

ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

Выпуск 28 (71) 2022



СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**Сборник
научных трудов
Донбасского государственного технического
института**

Сборник
Выходит 4 раза в год
Основан в июне 1999 г.
Выпуск 28 (71) 2022

Collection of Scientific Papers of DonSTI

Collection
Publishing 4 times a year
Founded in June 1999
Issue 28 (71) 2022

Алчевск
2022

Распространение и тиражирование без официального разрешения ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ» запрещено

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

**Сборник научных трудов
Донбасского государственного
технического института**

Сборник

Выпуск 28 (71) 2022

**Основатель:
ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»**

*Свидетельство Министерства связи
и массовых коммуникаций ЛНР
о регистрации средства массовой информации
ПШ 000169 от 08.12.2020*

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

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

*Рекомендовано учёным советом
ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»
(Протокол № 3 от 28.10.2022)*

Включён в наукометрическую базу данных РИНЦ

Формат 60×84½
Усл. печат. л. 23,63
Заказ № 251
Тираж 100 экз.

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

Адрес редакции, издателя и основателя:
ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»
пр. Ленина, 16, г. Алчевск, ЛНР
94204

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

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

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя и распространителя
средства массовой информации
МИ-СГР ИД 000055 от 05.02.2016

Главный редактор

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

Заместитель главного редактора

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

Редакционная коллегия:

Литвинский Г. Г. — 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.

Харламов Ю. А. — д.т.н., проф.

Артюх В. Г. — д.т.н., проф.

Зинченко А. М. — к.э.н., доц.

Снитко С. А. — д.т.н., проф.

Куберский С. В. — к.т.н., проф.

Должиков В. В. — к.т.н., доц.

Денищенко П. Н. — к.т.н., доц.

Шолух Н. В. — д. арх., проф.

Андрійчук Н. Д. — д.т.н., проф.

Пилавов М. В. — д.т.н., проф.

Бондарчук В. В. — к.т.н., доц.

Псюк В. В. — к.т.н., доц.

Скомская С. А. — секретарь редакционной
коллекции

Для научных сотрудников, аспирантов,
студентов высших учебных заведений.

Язык издания:
русский, английский

Компьютерная вёрстка
Исмаилова Л. М.

© ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022

© Чернышова Н. В., художественное
оформление обложки, 2022

*Посвящается 65-летию
Донбасского государственного
технического института*





ДОНСТУ

ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ІНСТИТУТ

УНІВЕРСИТЕТ



Уважаемые коллеги!

*В современном мире образование и наука — это основа развития человечества. За прошедшие десятилетия ДонГТИ приобрел заслуженную репутацию одного из ведущих вузов Донбасса. За свою историю институт выпустил десятки тысяч специалистов преимущественно технического профиля, среди которых талантливые руководители самого высокого уровня, видные государственные деятели, представители разных отраслей промышленности, прославившие свою **alma mater** на всей территории бывшего СССР. Сегодня сложно представить себе промышленность Луганской Народной Республики без выпускников нашего вуза. В основе его научно-исследовательской и образовательной деятельности — союз традиций и инноваций.*

Со дня предыдущего юбилея в 2017 году прошло не так много времени, но прошедшие изменения как геополитической ситуации в мире, так и конкретно в нашем вузе трудно переоценить. Прежде всего, это долгожданное признание независимости нашей Республики и вхождение в состав Российской Федерации. В совокупности эти события открывают новые горизонты для дальнейшего развития института и одновременно накладывают на коллектив большую ответственность за успешное решение вызовов времени.

Этот юбилейный сборник научных трудов еще раз подтверждает высокий научный и инновационный потенциал нашего института, раскрывает возможности дальнейшего совершенствования образовательного процесса.

Уверен, что вместе мы сумеем достойно выполнить все поставленные задачи и достичь намеченных целей. Желаю всем больших творческих успехов, мира и спокойствия каждому дому, нашему общему государству, новых открытий, воплощения смелых проектов в жизнь!

*Ректор Донбасского государственного технического института
Д. А. Вишневский*

НАУКИ О ЗЕМЈЕ

GEOSCIENCES

УДК 622.243.2:622.831.2.02

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТАТИКИ НДС В ТЕЛЕ С МИКРОДЕФЕКТАМИ

Последовательно изучена новая континуальная модель статически напряженно-деформированного состояния (НДС) произвольно нагруженного твердого тела с микродефектами. Расширены и уточнены понятия сплошности и поврежденности путем ввода сдвиговых и разрывных микродефектов. Рассмотрены особенности и ограничения их матричного представления. Впервые установлена связь между углом внутреннего трения материала и соотношением размеров разрывных и сдвиговых микродефектов в их Z-ансамбле. Показано, что распределение напряжений в теле предопределяется уровнем предельных состояний на микросдвигах, тогда как деформации на микросдвигах предопределяются уровнем упругих деформаций на главном направлении нагрузки.

Ключевые слова: поврежденность, сплошность, микродефекты, микросдвиг, микроразрыв, Z-ансамбль, матрица микродефектов, теория НДС, математическая модель, упругие и деформационные области, алгоритм расчета, напряжения, деформации.

1 Актуальность и цель исследований

В связи с незатухающим интересом исследователей к проблеме описания поведения сложных гетерогенных структур в условиях объемного напряженно-деформированного нагружения были достигнуты значительные результаты [1–9 и др.].

Исследования в этом направлении побуждались стремлением понять суть и адекватно описать приемлемыми математическими моделями сложный клубок термомеханических явлений, связанных с деформированием и разрушением материалов естественного и искусственного происхождения под действием многообразных внешних и внутренних факторов.

Однако эти задачи механики деформируемого твердого тела и горной геомеханики еще далеки от своего завершения. Так, из поля внимания многих исследований выпали проблемы формирования внутренней структуры тела, задачи устойчивости ее развития, обоснования микромеханических основ теорий пластичности, ползучести и разрушения.

В данной работе в рамках поставленной проблемы рассмотрена новая континуально-механическая модель микродефектного тела. В ее основу были положены накоп-

ленные к настоящему времени экспериментальные данные и ранее установленные в механике деформированного твердого тела базовые законы.

К числу исходных предпосылок, которые положены нами в основу изучения НДС микродефектного тела и не накладывают существенных ограничений на достоверность и общность получаемых выводов, следует отнести следующие:

- в твердом теле всегда имеются микродефекты, они расположены стохастически равномерно, при этом тело в целом квазиизотропно;

- микродефекты в теле представлены в виде микросдвигов, микроразрывов и их ансамблей [6];

- задана фиксированная на данный промежуток времени исходная структура микродефектов в виде матрицы W_{ij} [6], т. е. рассматривается квазистатическая задача без рассмотрения временных эффектов их поведения;

- главный вектор и главный момент внешней нагрузки равны нулю, т. е. рассматривается статическое равновесие.

Эти и принятые далее условия являются достаточно гибкими и не приводят к существенному ограничению общности решаемой задачи.

Цель исследования — разработать теоретическое описание напряженно-деформированного состояния (НДС) микродефектного тела при произвольно заданной внешней нагрузке.

Идея работы состоит в использовании ранее предложенной математической модели микродефектного тела, в котором существует структура из поврежденностей сдвигового и разрывного типов, и закономерностей ограничения напряжений и деформаций на микросдвигах.

Объектом исследований является образованная внутри тела структура микродефектов в виде сдвигов и разрывов и ее влияние на НДС; **предмет** исследований — закономерности НДС в теле с микродефектами.

Основные **задачи** исследования:

1) дополнить и уточнить основные понятия и определения структурной мезо- и микромеханики и описания микродефектов матрицами;

2) выполнить оценку соотношений между сдвиговыми и разрывными микродефектами при возникновении их ансамблей;

3) разработать математическую модель и алгоритм расчета НДС микродефектного тела;

4) привести демонстрационный пример расчета НДС тела с заданной матрицей микродефектов.

Выполненные исследования являются продолжением и существенным образом опираются на результаты работ автора [10–12 и др.], где представлена новая матричная теория микро- и мезодефектов в твердом теле, связанная с главными площадками НДС.

2.0 закономерностях распределения микродефектов

На первом этапе решения задачи о НДС микродефектного тела необходимо сделать некоторые дополнения, уточнить основные понятия и определения, чтобы устранить возможную неоднозначность и двойное толкование ряда положений.

Остановимся на базовых формулировках геометрической теории микродефектов.

Вводя понятия микродефектов W_{ij} с помощью матрицы второго порядка [10], подчеркнем сходство и различие между разрывными ($i=j$) и сдвиговыми ($i \neq j$) их типами. Оба типа микродефектов показывают относительную площадь каждого из нарушений и ее ориентацию относительно главных площадок НДС (рис. 1).

Микроразрывы W_{ii} ориентируются главным образом параллельно главным площадкам НДС при действии растягивающих деформаций, причем при сжимающих деформациях они закрываются. Полезно различать два типа разрывов: а) связанные с Z-ансамблем Wz_m ; б) условно свободные (не входящие в ансамбли) разрывы на площадках с растягивающими деформациями Wr_{mn} .

Микросдвиги W_{ij} (1) возникают благодаря действию сдвигающих деформаций, которые, как известно, ориентированы вдоль максимальных касательных напряжений, действующих под углом 45° к главным площадкам НДС. Порядок индексов показывает направление сдвигов на диагональной плоскости. Так, если на главных площадках действуют напряжения $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, то, соответственно, знаки микросдвигов будут $W_{12} \geq 0 \geq W_{21}$; $W_{23} \geq 0 \geq W_{32}$ и т. д., а в общем случае $W_{ij} = -W_{ji}$:

$$\|W_{ij}\|_{3 \times 3} = \begin{pmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$0 \leq |W_{ij}| \leq 1, \quad W_{ij} = -W_{ji}, \quad W_{ii} \geq 0.$$

По аналогии с матрицей микродефектов (1) вводим матрицу сплошностей $\|T_{ij}\|$ (2)

$$T_{ij} = 1 - |W_{ij}|,$$

$$\|T_{ij}\|_{3 \times 3} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$T_{ij} = T_{ji}, \quad 0 \leq T_{ij} \leq 1,$$

которые всегда положительны и являются, по сути, алгебраическим дополнением к матрице микродефектов $\|W_{ij}\|$.

Обобщая матрицы (1) и (2), которые описывают только отдельные структурные дефекты, введем результирующие по заданным направлениям $i, j, k = 1, 2, 3$ главных площадок с учетом сложения множеств и исключения их пересечений:

а) суммарную на главных площадках площадь микродефектов (3):

$$Wc_i = |W_{ii}| + |W_{ij}| + |W_{ik}| - |W_{ij}| \cdot |W_{ik}| - |W_{ii}| (|W_{ij}| + |W_{ik}|); \quad (3)$$

б) площадь сплошностей (4):

$$Tc_i = 1 - Wc_i, \quad (4)$$

при этом соблюдаются неравенства:

$$0 \leq Wc_i \leq 1; \quad 0 \leq Tc_i \leq 1.$$

Важно отметить, что по направлению сжимающих напряжений микроразрывы W_{ii} быстро залечиваются и исчезают, поэтому следует при их определении принимать дополнительные условия:

$$\varepsilon_i \geq 0 \Rightarrow W_{ii} \rightarrow 0 \cup T_{ii} \rightarrow 1. \quad (5)$$

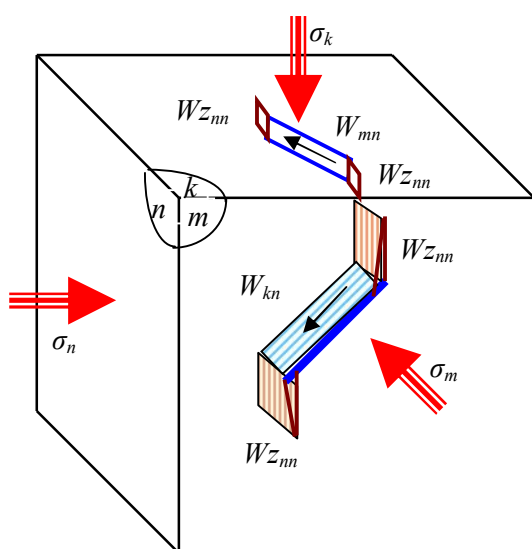


Рисунок 1 Схема Z-ансамблей микродефектов $W_{z_{nn}}$, W_{kn} и W_{mn} в разных плоскостях

Такая особенность микроразрывов W_{ii} — открываться при растягивающих деформациях и закрываться при сжимающих — заметным образом усложняет расчетные алгоритмы.

3 Конфигурация Z-ансамбля микродефектов

До настоящего времени остается нерассмотренным вопрос о зависимостях, раскрывающих соотношение между микроразрывами $W_{z_{jj}}$ и микродвигами $W_{z_{ij}}$, т. е. какова конфигурация Z-ансамбля микродефектов (рис. 2). Здесь опережающим концы Z-ансамбля микроразрывам присвоено обозначение $W_{z_{jj}}$ (рис. 2), в отличие от иной природы микроразрывов, возникающих обособленно вне Z-ансамбля и обозначаемых Wr_{ii} .

Для определения соотношения длин сдвигов $W_{z_{ij}}$ и разрывов $W_{z_{ii}}$ воспользуемся хорошо экспериментально изученными данными о значениях угла внутреннего трения материалов при их объемных испытаниях с помощью стабилометров [12].

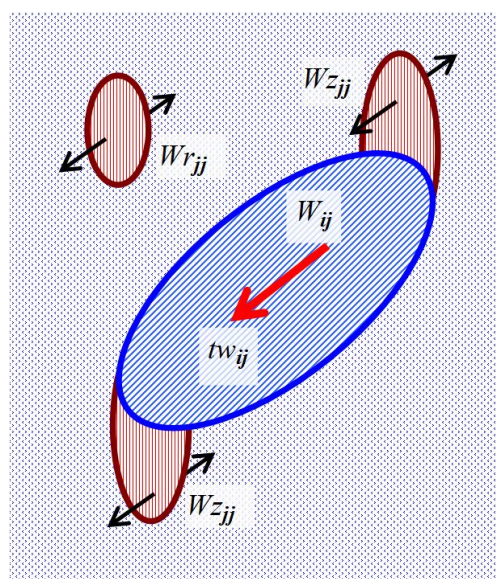


Рисунок 2 Геометрические соотношения в Z-ансамбле между микродвигом W_{ij} и опережающими его микроразрывами $W_{z_{jj}}$

Угол внутреннего трения φ представляет собой наклон огибающей наибольших кругов напряжений диаграммы О. Мора и всегда уменьшается по мере роста минимальной компоненты напряжений (рис. 3). Для большинства известных материалов угол внутреннего трения в области за пределом их прочности на одноосное сжатие может изменяться в пределах $0 \leq \varphi \leq 30...35^\circ$.

На рисунке 3 показан паспорт прочности на диаграмме О. Мора, построенной в осях нормальных σ и касательных τ напряжений. На ней отражены основные элементы паспорта прочности материала: показатели прочности на одноосные растяжение σ_0 и сжатие σ_c , нормальное σ_n и касательное τ_{nt} напряжения на площадке разрушения, угол внутреннего трения φ . С позиций аналитической теории прочности [12] здесь показаны когезия разрыва σ_0 , зачастую равная в каменных материалах одноосному растяжению, и когезия сдвига τ_0 , равная так называемому коэффициенту сцепления по устаревшей терминологии механики горных пород.

Уменьшение угла внутреннего трения φ по мере роста минимальной компоненты напряжений вносит дополнительные трудности при решении задач прочности в геомеханике.

Зададимся вопросом, какая связь существует между конфигурацией Z-ансамбля и углом внутреннего трения φ , который является одним из обобщенных показателей прочностных свойств материала. Для этого используем расчетную схему Z-ансамбля, представленную на рисунке 4.

На рисунке 4 штриховой линией, соединяющей концы микроразрывов, показана плоскость макроразрушения материала сдвигом при его сжатии, угол наклона которой α_{nt} , как известно, равен

$$\alpha_{nt} = 45^\circ + \varphi / 2. \quad (6)$$

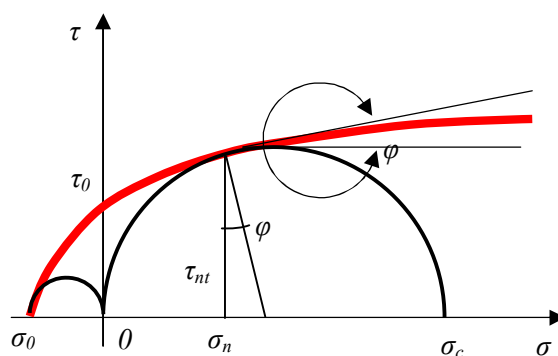


Рисунок 3 Определение угла внутреннего трения на диаграмме О. Мора

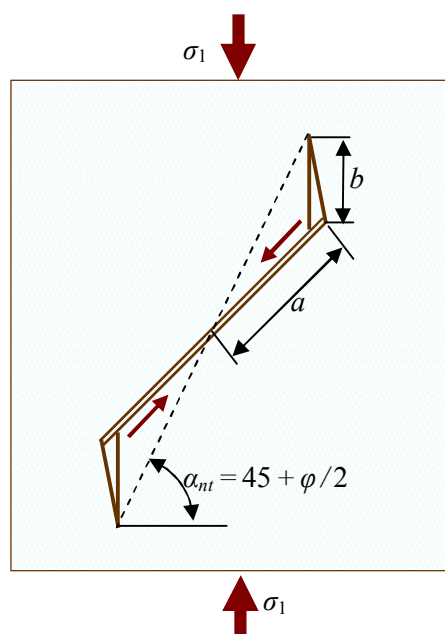


Рисунок 4 К определению соотношения размеров разрывных и сдвиговых микродефектов Z-ансамбля при сжатии материала

Из рисунка 4 путем несложных геометрических построений получаем искомое соотношение размеров микроразрывов и микросдвигов в Z-ансамбле:

$$\frac{b}{a} = \sqrt{2} \left[\frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi} - 1 \right], \quad (7)$$

где a , b — полудлины соответственно микросдвигов и разрывов (рис. 4).

Очевидно, что переход в область объемного НДС увеличения минимальной ком-

поненты напряжений σ_3 неизбежно приводит к уменьшению соотношения b/a между микроразрывами и микродвижениями, а значит, и формы Z-ансамбля микродефектов.

Если перейти к более общему случаю описания прочностных показателей материала с помощью аналитической теории прочности [12], то получим обобщение на случай многоосного сжатия, когда предельное соотношение для a/b зависит от НДС. Для этого воспользуемся исходной базовой формулой паспорта прочности [12] в соответствии с рисунком 3:

$$[\tau_{nt}] = \tau_0 \cdot \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_0} + 1 \right)^\alpha, \quad (8)$$

где $[\tau_{nt}]$ — предельное значение касательных напряжений на площадке сдвига nt , Па;

τ_0, σ_0 — когезии соответственно сдвига и отрыва, Па;

α — параметр хрупкости материала, отражающий соотношение сухого и жидкостного трения на площадке сдвига;

σ_n — нормальные напряжения на площадке сдвига, Па.

Тогда можем найти значение для угла внутреннего трения φ из выражения

$$\operatorname{tg}(\varphi) = \frac{d[\tau_{nt}]}{d\sigma_n} = \alpha \cdot \frac{[\tau_{nt}]}{(\sigma_n + \sigma_0)}, \quad (9)$$

которое следует подставить в (7) и определить a/b .

Как следует из (9), соотношение a/b уменьшается по мере увеличения действующих на площадке сдвига нормальных напряжений σ_n .

Таким образом, если опираться на экспериментальные данные, полученные при лабораторных испытаниях материалов по определению их угла внутреннего трения φ , можно заключить, что в среднем по всей выборке геометрия Z-ансамбля подчиняется зависимости (7).

С целью упрощения расчетов вместо зависимости (7) можно использовать ее

линейную аппроксимацию (8), которая показана на рисунке 5. Это уравнение (8) пригодно для описания материалов, у которых угол внутреннего трения $\varphi < 40^\circ$, а его погрешность не превышает $\pm 5\%$. С учетом (9) окончательно запишем

$$\frac{b}{a} = \frac{\varphi^0}{30} = \frac{6}{\pi} \varphi = \frac{6}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{\alpha \cdot [\tau_{nt}]}{\sigma_n + \sigma_0} \right), \quad (10)$$

где φ выражено в радианах, $0 \leq \varphi < 0,5$ рад.

Такого рода аппроксимация позволяет не только упростить расчетные алгоритмы, но и получить оценки угла внутреннего трения по измеренным экспериментально конфигурациям микродефектов.

Из рисунка 1 можно понять, что вся совокупность микроразрывов Wz_{nn} по любому направлению n образуется двумя микродвижениями Wz_{kn} и Wz_{mn} , т. е. такими, у которых второй индекс совпадает с указанным направлением.

Поскольку в Z-ансамбле микродефектов должно соблюдаться соотношение между размерами сдвигов и разрывов b/a , то каждый Z-ансамбль W_{ij} и приносит микроразрывы Wz_{jj} , относительная площадь участка которых равна, согласно (7),

$$Wz_{jj} = \frac{b}{a} (|W_{ij}| + |W_{kj}|). \quad (11)$$

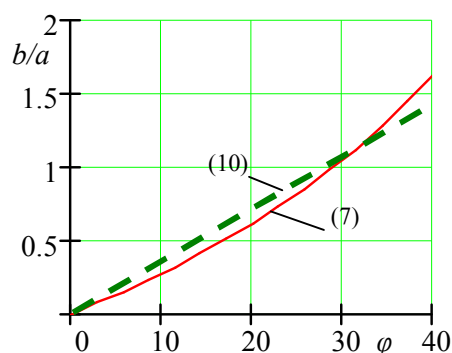


Рисунок 5 Сопоставление графиков исходного уравнения (7) и его линейной аппроксимации (10)

Кроме того, при наличии растягивающих деформаций $\varepsilon_j < 0$, величина которых превышает предельные для данного материала $\varepsilon_j < -[\varepsilon_r]$, появляются микро-разрывы, не связанные с Z-ансамблями, которые обозначим W_{jj} . Тогда в сумме все микро-разрывы по направлению jj , вызванные соответствующими микросдвигами и деформациями растяжения, равны

$$W_{jj} = W_{r_{jj}} + \frac{b}{a}(W_{ij} + W_{kj}). \quad (12)$$

Предыдущие оценки относились главным образом к телу, подвергнутому сжатию. При появлении деформаций растяжения в материале, у которого прочность на растяжение меньше прочности на сжатие ($\sigma_r < \sigma_c$), Z-ансамбли микродефектов могут вырождаться в микро-разрывы, ориентированные перпендикулярно деформациям растяжения, т. е. $(a/b) \rightarrow 0$.

Следовательно, основные проблемные вопросы по определению структуры микродефектов решены, и можно перейти к определению НДС тела с микродефектами.

4 Математическая модель расчета НДС микродефектного тела

В качестве основной предпосылки математической модели считаем микродефектное тело квазиоднородным с равномерным распределением по всему объему всех типов микродефектов, а определение параметров НДС производим отдельно для упругой и микродефектной областей.

Материал в исходном состоянии считаем квазиоднородным и изотропным, а распределение напряжений будем определять для произвольной совокупности дефектов сдвига и разрыва, представленной матрицей (1).

В рамках обычных решений теории упругости напряженное состояние тела в точке будет задано тремя напряжениями σ_i , действующими на главных площадках. Однако следует иметь в виду, что в микродефектном теле уже нельзя гово-

рить о напряжении в точке, поскольку необходимо рассматривать некоторый представительный объем материала, содержащий в среднем все типы микродефектов и выполняющий роль точки в континуальной теории деформаций и напряжений.

Рассмотрим в материале характерный объем в виде куба единичных размеров, грани которого ориентированы по главным площадкам с ортами i, j, k . В общем случае на тело действуют макронапряжения σ_i ($i=1, 2, 3$), причем принимаем, что $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ (рис. 6).

На каждой грани куба пунктирными кривыми условно показаны границы между областями упругими (сплошности Tc_k) и микродефектными (поврежденности Wc_k). На этих условно выделенных участках Tc_k и Wc_k действуют соответствующие нормальные напряжения: среднеинтегральные по всей площади σ , на упругих σ_u и микродефектных σ_w участках, условно отделенных друг от друга штриховыми кривыми.

Согласно известным уравнениям теории упругости, дополненным соотношениями для упругого (U -area) и микродефектного (W -area) участков тела, средние нормальные напряжения равны

$$\begin{aligned} \sigma n_{ij} &= (\sigma_i + \sigma_i) / 2, \\ \sigma n_{ij} &= (\sigma u_i + \sigma u_i) / 2, \\ \sigma n_{ij} &= (\sigma w_i + \sigma w_i) / 2, \end{aligned} \quad (13)$$

где $\sigma_i, \sigma u_i, \sigma w_i$ — нормальные напряжения на, соответственно, общих, упругих и сдвиговых площадках с ориентацией i ;

$\sigma n_{ij}, \sigma n_{ij}, \sigma n_{ij}$ — средние нормальные напряжения на, соответственно, общих, упругих и сдвиговых диагональных площадках с ориентацией i, j .

Максимальные касательные напряжения τ_{ij} на площадках, наклоненных к главным под 45 градусов, будут равны (рис. 7)

$$\begin{aligned} \tau_{ij} &= (\sigma_i - \sigma_j) / 2, \\ \tau_{uij} &= (\sigma u_i - \sigma u_j) / 2, \\ \tau_{w_{ij}} &= (\sigma w_i - \sigma w_j) / 2. \end{aligned} \quad (14)$$

На рисунке 7 по аналогии с рисунком 6 площадка условно разделена на две области: упругую T_{ij} и микросдвиговую W_{ij} , в каждой из которых действуют соответствующие нормальные и касательные напряжения.

