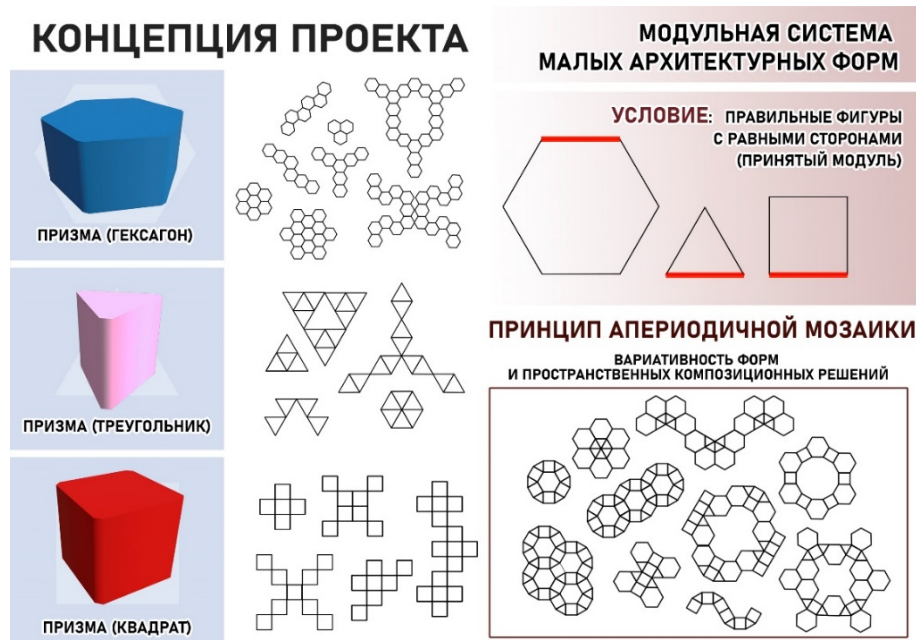


Рисунок 1 — Концепция проекта АМСЗ

SWOT-АНАЛИЗ ПРОЕКТА



Рисунок 2 — SWOT-анализ проекта АМСЗ



Рисунок 3 — Дизайн-код проекта АМСЗ



Рисунок 4 — Визуализации проекта АМСЗ

Функциональность модулей расширяется благодаря возможности высаживать в них цветы. Такое приподнятое над землей расположение цветников позволит в прямом смысле слова прикоснуться к природе маломобильным жителям микрорайона. Возможность перемещения по территории двора для МГН обеспечивается необходимой шириной дорожек и их мощением [4, 5].

Вышеперечисленные особенности модульной системы формируют динамичную

развивающуюся среду для благоприятной коммуникации между различными возрастными группами жителей многоэтажек. Создаются широкие возможности активизировать новые виды деятельности, знакомиться и взаимодействовать с социумом, ухаживать за растениями, приучать молодое поколение к порядку, вместе обучаться и познавать мир с разных точек зрения.

Выполненные исследования по проектному предложению внедрения модульной си-

стемы в благоустройство дворовых территорий позволяют сделать следующие **выводы**:

1. Предложенная адаптивная модульная система зонирования является экономически эффективным и выгодным решением для уже существующих градостроительных городских условий.

2. Исчезает потребность в глобальном переустройстве конфигураций и зон дворов.

3. Проектируемая модульная система состоит из типовых фигур, которые легки в изготовлении на производстве, при этом

они могут создавать множественные архитектурно-планировочные решения.

4. Модули — новые предлагаемые многофункциональные объекты в системе благоустройства.

Дальнейшие исследования будут направлены на рассмотрение универсальных типов модульного зонирования других территорий, а также на подбор элементов озеленения для различных климатических условий и выбор уникальных цветовых решений.

Список источников

1. Паспорт федерального проекта «Формирование комфортной городской среды»: утв. протоколом заседания проектного комитета по национальному проекту «Жилье и городская среда» от 21 декабря 2018 г. № 3. URL: https://bazanra.ru/download/pdf/?target_url=/sovet-pri-prezidente-rf-po-strategicheskomu-razvitiuu-i-natsionalnym-proektam-pasport-ot21122018-h4326114/.

2. СП 42.13330.2016. Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений. Актуализированная редакция СНиП 2.07.01-89*. М.: Госстрой, 2016. 125 с.

3. Майсак О. С. SWOT-анализ: объект, факторы, стратегии. Проблема поиска связей между факторами // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2013. № 1 (21). С. 151–157. EDN PZKVYJ

4. СП 82.13330.2016. Благоустройство территорий. Актуализированная редакция СНиП III-10-75 (с Изменениями N 1, 2). М.: Госстрой, 2016. 48 с.