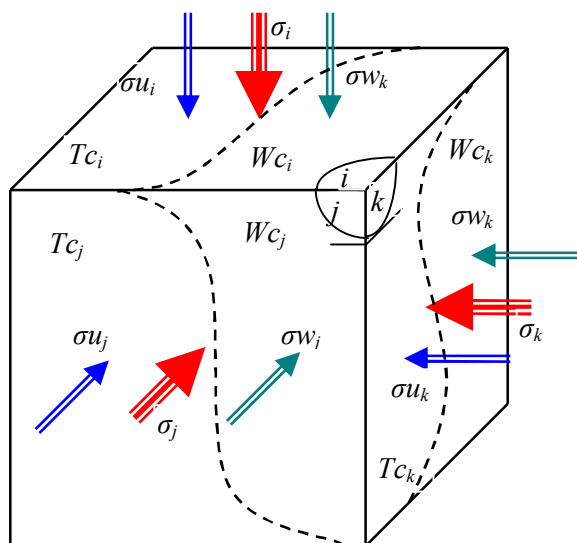


Рисунок 6 Совокупность нормальных напряжений на главных площадках в материале с микродефектами

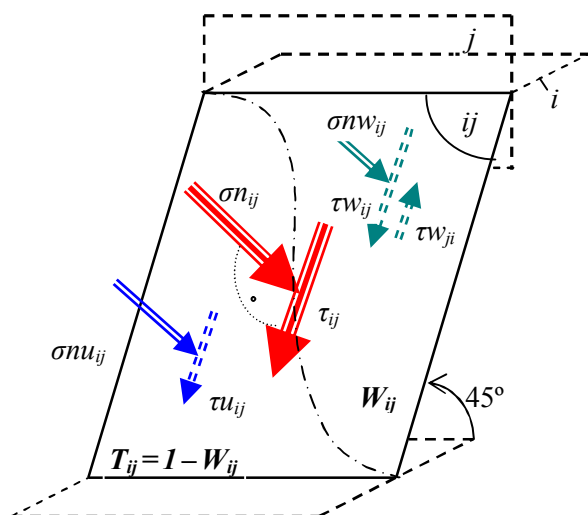


Рисунок 7 Совокупность касательных и нормальных напряжений на диагональной площадке i, j по направлению максимального сдвига τ_{ij}

На рисунке 7 показаны все напряжения, действующие на диагональной площадке ij единичного куба: касательные напряжения общие τ_{ij} , которые слагаются из напряжений $\tau_{u_{ij}}$ и $\tau_{w_{ij}}$, согласно (13), на упругих T_{ij} и микродефектных W_{ij} участках диагональной плоскости, и средние нормальные напряжения σn_{ij} , $\sigma n_{u_{ij}}$, $\sigma n_{w_{ij}}$ согласно (14). Для определения сдвиговых (касательных) напряжений $\tau_{w_{ij}}$, действующих на микросдвигах W_{ij} , в качестве основного уравнения примем условие прочности, которое ограничивает их пределом прочности Pw_{ij} :

$$\text{if } |\tau_{ij}| \begin{cases} \leq Pw_{ij} \\ \geq Pw_{ij} \end{cases} \text{ then } \tau_{w_{ij}} = \begin{cases} \tau_{ij} \\ Pw_{ij} \end{cases}, (i \neq j). \quad (15)$$

Отсюда следует, что касательные напряжения на микросдвигах всегда находятся в границах $-Pw_{ij} \leq \tau_{w_{ij}} \leq Pw_{ij}$.

При разгрузке материала происходит пропорциональное упругое снижение напряжений на всех площадках вплоть до момента, пока на сдвиговых площадках W_{ij} не будет достигнуто отрицательное значение сдвиговой прочности: $\tau_{ij} \leq -Pw_{ij} \rightarrow \tau_{w_{ij}} = -Pw_{ij}$. После этого дальнейшая разгрузка происходит при фиксированном предельном значении касательных напряжений Pw_{ij} на сдвиговых площадках W_{ij} вплоть до момента очередного нарушения неравенств (15) при изменении внешней нагрузки.

В упругой области, которую принято называть сплошностью T_{ij} или U -area и которая является дополнением к дефектной области W_{ij} (W -area), согласно соотношению

$$T_{ij} = 1 - |W_{ij}|, \quad (16)$$

действуют упругие касательные напряжения $\tau_{u_{ij}}$. Здесь T_{ij} , W_{ij} — сплошность и поврежденность на диагональной площадке между главными площадками i и j .

Определим базовое уравнение связи между упругими τu_{ij} и сдвиговыми τw_{ij} касательными напряжениями на упругих T_{ij} и сдвиговых W_{ij} площадках. Исходя из условий равновесия на главных и диагональных площадках, должны соблюдаться суммы

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \sigma u_i \cdot Tc_i + \sigma w_i \cdot Wc_i, \\ \tau_{ij} &= \tau u_{ij} \cdot T_{ij} + \tau w_{ij} \cdot W_{ij}, \end{aligned} \quad (i \neq j), \quad (17)$$

где τ_{ij} — среднеинтегральное значение напряжений сдвига для всей площади тела, Па.

Тогда из условий равновесия сил на всей рассматриваемой площадке находим из (17) касательное напряжение на упругой ее части (*U-area*) по формуле

$$\tau u_{ij} = (\tau_{ij} - \tau w_{ij} \cdot W_{ij}) / T_{ij}. \quad (18)$$

Уравнение (18) является основным для вычисления упругих касательных напряжений τu_{ij} по всегда известным предельным значениям (15) касательных напряжений τw_{ij} на микросдвигах. Таким образом, касательные напряжения τw_{ij} и τu_{ij} на участках *W-area* и *U-area* каждой диагональной площадки с индексом ij ($i, j = 1, 2, 3$) определены.

Опираясь на подобную (15) трактовку нормальных напряжений σw_i на сдвиговых площадках *W-area* как предельных для материала, которые не могут превышать его прочность при соответствующем предельном состоянии, можем записать условия, которым они должны удовлетворять:

$$\text{if } |\tau_{ij}| \begin{cases} \leq Pw_{ij} \\ \geq Pw_{ij} \end{cases} \text{ then } \sigma w_i = \begin{cases} \sigma_i \\ [\sigma_i] \end{cases}, \quad (19)$$

где $[\sigma_i]$ — показатель предела прочности материала в соответствии с принятой теорией прочности, в случае идеальной пластичности $[\sigma_i] = 2Pw_{ij}$.

После определения σw_i находим нормальное напряжение σu_i на соответ-

ствующей упругой площадке из первого уравнения (17):

$$\sigma u_i = (\sigma_i - \sigma w_i \cdot Wc_i) / Tc_i. \quad (20)$$

Для завершения задачи о напряженном состоянии материала с дефектами необходимо найти значения (13–14) всех нормальных напряжений на упругих и сдвиговых участках каждой из площадок i, j, k ($i, j, k = 1, 2, 3$) по заданным внешним нагрузкам в виде среднеинтегральных нормальных σ_i макронапряжений, а также с учетом вычисленных по формулам (15–18) микронапряжений τw_{ij} и τu_{ij} .

Напряжения σu_i , σw_i выражаются по определению через уже ранее определенные касательные и нормальные напряжения τu_{ij} , τw_{ij} , σn_{ij} по формулам

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \sigma n_{ij} + \tau_{ij} = \sigma n_{ik} + \tau_{ik}, \\ \sigma u_i &= \sigma n u_{ij} + \tau u_{ij} = \sigma n u_{ik} + \tau u_{ik}, \\ \sigma w_i &= \sigma n w_{ij} + \tau w_{ij} = \sigma n w_{ik} + \tau w_{ik}. \end{aligned} \quad (21)$$

В качестве контрольного уравнения проверки используем основное соотношение между нормальными напряжениями на *i*-площадке:

$$\sigma_i = \sigma u_i \cdot Tc_i + \sigma w_i \cdot Wc_i. \quad (22)$$

На основании полученных для вычисления напряжений соотношений можно перейти к следующему этапу решения задачи: рассмотрению особенностей распределения деформаций в теле с микродефектами.

5 Определение деформаций в микродефектном теле

Алгоритм определения деформаций в какой-то мере аналогичен вышеизложенному алгоритму для напряжений. Существенным отличием является порядок решения и базовые предпосылки. Если при определении напряжений мы исходили из формулирования условий напряженности на сдвиговых площадках (прочность на сдвигах была предопределяющей для по-

следующих результатов), то в случае разработки алгоритма для изучения деформаций, наоборот, упругие деформации определяют деформационное состояние тела в целом, а деформации на площадках сдвига играют подчиненную (пассивную) роль.

На рисунке 8 показан некий выделенный представительный объем тела в виде единичного куба с единичными осями i, j, k вдоль главных действующих напряжений $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$.

На каждой грани куба пунктирными кривыми условно показаны границы между областями упругими (сплошности Tc_k) и микродефектными (поврежденности Wc_k). На этих условно выделенных участках действуют соответствующие продольные деформации:

ϵ_k — полные (среднеинтегральные по всей грани куба);

$\epsilon u_k, \epsilon w_k$ — соответственно упругие и микродефектные деформации.

Упругие участки тела должны подчиняться общим уравнениям теории упругости, в частности обобщенному закону Гука, согласно которому деформации на всех главных площадках равны

$$\epsilon u_i = [\sigma u_i - \nu(\sigma u_j + \sigma u_k)] / E, \quad (23)$$

где ν — коэффициент Пуассона;

E — продольный модуль упругости, Па.

На главной площадке с максимальным нормальным напряжением σ_1 продольные деформации будут однородными, т. е. равны

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \epsilon u_1; \\ \epsilon w_1 &= \epsilon u_1. \end{aligned} \quad (24)$$

Однако если упругие деформации $\epsilon u_2, \epsilon u_3$ по другим главным направлениям следуют зависимостям (23), то деформации на микросдвигах $\epsilon w_2, \epsilon w_3$ будут следовать законам идеально пластического тела (т. е. условию несжимаемости) и поэтому будут равны

$$\epsilon w_2 = \epsilon w_3 = -0,5 \cdot \epsilon u_1. \quad (25)$$

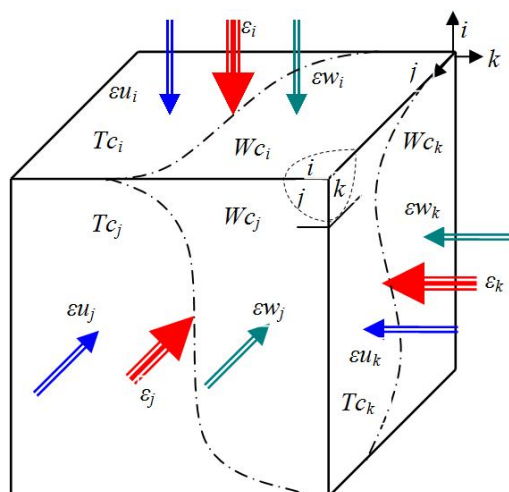


Рисунок 8 Действие продольных деформаций $\epsilon, \epsilon u, \epsilon w$ на главных площадках i, j, k в материале с микродефектами

Учитывая, что полные боковые деформации складываются из вклада упругих и сдвиговых компонент с учетом размеров упругой Tc и микродефектной Wc зон, окончательно получаем

$$\begin{aligned} \epsilon_2 &= \epsilon u_2 \cdot Tc_2 + \epsilon w_2 \cdot Wc_2, \\ \epsilon_3 &= \epsilon u_3 \cdot Tc_3 + \epsilon w_3 \cdot Wc_3. \end{aligned} \quad (26)$$

Качественная картина распределения касательных (сдвиговых) деформаций представлена на рисунке 9, который выполнен по аналогии со схемой распределения касательных напряжений (рис. 7).

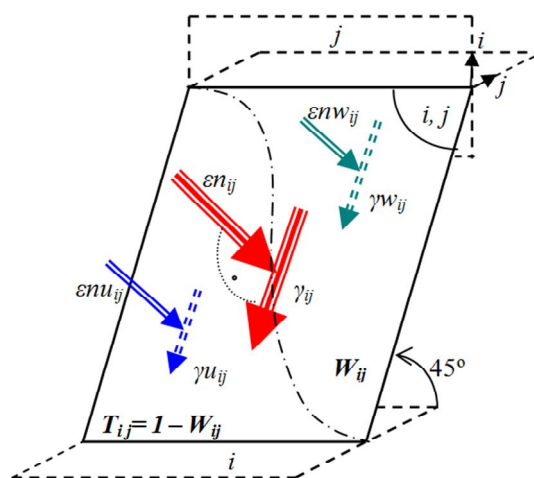


Рисунок 9 Сдвиговые γ_{ij} и средние нормальные ϵn_{ij} деформации на диагональных площадках в материале с микродефектами

Формулы для вычисления касательных деформаций для областей *U-area* и *W-area* на диагональной плоскости *ij* имеют обычный вид:

$$\begin{aligned}\gamma_{ij} &= (\varepsilon_i - \varepsilon_j) / 2, \\ \gamma u_{ij} &= (\varepsilon u_i - \varepsilon u_j) / 2, \\ \gamma w_{ij} &= (\varepsilon w_i - \varepsilon w_j) / 2.\end{aligned}\quad (27)$$

6 Демонстрационный пример расчета НДС тела с микродефектами

С целью достижения обзримости результатов расчета НДС зададимся исходными данными, которые, с одной стороны, близки к реальным показателям материала — песчаника средней прочности, а с другой — имеют в большинстве своем округленные целочисленные значения.

Поскольку расчеты НДС ведутся в некоторый фиксированный момент времени (статика), следует иметь в виду, что исходные данные о структурном строении материала, которые отражаются матрицей микродефектов $\|W\|$, на самом деле нельзя назначать произвольно, поскольку она формируется в итоге предшествующей истории нагружения материала.

Условно зададимся матрицей микродефектов, значения которой не противоречат ограничениям, указанным в (1):

$$W := \begin{pmatrix} 0,0 & 0,2 & 0,3 \\ -0,2 & 0,1 & 0 \\ -0,3 & 0 & 0,1 \end{pmatrix}.$$

В соответствии с формулами (2) получим следующие значения для матрицы сплошностей и микродефектов:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0,8 & 0,7 \\ 0,8 & 0,9 & 1 \\ 0,7 & 1 & 0,9 \end{pmatrix}.$$

Вычисляем значения обобщенных для каждой главной площадки микродефектов W_c и сплошности T_c (пренебрегая, ввиду малости, произведением множеств для повышения наглядности результатов):

$$W_c = \begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,3 \\ 0,4 \end{pmatrix}, \quad T_c = \begin{pmatrix} 0,5 \\ 0,7 \\ 0,6 \end{pmatrix}.$$

Внешнее нагружение условного единичного образца осуществляем путем одноосного сжатия $\sigma_1 = 120$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, что дает соответствующие матрицы для нормальных и касательных напряжений с размерностью в МПа:

$$\sigma := \begin{pmatrix} 120 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \tau = \begin{pmatrix} 0 & 60 & 60 \\ -60 & 0 & 0 \\ -60 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Как условия предела прочности на одноосное сжатие, если для простоты считать материал идеально пластичным, принимаем предел сдвига P_w и показатель прочности на одноосное сжатие σ_c :

$$P_w = 40 \text{ МПа}, \quad \sigma_c = 2P_w = 80 \text{ МПа}.$$

Для вычислений с использованием индексированных переменных MathLab условия прочности на сдвигах при идеальной пластичности материала записываем в виде

$$\tau w_{i,j} := \text{if} \left(\left| \tau_{i,j} \right| < P_w, \tau_{i,j}, P_w \cdot \text{sign}(\tau_{i,j}) \right),$$

что после подстановки в (15) даст значения касательных напряжений на сдвиговых (диагональных) участках *W-area* материала:

$$\tau w = \begin{pmatrix} 0 & 40 & 40 \\ -40 & 0 & 0 \\ -40 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Находим нормальные напряжения на главных площадках *W-area* с микросдвигами согласно (18):

$$\sigma w = \begin{pmatrix} 80 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

По формуле (19) находим значения упругих напряжений на главных площадках со сплошностями (*U-area*):

$$\sigma u = \begin{pmatrix} 160 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

После этого можно найти касательные напряжения на упругих участках тела *U-area* по каждому направлению согласно (18):

$$\tau u = \begin{pmatrix} 0 & 65 & 68,57 \\ -65 & 0 & 0 \\ -68,57 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Для проверки правильности вычислений используем итоговые равенства (17), численное значение которых совпадает с исходным полем напряжений при одноосном сжатии.

Осталось вычислить средние нормальные напряжения по каждой из осей i, j, k главных площадок:

$$\sigma n = \begin{pmatrix} 120 & 60 & 60 \\ 60 & 0 & 0 \\ 60 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\sigma_{un} = \begin{pmatrix} 160 & 80 & 80 \\ 80 & 0 & 0 \\ 80 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\sigma_{wn} = \begin{pmatrix} 80 & 40 & 40 \\ 40 & 0 & 0 \\ 40 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Для проверки правильности результатов воспользуемся уравнениями (22), которые должны дать исходное поле приложенных напряжений, после чего убеждаемся в корректности расчетов.

Анализ полученных результатов показывает, что даже при наличии сравнительно умеренных нарушений сплошности тела, представленных в исходной матрице микродефектов $\|W\|$, наблюдаются значительные различия в напряжениях на главных и диагональных площадках с микродефектами *W-area* и на участках вне них,

т. е. на сплошности *U-area*. Так, можно отметить (рис. 10), что напряжения $\sigma u_1 = 160$ МПа на упругих участках *U-area* тела вдвое превышают нормальные напряжения на микродефектных участках *W-area* $\sigma w_1 = 80$ МПа. Это убедительно демонстрируют круги напряжений на диаграмме О. Мора, построенные по результатам вычислений.

Следующий этап расчетов — определение всех типов деформаций согласно уравнениям (23–26). Для получения численных результатов деформаций зададимся исходными данными по деформационным свойствам материала, в качестве которого примем горную породу типа песчаника средней прочности:

$$E := 2 \cdot 10^4, \quad \nu := 0,2,$$

$$G := E[2 \cdot (1 + \nu)]^{-1}, \quad G = 8,33 \cdot 10^3,$$

где E — продольный модуль упругости (модуль Юнга), МПа;

ν — коэффициент Пуассона;

G — модуль сдвига материала, МПа.

Все полные продольные и сдвиговые деформации будут равны (26)

$$\varepsilon \cdot 10^3 = \begin{pmatrix} 6 \\ -1,2 \\ -1,2 \end{pmatrix}, \quad \gamma \cdot 10^3 = \begin{pmatrix} 0 & 3,6 & 3,6 \\ -3,6 & 0 & 0 \\ -3,6 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

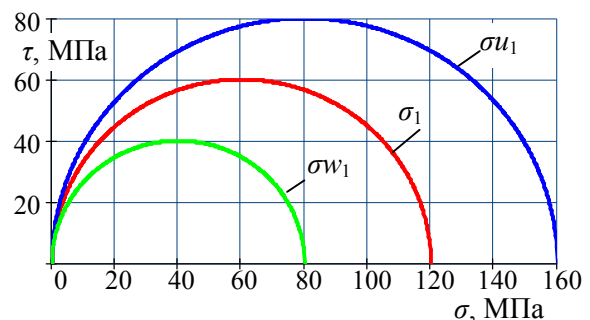


Рисунок 10 Диаграмма напряжений О. Мора с кругами для нормальных полных σ_1 , упругих σu_1 и микродефектных σw_1 напряжений

От этих деформаций ε , γ , вычисленных по обычным формулам теории упругости, значительно отличаются продольные и сдвиговые деформации εu , γu на упругих участках тела согласно (23–25)

$$\varepsilon u \cdot 10^3 = \begin{pmatrix} 8 \\ -1,6 \\ -1,6 \end{pmatrix},$$

$$\gamma u \cdot 10^3 = \begin{pmatrix} 0 & 4,8 & 4,8 \\ -4,8 & 0 & 0 \\ -4,8 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

а на участках с микродефектами *W-area* будут действовать деформации εw , γw , определяемые по формулам (23), (26):

$$\varepsilon w \cdot 10^3 = \begin{pmatrix} 8 \\ -5,6 \\ -5,6 \end{pmatrix},$$

$$\gamma w \cdot 10^3 = \begin{pmatrix} 0 & 6,8 & 6,8 \\ -6,8 & 0 & 0 \\ -6,8 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Полученные численные значения деформаций показывают, что при наличии микродефектов соблюдаются следующие соотношения между напряжениями и деформациями:

$$\begin{aligned} \sigma u_1 &\geq \sigma_1 \geq \sigma w_1, \\ \varepsilon u_1 &\geq \varepsilon w_1 \geq \varepsilon_1, \quad \gamma w_{12} \geq \gamma u_{12} \geq \gamma_{12}. \end{aligned}$$

Это значит, что всегда при «прямом» на прессе лабораторном испытании микродефектного тела мы получим заниженное значение модуля продольной упругости и завышенный показатель коэффициента Пуассона.

Памятуя об этих соотношениях, можно более достоверно судить о деформационных и прочностных показателях материалов с одной стороны, а с другой — получить возможность с большей надежностью проводить лабораторные их испытания.

В целом предложенная математическая модель и алгоритм расчета НДС микроде-

фектного тела позволяют перейти на новый уровень оценки деформационно-прочностных показателей материала и, тем самым, повысить адекватность и надежность оценки прочности, несущей способности и деформируемости инженерных конструкций и природных образований под действием силовых нагрузок.

Выводы

Кратко резюмируя полученные результаты, можно заключить, что в работе предложены новая математическая модель и алгоритм расчета НДС при действии статических нагрузок на тело с микродефектами, в которых:

а) расширены и уточнены понятия сплошности и поврежденности путем ввода сдвиговых и разрывных микродефектов, дополненные особенностями и ограничениями на их матричное представление;

б) рассмотрены особенности геометрической теории микродефектов и закономерности их распределения в теле;

в) изучены закономерности, которым подчиняется конфигурация *Z*-ансамбля микродефектов, впервые получена численная оценка соотношения размеров микросдвигов и микроразрывов;

г) предложена континуальная математическая модель определения НДС на упругих (*U-area*) и сдвиговых (*W-area*) участках тела, в которой при определении напряжений учитывается их предельное состояние на микросдвигах, а в случае нахождения деформаций упругие деформации εu_1 на *U-area* предопределяют деформационное состояние тела в целом, тогда как деформации на площадках сдвига εw_1 (*W-area*) играют подчиненную (пассивную) роль;

д) демонстрационный пример расчета НДС подтвердил, что даже умеренные значения поврежденности тела вызывают существенные различия напряжений и деформаций на микродефектных и упругих участках и всего тела в целом.

Опираясь на полученные результаты статистики НДС микродефектного тела, мож-

но перейти к решению основной проблемы залечивания микродефектов в теле с учетом реономной микромеханики — обоснованию, составлению и решению фундаментальных кинетических уравнений роста и воздействию на него переменных термосиловых воздействий, чему будут подчинены последующие публикации.

Библиографический список

1. Шермергор, Т. Д. Теория упругости микронеоднородных сред [Текст] / Т. Д. Шермергор // М. : Наука, 1977. — 400 с.
2. Макклиток, Ф. Деформация и разрушение материалов [Текст] / Ф. Макклиток, А. Аргон // М. : Мир, 1970. — 444 с.
3. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение [Текст] : пер. с англ. / Дж. Коллинз ; под ред. Э. И. Григолюка. — М., 1984. — 624 с.
4. Boudifa, M. A micromechanical model for inelastic ductile damage prediction in polycrystalline metals for metal forming [Text] / M. Boudifa, K. Saanouni, J.-L. Chaboche // Int. J. Mech. Sci. — 2009. — Vol. 51. — P. 453–464.
5. Черепанов, Г. П. Механика разрушения [Текст] / Г. П. Черепанов. — М. — Ижевск : Изд-во ИКИ, 2012. — 872 с.
6. Сосновский, Л. Концепции поврежденности материалов [Текст] / Л. Сосновский, С. Щербаков // Обзор: Вестник ТНТУ. — 2011. — Спецвыпуск. — Ч. 1. — С. 14–23.
7. Биргер, И. А. Детерминированные и статистические модели суммирования повреждений [Текст] / И. А. Биргер // Проблемы прочности. — 1978. — № 11. — С. 3–11.
8. Золотаревский, Р. Ю. Фрагментация и текстуробразование при деформации металлических материалов [Текст] / Р. Ю. Золотаревский, В. В. Рыбин. — СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2014. — 208 с.
9. Ставрогин, А. Н. Экспериментальная физика и механика горных пород [Текст] / А. Н. Ставрогин, Б. Г. Тарасов. — СПб. : Наука, 2001. — 343 с.
10. Литвинский, Г. Г. Ансамбли и структуры микродефектов в твердом теле (горной породе) [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТИ. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. — № 26 (69). — С. 5–15.
11. Литвинский, Г. Г. Фрагментация напряжений в теле с микродефектами [Текст] / Г. Г. Литвинский // Сб. науч. трудов ДонГТИ. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2022. — № 27 (70). — С. 5–17.
12. Литвинский, Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов [Текст] / Г. Г. Литвинский. — Донецк : Норд-Пресс, 2008. — 207 с.

© Литвинский Г. Г.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зам. директора РАНИМИ АН ДНР Дрибаном В. А., к.т.н., доц., проректором по научной работе ДонГТИ Смекалиным Е. С.

Статья поступила в редакцию 05.09.2022.

Doctor of Technical Sciences, Prof. Litvinsky G. G. (DSTI, Alchevsk, LPR, ligag@ya.ru)

MATHEMATICAL MODEL OF THE SSS STATICS IN A BODY WITH MICRODEFECTS

A new continuum model of statics of the stress-strain state (SSS) of an arbitrarily loaded solid body with microdefects is consistently studied. The concepts of continuity and damage are expanded and clarified by introducing shear and discontinuous microdefects. The features and limitations of their matrix representation are considered. For the first time, the link has been determined between the angle of internal friction of the material and the ratio of sizes of discontinuous and shear microdefects in their Z-ensemble. It is shown that the distribution of stresses in the body is predetermined by the level of limiting states on the microshiftes, while deformations on the microshiftes are predetermined by the level of elastic deformations on the main direction of load.

Key words: damage, continuity, microdefects, microshift, microfracture, Z-ensemble, microdefect matrix, SSS theory, mathematical model, elastic and defect areas, calculation algorithm, stresses, deformations.

УДК 622.23.02

к.т.н. Доценко О. Г.,
к.т.н. Кизияров О. Л.,
к.т.н. Аверин Г. А.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

КОМПРЕССИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРУШЕННЫХ ПОРОД

В статье приведены результаты компрессионных испытаний обрушенных пород. Экспериментально установлены экспоненциальные зависимости, с вероятностью 0,95 и погрешностью 7 % описывающие изменение модуля деформации обрушенных пород в процессе их уплотнения с учетом пустотности, влажности и литологического состава, позволяющие рассчитать параметры поддержания проводимых по ним выработок.

Ключевые слова: обрушенные породы, процесс уплотнения обрушенных пород, компрессионные испытания, критерии подобия, факторный эксперимент, модуль деформации.

Расположение подготовительных выработок в выработанном пространстве используется как способ их безремонтного поддержания, что особенно актуально в условиях глубоких шахт. Данный способ охраны встречается как на шахтах Донбасса, так и в Кузнецком, Карагандинском и Челябинском угольных бассейнах. Параметры способа устанавливались М. П. Зборщиком [1], В. В. Назимко [2], В. И. Пилюгиным [3] и другими исследователями. Указанные ученые сходятся во мнении, что к моменту сооружения выработки массив обрушенных пород должен уплотниться.

Целью исследования является установление закономерностей изменения компрессионных свойств обрушенных пород с учетом их литологического типа, влажности и исходной пустотности. Без этих сведений невозможно адекватно моделировать численными методами напряженно-деформированное состояние породного массива при ведении очистных работ, достоверно прогнозировать проявления горного давления в проводимой выработке и устанавливать параметры крепления. В этой связи поставленная цель исследования имеет актуальное значение.

Ввиду сложности изучения массива обрушенных пород в шахтных условиях поставленная задача решалась путем физического моделирования процесса уплотнения

обрушенных пород под воздействием сжимающей нагрузки (компрессии пород) с соблюдением критериев подобия.

Суть лабораторного эксперимента заключалась в проведении компрессионных испытаний модельного материала на приборе одомере в соответствии со стандартной методикой [4]. При проведении эксперимента исключалась возможность бокового расширения образца.

Схема лабораторной установки представлена на рисунке 1.

Образец испытываемой породы с определенным соотношением входных факторов помещался в рабочее кольцо 1 площадью поперечного сечения внутренней плоскости 25 см^2 . Согласно [4], допускается испытание образцов нарушенной структуры. Кольцо устанавливается на базу с перфорированным днищем для обеспечения свободного оттока воды, выжатой из образца породы при испытании его во влагонасыщенном состоянии. На образец сверху устанавливается перфорированный поршень 2 со штоком.

Для исключения попадания кусков породы в отверстия днища, а также через поршень применялись бумажные фильтры. Сверху на кольцо устанавливается обойма, в которой устроено направляющее отверстие для штока и приспособление для крепления индикатора перемещений часового

типа 5. Обойма 3 соединена с базой с помощью 3-х откидных винтов, что обеспечивает общую жесткость прибора во время опыта. Прибор крепится к крышке стола зажимным устройством, к которому с помощью металлической тяги подсоединяется рычаг 4 для создания нагрузок на образец. Рычаг имеет накладку с углублением для опоры на шток поршня 2 и обеспечивает соотношение плеч для передачи нагрузки на поршень 1:25, то есть величина груза 3, уложенного на подвеску рычага 4, будет численно соответствовать давлению на образец. С обратной стороны рычага устроена подвеска 6 для грузов 7, которые служат для уравнивания и исключения передачи нагрузок на образец от веса рычага и подвески. Компрессионный прибор устанавливается в лаборатории на жестком основании, исключающем вибрации. Горизонтальность установки прибора устанавливается по уровню.

При испытаниях образец помещается в кольцо. При этом не допускается образование зазоров между образцом и кольцом.

Нагрузка на образец передавалась ступенями, равными 0,1, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 кг/см² и т. д., с шагом в 0,5 кг/см². Масса грузов на подвеске рычага при этом соответствовала 0,1, 0,5, 1,0, 1,5, 2,0 кг и т. д.

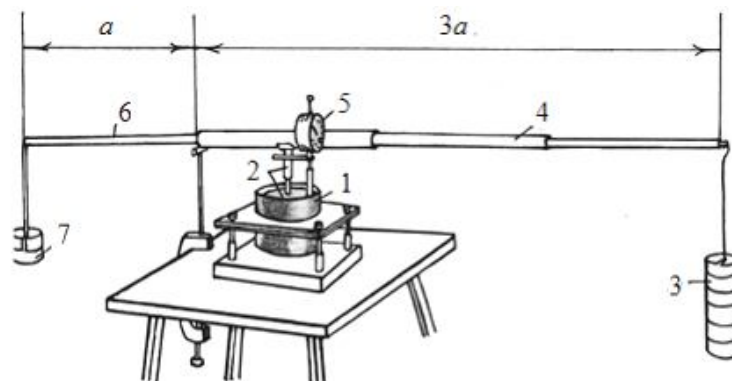
После приложения каждой ступени нагрузки фиксировались показания индикатора часового типа через 1, 2, 3, 4, 5, 10,

15, 20, 30 мин до достижения условной стабилизации деформаций. За условную стабилизацию принимаются деформации не более 0,01 мм за 15 минут.

Величина осадки образца Δh измерялась индикатором часового типа с точностью 0,001 мм. Абсолютная деформация образца вычислялась как разница между показаниями индикатора часового типа с поправкой на деформацию компрессионного прибора (в том числе и бумажных фильтров). Результаты замеров заносились в журнал учета.

Модельный материал изготавливался из типичных пород Донбасса (аргиллит, алевролит, песчаник) путем дробления и просеивания до определенных фракций. Величины исходной пустотности V_0 и влажности W задавались образцам в соответствии с матрицей планирования полного факторного эксперимента.

Для достижения достоверных результатов необходимо соблюдать подобие между натурой и ее моделью, что обеспечивается за счет определения переходных масштабов для всех соответствующих величин. Моделируемый процесс уплотнения обретенных пород в лабораторных условиях количественно протекает иначе, но так как геометрические размеры кусков и действующая на породу нагрузка изменяются пропорционально, то измеряемые деформации будут подобны натурным.



1 — рабочее кольцо; 2 — поршень; 3 — груз; 4 — длинное плечо рычага; 5 — индикатор часового типа; 6 — короткое плечо рычага; 7 — уравнивающий груз

Рисунок 1 Конструкция одометра

Испытуемый модельный материал должен отражать свойства обрушенного массива пород. С учетом технических характеристик прибора одометра и равенства объемного веса породы в натуре γ_n и модели γ_m , то есть $\alpha_\gamma = \gamma_n / \gamma_m = 1$, устанавливались критерии подобия.

Выбор линейного масштаба определялся размерами рабочего кольца одометра и обуславливался, кроме того, объемом породы, обладающим структурными свойствами породного массива. Согласно [5], элементарный объем массива должен содержать в себе достаточное количество структурных блоков, а размер элементарной площадки должен составлять не менее 10 его характерных размеров, то есть диаметр рабочего кольца $D \geq 10d$, где d — линейный размер измельченной породы. Также выбор геометрического масштаба (табл. 1) зависел от размера породных кусков в натуре [6]. Состояние обрушенных пород можно охарактеризовать, прежде всего, показателем трещинной пустотности $V_{тр}$, представляющим собой отношение суммарного объема трещин к единице объема массива горных пород. Так как приготовленный для испытания модельный материал обладает свойствами массива обрушенных пород, то и объем пустот должен быть у них одинаковым. Материал для моделирования мелкодробленого и крупнодробленого слоев по своей сути напоминает песок, а материал для моделирования блочного слоя — щебень. Варьирование фактором пустотности в эксперименте предусмотрено на двух уровнях, выбранных на основании априорной информации [7]. Верхний уровень пустотности пород принят на уровне 47 %, что соответствует нижнему

слою области беспорядочного обрушения, залегающего на почве пласта (мелкодробленый слой). Нижний уровень пустотности пород принят равным 21 %, характерный для области связного опускания. При заполнении рабочего кольца одометра модельным материалом путем взвешивания пробы подбирался такой насыпной вес, который бы обеспечил заданную пустотность образца.

Уровни варьирования влажности установлены исходя из нахождения обрушенных пород в естественном сухом (нижний уровень) и обводненном состояниях (верхний уровень).

Учитывая, что глубина разработки на шахтах Донбасса в среднем составляет 1000 м, то в натуральных условиях давление на почву отработанного пласта изменяется от 0 до 25 МПа.

Динамический критерий подобия (табл. 2) при компрессионных испытаниях принят на уровне $\alpha_p = P_n / P_m = 25$, где P_n — давление на обрушенные породы в натуральных условиях:

$$P_n = \gamma \cdot H, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где γ — объемный вес пород, т/м³;

H — глубина разработки, м;

P_m — давление, оказываемое на модельный материал, МПа.

Кинематический критерий подобия $\alpha_t = t_n / t_m$ (где t_n и t_m — время уплотнения пород в натуральных условиях и в модели соответственно) был увязан с остальными критериями α_γ , α_l и α_p [8]:

$$\alpha_t = \alpha_l \cdot \sqrt{\frac{\alpha_\gamma}{\alpha_p}}. \quad (2)$$

Таблица 1

Геометрический критерий подобия α_l , используемый при моделировании

Слой подработанного массива	$\alpha_l = \frac{l_n}{l_m}$	Размер породных кусков (d), мм		Диаметр цилиндра, мм $D \geq 10d$	$\frac{D}{d}$
		в натуральных условиях, мм	в лабораторной установке, мм		
Мелкодробленый слой	1200	250	>0,2	56,6	290
Крупнодробленый слой	1200	420	0,2–1,0	56,6	161
Блочный слой	1200	2500	2,0–2,5	56,6	28,3

Таблица 2

Критерии подобия, принятые при моделировании процесса уплотнения обрушенных пород

Критерий подобия	Значение критериев подобия
α_γ	1
α_l	1200
α_p	25
α_t	240

Исследование процесса уплотнения обрушенных пород проведено в виде полного факторного эксперимента. Уровни и интервалы варьирования факторами представлены в таблице 3.

Матрица планирования трехфакторного эксперимента приведена в таблице 4. Каждая строка матрицы отражает условия проведения опыта, а выходным параметром является модуль деформации E . По результатам замеров величин осадки образца, заносимых в специальный регистрационный журнал, были построены компрессионные кривые для каждого типа пород, продолженные в соответствии с методикой Н. К. Роботнова до нагрузки 1,0 МПа. Пример компрессионной кривой приведен на рисунке 2.

Компрессионные кривые отражают зависимость между величиной осадки образца Δh (изменением его пустотности) и величиной условно-мгновенного давления в условиях трехосного сжатия без возможности бокового расширения. С ростом сжимающей нагрузки вертикальная осадка Δh увеличивается, причем вначале прирост смещений максимален и обусловлен вза-

имным перемещением и переупаковкой породных кусков, то есть изменением строения пород на более компактное. По мере роста давления компрессионные кривые выполаживаются, поскольку последующее уплотнение пород связано с разрушением, доля которого постепенно возрастает. Выходной параметр матрицы планирования — секущий модуль деформации или коэффициент жесткости E , равный тангенсу угла наклона секущей в точке на компрессионной кривой к оси абсцисс. Модуль деформации породы рассчитывался по формуле

$$E = \frac{1 + V_0}{a}, \text{ кгс/см}^2, \quad (3)$$

где V_0 — исходная пустотность материала;

a — коэффициент уплотнения:

$$a = \frac{V_{i-1} - V_i}{P_i - P_{i-1}}, \quad (4)$$

где V_{i-1} — конечная пустотность материала при нагрузке P_{i-1} ;

V_i — конечная пустотность материала при нагрузке P_i .

Таблица 3

Уровни и интервал варьирования факторов в натуре (n^*) и модели (m^*) при компрессионных испытаниях

Входные параметры	Обозначения факторов	Уровни варьирования входных факторов				Интервал варьирования	
		min		max			
		n^*	m^*	n	m	$\frac{n - n^*}{2}$	$\frac{m - m^*}{2}$
Нагрузка на образец, МПа	$P(x_1)$	2,5	0,1	25	1,0	11,25	0,45
Пустотность образца, %	$V(x_2)$	0,205	0,205	0,447	0,447	0,121	0,121
Влажность, %	$W(x_3)$	0,0012	0,0012	0,3	0,3	0,1494	0,1494

Таблица 4

Матрица планирования трехфакторного эксперимента
при компрессионных испытаниях пород

№ п/п	Входные параметры			Выходной параметр
	$P(x_1)$, МПа	$V(x_2)$, %	$W(x_3)$, %	E , МПа
1	-1	-1	-1	E_1
2	1	-1	-1	E_2
3	-1	1	-1	E_3
4	1	1	-1	E_4
5	-1	1	1	E_5
6	1	1	1	E_6
7	-1	-1	1	E_7
8	1	-1	1	E_8

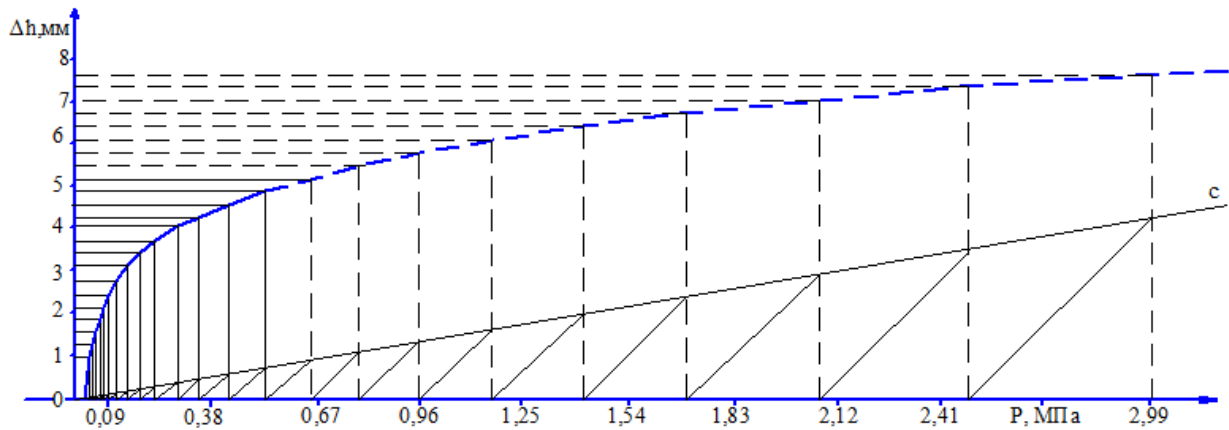


Рисунок 2 Компрессионная кривая мелкодроблёного аргиллита при естественном уровне влажности, построенная на основании экспериментальных данных и продолженная по методу Н. К. Работнова

Конечная пустотность равна

$$V_i = V_0 - \varepsilon \cdot (1 + V_0), \quad (5)$$

где ε — относительные деформации испытуемого материала;

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad (6)$$

где Δh — линейная осадка материала, мм;
 h_0 — исходная высота насыпки материала, мм.

Исходная пустотность материала с учетом влажности равна

$$V_0 = w \cdot \gamma_n / \rho_w, \quad (7)$$

где w — влажность модельного материала, доли единицы;

γ_n — насыпная плотность материала, г/см³;

ρ_w — плотность воды, г/см³.

По формулам (3–7) заполнялась таблица 5 и определялся модуль деформации, полученный при компрессионных испытаниях. В качестве примера на рисунке 3 показан график изменения модуля деформации алевролита естественной влажности.

Для получения математической модели $E = f(P, V, W)$, позволяющей прогнозировать значения модуля деформации при различных исходных состояниях обрушенных пород, использовались данные матрицы планирования полного факторного эксперимента (табл. 6).

Таблица 5

Алгоритм расчета компрессионного модуля деформации материала, моделирующего обрушенные породы

Этапы расчета модуля деформации						Модуль деформации	
Давление, МПа	Осадка образца, мм	Относительные деформации	Пористость модельного материала		Коэффициент уплотнения		
			начальная	конечная		кгс/см ²	МПа
P	Δh	ε	V_0	V_i	a	E	$E^* = E \cdot 0,0981$

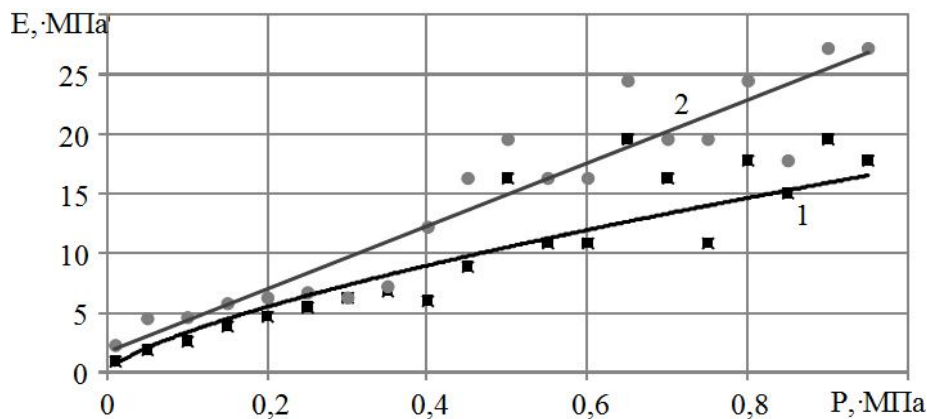


Рисунок 3 Модуль деформации на примере алевролита естественной влажности (W_{max}) при пустотности образца: 1 — максимальной (V_{max}), 2 — минимальной (V_{min})

Таблица 6

Матрица планирования трехфакторного эксперимента при компрессионных испытаниях пород

№ п/п	Входные параметры			Выходной параметр E , МПа		
	$P(x_1)$, МПа	$V(x_2)$, %	$W(x_3)$, %	аргиллит	алевролит	песчаник
1	-1	-1	-1	2,26	2,34	9,81
2	1	-1	-1	19,62	27,25	28,03
3	-1	1	-1	0,53	0,98	0,48
4	1	1	-1	15,09	19,62	19,62
5	-1	1	1	0,48	0,57	0,50
6	1	1	1	14,01	12,31	18,47
7	-1	-1	1	2,75	2,79	4,05
8	1	-1	1	19,62	24,02	33,77

В результате обработки опытных данных при использовании математической статистики были получены следующие компрессионные зависимости в кодированном виде для аргиллита ($E_{арг}$), алевролита ($E_{ал}$) и песчаника ($E_{пес}$):

$$E_{арг} = 4,33 \cdot \exp(1,36x_1 - 0,47x_2 + 0,33x_1x_2 - 0,05x_2x_3), \text{ МПа}; \quad (8)$$

$$E_{ал} = 5,22 \cdot \exp(1,34x_1 - 0,43x_2 + 0,18x_1x_2 - 0,13x_2x_3), \text{ МПа}; \quad (9)$$

$$E_{nec} = 6,89 \cdot \exp(1,34x_1 - 0,82x_2 + 0,48x_1x_2), \text{ МПа.} \quad (10)$$

Модуль деформации тем больше, чем больше сжимающие усилия (x_1). Обратная зависимость исследуемого параметра связана с фактором исходной пустотности x_2 : чем больше пустотность, тем меньше модуль деформации. Имеет место перекрестное влияние факторов x_1 и x_2 . Прямого влияния влажности x_3 на модуль деформации не прослеживается. Влажность — значимый показатель только в сочетании с другими факторами. Так, для глинистых пород, склонных к размоканию, наблюдается обратная связь между модулем деформации E и факторами x_2, x_3 (пустотность — влажность): чем больше пустотность материала, тем значительнее влияние влажности.

Для раскодировки полученных уравнений регрессии (8–10) использовались следующие выражения:

$$x_1 = \frac{P - 13,75}{11,25}, \quad (11)$$

$$x_2 = \frac{V - 0,326}{0,121}, \quad (12)$$

$$x_3 = \frac{W - 0,151}{0,149}. \quad (13)$$

Окончательно с учетом критериев подобия получаем эмпирические уравнения для расчета модуля деформации:

$$E_{arg} = 108 \cdot \exp(0,043P - 6,82V + 0,83W + 0,24PV - 2,54VW + 0,57), \text{ МПа,} \quad (14)$$

$$E_{all} = 131 \cdot \exp(0,075P - 4,32V + 2,38W + 0,13PV - 7,29VW - 0,22), \text{ МПа,} \quad (15)$$

$$E_{nec} = 172 \cdot \exp(0,003P + 0,36PV - 11,72V + 2,17), \text{ МПа.} \quad (16)$$

Выводы. Сжимаемость обрушенных пород объясняется уменьшением объема пустот, происходящим при взаимном перемещении частиц под воздействием внешних нагрузок. С уменьшением объема пустот модуль деформации увеличивается,

одновременно растет и плотность сложения обрушенного массива. Для изучения процесса уплотнения был применен метод К. Терцаги, согласно которому модуль деформации обрушенных пород устанавливался при учете исходной пустотности материала. Физическое моделирование процесса уплотнения обрушенных пород во времени под воздействием сжимающей нагрузки проведено с соблюдением критериев подобия в виде полного факторного эксперимента. По результатам замеров величин осадки образца были построены компрессионные кривые. Выходной параметр матрицы планирования — модуль деформации — рассчитывался по методике, используемой в механике грунтов.

В результате анализа полученных данных эксперимента выявлено:

- наиболее значимым фактором для модуля деформации обрушенных пород (E) является действующая нагрузка (P) и пустотность (V); связь $E=f(P)$ — прямая, $E=f(V)$ — обратная. Имеет место перекрестное влияние факторов сжимающего усилия и пустотности;

- непосредственного влияния влажности (W) на модуль деформации не прослеживается. Данный фактор значим только в сочетании с пустотностью (V) для мелкодробленых пород с высоким содержанием глинистых частиц. Для пород блочной структуры влажность незначима. Для песчаника любой степени раздробленности данный фактор не имеет значения;

- наименьшие значения модуля деформации у аргиллита, а наибольшие — у песчаника. Коэффициенты жесткости алевролита занимают промежуточное значение;

- деформационные свойства мелкодробленого алевролита ближе к свойствам аргиллита; с увеличением размеров породных кусков и с уменьшением объема пустот между ними свойства алевролита стремятся к свойствам песчаника.

С учетом критериев подобия получены эмпирические уравнения для расчета модуля деформации обрушенных пород.

Библиографический список

1. Зборщик, М. П. *Охрана выработок глубоких шахт в выработанном пространстве [Текст] / М. П. Зборщик. — К. : Техника, 1978. — 176 с.*
2. Назимко, В. В. *Исследование и разработка повышения устойчивости выработок в обрушенных и уплотненных породах при разработке пологих пластов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.15.02 / Виктор Викторович Назимко. — Донецк : ДНТУ, 1981 — 17 с.*
3. Пилюгин, В. И. *Обоснование параметров расположения и способов повышения устойчивости выработок, поддерживаемых в обрушенной и уплотненной толще пород [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.15.02 / Виталий Иванович Пилюгин. — Донецк : ДонНТУ, 1988. — 16 с.*
4. ДСТУ БВ 2.1-4-96. *Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости. — Введ. 01-01-97. — К. : Укрархинформ, 1997. — 43 с.*
5. Фисенко, Г. Л. *Предельное состояние горных пород вокруг выработок [Текст] / Г. Л. Фисенко. — М. : Недра, 1976. — 272 с.*
6. Бабиюк, Г. В. *Шахтные исследования структурно-механических особенностей массива обрушенных пород [Текст] / Г. В. Бабиюк, О. Г. Доценко // Сб. науч. тр. ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». — 2019. — Вып. 14 (57). — С. 12–18.*
7. Комиссаров, С. Н. *Управление массивом горных пород вокруг очистных выработок [Текст] / С. Н. Комиссаров. — М. : Недра, 1983. — 237 с.*
8. Доценко, О. Г. *Обоснование параметров размещения и поддержания выработок в обрушенных и уплотняющихся породах [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.22 / Ольга Геннадьевна Доценко ; ДонГТИ. — Алчевск, 2020. — 236 с.*

© Доценко О. Г.
 © Кизияров О. Л.
 © Аверин Г. А.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СГ ДонГТИ Смекалиным Е. С.,
 зам. гл. инженера по производству и перспективному развитию
 ПП «Шахтоуправление „Луганское“» ГУП ЛНР «РТК „Востокуголь“» Чепурным Д. С.*

Статья поступила в редакцию 07.10.2022.

PhD in Engineering Dotsenko O. G., PhD in Engineering Kiziyarov O. L., PhD in Engineering Averin G. A. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

COMPRESSION TESTS OF CAVED ROCKS

The article presents the results of compression tests of caved rocks. Exponential dependences have been experimentally determined, with a probability of 0,95 and an error of 7 % describing the change in the deformation modulus of caved rocks during their compaction, considering porosity, humidity and lithological composition, allowing to calculate the parameters for maintaining the road entries carried out on them.

Key words: *caved rocks, process of compaction of caved rocks, compression tests, similarity criteria, factor experiment, modulus of deformation.*

УДК 622.83:622.023.23

*к.т.н. Аверин Г. А.,
к.т.н. Доценко О. Г.,
Корецкая Е. Г.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСЕДАНИЙ ПОДРАБОТАННОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ ШАХТЫ «ВЕРГЕЛЕВСКАЯ» С УЧЕТОМ КРЕПКИХ ПОРОД, ЗАЛЕГАЮЩИХ В МАССИВЕ

Для определения оседаний подработанной земной поверхности в работе применена усовершенствованная методика прогноза, отличающаяся от нормативной учетом влияния крепких породных слоев, залегающих в подработанном массиве.

***Ключевые слова** максимальные оседания земной поверхности, крепкие породы в подработанном массиве, отношение ширины выработанного пространства к глубине разработки.*

По мере подвигания очистных забоев при выемке угольных пластов происходит обрушение вышележащих породных слоев, что вызывает образование пустот значительных размеров. Слои, представляющие осадочные породы различного литологического состава и крепости, залегающие в кровле очистных забоев, под действием силы тяжести приходят в движение, обуславливая развитие процесса сдвижения всей толщи до земной поверхности.

Продолжительные наблюдения за подработкой объектов показали, что при соблюдении определенных условий возможна подработка объектов без нарушения их нормальной эксплуатации. Такими условиями являются: значительная глубина разработки, специально разработанные способы выемки полезных ископаемых, усиление объектов перед подработкой специальными конструкторскими решениями и др.

Правильный и научно обоснованный подход к выбору мер охраны зданий и сооружений требует всестороннего изучения проявлений и установления закономерностей развития процесса сдвижения подработанной толщи пород и земной поверхности. Важно достоверно прогнозировать величины сдвижений и деформаций, рассчитываемых в главных сечениях мульды сдвижения земной поверхности. Прогноз оседаний основывается на методе типовых

кривых, безразмерных функций распределения оседаний, наклонов, кривизны, величины горизонтальных сдвижений и относительных горизонтальных деформаций. В расчетных формулах определения указанных величин значение максимального оседания выступает в качестве переменной. Погрешность определения оседаний влияет на точность прогноза величин деформаций, используемых при выборе мер охраны подрабатываемых объектов.