5. СП 137.13330.2012. Жилая среда с планировочными элементами, доступными инвалидам. Правила проектирования. М.: Госстрой, 2012. 37 с.

© Шевченко А. А., Николаева Е. К.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СА ДонГТУ Бондарчуком В. В.,
директором ИП «Подлевская Е. Г.» Подлевским Е. О.**

Статья поступила в редакцию 28.02.2025.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Шевченко Алина Алексеевна, ассистент каф. строительства и архитектуры
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия,
e-mail: rigorevich@inbox.ru

Николаева Елена Климовна, канд. техн. наук, доцент каф. строительства и архитектуры
Донбасский государственный технический университет,
г. Алчевск, Россия

*Shevchenko A. A., Nikolaieva E. K. (Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia, *e-mail: rigorevich@inbox.ru)

ADAPTIVE MODULAR SYSTEM FOR ZONING YARD AREAS

The article deals with the proposed project to create an adaptive modular zoning system for landscaping the yards. Using a combinatorial method based on the principle of periodic mosaics, the

designed system allows to create a variety of unique multi-functional yard organizations suitable for a variety of yard configurations.

Key words: yard landscaping, adaptive modular system for zoning yard areas, SWOT-analysis, design-code for planning, functional zoning, modular forms.

References

1. Passport of the federal project "Formation of comfortable urban environment" : approved by the records of meeting of the project committee for the national project "Housing and urban environment" dated December 21, 2018 No. 3. URL: https://bazanpa.ru/download/pdf/?target_url=/sovet-pri-prezidente-rf-po-strategicheskomu-razvitiu-i-natsionalnym-proektam-pasport-ot21122018-h4326114/.
2. SP 42.13330.2016. Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements. Actualized edition of SNiP 2.07.01-89*. M. : Gosstroy, 2016. 125 p.
3. Maysak O. S. SWOT-analysis: object, factors, strategies. The problem of finding links between factors [SWOT-analiz: ob"ekt, faktory, strategii. Problema poiska svyazej mezhdu faktorami]. The Caspian Journal: Management and High Technologies. 2013. No. 1 (21). Pp. 151–157. EDN PZKVYJ
4. SP 82.13330.2016. Improvement of territories. Updated edition of SNiP III-10-75 (with Amendments N 1, 2). M. : Gosstroy, 2016. 48 c.
5. SP 137.13330.2012. Residential environment with planning elements accessible to persons with disabilities. Design rules. M. : Gosstroy, 2012. 37 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shevchenko Alina Alekseevna, Assistant lecturer of the Department of Building and Architecture
Donbass State Technical University
Alchevsk, Russia,
e-mail: rigorevich@inbox.ru

Nikolaieva Elena Klimovna, PhD in Engineering, Assistant Professor of the Department of Building and Architecture
Donbass State Technical University
Alchevsk, Russia

СОДЕРЖАНИЕ

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ

Литвинский Г. Г.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ АКСИАЛЬНОЙ ГИДРОМАШИНЫ С ЗУБЧАТО-ТОРЦЕВЫМ
ВЫТЕСНИТЕЛЕМ5

Полозов Ю. А., Лазебник А. Ю., Смекалин Е. С.

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ВЫБОР СПОСОБА ЛИКВИДАЦИИ
АВАРИЙНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ19

Ларченко В. Г., Мележик А. И., Коваленко Е. В.

ЗАВИСИМОСТЬ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ОТ КАЧЕСТВА ПРОЕКТА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК29

МЕТАЛЛУРГИЯ

Русанов И. Ф., Куберский С. В., Проценко М. Ю., Кононенко Г. И.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ЗОЛЫ ТЕПЛОВЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ МЕТОДАМИ ПИРОМЕТАЛЛУРГИИ43

Митичкина Н. Г., Кравцова С. И.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ
ПРИ ТОЛСТОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
СМАЗОК В ЧИСТОВОЙ КЛЕТИ ТЛС 300053

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Зинченко А. М., Белозерцев В. Н., Пипкин Ю. В.

АНАЛИЗ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОЙ ВЗАИМОСВЯЗИ МЕЖДУ ТОЧНОСТЬЮ
И СЕБЕСТОИМОСТЬЮ ЛЕЗВИЙНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ63

Зинченко А. М., Кучма С. Н., Стародубов С. Ю.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМА ДОСТАРИВАНИЯ ПРУТКОВ
МАЛОГО СЕЧЕНИЯ ИЗ СПЛАВА 44НХМТ75

СТРОИТЕЛЬСТВО

Шевченко А. А., Николаева Е. К.