Нормативная методика [1] прогноза дает значительную погрешность: расчетные значения оседаний земной поверхности могут превышать фактические в два раза. Причины расхождения на данный момент достаточно не изучены. По мнению авторов, на точность прогноза влияет учет такого фактора, как наличие крепких породных слоев в структуре подработанного массива. В работе [2] авторами предложено применять к результатам прогноза по нормативной методике [1] корректирующий коэффициент k_k , определяемый долей крепких слоев в массиве (C) и соотношением D/H (где D — ширина выработанного пространства, м; H — глубина разработки, м).

Цель данной работы — повысить точность прогноза величины максимальных оседаний земной поверхности путем учета процентного содержания в подрабатываемом массиве крепких слоев пород (песча-

ников и известняков) в условиях шахты «Вергелёвская».

Исследования проводились при нивелировке железной дороги, которая расположена почти перпендикулярно к линии 16 Восточной лавы пласта l_5 в горно-геологических условиях шахты «Вергелевская» в 2001–2003 годах. Расстояние между реперами было 30 м. Замеры проводили раз в квартал.

Пласт l_5 — сложного строения, вынимаемая мощность в среднем составляет 1,15 м, угол падения на выемочном участке изменяется от 0° до 5° . Глубина расположения лавы — 410 м. Выемка антрацита проводилась механизированным комплексом КД-80. Средняя скорость подвигания очистного забоя — 30–40 м/мес. Средняя длина очистного забоя составила 180 м. Процентное содержание песчаников и известняков составило 25,2 %. Лава ранее надработана пластом l_6 на глубине 370 м. Время отработки пласта l_6 — более 10 лет.

Выкопировка с плана исследуемого участка представлена на рисунке 1.

Прогнозируемые оседания пикета № 7, расположенного примерно на середине 16-й лавы пласта l_5 , определяли на основании методики прогноза сдвижений и деформаций земной поверхности [1].

Оседание земной поверхности в точках главных сечений мульды сдвижения определяется по формуле (32) [1]:

$$\eta = \eta_m S(z), \quad (1)$$

где $S(z)$ — функция типовой кривой оседания, определяемая по таблицам 17–23 [1] для соответствующих бассейнов (месторождений);

η_m — максимальные оседания, рассчитываются по формуле (2):

$$\eta_m = q_0 \cdot m \cdot \cos \alpha \cdot N_1 \cdot N_2, \quad (2)$$

где q_0 — коэффициент, характеризующий способность пород к разуплотнению при их полной подработке и относительное максимальное оседание земной поверхности [1];

m — мощность разрабатываемого пласта, м;

N_1 и N_2 — коэффициенты, определяемые в зависимости от отношения расчётной ширины выработанного пространства D к глубине разработки H .

Согласно ранее проведенным исследованиям [2], влияние крепких пород учтено в формуле (3):

$$\eta_m = (q_0 \cdot m \cdot \cos \alpha \cdot N_1 \cdot N_2) / k_k, \quad (3)$$

где k_k — корректирующий коэффициент, учитывающий процентное содержание пород песчаников и известняков (C), определяемый по формуле (4) [2]:

$$k_k = a \cdot \left(\frac{D}{H} \right)^b, \quad (4)$$

где a и b — параметры зависимости (4), зависящие от доли крепких пород в подрабатываемом массиве (C).



Рисунок 1 Выкопировка с плана горных работ по пласту l_5

Параметры a и b определяются:

– при глубине разработки $H = 500$ м:

$$\begin{aligned} a &= 0,005 \cdot C + 1,43, \\ b &= 0,001 \cdot C - 0,42; \end{aligned} \quad (5)$$

– при глубине разработки $H = 1000$ м:

$$\begin{aligned} a &= 0,004 \cdot C + 0,78, \\ b &= 0,00009 \cdot C^2 - 0,0092 \cdot C - 0,39, \end{aligned} \quad (6)$$

где C — процентное содержание пород песчаников и известняков в подрабатываемой толще горных пород.

Корректирующий коэффициент можно определять по номограммам, представленным ниже на рисунках 2 и 3.

Для глубин свыше 500 м и меньше 1000 м корректирующий коэффициент можно получить путем интерполяции, при этом ширина выработанного пространства (D) должна быть одинакова.

В таблице 1 представлено сравнение фактических смещений с расчётными, полученными по нормативной методике [1], из которой видно, что относительная погрешность прогноза по нормативной методике колеблется от 36 до 64 % в зависимости от отношения ширины выработанного пространства к глубине разработки.

С увеличением ширины выработанного пространства погрешность уменьшается.

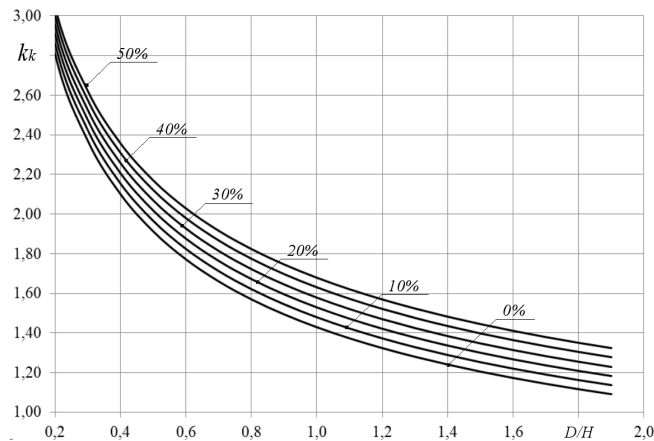


Рисунок 2 Номограмма определения корректирующего коэффициента при отработке угольных пластов на глубине в пределах 500 м

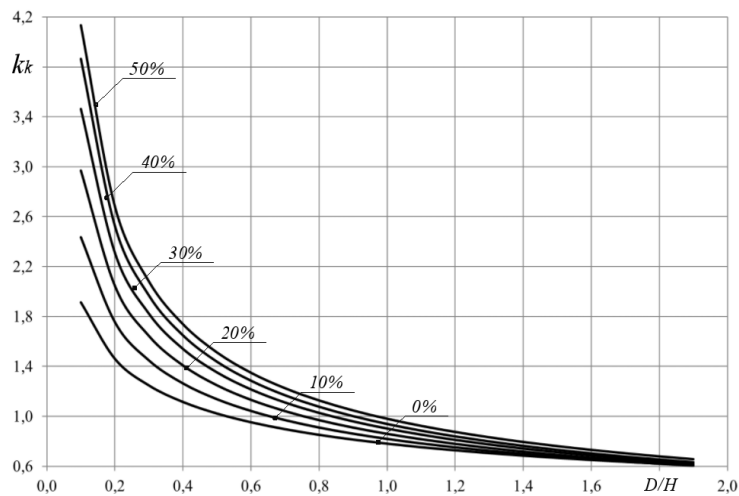


Рисунок 3 Номограмма определения корректирующего коэффициента при отработке угольных пластов на глубине в пределах 1000 м

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

В таблице 2 представлено сравнение фактических оседаний на пикете 7 с расчётными по формулам (2) и (3).

При учете залегания крепких породных слоев относительная погрешность прогноза снижается в 2 раза, то есть до 0,54–36 %.

Таблица 1

Сравнение фактических смещений с расчётными смещениями, полученными по нормативной методике

D/H	Максимальные нормативные оседания, η_m , мм	Нормативная величина оседаний, $\eta_{пк7}$, мм	Фактические оседания, $\eta_{пк7}$, мм	Относительная погрешность прогноза, А, %
0,16	170	103	37	64,08
0,24	256	236	117	50,42
0,32	347	347	185	46,69
0,36	390	383	210	45,17
0,40	431	416	236	43,27
0,46	490	451	266	41,02
0,51	544	472	272	42,37
0,57	614	483	299	38,10
0,68	730	494	307	37,85
0,76	813	505	315	37,62
0,84	899	516	320	37,98
0,87	940	527	336	36,24
0,90	964	538	339	36,99
0,95	1018	549	342	37,70
0,98	1058	560	345	38,39
1,00	1080	571	365	36,08

Таблица 2

Сравнение фактических оседаний на пикете 7 с расчётными по формулам (2) и (3)

D/H	Нормативная величина η_m , мм	Корректирующий коэффициент, k_k	Оседания с учетом влияния крепких пород, η_m , мм	Фактические оседания, $\eta_{пк7}$, мм	Относительная погрешность, А, %
0,16	103	3.23	32	37	15,63
0,24	236	2.74	86	117	36,05
0,32	347	2.43	143	185	29,37
0,36	383	2.32	165	210	27,27
0,40	416	2.23	186	236	26,88
0,46	451	2.12	212	266	25,47
0,51	472	2.04	232	272	17,24
0,57	483	1.94	249	299	20,08
0,68	494	1.81	272	307	12,87
0,76	505	1.74	290	315	8,62
0,84	516	1.67	309	320	3,56
0,87	527	1.64	321	336	4,67
0,90	538	1.63	331	339	2,42
0,95	549	1.59	345	342	0,87
0,98	560	1.57	357	345	3,36
1,00	571	1.55	367	365	0,54

Выводы:

– прогноз максимальных оседаний земной поверхности с учетом наличия крепких породных слоев в подрабатываемом массиве [2] позволяет снизить относительную погрешность в два раза в сравнении с нормативной методикой [1];

– между ошибкой прогноза и отношением ширины выработанного пространства к глубине разработки D/H прослеживается обратная связь.

Библиографический список

1. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях [Текст] : ПБ 07-269-98 : [утв. Госгортехнадзором России 16.03.1998 № 13]. — СПб. : Межотраслевой науч. центр ВНИИИ, 1998. — 291 с.
2. Аверин, Г. А. Учёт влияния песчаников и известняков на максимальное оседание подработанной горными работами земной поверхности [Текст] / Г. А. Аверин, О. Г. Доценко, Е. Г. Корецкая // Сборник научных трудов ДонГТИ. — 2021. — № 22 (65). — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ». — С. 21–28.

© Аверин Г. А.© Доценко О. Г.© Корецкая Е. Г.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СГ ДонГТИ Смекалиным Е. С.,
зам. гл. инженера по производству и перспективному развитию
ПП «Шахтоуправление „Луганское“» ГУП ЛНР «РТК „Востокуголь“» Чепурным Д. С.*

Статья поступила в редакцию 14.10.2022.

PhD in Engineering Averin G. A., PhD in Engineering Dotsenko O. G., Koretskaia E. G. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

SUBSIDENCE PREDICTION OF THE UNDERMINED EARTH'S SURFACE IN CONDITIONS OF THE "VERGELEVSKAIA" MINE, CONSIDERING THE STRONG ROCKS LYING IN THE MASSIF

To determine the subsidence of the undermined earth's surface, an improved predicting technique was used in the work, which differs from the normative one by considering the influence of strong rock layers lying in the undermined massif.

Key words: *maximum subsidence of the earth's surface, strong rocks in the undermined massif, ratio of width of the developed area to the mining depth.*

**МЕТАЛЛУРГИЯ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**METALLURGY
AND MATERIAL SCIENCES**

УДК 621.771.27

д.т.н. Снитко С. А.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, snitko_sa@mail.ru),
Денищенко Н. П.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, nd76696@gmail.ru),
д.т.н. Яковченко А. В.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, mond1991@mail.ru),
к.т.н. Денищенко П. Н.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, pavel.denischenko@gmail.com)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧАГОВ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ ПРЕДЧИСТОВЫХ ОВАЛЬНЫХ РАСКАТОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ В КРУГЛОМ КАЛИБРЕ

На базе конечно-элементного моделирования выполнены комплексные исследования основных параметров очагов деформации при прокатке предчистовых овальных раскатов различных типов (плоского овала, а также двухрадиусного, трехрадиусного и двух четырёхрадиусных овалов) в идентичных условиях в круглом калибре. Выполнен сравнительный анализ калибровок по разновременности захвата овального раската, степени охвата овального раската по его периметру ручьями круглого калибра, неравномерности деформации металла, величине и распределению нормальных напряжений. Показано, что использование четырёхрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном, имеет преимущества.

Ключевые слова: прокатка круглых профилей, предчистовой овал, конечно-элементное моделирование, разновременность захвата овального раската, охват овального раската по его периметру, неравномерность деформации металла, нормальные напряжения.

Повышение качества круглых профилей, получаемых прокаткой, является актуальной задачей. Её решение рассмотрено в работах [1–11 и др.]. На практике для прокатки круглых профилей широко применяется система калибров «овал — круг». При этом используются различные типы предчистовых овальных калибров, которые имеют свои преимущества и недостатки.

Рациональная калибровка валков для прокатки предчистового овала должна обеспечить получение круглого профиля заданных размеров, высокой точности и хорошего качества, а также создать условия для плавного и надежного захвата металла валками, устойчивого положения раската в круглом калибре, наименьшего и равномерного износа валков. Разработка указанной калибровки требует учитывать закономерности течения металла в круглом калибре.

На практике установлены следующие известные положения [1–4]:

– разновременность захвата овального раската и неравномерность деформации металла валками по ширине круглого калибра отрицательно сказываются на качестве наружной поверхности горячекатаного металла, в том числе повышают вероятность появления трещин и других дефектов на поверхности круглых профилей;

– обеспечение сечения профиля овального раската, полностью соответствующего вертикальному сечению круглого калибра в плоскости захвата, улучшает устойчивость полосы в момент захвата;

– практически полный охват овального раската по его периметру ручьями круглого калибра уменьшает глубину наружных пороков сталеплавильного происхождения и возможность образования дефектов прокатного производства.

Поставлена задача конечно-элементного моделирования процессов прокатки предчистовых овалов различных типов в круглом калибре и на этой основе установления зако-

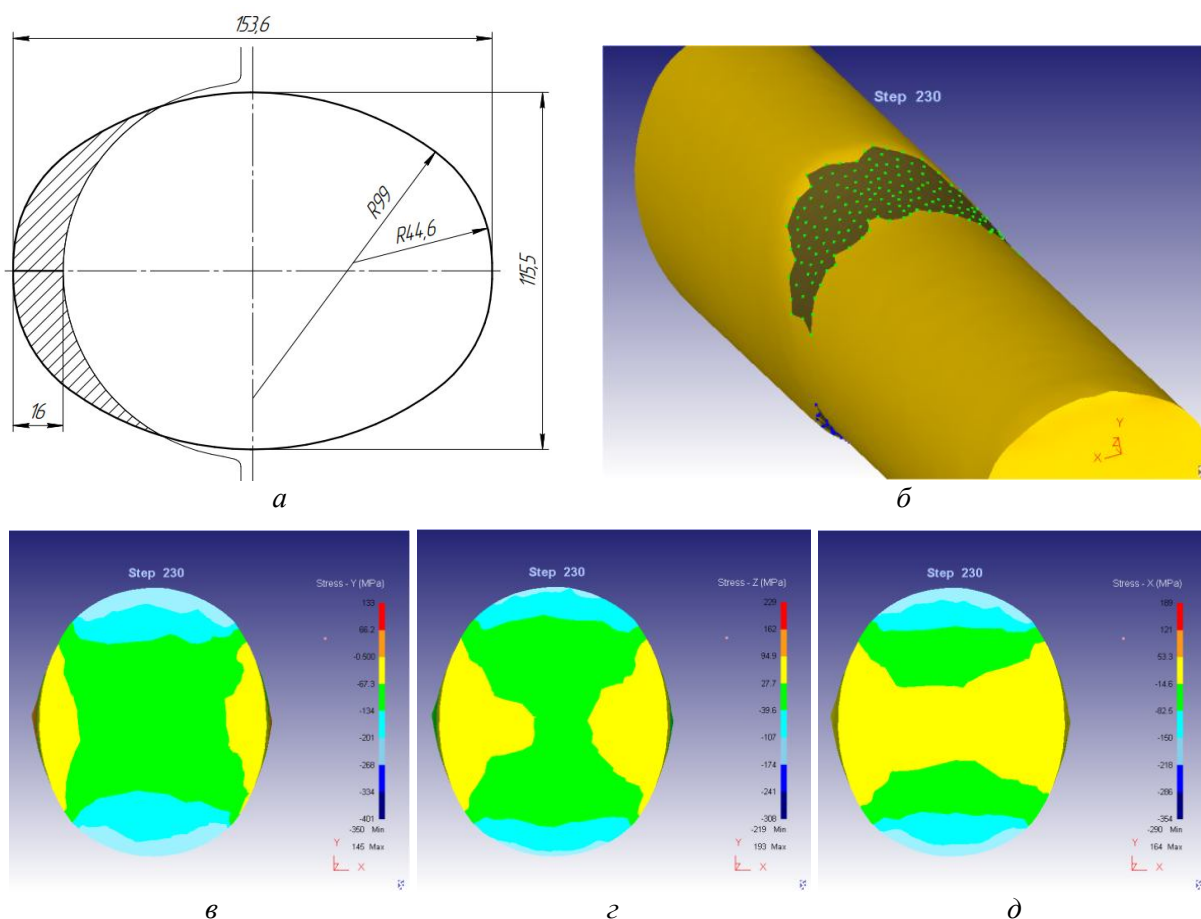
номерностей напряженно-деформированного состояния металла. Планируется выполнить сравнительный анализ основных параметров очагов деформации при прокатке в круглом калибре овалов различных типов и усовершенствованных предчистовых овалов.

Реализация моделирования процесса прокатки предчистовых овальных раскатов различных типов в круглом калибре выполнена в системе Deform 3D. Адаптация метода конечно-элементного моделирования применительно к решению такого рода задач выполнена в работе [9]. Методика исследований изложена в работах [7, 9].

Результаты моделирования процесса прокатки предчистового овального раската по калибровке завода А (Днепропетцсталь)

представлены на рисунке 1, по калибровке завода Б (Донецкий металлургический завод) — на рисунке 2, по калибровке завода В (Алчевский металлургический комбинат) — на рисунке 3, по усовершенствованным калибровкам — на рисунках 4–9. Вытяжка при прокатке указанных овалов в круглом чистовом калибре, показанном на рисунках 5 и 8, равна 1,217.

Калибр завода А (рис. 1, а) представляет собой двухрадиусный овал. Имеет место значительная разновременность захвата овального раската (рис. 1, б). При этом наибольшая длина очага деформации получена в зоне дна круглого калибра, а наименьшая — в зонах боковых стенок его ручьев.



а — чертеж предчистового овала; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной, продольной и поперечной осям соответственно

Рисунок 1 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската по калибровке завода А в круглом калибре

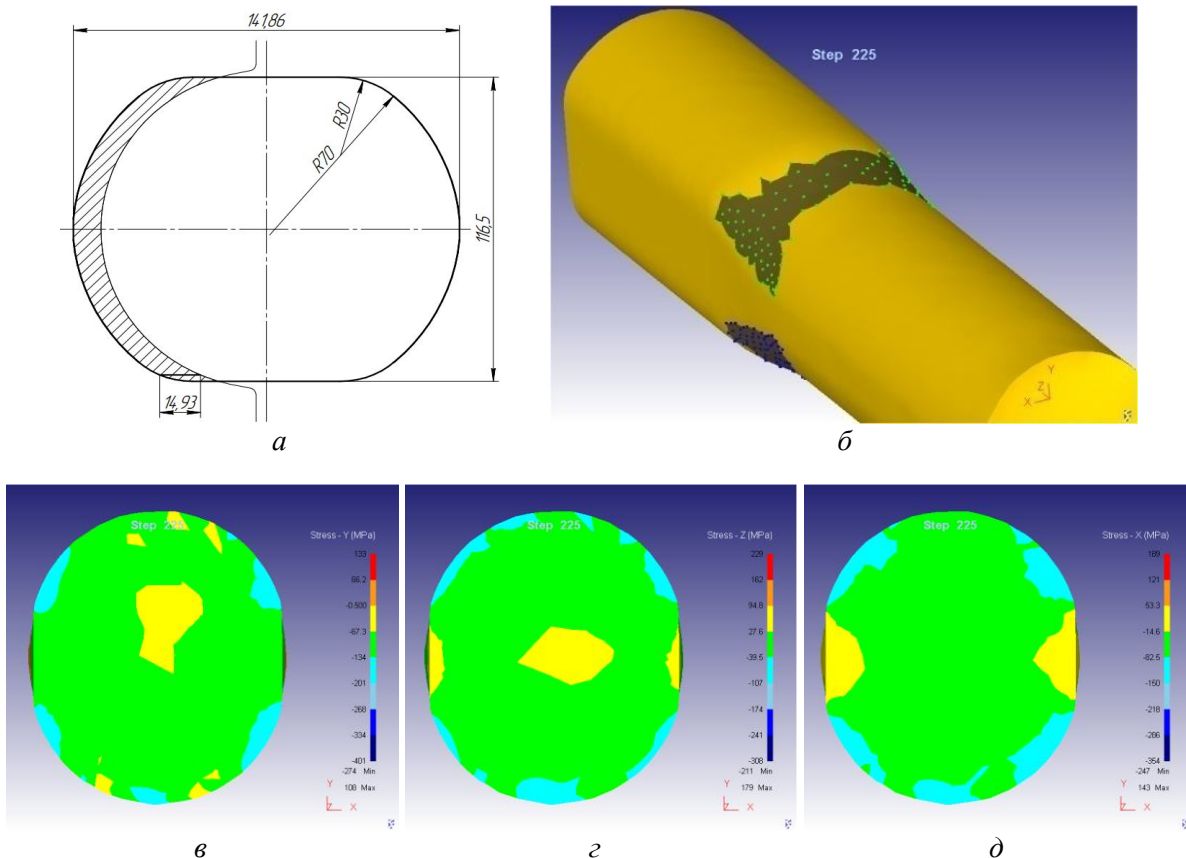
Калибр завода Б (рис. 2, а) представляет собой плоский овал. Имеет место значительная разновременность захвата овального раската (рис. 2, б). При этом наименьшая длина очага деформации получена в зоне дна круглого калибра, а наибольшая — в зонах боковых стенок его ручьев.

Калибр завода В (рис. 3, а) представляет собой специальный трехрадиусный овал. Имеет место некоторая разновременность захвата овального раската (рис. 3, б). При этом наименьшая длина очага деформации получена в зоне дна круглого калибра, а наибольшая — в зонах боковых стенок его ручьев.

Калибр, показанный на рисунках 5 и 6, а, представляет собой специальный четырёхрадиусный овал с выпуклым дном. В этом

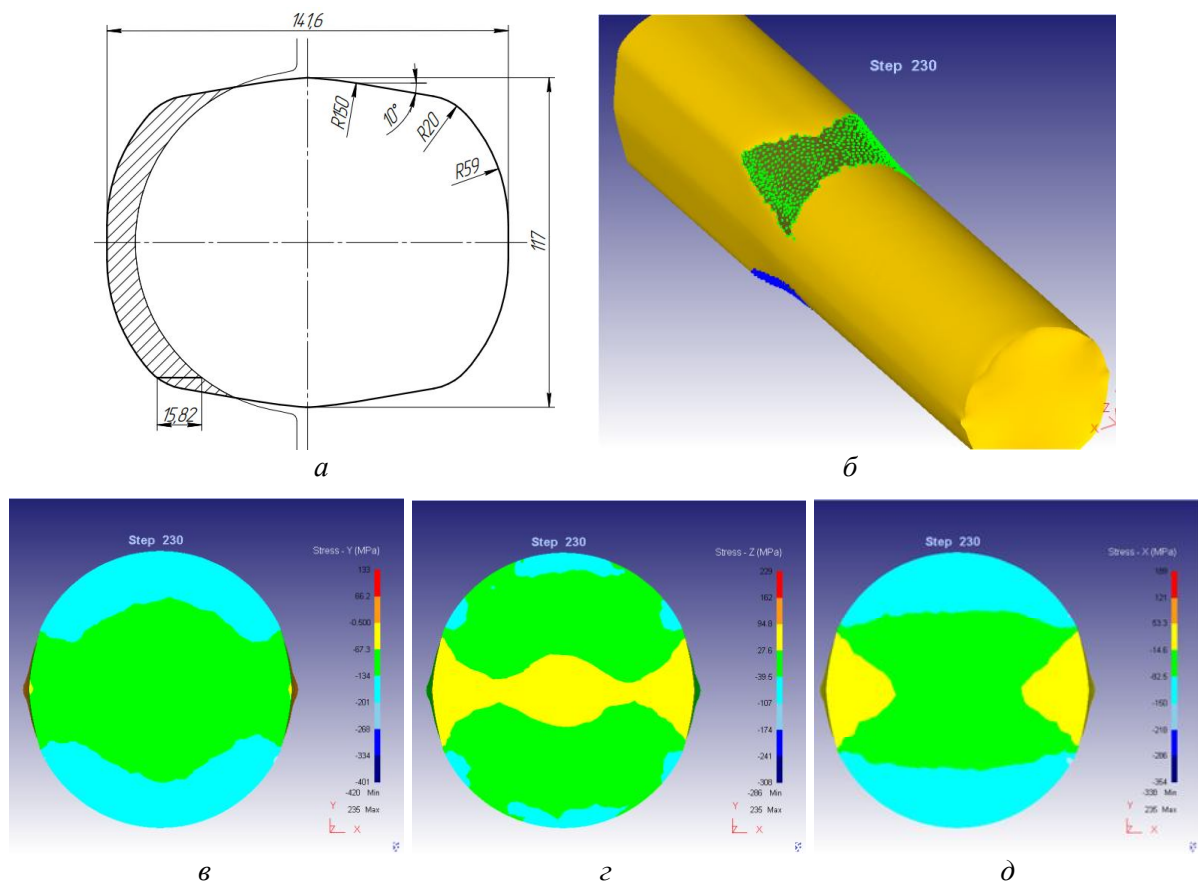
случае обеспечивается одновременный захват овального раската (рис. 6, б) и, соответственно, одинаковая длина очага деформации по ширине круглого калибра. Калибровка овала разработана на основе теории и компьютерной программы, созданных в работах [6, 8].

Калибр, показанный на рисунках 8 и 9, а, представляет собой специальный четырёхрадиусный овал с вогнутым дном. В этом случае обеспечивается одновременный захват овального раската по дну и части боковых стенок круглого калибра (рис. 9, б) и, соответственно, одинаковая длина очага деформации в указанной зоне. Калибровка овала разработана на основе теории и компьютерной программы, созданных в работах [6, 8].