АДАПТИВНАЯ МОДУЛЬНАЯ СИСТЕМА ЗОНИРОВАНИЯ ДВОРОВЫХ ТЕРРИТОРИЙ87

CONTENT

SUBSURFACE MANAGEMENT

<i>Litvinsky G. G.</i> DEVELOPMENT OF AXIAL HYDRAULIC MACHINE DESIGN WITH TOOTHED-END DISPLACER	5
<i>Polozov Yu. A., Lazebnik A. Yu., Smekalin Ye. S.</i> JUSTIFYING TECHNICAL SOLUTIONS AND CHOOSING HOW TO ELIMINATE THE EMERGENCY MINE WORKINGS	19
<i>Larchenko V. G., Melezhik A. I., Kovalenko E. V.</i> DEPENDENCE OF SHIFTS AND DEFORMATIONS OF THE EARTH'S SURFACE ON THE QUALITY OF THE DESIGN OF MINE WORKINGS	29

METALLURGY

<i>Rusanov I. F., Kuberskii S. V., Protsenko M. Yu., Kononenko G. I.</i> THEORETICAL ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF PROCESSING THE THERMAL POWER PLANTS ASHES BY PYROMETALLURGY METHODS	43
<i>Mitichkina N. G., Kravtsova S. I.</i> MATHEMATICAL MODEL FOR CALCULATING THE FRICTION COEFFICIENT FOR PLATE ROLLING WITH TECHNOLOGICAL LUBRICANTS IN THE PM 3000 FINISHING STAND	53

MECHANICAL ENGINEERING

<i>Zinchenko A. M., Belosertsev V. N., Pipkin Yu. V.</i> ANALYSIS OF HYPERBOLIC INTERDEPENDENCE BETWEEN ACCURACY AND PRIME COST OF EDGE CUTTING MACHINING	63
<i>Zinchenko A. M., Kuchma S. N., Starodubov S. Yu.</i> AUTOMATED SELECTION OF THE OPTIMUM FINAL AGEING MODE FOR LIGHT SECTION BARS MADE OF 44 HXMT ALLOY	75

CIVIL ENGINEERING

<i>Shevchenko A. A., Nikolaieva E. K.</i> ADAPTIVE MODULAR SYSTEM FOR ZONING YARD AREAS.....	87
---	----

UDC 30.123 + 504.06 + 550.822 + 6 + 711.55

EDN: DOPXYQ

**Knowledge-intensive technologies
and equipment in industry
and building**

Scientific journal

Issue 7 (81) 2025

**Establisher:
Federal State Budget Educational
Institution of Higher Education «Donbass
State Technical University»**

*Registration Certificate for mass media
PI No. FS77-85961 dated 11.09.2023*

*The journal is included in the List of peer-
reviewed scientific editions in which the
main scientific results of thesis for the degree
of Candidate of Sciences and for the degree
of Doctor of Sciences must be published*

Added to scientometrical database of RISC

*Recommended by academic council
of FSEI HE "DonSTU"
(Record № 8 dated 25.03.2025)*

Format 60×84½
Conventional printed sheet 11,75
Order № 74
Circulation 500 copies
Date of issue: 11.04.2025
The journal is distributed free of charge

Computer layout
Ismailova L. M.

Cover art design
Chernyshova N. V.

Address of establisher, publisher and maker :
FSEI HE "DonSTU"
294204, Lugansk People's Republic,
urban district Alchevsk, Alchevsk, Lenin avenue, 16
E-mail: info@dontu.ru
Web-site: <https://dontu.ru>

Editor-in-chief

Vishnevskiy D. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.,
Rector

Deputy Editor-in-chief

Smekalin E. S. — PhD in Engineering, Asst. Prof.,
Vice-Rector for Science

Editorial board:

Litvinskiy G. G. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Korshunov G. I. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Eremenko V. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Borshchevskiy S. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Korneyev S. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Leonov A. A. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Artiukh V. G. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Sotnikov A. L. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Vitrenko V. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Kuzin A. V. — Doctor of Tech. Sc., Asst. Prof.
Mikhailov A. N. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Kozlov A. M. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Zinchenko A. M. — PhD in Economics, Asst. Prof.
Snitko S. A. — Doctor of Tech. Sc., Asst. Prof.
Korzun E. L. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Bogatyreva E. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Yakovchenko A. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Goncharuk A. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Kuberskiy S. V. — PhD in Engineering, Prof.
Denischenko P. N. — PhD in Engineering, Prof.
Suleymanova L. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Smolyago G. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Bondarchuk V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Psiuk V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Skomskaya S. A. — secretary to the editorial board

For research scientists, PhD seekers, students of
higher educational institutions.

Issue language:
Russian, English