а — чертеж предчистового овала; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной, продольной и поперечной осям соответственно

Рисунок 2 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската по калибровке завода Б в круглом калибре



а — чертеж предчистового овала; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной, продольной и поперечной осям соответственно

Рисунок 3 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската по калибровке завода В в круглом калибре

Представление о неравномерности деформации металла валками по ширине круглого калибра применительно к каждому из пяти типов предчистовых овалов дают рисунки 1–3, а, 6, а, 9, а. Неравномерность деформации по каждой калибровке оценивали отклонением значения максимального обжатия от значения среднего приведенного обжатия по ширине калибра. Среднее приведенное обжатие по каждой калибровке находили как частное от деления площади заштрихованной зоны (показанной на каждом из указанных рисунков) на высоту этой зоны. Для калибровки А указанное отклонение составило 24,2 %, для калибровки Б — 32,9 %, для калибровки В — 29,4 %, для калибровки, показанной на рисунке 6, а, — 6,2 %, для ка-

либровки, показанной на рисунке 9, а, — 19,7 %. Наибольшая неравномерность деформации по указанному показателю получена по калибровке Б, наименьшая — по усовершенствованной калибровке, показанной на рисунке 6, з. Неравномерность деформации по каждой калибровке оценили также отклонением относительного обжатия, соответствующего максимальному абсолютному обжатию, от относительного обжатия, соответствующего абсолютному среднему приведенному обжатию. Для калибровки А указанное отклонение составило 0,5 %, для калибровки Б — 86,7 %, для калибровки В — 65,0 %, для калибровки, показанной на рисунке 6, а, — 15,1 %, для калибровки, показанной на рисунке 9, а, — 7,1 %.

Исходная информация
Диаметр круга 120

Размеры круглого калибра

D (мм)	574
h (мм)	57
S (мм)	7.5
R (мм)	60.75
B0 (мм)	122.5

Уширение (мм) 4.0 (δ)

информация по умолчанию для заготовки

B (мм)	117.5
T (мм)	0
u1 (град.)	40
u2 (град.)	81
r0 (мм)	-100
r1 (мм)	20
r2 (мм)	0
B2 (мм)	0

Вытяжка 1.217

Масштаб M:1 M=2

Результаты расчета

Ld (мм)	71.585	x (мм)	y (мм)	z (мм)	
z1 (мм)	39.049	1	71.585	18.766	60.002
y1 (мм)	57.264	2	71.585	23.903	59.002
R0 (мм)	64.044	3	71.585	27.628	58.002
R1 (мм)	59.580	4	71.585	30.680	57.002
V (мм)	10.727	5	71.585	33.312	56.002
fi (град.)	41.432	6	71.585	35.648	55.002
B1 (мм)	0.500				
Sk (мм ²)	11599.4				
Sz (мм ²)	14116.5				

$$B1 = \frac{B0}{2} - \left(\frac{B}{2} + \frac{\delta}{2} \right)$$

Рисунок 4 Проектирование овального раската, полученного в специальном четырёхрадиусном овальном калибре с выпуклым дном

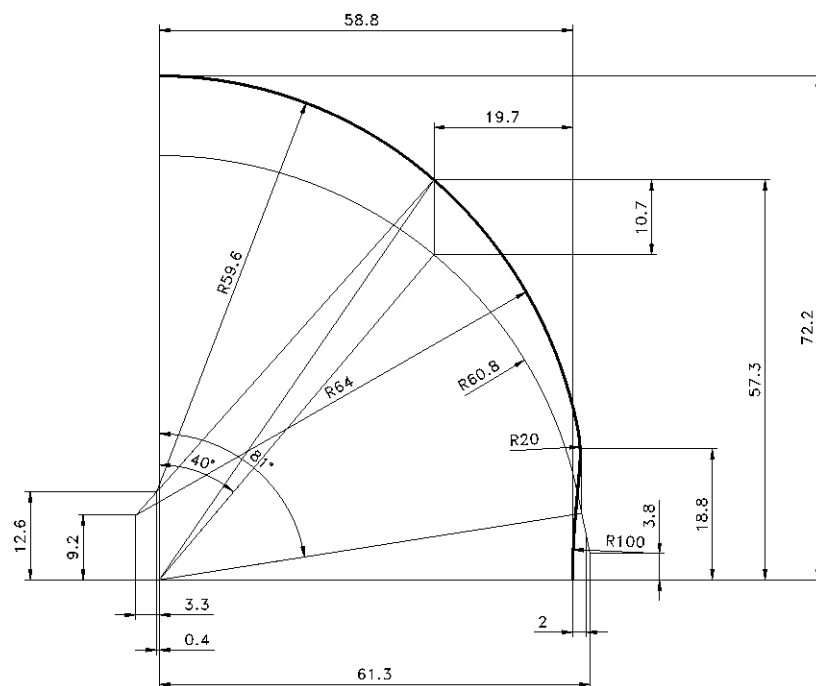
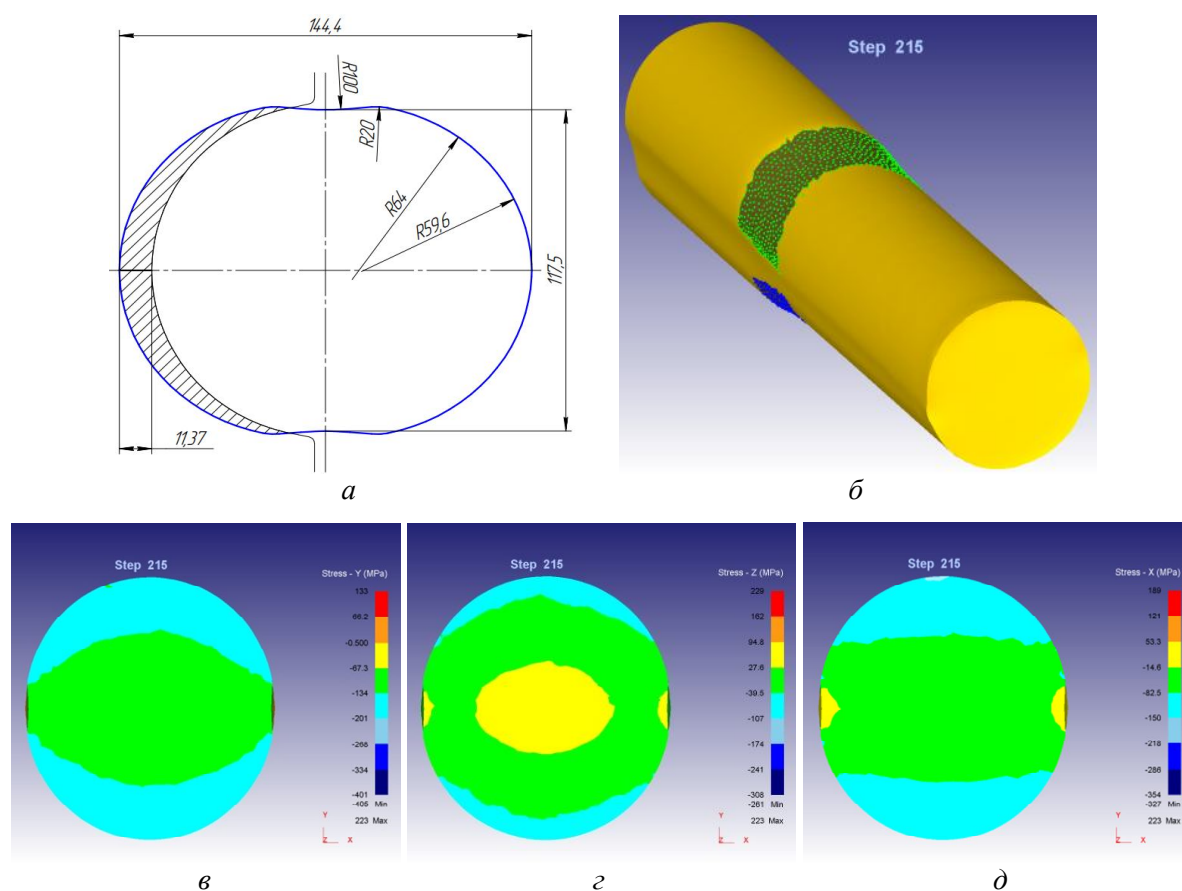


Рисунок 5 Чертеж специального овального раската, совмещенного с калибром для прокатки круглого профиля диаметром 120 мм на крупносортном стане «600» (проектирование выполнено в окне программы, показанном на рисунке 4)



а — чертеж предчистового овала; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной, продольной и поперечной осям соответственно

Рисунок 6 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската (по калибровке, представленной на рисунках 4, 5) в круглом калибре

Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки предчистовых овальных раскатов различных типов, показанные на рисунках 1–3, б, 6, б, 9, б, позволяют судить о степени охвата овального раската по его периметру ручьями круглого калибра, причем как при захвате, так и по всей длине очага деформации. Так, по калибровке А захват начинается по дну круглого калибра, соответственно, охват овального раската отсутствует. По калибровке Б захват начинается на небольших участках боковых стенок круглого калибра, соответственно, охват овального раската выполняется только по ним. По калибровке В захват начинается в зоне перехода дна круглого калибра в его боковые

стенки и достаточно быстро распространяется на всё дно калибра. То есть охват овального раската после захвата выполняется практически по дну круглого калибра. По калибровке, показанной на рисунке 9, б, одновременный захват начинается по дну и части боковых стенок круглого калибра, соответственно, охват овального раската выполняется в указанной зоне. Анализ рисунков 1–3, б, 9, б позволяет сделать вывод о том, что по рассматриваемым калибровкам степень охвата овальных раскатов по их периметрам ручьями круглого калибра является неполной как при захвате, так и по всей длине очага деформации. По калибровке, показанной на рисунке 6, б, имеет место практически пол-

ный охват овального раската по его периметру ручьями круглого калибра. Так, при диаметре прокатанного круга в горячем состоянии 121,6 мм контакт уже в первый момент захвата получен на ширине калибра, равной 120 мм. Далее по длине очага деформации степень охвата овального раската по его периметру ручьями круглого калибра несколько увеличивается.

Рассмотрим распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной оси (рис. 1–3, в, 6, в, 9, в). Необходимо отметить, что сжимающие напряжения по всему сечению очага получены по всем пяти калибровкам. При этом максимальные сжимающие напряжения 200–250 МПа по дну круглого калибра получены по калибровке А (рис. 1, в) и калибровке, показанной на рисунке 9, в; по калибровке Б (рис. 2, в) — 0,5–130 МПа; по калибровкам С (рис. 3, в) и представленной на рисунке 6, в — 130–200 МПа.

Вместе с тем по всей боковой поверхности контакта наибольшие сжимающие напряжения 130–200 МПа получены только по калибровке, представленной на рисунке 6, в, по остальным они ниже.

На рисунках 1–3, з, 6, з, 9, з показано распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по продольной оси (в направлении прокатки). По всем калибровкам имеются зоны сжимающих напряжений (40–100 МПа), которые показаны голубым цветом; зоны сжимающих напряжений (от 40 МПа), переходящие в растягивающие напряжения (до 28 МПа), которые показаны зеленым цветом; зоны растягивающих напряжений (28–95 МПа), которые показаны желтым цветом. При этом наибольшая по протяженности зона сжимающих напряжений (40–100 МПа) по дну и боковым стенкам круглого калибра имеет место по калибровке, представленной на рисунке 6, з.

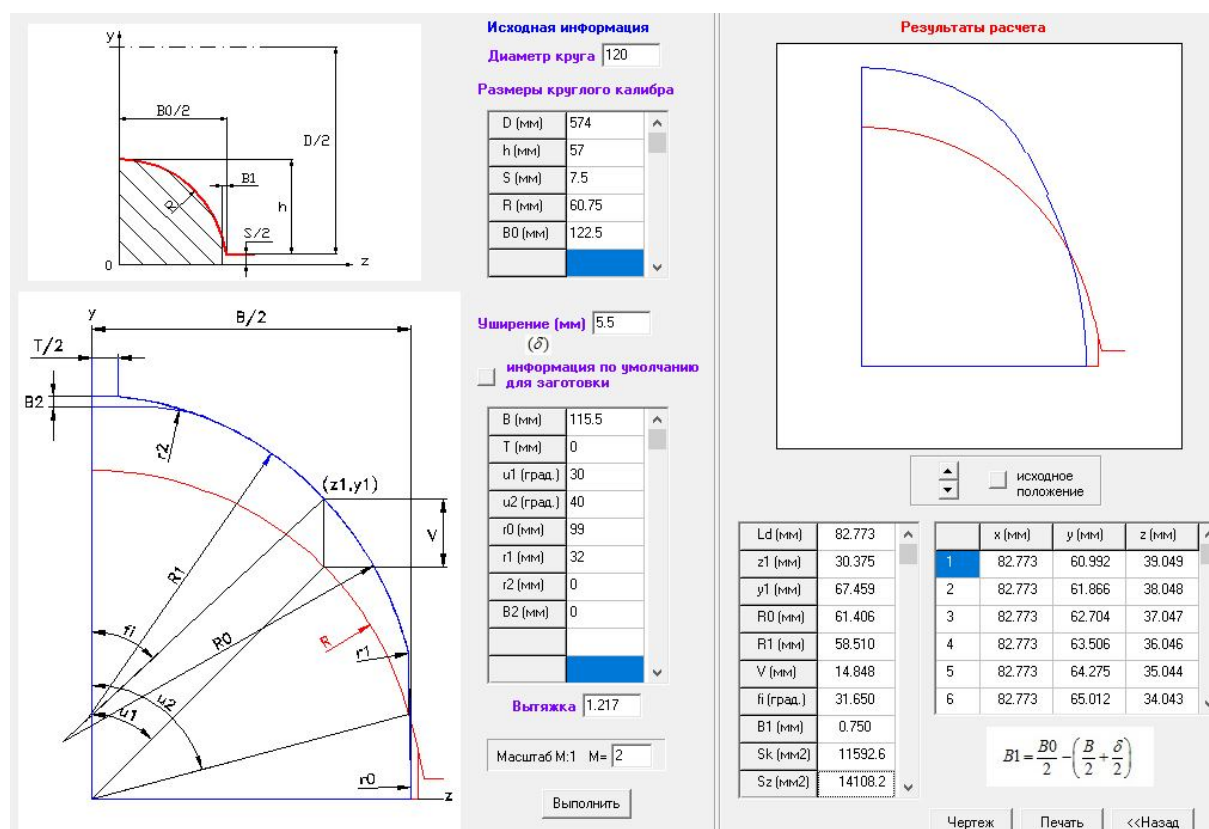


Рисунок 7 Проектирование овального раската, полученного в специальном четырёхрадиусном овальном калибре с вогнутым дном

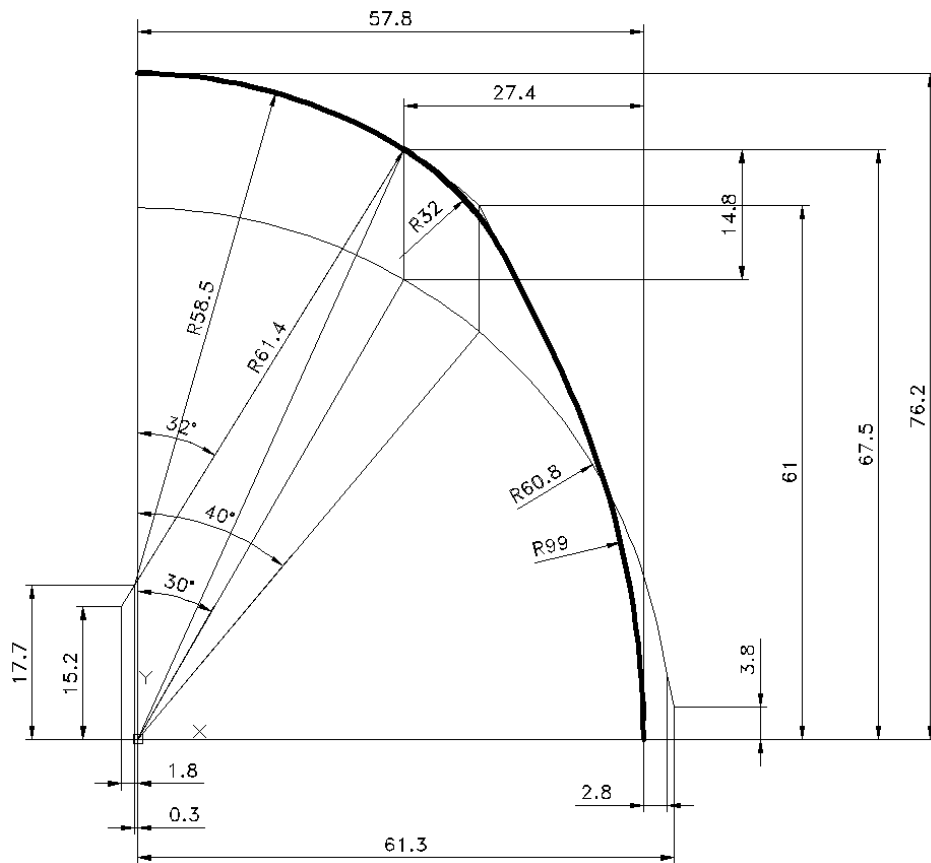
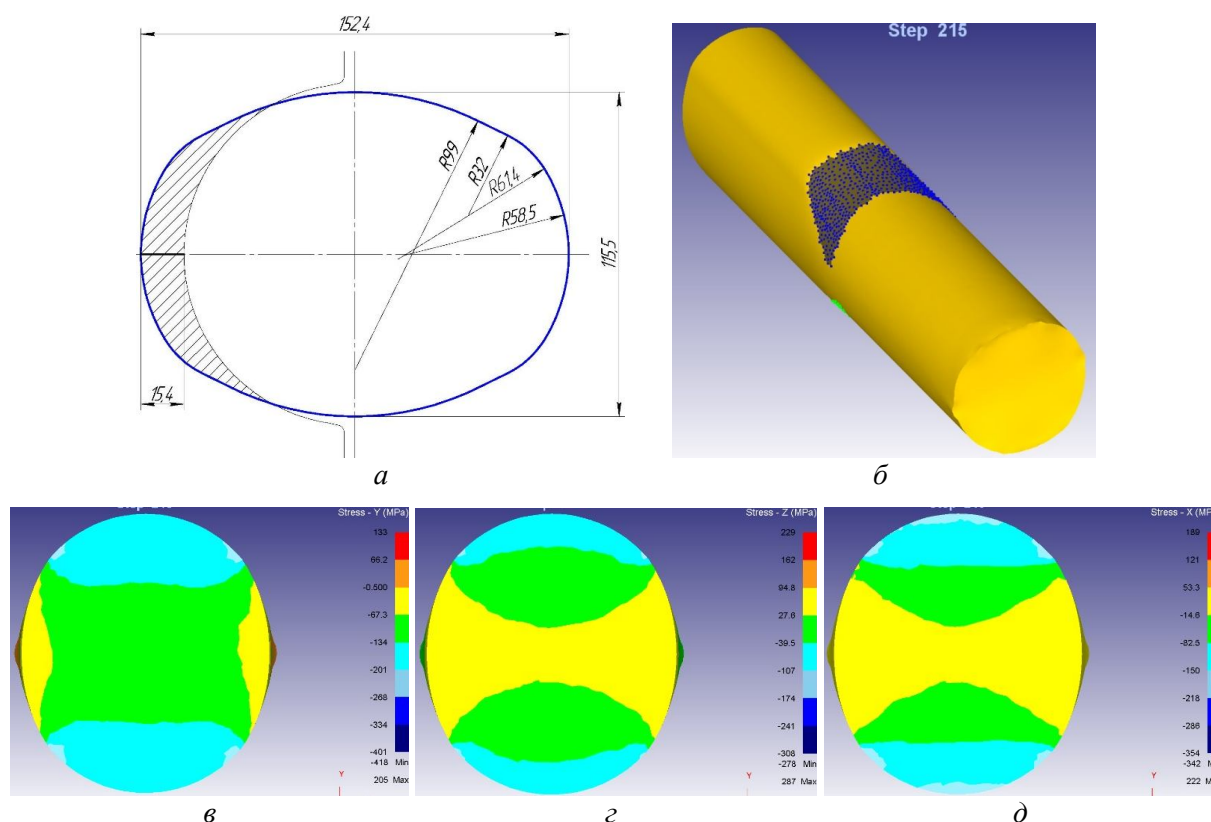


Рисунок 8 Чертеж специального овального раската, совмещенного с калибром для прокатки круглого профиля диаметром 120 мм на крупносортом стане «600» (проектирование выполнено в окне программы, показанном на рисунке 7)

Распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по поперечной оси (в направлении течения металла в уширение) показано на рисунках 1–3, д, 6, д, 9, д. При этом максимальные сжимающие напряжения 200–250 МПа по дну круглого калибра получены по калибровке А (рис. 1, д) и калибровке, показанной на рисунке 9, д. По остальным калибровкам сжимающие напряжения по дну круглого калибра находятся в диапазоне 15–150 МПа. В сечениях раскатов имеются сжимающие напряжения в диапазоне 15–80 МПа, показанные зеленым цветом. Имеются также растягивающие напряжения (не более 50 МПа), показанные желтым цветом. При этом наименьшая протяженность зон растягивающих напряжений, показанных желтым цветом, получена по калибровке, представленной на рисунке 6, д. Причем они

расположены только у зазоров круглого калибра и связаны с течением металла в уширение.

Разновременность захвата овального раската и неравномерность деформации металла валками по ширине круглого калибра обуславливают неравномерный износ валков, что в конечном итоге приводит к появлению дефектов на поверхности горячекатаного металла. Наиболее существенными факторами, определяющими износ валков, являются величины проскальзывания деформируемого металла относительно поверхностей валков и значения контактных давлений. Представляет интерес выполнить на базе конечно-элементного моделирования сравнительный анализ износа валков в зоне круглого калибра в случае прокатки в нем предчистовых овалов различных типов.



а — чертеж предчистового овала; б — конфигурация очага деформации; в, г, д — распределение нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной, продольной и поперечной осям соответственно

Рисунок 9 Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската (по калибровке, представленной на рисунках 7, 8) в круглом калибре

Выводы и направление дальнейших исследований:

1. Выполнены комплексные исследования в идентичных условиях основных параметров очагов деформации при прокатке предчистовых овальных раскатов различных типов (плоского овала, двухрадиусного, трехрадиусного, а также двух четырехрадиусных овалов) в круглом калибре. Вытяжка при прокатке четырех указанных овалов равнялась 1,217.

2. Выполнен сравнительный анализ выявленных закономерностей напряженно-деформированного состояния металла в очагах деформации при прокатке овалов различных типов в круглом калибре. Анализ распределения нормальных напряжений в средней части очага деформации по вертикальной оси показал, что наибольшие

сжимающие напряжения (130–200 МПа) по всей боковой поверхности контакта получены при прокатке четырехрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном. Анализ распределения нормальных напряжений в средней части очага деформации по продольной оси (в направлении прокатки) показал, что наибольшая по протяженности зона сжимающих напряжений (40–100 МПа) по дну и боковым стенкам круглого калибра имеет место при прокатке четырехрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном. Анализ распределения нормальных напряжений в средней части очага деформации по поперечной оси (в направлении течения металла в уширение) показал, что наименьшая протяженность зон растягивающих напря-

жений (не более 50 МПа) получена при прокатке четырёхрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном. Причем они расположены только у зазоров круглого калибра и связаны с течением металла в уширение.

3. Показано, что только при прокатке четырёхрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном, его сечение полностью соответствует вертикальному сечению круглого калибра в плоскости захвата, что улучшает устойчивость полосы в момент захвата.

4. Установлено, что только при прокатке четырёхрадиусного овала, полученного в специальном овальном калибре с выпуклым дном, обеспечивается одновременный захват металла валками практически по всей ширине круглого калибра, что снижает вероятность появления трещин.

5. Результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки предчистовых овальных раскатов различных типов показали, что только при прокатке четырёхрадиусного овала, полученного в спе-

циальном овальном калибре с выпуклым дном, имеет место практически полный охват овального раската по его периметру ручьями круглого калибра. Так, при диаметре прокатанного круга в горячем состоянии 121,6 мм контакт уже в первый момент захвата получен на ширине калибра, равной 120 мм.

6. Неравномерность деформации металла, которая отрицательно сказывается на качестве наружной поверхности горячекатаного металла, оцениваемая по каждой калибровке отклонением значения максимального обжатия от значения среднего приведенного обжатия по ширине калибра при прокатке, составила при использовании двухрадиусного овала 24,2 %, плоского овала — 32,9 %, трехрадиусного овала — 29,4 %, четырёхрадиусного овала (калибр с вогнутым дном) — 19,8 %, четырёхрадиусного овала (калибр с выпуклым дном) — 6,2 %.

7. Направление дальнейших исследований связано с исследованием износа валков при прокатке в круглом калибре предчистовых овалов различных типов.

Библиографический список

1. *Прокатка и калибровка [Текст] : справочник. В 6 т. Т. 1 / Б. М. Илюкович, Н. Е. Нехаев, С. Е. Меркурьев ; под ред. Б. М. Илюковича. — Днепропетровск : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2002. — 506 с.*
2. *Чекмарев, А. П. Калибровка прокатных валков [Текст] / А. П. Чекмарев, М. С. Мутьев, Р. А. Машиковцев. — М. : Металлургия, 1971. — 512 с.*
3. *Бахтинов, Б. П. Калибровка прокатных валков [Текст] / Б. П. Бахтинов, М. М. Штернов. — М. : Металлургияиздат, 1953. — 784 с.*
4. *Бахтинов, В. Б. Технология прокатного производства [Текст] / В. Б. Бахтинов. — М. : Металлургия, 1983. — 486 с.*
5. *Hong, H. Roll pass design and simulation on continuous rolling of alloy steel round bar [Text] / H. Hong // Procedia Manufacturing : 9th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing (ICPNS'2019). — 2019. — Vol. 37. — P. 127–131.*
6. *Бочков, Н. Г. Производство качественного металла на современных сортовых станах [Текст] / Н. Г. Бочков. — М. : Металлургия, 1988. — 312 с.*
7. *Пат. 102915 Украина, МПК (2012) B21B 1/02. Способ прокатки круглых профилей / В. Б. Шум, А. В. Яковченко, В. М. Никишин, А. В. Курилов, Р. Е. Гайдук, В. В. Борискин ; заявитель и патентообладатель Донец. нац. техн. ун-т. — № a201200925; заявл. 30.01.12; опубл. 27.08.13, Бюл. № 16. — 6 с. : ил.*
8. *Снитко, С. А. Математическая модель поверхности круглого калибра [Текст] / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко // Вестник Донецкого национального технического университета. — 2020. — Т. 20. — № 4. — С. 43–48.*
9. *Снитко, С. А. Исследование процесса самоцентрировки овального раската специальной формы в круглом калибре на базе метода конечных элементов [Текст] / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко //*

Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении : сб. науч. тр. — 2021. — Т. 36. — № 3. — С. 71–82.

10. Развитие теории и технологии прокатки круглых профилей [Текст] / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко, А. В. Яковченко, П. Н. Денищенко // Сборник научных трудов ДонГТИ. — 2021. — Вып. 25 (68). — С. 32–45.

11. Снитко, С. А. Адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската в круглом калибре [Текст] / С. А. Снитко, Н. П. Денищенко, В. В. Пилипенко // Сборник научных трудов ДонГТИ. — 2021. — Вып. 23 (66). — С. 32–39.

© Снитко С. А.

© Денищенко Н. П.

© Яковченко А. В.

© Денищенко П. Н.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В.,
к.т.н., доц., пом. нач. СПЦ по технологии
Филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК» Чичканом А. А.**

Статья поступила в редакцию 28.09.2022.

Doctor of Technical Sciences Snitko S. A. (*DonNTU, Donetsk, DPR, snitko_sa@mail.ru*),
Denishchenko N. P. (*DonSTI, Alchevsk, LPR, nd76696@gmail.ru*), **Doctor of Technical Sciences**
Yakovchenko A. V. (*DonNTU, Donetsk, DPR, mond1991@mail.ru*), **PhD in Engineering**
Denishchenko P. N. (*DonSTI, Alchevsk, LPR, pavel.denishchenko@gmail.com*)

INVESTIGATION OF ROLL PASSES OF THE PRE-FINISHING OVAL ROLLS OF VARIOUS TYPES IN A ROUND GROOVE

On the basis of finite-element modeling, complex studies of the main parameters of roll pass of pre-finishing oval rolls of various types (flat oval, as well as two-radius, three-radius and two four-radius ovals) under identical conditions in a round groove were performed. A comparative analysis of grooving was carried out on timing of capture oval roll, the degree of coverage of oval roll along its perimeter by roll-groove, the unevenness of metal deformation, the magnitude and distribution of normal stresses. It is shown that the use of a four-radius oval obtained in a special oval groove with a convex bottom has advantages.

Key words: *rolling of round profiles, pre-finishing oval, finite-element modeling, timing of capture oval roll, coverage of oval roll along its perimeter, unevenness of metal deformation, normal stresses.*

УДК 621.983

д.т.н. Рябичева Л. А.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, ryabic@gmail.com),
к.т.н. Коробко Т. Б.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, korobko.tamara@rambler.ru),
Королько В. В.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР)

ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА ПРИ СВОБОДНОМ ДОРНОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ ПОРОШКОВОЙ ЗАГОТОВКИ

В статье представлено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния при свободном дорновании порошковой пористой заготовки. Показано его влияние на структурообразование и твердость. Получено, что наибольшая интенсивность напряжений наблюдается в очаге деформации при меньшей исходной пористости порошковой заготовки. Микротвердость и толщина упрочненного слоя зависят от пористости и относительной толщины, от степени толстостенности и относительного натяга.

Ключевые слова: свободное дорнование, интенсивность напряжений, гидростатическое давление, структурообразование, микротвердость.

В настоящее время в машиностроении имеется большое количество разнообразных деталей, к которым предъявляются высокие требования по точности изготовления и высокой твердости рабочего поверхностного слоя. Типичными и наиболее массовыми представителями данных деталей являются детали типа тел вращения: втулки, кольца, фланцы и т. д. К наиболее эффективным методам улучшения качества деталей относятся способы поверхностного пластического деформирования, в частности дорнование [1]. Дорнование обладает способностью к формированию инструментом упрочненного поверхностного слоя в обрабатываемой заготовке со специфическим расположением волокон металла, за счет которого долговечность этой детали возрастает в 1,5–2 раза. Точность деталей и качество их поверхностного слоя обеспечиваются распределением остаточных деформаций и напряжений.

Процессам дорнования отверстий свойственны многие характерные признаки холодной обработки металлов давлением: упрочнение металла при его пластическом деформировании, изменение линейных

размеров обрабатываемых заготовок, трение и высокие давления на контактных поверхностях и др. [2].

Свободное дорнование характеризуется осесимметричным напряженным состоянием, при котором напряжения, действующие в плоскостях, перпендикулярных направлениям течения металла, являются главными. Поэтому компоненты всех касательных напряжений равны нулю. При дорновании возникают три составляющие деформации, из которых две могут быть положительными (отрицательными), а одна отрицательной (положительной) [3].

В подавляющем большинстве работ по проблемам дорнования исследовали дорнование отверстий в деталях из компактных сталей [4, 5]. В машиностроении нашли широкое применение детали из цветных металлов и сплавов на их основе, полученные операциями порошковой металлургии, — подшипники скольжения, втулки, ролики, при работе которых необходима высокая прочность внутренней поверхности отверстий. В направлении увеличения плотности порошковых деталей выполнена работа авторов [6], в которой рассматрива-

ется распределение плотности и накопленной деформации порошковых прессовок в различные моменты деформирования.

Поэтому актуальным является исследование напряженно-деформированного состояния и уплотнение порошковых заготовок.

Медь и ее сплавы являются распространенными материалами для изготовления деталей приборов, деталей электротехнического назначения из порошковых материалов. Медь имеет низкую прочность и высокую пластичность, поэтому представляет интерес разработать методы повышения прочности деталей из порошковой меди дорнованием.

Целью работы является компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния при свободном дорновании отверстий в заготовках из порошковой меди и его влияние на структурообразование и твердость.

Объект исследования — технологический процесс свободного дорнования порошковых пористых заготовок.

Предмет исследования — напряженно-деформированное состояние, структурообразование, твердость при свободном дорновании порошковых пористых заготовок.

Задачи исследования:

- компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния при свободном дорновании порошковых пористых заготовок;

- анализ интенсивности напряжений и гидростатического давления и их влияние на уплотнение;

- исследование структурообразования на внутренних и внешних слоях порошковой пористой заготовки при свободном дорновании;

- исследование твердости по Бринеллю и микротвердости на внутренних и внешних слоях порошковой пористой заготовки при свободном дорновании.

Рассматривали свободное дорнование отверстия в детали по схеме сжатия. Деталь имела размеры: исходный внутренний диаметр $d_0 = 9,8$ мм, наружный диаметр

$D_0 = 28$ мм, высота $H = 20$ мм. Материал — медь с исходной пористостью 6, 15 и 24 %.

Параметры дорна: дорн однозубый, диаметр по ленточке $d = 10$ мм; ленточка шириной $b = 1$ мм; угол заборного конуса $\alpha = 4^\circ$; угол обратного конуса $\alpha_1 = 4^\circ$; в месте перехода конической части дорна в цилиндрическую кромка скруглена до $R = 0,2$ мм. Натяг дорнования принимался равным $i = 0,2$ мм. Скорость дорнования $v = 2$ мм/с. При моделировании дорн и опора считались абсолютно жесткими объектами.

При дорновании напряжения на контактной поверхности заборного конуса дорна и детали обычно превышают величину напряжения текучести материала втулки σ_s или соизмеримы с ним. Поэтому для описания трения в таких условиях процесса использовали формулу Зибеля — $\tau_f = m\sigma_s$, где m — фактор трения; для процессов холодной деформации при наличии смазки следует принять $m = 0,08$.

Моделирование выполняли в пакете инженерного анализа Deform 10.2, в котором используется метод конечных элементов. Данный пакет позволяет моделировать деформирование спеченных металлов с пористостью до 30 %, при этом плотность материала рассчитывается и обновляется в процессе моделирования. Кривые упрочнения пористого материала рассчитываются на основе кривых упрочнения материала основы с учетом текущей пористости.

На рисунке 1 показана картина распределения интенсивности напряжений в стенке полый детали с различной исходной пористостью материала при свободном дорновании. На рисунке 2 представлены профили интенсивности напряжений в поперечном сечении очага деформации полый детали при различной исходной пористости материала.

Как видно из рисунка 1, наибольшая интенсивность напряжений 220 МПа наблюдается в очаге деформации при исходной пористости 6 %. С ростом пористости материала величина интенсивности на-

пряжений уменьшается и при 24 % составляет 145 МПа. Наибольшая величина очага деформации, в котором происходит и уплотнение материала, также наблюдается в материале при пористости 6 %.

Ход кривых интенсивности напряжений в очаге деформации при данных значениях пористости материала одинаков (рис. 2, а). При этом профили отличаются размерами очага деформации. Если при пористости 6 % длина очага деформации составляет 1,8 мм, то при пористости 15 % она равна 1,4 мм, а при 24 % — 1 мм. Такое изменение размера очага деформации свидетельствует о том, что именно при больших значениях исходной пористости в начальный период дорнования происходит структурная деформация.

Интенсивность напряжений по величине наибольшая у полой детали с исходной пористостью 6 % (рис. 2, а). Отсюда следует, что сила при дорновании полого цилиндра из материала с меньшей пористостью затрачивается на преодоление сопротивления деформированию твердой фазы, а с большей пористостью — на выполнение структурной деформации.

Гидростатическое давление характеризует изменение объема материала заготовки, что очень важно для пористых материалов, для которых не соблюдается закон

постоянства объема, а соблюдается закон постоянства массы. Величина гидростатического давления дает возможность проследить трансформацию очага деформации в очаг уплотнения [6].

Как видно из рисунка 2, б, для всех исследуемых случаев происходит рост гидростатического давления до некоторого увеличения очага деформации, который в данном случае трансформируется в очаг уплотнения. При этом гидростатическое сжатие обеспечивает уплотнение материала.

В стенке полой заготовки с начальной пористостью 6 % длина очага уплотнения достигает 3,8 мм вследствие того, что за пределами геометрического очага уплотнения взаимные перемещения и относительное течение частиц металла пренебрежимо малы. Движение внешней границы очага представляет собой движение точек твердого тела; векторы скорости всех точек движущейся зоны в любой момент времени равны по величине и направлению. На расстоянии более 3,8 мм возникают растягивающие напряжения, препятствующие уплотнению материала. Для пористостей 15 и 24 % длина очага уплотнения составляет 2 и 1,8 мм соответственно, что и объясняет низкую величину относительной плотности материала.

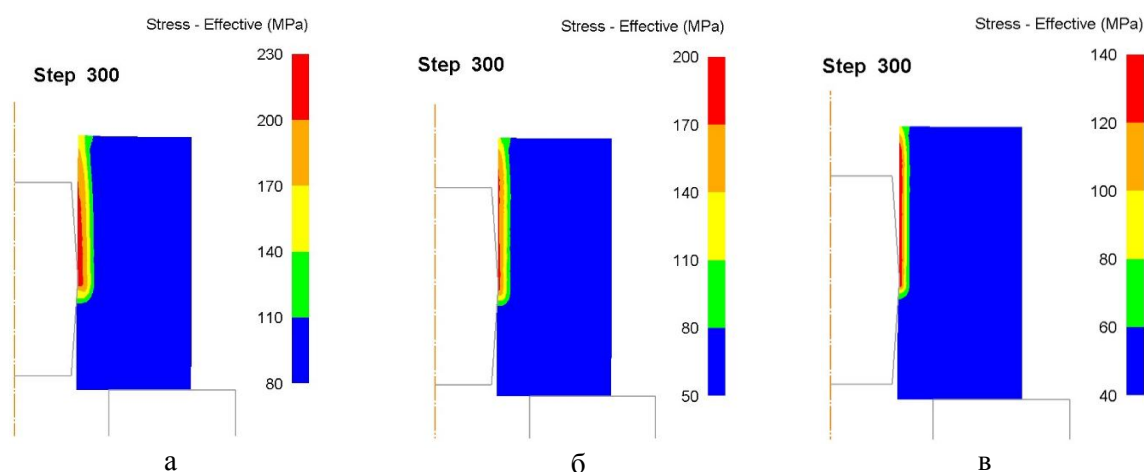


Рисунок 1 Распределение интенсивности напряжений в стенке полого цилиндра с разной исходной пористостью (а — 6 %; б — 15 %; в — 24 %)

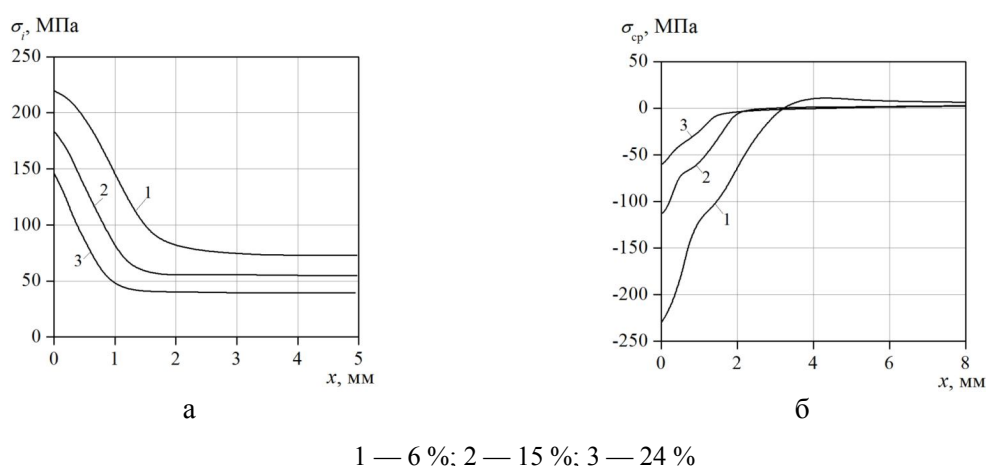


Рисунок 2 Профили интенсивности напряжений (а) и гидростатического давления (б) в очаге деформации при различной исходной пористости материала

При дорновании полый заготовки с исходной пористостью 6 % создаются более высокие сжимающие напряжения вследствие пластической деформации твердой фазы. У полых заготовок с большей исходной пористостью эти величины меньше, что и объясняет невозможность получения высокой плотности материала при дорновании.

В результате свободного дорнования пористых полых заготовок состояние их внутренней поверхности изменилось: она стала более качественной с менее заметной пористостью, образовалась своего рода плотная металлическая «рубашка» при оставшемся пористом наружном слое. На рисунках 3–5 представлена микроструктура пластически деформированных внутреннего и наружного слоёв заготовки образца после дорнования. Съемки выполняли на оптическом микроскопе МИМ-8 и на растровом электронном микроскопе РЭММА-102.

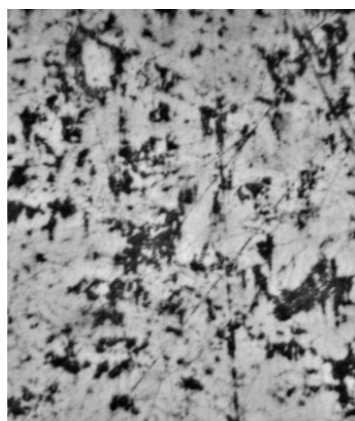
Микроструктуру изучали на образцах, полученных дорнованием пористых заготовок с исходной пористостью 15 %, с относительным натягом $i/d_0 = 0,02$ дорном с $d = 10$ мм, углом заборного конуса $\alpha = 4^\circ$. Шлифы вырезали по внутренней и внешней поверхностям заготовки вдоль вертикальной оси.

Исходные структуры пористых образцов после спекания при 900–920 °С в среде генераторного газа характеризуются нали-

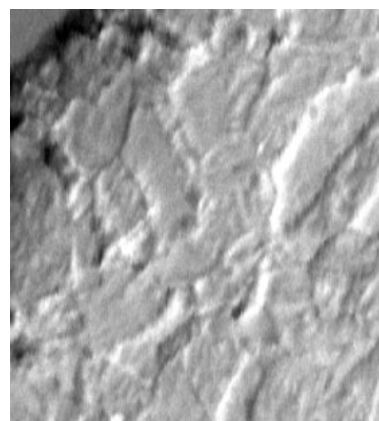
чием зерен меди и пор. На рисунке 3, а показана микроструктура медных образцов после спекания при увеличении 500. Наблюдается значительная разноразмерность, видны поры. Появление разноразмерности связано с неравномерным развитием статической рекристаллизации при спекании вследствие неоднородного напряженного состояния, которое создается при прессовании исходного полого образца [6, 9]. На рисунке 3, б показана микроструктура при увеличении 4000. Видны практически бездефектные границы зерен разной величины. После спекания средняя величина зерна на меди равна 31–32 мкм. Средняя твердость по Бринеллю составила НВ 58.

В результате дорнования во внешних слоях полый заготовки микроструктура металла претерпевает незначительные изменения, что связано с наличием некоторого гидростатического сжатия и дробления зерна за счет локального повышения внутренних напряжений (рис. 4).

На рисунке 4, а показана микроструктура внешнего слоя при увеличении 500. Следует отметить дробность зерна вследствие незначительной пластической деформации внешних слоев. Заметно искажение формы зерна, большая его дробность и наличие пор (рис. 4, б). Средняя величина зерна составила 15–18 мкм. Средняя твердость по Бринеллю составила НВ 92.

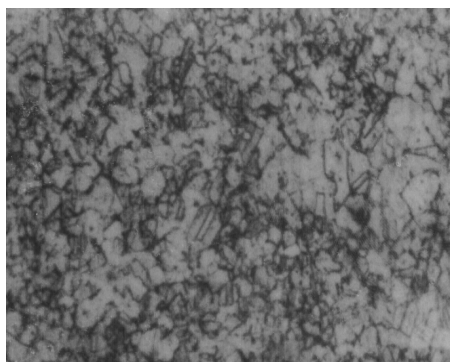


а

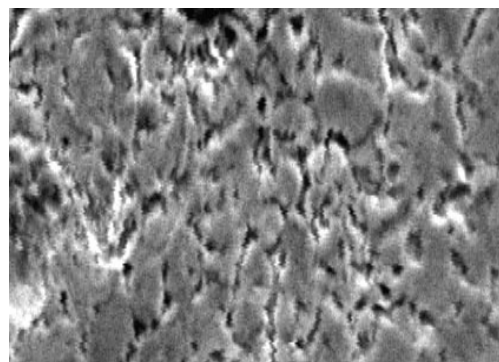


б

Рисунок 3 Микроструктура внутренней поверхности полого образца пористостью 15 % после спекания при увеличении: а — $\times 500$; б — $\times 4000$

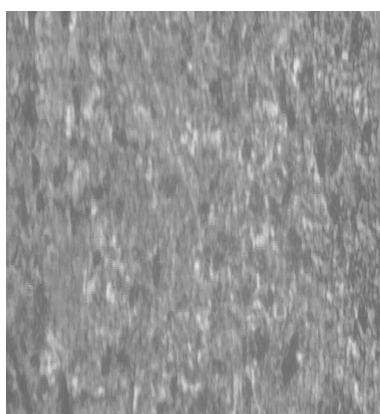


а

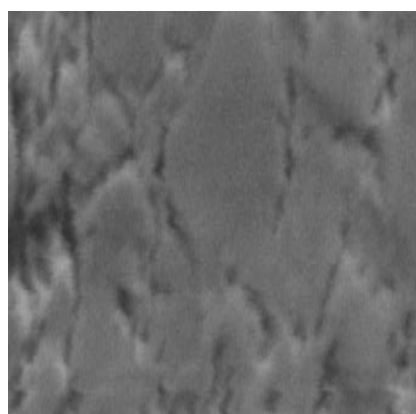


б

Рисунок 4 Микроструктура внешних слоев полой заготовки после дорнования при увеличении: а — $\times 500$; б — $\times 4000$



а



б

Рисунок 5 Микроструктура внутреннего слоя полой заготовки после дорнования при увеличении: а — $\times 500$; б — $\times 5000$

Для внутреннего слоя образца после дорнования характерна вытянутость зерен в направлении перемещения дорна, обеспечивающего осевое течение металла (рис. 5, а). При большем увеличении видно размытие зерен вследствие большой степени деформации и отсутствие пор (рис. 5, б). Средняя величина зерна составила 7–9 мкм. Средняя твердость по Бринеллю составила HB 105.

Деформационное упрочнение материала изучали методом измерения микротвердости на образцах, полученных дорнованием пористых заготовок с исходной пористостью 6, 15, 24 %, с относительным натягом $i/d_0 = 0,02$ дорном с $d = 10$ мм, углом заборного конуса $\alpha = 4^\circ$. На первом этапе микротвердость определяли непосредственно после дорнования отверстия, на втором — после отжига по режиму: нагрев до температуры 500–550 °С, выдержка, охлаждение на воздухе.

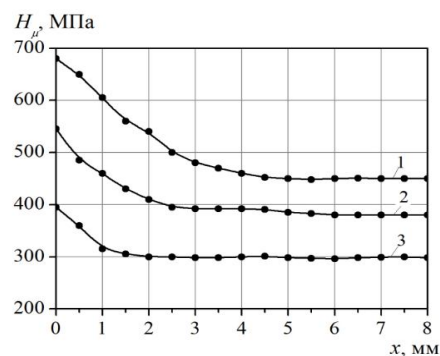
На рисунке 6, а показана зависимость микротвердости по поверхности обработанных дорнованием отверстий ($d_0 = 9,8$ мм) при различной исходной пористости образцов. Каждая точка на графиках представляет собой среднее арифметическое не менее десяти измерений. Анализ этих зависимостей позволяет констатировать следующее.

С увеличением пористости образцов величина микротвердости уменьшается. Причиной является наличие остаточной пористости. При этом упрочнение охватывает толщину поверхностного слоя в пределах 1,6 мм для пористости 24 % и 2 мм для пористости 6 %.

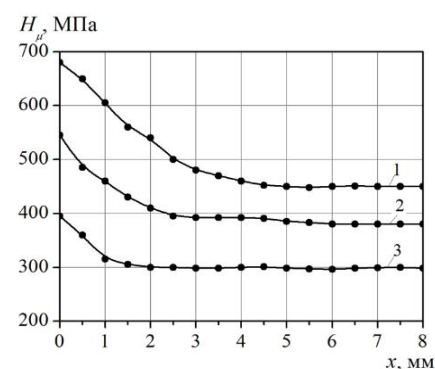
На рисунке 6, б показана зависимость микротвердости по поверхности обработанных дорнованием отверстий при различной степени толстостенности D_0/d_0 1,63; 2,24; 2,86. С повышением степени толстостенности наблюдается увеличение микротвердости упрочненного слоя, что связано с ростом контактных давлений и гидростатического сжатия в этих слоях образцов.

Исследовали зависимость микротвердости образцов из порошковой меди с исходной пористостью 15 %, длиной заго-

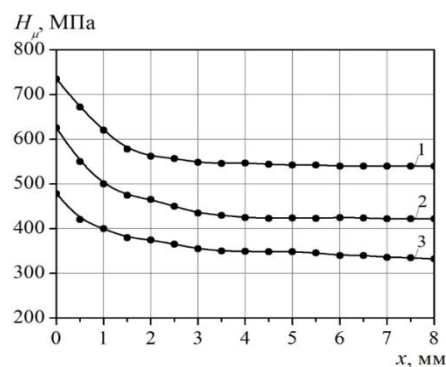
товки $L_0 = 20$ мм, наружным диаметром $D_0 = 28$ мм. Относительный натяг составлял, i/d_0 , %: 2,0; 5,3; 8,7.



а



б



в

Рисунок 6 Зависимость микротвердости по поверхности обработанных дорнованием отверстий при: а — различной исходной пористости образцов (1 — 6%; 2 — 15%; 3 — 24%); б — различной степени толстостенности (1 — 1,63; 2 — 2,24; 3 — 2,86); в — различной величине относительного натяга (1 — 2,0%; 2 — 5,3%; 3 — 8,7%)

На рисунке 6, в показана зависимость микротвердости по поверхности обработанных дорнованием отверстий при различной величине относительного натяга 0,02; 0,053; 0,087. С повышением относительного натяга наблюдается увеличение микротвердости упрочненного слоя и его толщина, что связано с ростом объема металла, участвующего в пластической деформации.

Отжиг влияет на микроструктуру. Он приводит к незначительному увеличению зерна как в наружных слоях, так и во внутренних слоях отверстия. В результате твердость по Бринеллю и микротвердость несколько уменьшаются. Твердость по Бринеллю на внутренних слоях отверстия составила в среднем НВ 92–98, на внешних слоях образца — НВ 83–85.

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Компьютерным моделированием показано, что наибольшая интенсивность напряжений наблюдается в очаге деформации при исходной пористости порошковой заготовки, равной 6 %. С ростом пористости материала величина интенсивности напряжений уменьшается. Наибольшая величина очага деформации, в котором происходит и

уплотнение материала, также наблюдается в материале при пористости 6 %.

2. При всех значениях пористости порошковых заготовок наблюдается рост гидростатического сжатия до некоторого увеличения очага деформации, который трансформируется в очаг уплотнения, что и обеспечивает уплотнение материала.

3. Установлено, что неравномерность напряженно-деформированного состояния влияет на структурообразование при свободном дорновании порошковой медной заготовки. Во внутреннем поверхностном слое полой заготовки величина зерна минимальна, во внешнем слое величина зерна больше.

4. Получено, что микротвердость и толщина упрочненного слоя зависит от пористости и относительной толщины, от степени толстостенности и относительного натяга. С увеличением исходной пористости образцов уменьшаются величина микротвердости и толщина упрочненного слоя. С повышением степени толстостенности наблюдается увеличение микротвердости и толщины упрочненного слоя. С повышением относительного натяга наблюдается увеличение микротвердости упрочненного слоя и его толщина.

Библиографический список

1. Проскуряков, Ю. Г. Дорнование отверстий [Текст] / Ю. Г. Проскуряков. — М. : Машгиз, 1961. — 190 с.
2. Скворцов, В. Ф. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра [Текст] / В. Ф. Скворцов, А. Ю. Арляпов. — Томск : ТПУ, 2005. — 92 с.
3. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст] : справочник / Л. Г. Одинцов. — М. : Машиностроение, 1987. — 328 с.
4. Воронцов, А. Л. Исследование процесса дорнования отверстий [Текст] / А. Л. Воронцов // Кузнечно-штамповочное производство. — 2010. — № 10. — С. 3–8.
5. Алешин, А. В. Исследование характера течения металла при установке втулки в корпус с торцевым уплотнением методом дорнования [Текст] / А. В. Алешин, А. М. Роговой, В. А. Хоменко // Ползуновский вестник. — 2002. — № 1. — С. 159–163.
6. Эволюция распределения плотности, накопленной деформации и топологических особенностей порошковых цилиндрических заготовок в условиях деформирующего протягивания [Текст] / О. А. Розенберг, Е. А. Пащенко, А. П. Майданюк [и др.] // Сверхтвердые материалы. — 2008. — № 2. — С. 81–91.

© Рябичева Л. А.
 © Коробко Т. Б.
 © Королько В. В.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ПуХЛ ЛГУ им. В. Даля Гутько Ю. И.,
к.т.н., доц., зав. каф. ОМДМ ДонГТИ Денищенко П. Н.*

Статья поступила в редакцию 29.09.2022.

Doctor of Technical Sciences Riabicheva L. A. (*LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, ryabic@gmail.com*), **PhD in Engineering Korobko T. B.** (*DonSTI, Alchevsk, LPR, korobko.tamara@rambler.ru*), **Korolko V. V.** (*LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR*)

INFLUENCE OF THE STRESS-STRAIN STATE ON STRUCTURE FORMATION AND PROPERTIES DURING FREE MANDRELLING OF POWDERED BLANK HOLES

The article presents a computer simulation of the stress-strain state during free mandrelling of a powdered porous blank. Its influence on structure formation and hardness is shown. It is found that the greatest intensity of stresses is observed in the deformation focus at a lower initial porosity of the powdered blank. The microhardness and thickness of the hardened layer depends on the porosity and relative thickness, on the degree of thick-walled and relative tension.

Key words: *free mandrelling, stress intensity, hydrostatic pressure, structural formation, microhardness.*

УДК 621.774.04

к.т.н. Куберский С. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР),
Великоцкий Р. Е.
(Филиал № 1 «АМК» ООО «ЮГМК», г. Алчевск, ЛНР),
к.т.н. Должиков В. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И СТАРЕНИЯ НА ХЛАДОСТОЙКОСТЬ ТРУБНОЙ СТАЛИ КАТЕГОРИИ ПРОЧНОСТИ К60

В работе исследовано влияние термической обработки и старения на низкотемпературную вязкость трубной стали категории прочности К60, не прошедшей противоблоковую обработку (ПФО). Установлена зависимость между продолжительностью старения горячекатаного толстолистового проката, не прошедшего ПФО, и хладостойкостью. Предложено научное обоснование влияния процесса молизации атомарного водорода при эвтектоидной реакции на хладостойкость стали К60.

Ключевые слова: *сталь К60, хладостойкость, противоблоковая обработка, порог хладноломкости, термическая обработка, старение, атомарный водород, межфазная граница, эвтектоидное превращение, молизация.*

Трубная сталь категории прочности К60 (предел прочности $\sigma_B \geq 600$ МПа) принадлежит к группе малоуглеродистых низколегированных сталей (МНС) феррито-перлитного класса. Марка данной стали довольно хорошо изучена [1]. Как правило, при производстве данной стали не возникает особых проблем с обеспечением необходимых механических свойств по прочности и ударной вязкости, однако из-за высоких требований по σ_B иногда возникает отсортровка по относительному удлинению (δ_5). Основным видом брака при производстве данной стали является отсортровка по хладостойкости [2], на величину которой большое влияние оказывает содержание водорода. Поэтому после разливки сталь подвергают противоблоковой обработке (ПФО), предусматривающей замедленное ее охлаждение до температуры окружающей среды в течение нескольких десятков часов.

Термическая обработка (ТО) листов после ускоренного охлаждения (УО) выполняется, если необходимо повысить пластичность металла. Такую обработку листов, заключающуюся в нормализации горячекатаного толстолистового проката (ГТП), т. е. нагреве в

аустенитное состояние (выше A_{c3}) и дальнейшем охлаждении на воздухе, производят в методических нагревательных печах.

Для изменения хладостойкости данной марки стали к старению металла обычно не прибегают, т. к. при старении наблюдается деградация свойств, а именно повышение прочности и снижение пластичности, величины предела макроупругости и длительности инкубационного периода коррозионного растрескивания.

В работе [3] представлены результаты исследований влияния длительной эксплуатации стали класса прочности К60 на стандартные механические свойства, хладостойкость и характер разрушения металла для магистральных трубопроводов высокого давления (МТВД) из сталей феррито-перлитного класса. Предложена методика моделирования процессов старения и оценки уровня деградации свойств металла, основанная на склонности стали к замедленному разрушению при одновременном воздействии напряжений, коррозионной среды и водорода.

Для трубных сталей класса прочности К60 с феррито-перлитной и феррито-

бейнитной структурой проведено исследование влияния длительной эксплуатации на стандартные механические свойства, температурную зависимость внутреннего трения и склонность к деформационному старению [4]. В ходе длительной эксплуатации происходит деградация свойств в результате протекания процесса деформационного старения, приводящего к охрупчиванию металла.

В работе [5] представлены результаты исследования влияния нагрева при нанесении антикоррозионного покрытия и пластической деформации при изготовлении отводов холодного гнутья на свойства труб К60 с высокой деформационной способностью. Изменение механических свойств металла деформированных зон отводов в поперечном направлении состоит в снижении пластичности, а в продольном — более комплексное и зависит от направления деформации. Высокая деформируемость металла труб после старения достигается благодаря формированию структуры стали с двухфазной матрицей, высокой плотностью свободных дислокаций и выделениями карбидов.

В работе [6] исследованы химический состав, микроструктура, содержание водорода, степень коррозионного повреждения труб, механические свойства при растяжении и ударном изгибе. Показано, что межзеренное разрушение является следствием ослабления когезионной прочности границ зерен феррита и колоний перлита.

В работе [7] исследовано качество проката из высокопрочной низкоуглеродистой стали, изготовленного из слябов с применением усовершенствованного сокращенного режима ТО. Применение такого режима ТО, исключая операцию высокого отпуска, при содержании водорода в жидкой стали не более 1,8 ppm обеспечивает качество листового проката на уровне металла валового производства.

Авторами работы [8] выполнена оценка степени обезводороживания листовой стали повышенной прочности. Исследован

способ снижения содержания водорода в стали за счет введения в технологический процесс контролируемой прокатки изотермической выдержки при температурах 450–350 °С и охлаждения от этих температур со скоростью не более 20 °С/ч. Выполнен теоретический расчет содержания водорода в листовой стали повышенной прочности после предложенного режима обработки на основании закона Фика. Получено распределение концентрации водорода по сечению листа стали ЕНЗ6 (близкой по химическому составу к сталям класса прочности К60) после ПФО и показано, что такой технологический прием способствует снижению концентрации водорода по сечению листа от его центра к поверхности в среднем на 2 ppm.

Таким образом, можно отметить, что влияние ТО на свойства металла для МТВД и процессы, протекающие при его старении, достаточно хорошо изучены.

Однако в литературе отсутствуют исследования уровня хладостойкости ГТП трубной стали категории прочности К60, не прошедшего ПФО, а также влияния на этот показатель ТО и старения.

Поэтому основная **цель настоящей работы** заключалась в определении закономерностей влияния ТО и старения на хладостойкость трубной стали категории прочности К60, не прошедшей ПФО.

Объект исследования — процессы структурообразования и механические свойства стали К60.

Предмет исследования — влияние ТО и старения стали К60 на ее хладостойкость.

Задачи исследования:

- установить влияние ТО на хладостойкость стали К60;
- проанализировать влияние старения стали К60 на хладостойкость металла;
- определить порог хладноломкости (T_{50}) для состаренного металла стали К60.

Для решения поставленных в работе задач в условиях действующего производства были исследованы листы одной плавки стали категории прочности К60, выплав-

ленной в кислородном конвертере комбинированного дутья емкостью 300 т и разлитой на двухручьеваой машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) на слябы сечением 220×1200 мм. Единственное отличие при производстве данной плавки от стандартной технологии заключалось в том, что ПФО литых слябов не была выполнена. В соответствии с существующей технологией после разлива на МНЛЗ литые слябы сразу складывают в штабеля, состоящие из 20–25 слябов, для последующего медленного охлаждения в течение 72 ч. По причине аварийного отключения электроэнергии и дальнейшей работы на аварийном генераторе все полученные литые слябы были охлаждены в течение суток примерно до 20 °С (зимнее время года). Температура атмосферного воздуха составляла минус 15 °С, а в ККЦ — около минус 5 °С. Так как слябы не были складированы в штабеля, скорость охлаждения в температурном интервале от 950 °С до 20 °С увеличилась в 7–8 раз, тогда как при охлаждении в штабеле средняя скорость охлаждения сляба обычно составляет ~10–15 °С/ч (900 °С/72 ч = 13 °С/ч). На холодном полу ККЦ полученные слябы остыли с 950 °С до 40–50 °С примерно за 10–12 ч, т. е. средняя скорость охлаждения литого сляба составила ~80–100 °С/ч. В дальнейшем литые слябы данной плавки были нагреты в методической печи блюминга и подвергнуты стандартному термомеханическому контролируемому процессу (ТМКП). ТМКП производили на стане «3000» в соответствии с техническими условиями [9]. Определение количества вязкой составляющей (КВС) в образцах проката при испытании падающим грузом (ИПГ) выполняли по ГОСТ 30456-97 при температуре минус 20 °С на копре УМУ-10000, используя стандартные образцы с прессованным надрезом. Определение химического состава образцов выполняли спектральным методом на установке Spectrolab. Для идентификации микроструктур при металлогра-

фическом исследовании применяли оптический микроскоп Neophot-21.

Химический состав исследуемой плавки (табл. 1) полностью соответствовал требованиям ТУ 14-1-5493-2004.

Для определения зависимостей между исследованными параметрами использовали методы математической статистики. Зависимость между КВС и δ_5 установлена по результатам анализа 2390 образцов для ИПГ, полученных из 161 плавки стали К60, прошедших ПФО, при толщине листа от 8 до 16 мм включительно.

Для определения критических точек Ac_1 и Ac_3 использовали формулы Гольдштейна:

$$Ac_1 = 723 - 7,08 \times Mn + 37,7 \times Si + 18,1 \times Cr + 44,2 \times Mo + 8,95 Ni + 50,1 \times V + 21,7 \times Al + 3,18 \times W + 297 \times S - 830 \times N - 11,5 \times C \times Si - 14 \times Mn \times Si - 3,10 \times Si \times Cr - 57,9 \times C \times Mo - 15,5 \times Mn \times Mo - 5,28 \times C \times Ni - 6,0 \times Mn \times Ni + 6,77 \times Si \times Ni - 0,80 \times Cr \times Ni + 27,4 \times C \times V + 30,8 \times Mo \times V - 0,84 \times Cr^2 - 3,46 \times Mo^2 - 0,46 \times Ni^2 - 28 \times V^2;$$

$$Ac_3 = 912 - 370 \times C - 27,4 \times Mn + 27,3 \times Si - 6,35 \times Cr - 32,7 \times Ni + 95,2 \times V + 190 \times Ti + 72 \times Al + 64,5 \times Nb + 5,57 \times W + 332 \times S + 276 \times P + 485 \times N - 900 \times B + 16,2 \times C \times Mn + 32,3 \times C \times Si + 15,4 \times C \times Cr + 48 \times C \times Ni + 4,32 \times Si \times Cr - 17,3 \times Si \times Mo - 18,6 \times Si \times Ni + 4,8 \times Mn \times Ni + 40,5 \times Mo \times V + 174 \times C^2 + 2,46 \times Mn^2 - 6,86 \times Si^2 + 0,322 \times Cr^2 + 9,9 \times Mo^2 + 1,24 \times Ni^2 + 60,2 \times V^2.$$

Таблица 1
Содержание элементов (%) в стали

C	Mn	Si	S	P	Cr
0,100	1,560	0,420	0,003	0,012	0,013
Ni	Cu	Ti	Al	As	
0,006	0,005	0,0193	0,043	<0,002	
N		Mo		V	
0,0058		0,0019		0,0825	
Nb		Ca		B	
0,0322		0,0021		0,0005	

Расчетные значения температур критических точек A_{c1} и A_{c3} составили 720 °С и 878 °С соответственно.

Из 6 листов толщиной 16 мм по стандартной схеме вырезали опытные образцы для определения хладостойкости, предела прочности, предела текучести, относительного удлинения и ударной вязкости:

– 6 штук: для определения ударной вязкости КСВ⁻²⁰ при минус 20 °С;

– 6 штук: для определения ударной вязкости КСУ⁻⁷⁰ при минус 70 °С;

– 12 штук: для определения ИПГ при минус 20 °С;

– 6 штук: для определения σ_B , σ_T , δ_5 при 20 °С.

В таблице 2 указаны вид и условия испытаний, размеры и количество образцов для ТО.

В процессе термической обработки все образцы нагревались в муфельной печи в течение 30 мин при температуре 915 °С. Затем происходило их охлаждение на воздухе до температуры на 20 °С выше и на 40 °С ниже эвтектоидного превращения A_{c1} , равной 720 °С, т. е. до температур 740 °С и 680 °С соответственно. Далее образцы помещали в муфельные печи и выдерживали по 30 мин при этих температурах. После каждого нагрева и выдержки

образцы охлаждали до комнатной температуры со скоростью 10 °С/мин, 5 °С/мин и 1 °С/мин (табл. 3). Данный эксперимент был проведен с целью определения влияния режимов термической обработки (температуры нагрева и скорости охлаждения) на хладостойкость исследованного металла.

С интервалом 2–3 недели от даты выплавки исследованной плавки в течение 38 недель проводили определение КВС при ИПГ на 28 образцах, отобранных в соответствии с ТИ 229-067-1-2021 от 14 листов ГТП стали К60, не прошедшей ПФО, которые весь этот период находились на складе металла.

Определение T_{50} выполнили через 38 недель старения при температуре испытания от минус 70 °С до 20 °С с шагом 10 °С (всего 10 испытаний). При определении T_{50} для каждой температуры испытания использовали по 3 образца (всего 30 образцов), отобранных от 15 листов исследованной плавки.

Основной причиной всестороннего анализа данного металла являлась неудовлетворительная хладостойкость исследуемого металла, находившаяся на уровне 5–10 % КВС, при норме ≥ 80 %. Все остальные механические свойства металла были в пределах нормы.

Таблица 2

Образцы, используемые для проведения механических испытаний

Размеры образца Н×В×L, мм	Вид испытания	Температура испытаний, °С	Количество образцов, шт.
16×60×250	КСВ	–20	6
16×60×250	КСВ	–70	6
16×90×300	ИПГ	–20	12
16×70×320	Растяжение	+20	6

Таблица 3

Режимы ТО образцов для ИПГ

№ режима ТО					
1	2	3	4	5	6
Температура нагрева, °С					
680	740	680	740	680	740
Скорость охлаждения, °С/мин					
10		5		1	

Механические свойства исследованной плавки, полученные после ТО, представлены в таблице 4.

В соответствии с данными таблицы 4, при снижении скорости охлаждения с 10 до 1 °С/мин наблюдается уменьшение временного сопротивления с 525–529 МПа до 478–493 МПа (примерно на 50 МПа), повышение относительного удлинения с 30,5 % до 35 % (на 4–5 %), а ударной вязкости — на 30–70 Дж/см² с 172–195 Дж/см² до 246–255 Дж/см² (KCV⁻²⁰) и с 191–210 Дж/см² до 226–234 Дж/см² (KCU⁻⁷⁰). Предел текучести практически не изменился.

Необходимо особо отметить, что КВС уменьшилось с 10 до 0–5 % по сравнению с исходным состоянием металла для всех режимов ТО, за исключением режима № 2. После термической обработки металл полностью охрупчился (КВС=0–5 %), однако после режима ТО № 2 количество вязкой составляющей при испытании падающим грузом увеличилось в 2,5 раза: с 10 до 25 % (табл. 4).

Снижение прочностных и повышение пластических свойств металла после выполненной термической обработки, очевидно, является следствием классического отжига, заключающегося в нагреве образцов в однофазной области, выдержке и охлаждении. При уменьшении скорости охлаждения образцов исследованной плавки с 10 до 1 °С/мин наблюдается снижение

прочности, а также повышение пластичности и вязкости металла (табл. 4). Изменение механических свойств после термической обработки, связано, прежде всего, с перекристаллизацией металла и релаксацией остаточных напряжений, являющихся следствием проведенного ранее ТМКП.

Снижение хладостойкости с 10 до 0 % КВС образцов исследованной плавки после проведенной ТО, по нашему мнению, невозможно объяснить существующими в настоящее время представлениями [9] о природе и механизме водородного охрупчивания МНС.

Для всех режимов проведенной ТО отмечено увеличение δ_5 с 21,5 % (исходное состояние металла) до 28,5–35,5 %, т. е. на 7–14 %, но, несмотря на это, повышения КВС не наблюдалось (табл. 4).

По данным работы [10] повышение хладостойкости металла хорошо коррелирует с δ_5 , т. е. имеет место пропорциональная зависимость, когда увеличение относительного удлинения ГТП стали К60 сопровождается повышением значения КВС.

Аналогичная зависимость была получена и в результате проведенных нами исследований образцов проката из стали К60, произведенной по существующей на предприятии технологии, предусматривающей ПФО непрерывнолитых слябов (рис. 1).

Таблица 4

Механические свойства проката после ТО

Механические свойства	Исходное состояние	Скорость охлаждения, °С/мин					
		10		5		1	
		Температура нагрева, °С					
		680	740	680	740	680	740
		№ режима ТО					
		1	2	3	4	5	6
КВС, %	10	5	25	5	0	5	0
σ_B , МПа	659	525	529	515	519	493	478
σ_T , МПа	557	345	350	361	368	366	342
δ_5 , %	21,5	30,5	30,5	29,5	28,5	35,5	34
KCV ⁻²⁰ , Дж/см ²	194	172	195	197	140	246	255
KCU ⁻⁷⁰ , Дж/см ²	218	191	210	193	238	234	226

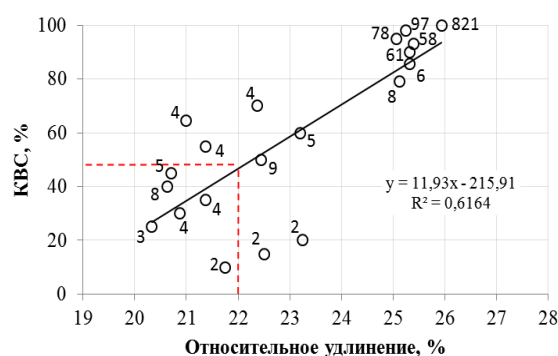


Рисунок 1 Зависимость между КВС и относительным удлинением

В соответствии с данными, представленными на рисунке 1, удовлетворительные значения относительного удлинения (норма для $\delta_5 \geq 22\%$) наблюдаются при КВС $\geq 50\%$, что соответствует порогу хладноломкости.

Исходя из этого, можно заключить, что один из основных критериев хладостойкости — пластичность металла — не является объективной, а также единственной характеристикой низкотемпературной вязкости металла МНС.

Также недостаточно понятны причины резкого увеличения КВС образцов после режима ТО № 2 в сравнении с остальными режимами термообработки. Поэтому для определения возможной связи между микроструктурой и механическими свойствами и, в частности, с хладостойкостью стали К60 после выполненной ТО, были проанализированы основные характеристики её микроструктуры (рис. 2, 3; табл. 5).

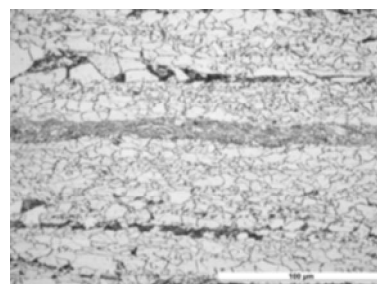
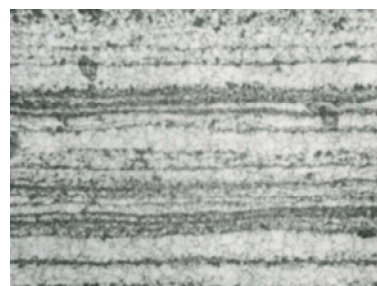


Рисунок 2 Микроструктура стали К60 в исходном состоянии (до ТО), ($\times 500$)



а



б

Рисунок 3 Микроструктура образцов, отобранных с поверхности (а) и середины (б) листа, после ТО по режимам № 1 и № 2 ($\times 500$)

Таблица 5

Характеристики микроструктур стали К60 после термической обработки

Место отбора образцов	Показатель микроструктуры	Режим ТО					
		1	2	3	4	5	6
Поверхность листа	Балл зерна	8–9	7–9	6–8	7–9	6–9	7–9
	БВС	2	2	–	–	–	–
	Балл перлита	2–3	2–3	4	2–3	3–4	1–2
Середина листа	Балл зерна	7–9	7–9	7–8	7–9	6–9	7–9
	БВС	2	2	–	–	–	–
	Балл перлита	5	5	5	5	5	5

Анализ представленных данных показывает, что качественных отличий в микроструктуре образцов до и после ТО, а также по баллу зерна не наблюдается. При скорости охлаждения $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в микроструктуре наблюдается видманштеттова структура 2 балла (БВС). Полосчатость образцов, отобранных с поверхности листа, в основном составляет 2–3 балла (рис. 3, а), а для образцов, отобранных со средней части, соответствует 5-му баллу (рис. 3, б).

Установлено, что изменение механических свойств и микроструктуры после проведённой ТО полностью согласуются с классическими представлениями о влиянии температуры и скорости охлаждения МНС на прочность, пластичность и ударную вязкость металла, характерными для отжига, за исключением резко увеличившегося КВС при ИПГ образцов, обработанных по режиму № 2 (табл. 4).

Результаты исследований КВС при ИПГ после старения горячекатаного толстолистного проката исследуемой плавки в течение 38 недель представлены на рисунке 4.

Представленную на рисунке 4 кривую можно условно разбить на 4 участка, характерных для различных периодов старения.

В течение первых 20 суток после ТМКП хладостойкость металла увеличилась с 10 до 20 % КВС (участок А–В на рис. 4). Скорее всего, это свидетельствует о незавершённой и продолжающейся диффузии атомарного водорода из феррита и его дальнейшей адсорбции, в результате чего давление мо-

лекулярного водорода в коллекторах снижается и, как следствие, приводит к повышению КВС примерно на 10 %.

В течение последующих 12 недель старения (участок В–С на рис. 4) наблюдается снижение КВС с 20 до 0 %. По-видимому, водородная хрупкость металла на втором участке определяется не давлением молекулярного водорода, сегрегированного в коллекторах, и не средней концентрацией атомарного водорода, растворённого в решётке феррита, а увеличением концентрации молекулярного водорода и др. газов в зоне максимальных объёмных напряжений кристаллической решётки.

Начиная с 15-й недели старения (участок С–D на рис. 4) наблюдается повышение хладостойкости с 0 до 85 % КВС. Данное резкое повышение хладостойкости, вероятнее всего, является следствием релаксации микрообластей в приграничной зоне межфазной границы цементит/феррит, что приводит к последующей стабилизации хладостойкости на удовлетворительном уровне в результате старения термически, деформационно и фазово напряжённого металла (напряжения II и III рода).

Примерно после 33-й недели старения металл приобретает хладостойкость на уровне 85 % КВС (участок D–E на рис. 4), что очевидно свидетельствует о завершении процессов релаксации микрообластей в приграничной зоне межфазной границы цементит/феррит, обусловленных напряжениями II и III рода.

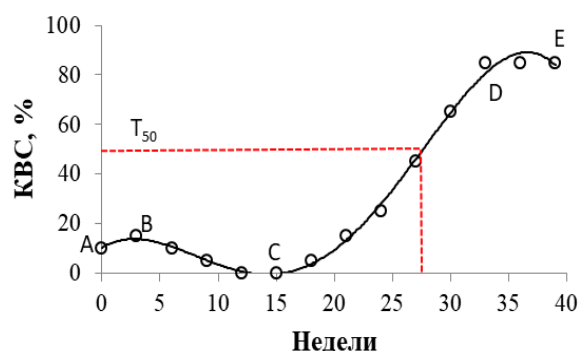


Рисунок 4 Изменение КВС в процессе старения образцов, не прошедших ПФО

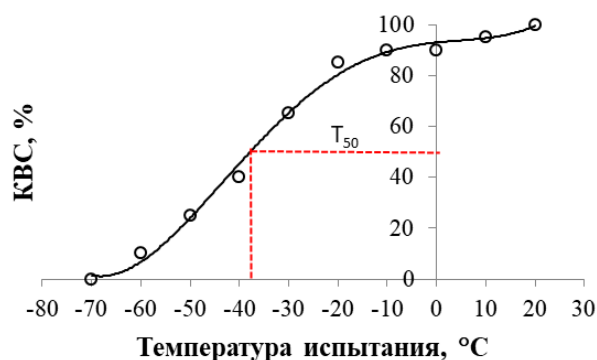


Рисунок 5 Характер изменения КВС для различных температур при ИПГ

Порог хладноломкости или переходная температура для стали К60 наблюдается примерно через 28 недель после старения (рис. 4).

Характер изменения КВС для различных температур при ИПГ образцов толстолистового проката через 38 недель их старения представлен на рисунке 5.

Представленные на рисунке 5 данные свидетельствуют о том, что порог хладноломкости соответствует температуре минус 38 °С, а полностью хрупкое состояние металла наблюдается при минус 70 °С. Удовлетворительная хладостойкость (≥ 80 % КВС) наблюдается при температуре испытания минус 20 °С, что соответствует требованиям ТУ 14-1-5493-2004. Хладостойкость, соответствующая 100 % КВС, наблюдается при 20 °С и выше.

На основании проведенных исследований и их результатов можно сделать следующие основные выводы:

- нарушение технологии производства трубной стали категории прочности К60, обусловленное отсутствием ПФО (замедленного охлаждения) непрерывнолитых слябов, не позволяет получить требуемую хладостойкость толстолистового проката;

- термическая обработка такой стали показала, что при снижении скорости охлаждения с 10 до 1 °С/мин предел прочности несколько уменьшается, а относительное удлинение и ударная вязкость возрастают. Качественных отличий в микроструктуре образцов до и после термической обработки не наблюдается. КВС для экспе-

риментальных образцов снизилось с 10 до 0–5 % для всех режимов термической обработки, за исключением режима ТО № 2, после которого КВС возросло до 25 %;

- впервые установлен нелинейный характер изменения КВС на протяжении 38 недель старения не прошедшего ПФО металла и показано, что увеличение и уменьшение величины данного параметра в процессе старения связано с диффузией атомарного водорода из феррита и его дальнейшей адсорбцией, концентрацией молекулярного водорода и др. газов в зоне максимальных объемных напряжений в кристаллической решётке, релаксацией микрообластей в приграничной зоне межфазной границы цементит/феррит;

- порог хладноломкости исследованного металла после 38 недель старения соответствует температуре минус 38 °С, полностью хрупкое состояние наблюдается при минус 70 °С, а хладостойкость, соответствующая 100 % КВС, наблюдается при 20 °С.

- установлено, что после 33-й недели старения металл приобретает хладостойкость на уровне, удовлетворяющем большинству существующих в настоящее время стандартов, что, очевидно, свидетельствует о завершении процессов релаксации микрообластей в приграничной зоне межфазной границы феррит/цементит, обусловленных напряжениями II и III рода.

- показано, что процесс старения может использоваться производителями для обеспечения необходимых требований по хладостойкости в случае невозможности

проведения предусмотренного технологией замедленного охлаждения непрерывнолитых слябов.

В процессе последующих исследований предполагается проанализировать влияние

температуры окончания чистой стадии ТМКП в межкритическом интервале температур на формирование хладостойкости трубной стали категории прочности К60.

Библиографический список

1. Организация производства листового проката класса прочности К60, предназначенного для электросварных труб газопроводов и газораспределительных систем заводов по производству сжиженного газа [Текст] / А. А. Придеин, С. П. Зубов, Л. В. Прокопенко [и др.] // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. — 2019. — Т. 75. — № 1. — С. 68–80.
2. Куберский, С. В. Влияние химического состава и микроструктуры трубной стали класса прочности К60 на её хладостойкость [Текст] / С. В. Куберский, Р. Е. Великоцкий // *Сб. науч. тр. ДонГТИ*. — 2021. — № 24 (67). — С. 54–60.
3. Закономерности изменения механических свойств конструкционных сталей в ходе длительной эксплуатации и моделирование процессов старения [Текст] / В. Н. Зикеев, Г. А. Филиппов, И. П. Шабалов [и др.] // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. — 2014. — № 4. — С. 74–82.
4. Влияние длительной эксплуатации на температурную зависимость внутреннего трения и склонность к деформационному старению низколегированных сталей [Текст] / Г. А. Филиппов, В. Н. Зикеев, И. П. Шабалов [и др.] // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. — 2017. — № 1. — С. 49–55.
5. Изменение свойств труб класса прочности К60 с повышенной деформационной способностью при изготовлении отводов холодного гнутья [Текст] / И. П. Шабалов, В. Я. Великоднев, С. Ю. Настич [и др.] // *Инновации и импортозамещение в трубной промышленности (Трубы — 2016) : труды XXII международной научно-практической конференции ; под ред. И. Ю. Пышминцева*. — Челябинск : ОАО «РосНИТИ», 2016. — С. 42–52.
6. Горицкий, В. М. Восстановленные нефтегазопроводные трубы повторного применения для конструкций четвертой группы [Текст] / В. М. Горицкий, Г. Р. Шнейдеров // *Промышленное и гражданское строительство*. — 2021. — № 2. — С. 24–33.
7. Оптимизация режима термической обработки кованных слябов из высокопрочной низкоуглеродистой стали [Текст] / В. В. Цуканов, В. Г. Милоуц, О. Э. Нигматулин [и др.] // *Металлург*. — 2017. — № 9. — С. 63–66.
8. Рябичева, Л. А. Оценка степени обезводородживания листовой стали повышенной прочности при контролируемой прокатке [Текст] / Л. А. Рябичева, В. И. Алимов, Ю. С. Колчина, Е. Э. Павлюченко // *Ресурсосберегающие технологии производства и обработки давлением материалов в машиностроении*. — 2019. — № 3 (28). — С. 18–26.
9. Влияние способа изготовления проката из стали типа 10Г2ФБ на микроструктуру, механические свойства и хладостойкость после отжига при температурах полной и неполной фазовой перекристаллизации [Текст] / П. Г. Мартынов, М. Ю. Матросов, А. Б. Григорьева [и др.] // *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. — 2016. — № 3. — С. 80–87.
10. Матросов, Ю. И. Сталь для магистральных газопроводов [Текст] / Ю. И. Матросов, Д. А. Литвиненко, С. А. Голованенко. — М. : Металлургия, 1989. — 288 с.

© Куберский С. В.

© Великоцкий Р. Е.

© Должиков В. В.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиМ ДонГТИ Денищенко П. Н.,
и.о. первого заместителя управляющего, главным инженером
Филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК» Сбитневым С. А.*

Статья поступила в редакцию 06.10.2022.

PhD in Engineering Kuberskiy S. V. (*DonSTI, Alchevsk, LPR*), **Velikotskiy R. E.** (*Branch № 1
“Alchevsk Iron-and-Steel Works” ООО “YuGMK”, Alchevsk, LPR*), **PhD in Engineering**

Dolzhiikov V. V. (*DonSTI, Alchevsk, LPR*)

**EFFECT OF HEAT TREATMENT AND AGING ON THE COLD RESISTANCE OF PIPE
STEEL, STRENGTH CATEGORY K60**

The paper investigates the effect of heat treatment and aging on the low-temperature viscosity of pipe steel, strength category K60, which has not undergone antifloken treatment (AFT). The dependence between the duration of aging of hot-rolled thick-rolled products that have not passed the AFT and cold resistance has been determined. The scientific substantiation of influence of the atomic hydrogen molization is proposed, during the eutectoid reaction, on the cold resistance of K60 steel.

Key words: *K60 steel, cold resistance, antifloken treatment, cold breaking threshold, heat treatment, aging, atomic hydrogen, interfacial boundary, eutectoid transformation, molization.*

УДК 621.762

д.т.н. Рябичева Л. А.

(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, ryabic@gmail.com),

Дядичев А. В.

(ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского»,

г. Симферополь, Республика Крым, tr.dyadichev@mail.ru)

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПОРОШКОВЫХ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ПЛОТНОСТЬ

В работе выполнено компьютерное моделирование уплотнения и формоизменения порошковой пористой заготовки. Показано, что высокое гидростатическое давление позволяет получить высокоплотную полую деталь с тонкой стенкой. Предложено учитывать такую зависимость при проектировании технологического процесса с припуском по высоте и его последующим удалением.

Ключевые слова: прямое выдавливание, порошковая деталь, относительная плотность, гидростатическое давление.

Развитие машиностроения неразрывно связано с применением прогрессивных методов производства деталей различными видами обработки металлов. Расширяется использование процессов, основанных на холодной пластической деформации заготовок, в том числе полученных методами порошковой металлургии. Такие процессы обеспечивают изготовление деталей с точными размерами и высоким качеством поверхности и, следовательно, позволяют сократить, а чаще полностью исключить операции обработки резанием. Холодная пластическая деформация в сочетании с термической обработкой обеспечивает стабильное получение заданных физико-механических свойств и структуры металла, необходимых для повышения надежности и долговечности как деталей, так и узлов машины в целом [1, 2].

Особый интерес представляет холодное выдавливание, позволяющее получать изделия сложной конфигурации с внутренними полостями и тонкими стенками, большими перепадами сечений. Холодное выдавливание обеспечивает сокращение расхода металла по сравнению обработкой резанием в 2–3 раза и более высокую производительность [3].

Процесс прямого выдавливания деталей из порошкового материала состоит из двух

стадий — уплотнения и формоизменения [1]. Прямое выдавливание порошковых материалов приводит к увеличению гидростатического давления, что повышает пластичность металла и обеспечивает получение высокой плотности. Это особенно важно для порошковых материалов, при деформировании которых одновременно с повышением пластичности необходимо добиться высокой равноплотности [4]. Типовыми деталями, которые целесообразно изготавливать прямым выдавливанием из порошковых материалов, являются детали типа тел вращения с внутренними полостями и тонкими стенками. При этом существует сложность получения равномерной плотности по тонкой стенке детали.

При выполнении операций порошковой металлургии определяют относительную плотность по формуле

$$\theta = 1 - \frac{\vartheta}{2},$$

где ϑ — относительная плотность прессовки.

Формирование высокой относительной плотности детали объясняется влиянием гидростатического давления на процессы уплотнения и формообразования.

В работе [5] получено условие пластичности пористого тела в виде

$$3I_2^1 + \varphi I_1^2 = \psi \sigma_T^2,$$

где I_1 — первый инвариант тензора напряжений;

I_2 — второй инвариант девиатора напряжений;

σ_T — предел текучести материала.

Показано, что пористость материала связана с первым инвариантом тензора напряжений, величина которого определяется значением функции пористости φ . В результате получен критерий, определяющий рост или уменьшение пористости: при $\varphi > 0$, $d\theta > 0$, если $I_1 > 0$, если $d\theta < 0$, то $I_1 < 0$.

Отсюда следует, что изменение объема пористого тела непосредственно связано с первым инвариантом тензора напряжений или гидростатическим давлением.

Актуальным является исследование возможности получения порошковых полых деталей с тонкой стенкой. Очевидно, анализ гидростатического давления позволит объяснить изменение относительной плотности в порошковых деталях в зависимости от размеров детали.

Целью работы является определение изменения относительной плотности по толщине стенки порошковых полых деталей путем компьютерного моделирования прямого выдавливания и экспериментальная проверка полученных зависимостей.

В работах Дж. Грина и М. Абоаф [5, 6] отмечается, что в спеченном пористом материале, в отличие от несжимаемого, гидростатическое давление вызывает текучесть. Поэтому критерий пластичности для таких материалов должен быть функцией гидростатического давления. Формирование очага уплотнения при прямом выдавливании можно объяснить изменением гидростатического давления.

Объект исследования — технологический процесс прямого выдавливания по-

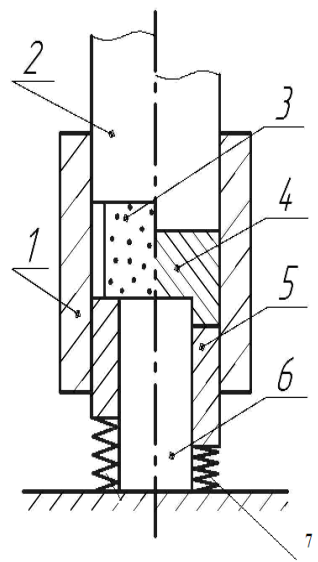
рошковой полый детали с различной толщиной кольцевой стенки.

Предмет исследования — закономерности изменения относительной плотности порошковой полый детали при разном гидростатическом давлении.

Задачи исследования:

- моделирование изменения относительной плотности порошковой детали;
- изучение формирования очага уплотнения;
- моделирование гидростатического давления;
- доказательство влияния гидростатического давления на равноплотность порошковой полый детали.

Прямое выдавливание выполняли по схеме (рис. 1). Исходную пористую заготовку 3 устанавливали в матрицу 1 на подвижный пуансон 5 с противодействием, создаваемым подвижным упором 6. Верхним пуансоном 2 выдавливали образец 5. При выполнении операции использовали пуансон с различными диаметрами, в результате чего изменялась толщина стенки полый детали.



1 — матрица, 2 — верхний пуансон, 3 — заготовка, 4 — образец, 5 — подвижный упор, 6 — нижний пуансон

Рисунок 1 Схема прямого выдавливания

Компьютерное моделирование прямого выдавливания выполняли на деталях с толщиной стенки 7, 4, 2 мм. Параметры заготовки: цилиндрический образец $\text{Ø}28,5 \times 26,3$ мм; высота полости изменялась в зависимости от толщины стенки, мм; относительная толщина стенки составила $b/h = 0,47; 0,27; 0,14$. Материал — медный порошок ПМС-1, исходная относительная плотность $\bar{\rho}_0 = 0,9$, исходная пористость 15 %.

Кривые упрочнения для меди марки ПМС-1 заданы в табличном виде для различных скоростей деформации и выбраны из базы материалов пакета Deform 10.2. Условие текучести материала выбирали по Мизесу. При моделировании прямого выдавливания элементы штампа считали абсолютно жесткими объектами. Скорость движения пуансона составляла 0,5 мм/с.

Исходную пористую заготовку 3 устанавливали в матрицу 1 на нижний пуансон 6 и подвижный упор 5 с противодействием, создаваемым пружинами. Верхним пуансоном 2 выдавливали образец 4.

Для описания трения между заготовкой и деформирующим инструментом использовали закон Зибеля: $\tau_f = m\sigma_s$, где m — фактор трения; для процессов холодной деформации при наличии смазки дисульфида молибдена принято значение $m = 0,05$. Противодействие принимали 120 МПа [7].

На рисунке 2 показана картина распределения относительной плотности при прямом выдавливании порошковой полый детали с различной толщиной стенки. Как видно, формируются два очага уплотнения: один занимает донную и кольцевую части детали и имеет относительную плотность, равную 1; второй находится на торцевой части детали и имеет среднюю относительную плотность 96 %. При этом разноплотность на этих участках составляет 8 %.

На рисунке 3 показана эволюция очага уплотнения при прямом выдавливании детали с толщиной стенки 7 мм при изменении глубины полости детали.

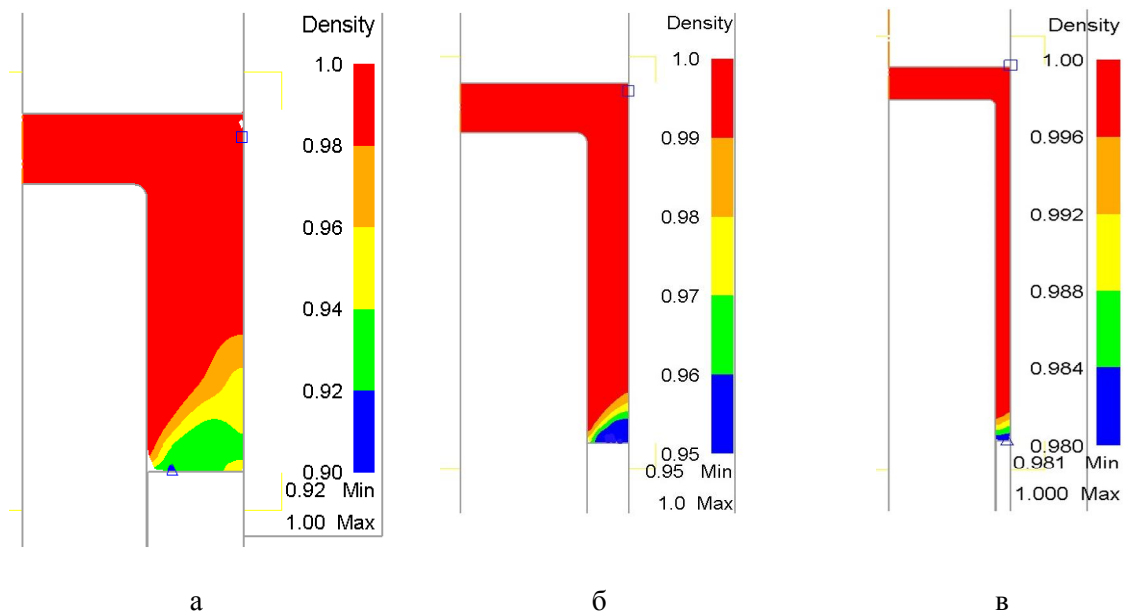


Рисунок 2 Картина распределения относительной плотности при прямом выдавливании порошковой полый детали с различной толщиной стенки: а — 7 мм, б — 4 мм, в — 2 мм

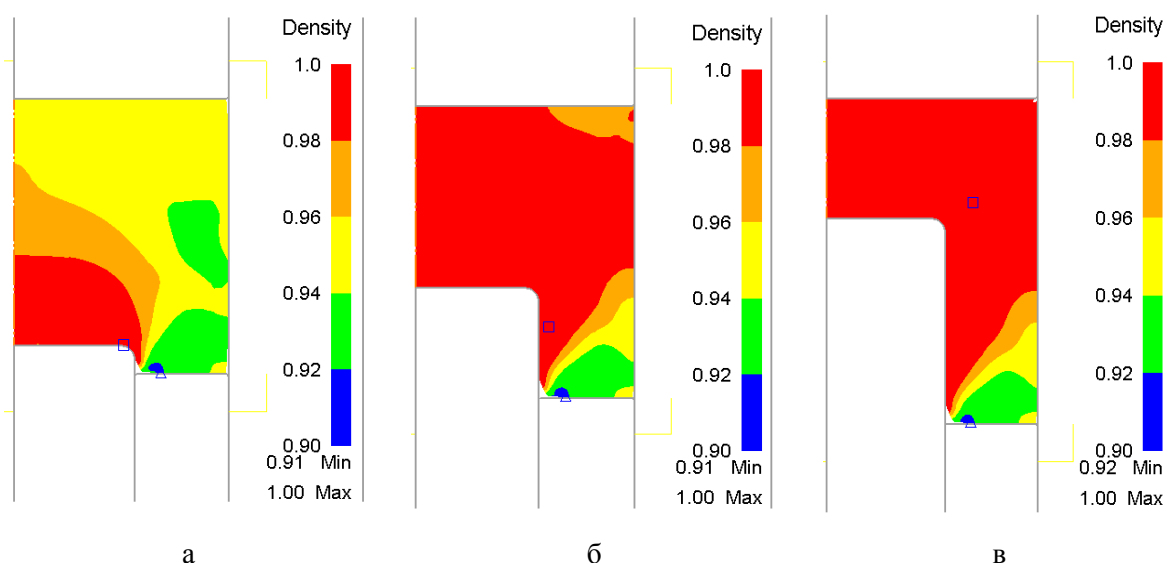


Рисунок 3 Эволюция очага уплотнения при толщине стенки 7 мм и различной глубине полости: а — 2,2 мм; б — 8,2 мм; в — 14,7 мм

При глубине полости 2,2 мм (рис. 3, а) формируется первый очаг уплотнения с максимальной относительной плотностью, которая распространяется на незначительную высоту донной части стакана. Далее по высоте донной части относительная плотность уменьшается от 1 до 0,96. В угловой части наблюдаются области с относительной плотностью 0,94. Для глубины полости 2,2 мм характерна неравномерность относительной плотности. При глубине 8,2 мм первый очаг уплотнения увеличивается и появляется второй очаг на торцевой части стакана с большой неравномерностью. При глубине 14,7 мм очаг уплотнения занимает еще больший объем, а неравномерность смещается к торцу детали с относительной плотностью 0,96.

На рисунке 4 показана картина распределения гидростатического давления при прямом выдавливании с противодавлением 120 МПа и разной толщиной стенки детали. Как видно гидростатическое сжатие увеличивается с увеличением высоты полости и уменьшением стенки. Но деталь с толщиной стенки можно получить несмотря на высокое гидростатическое давление, что свидетельствует о его роли при выдавливании порошковых деталей.

Таким образом, моделирование показало влияние гидростатического давления на уплотнение полых порошковой детали. Чем меньше толщина стенки, тем больше гидростатическое сжатие по всей высоте стенки. При этом уменьшается высота участка с неравномерной плотностью. Это уменьшение составляет 0,68 %. Такие исследования показывают возможность получать порошковые полые детали с тонкой стенкой. Очевидно, можно проектировать технологический процесс с припуском по торцевой части детали с последующим его удалением.

Полученные данные проверены экспериментально для различных величин противодействия и соотношений b/h (рис. 5). С ростом b/h относительная плотность растет у всех образцов. При этом при выдавливании без противодействия она увеличивается до 0,978, а затем уменьшается в связи с образованием трещин на торцевой части образца. При наличии противодействия относительная плотность растет, практически достигая беспористого состояния. Однако при противодействии 120 МПа относительная плотность значительно больше. Относительная плотность, практически равная 1, достигается при отношении $b/h = 0,47$.

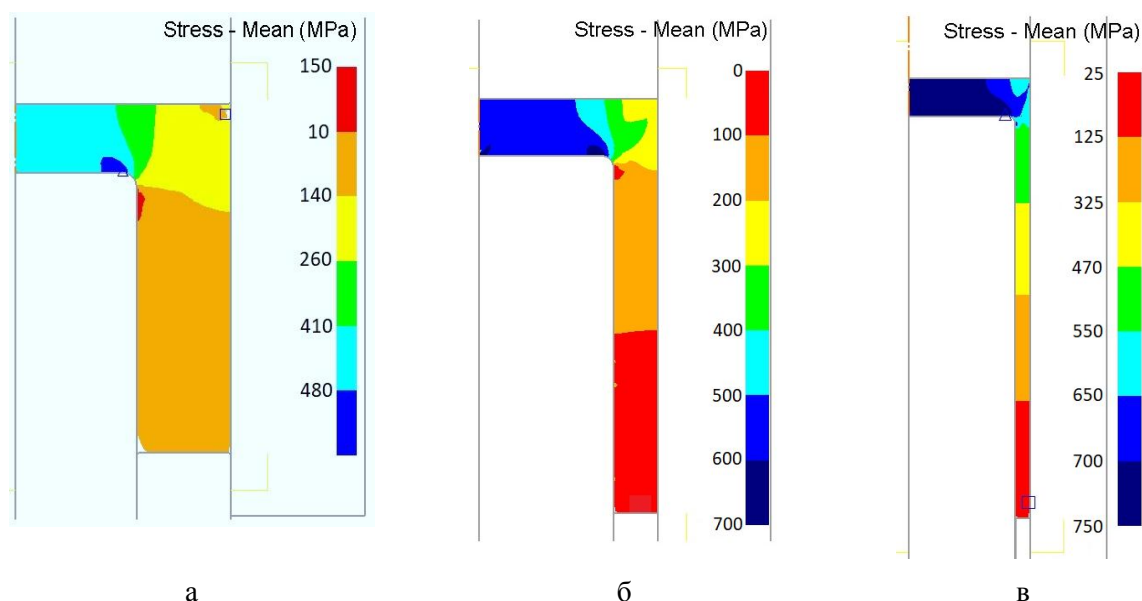


Рисунок 4 Картина распределения гидростатического давления при прямом выдавливании порошковой полый детали с различной толщиной стенки: а — 7 мм, б — 4 мм, в — 2 мм

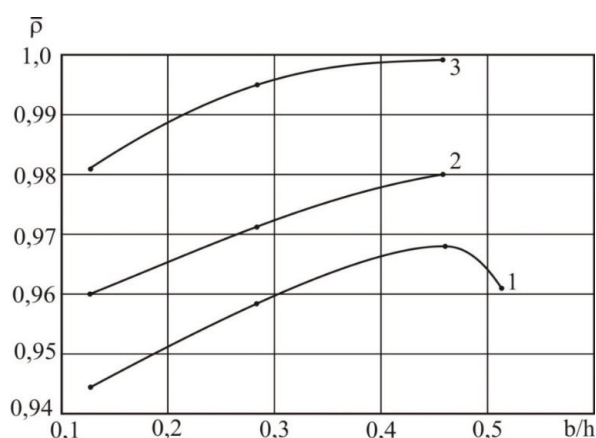


Рисунок 5 Изменение относительной плотности в зависимости от относительной толщины стенки при различном противодавлении:

1 — без противодействия; 2 — с противодавлением 95 МПа; 3 — с противодавлением 120 МПа

Для оценки равномерности образцы разрезали на три части: донную, кольцевую и торцевую (рис. 6). Анализ относительной плотности показал, что при выдавливании без противодействия при различной глубине полости она мало отличается в донной части. В кольцевой части относительная плотность при $b/h = 0,47$ отличается приблизительно на 3 %, а в торцевой части — на 8,9 %. Такие данные свидетельствуют о значительной неравно-

плотности по объему образца при прямом выдавливании без противодействия. При выдавливании с противодавлением 120 МПа и том же соотношении размеров сравнение относительной плотности донной и торцевой частей показывает, что они отличаются на 2,6 %, что свидетельствует о наличии неравноплотности (табл. 1).

Распределение плотности при прямом выдавливании полый детали с толщиной стенки 7 мм показано в таблице 1.



Рисунок 6 Образцы для анализа равномерности:
а — донная, б — кольцевая, в — торцевая части

Таблица 1

Распределение плотности в объеме порошковой полый детали

Толщина стенки детали, мм	Среднестатистическая плотность, г/см ³		
	донной части	угловой части	по толщине стенки
7	8,84	8,87	8,94
4	8,89	8,90	8,94
2	8,94	8,94	8,94

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Гидростатическое давление оказывает влияние на технологию изготовления порошковой детали высокой плотности.

2. С ростом высоты полости порошковой детали по объему появляются два очага уплотнения высокой плотности и по торцевой части очаг с неравномерной плотностью.

3. Гидростатическое давление увеличивается с уменьшением толщины кольцевой

стенки порошковой полый детали, но при этом позволяет получить детали с тонкой стенкой и равномерной плотностью.

4. При проектировании технологического процесса изготовления порошковых полых деталей с тонкой стенкой рекомендуется назначать припуск по торцевой части детали, величина которого соизмерима с припуском по ГОСТ, с последующим его удалением.

Библиографический список

1. Кипарисов, С. С. Порошковая металлургия [Текст] / С. С. Кипарисов, Г. А. Либенсон. — М. : Металлургия, 1972. — 528 с.
2. Рябичева, Л. А. Применение теории пластичности пористых тел к анализу связи пористости с осевой деформацией при свободной осадке [Текст] / Л. А. Рябичева, О. П. Гапонова // Вісн. Східноукр. націон. ун-ту. — 2008. — № 8 (126). — Ч. 2. — С. 21–27.
3. Скороход, В. В. Актуальные проблемы континуальной теории и структурного моделирования процессов деформации порошков и пористых тел [Текст] / В. В. Скороход // Реологические модели и процессы деформирования пористых порошковых и композиционных материалов. — К. : Наук. думка, 1985. — С. 6–11.
4. Проскуряков, Ю. Г. Дорнование отверстий [Текст] / Ю. Проскуряков. — М. : Машгиз, 1961. — 190 с.
5. Грин, Р. Дж. Теория пластичности пористых тел [Текст] / Р. Дж. Грин // Механика. — 1973. — № 4. — С. 109–120.
6. Aboaf, M. Modelisation numerique de la deformationa chaud de poudres metalliques [Text] / M. Aboaf, J. T. Chenot // Journal of theoretical and applied mechanics. — 1986. — № 5. — P. 121–140.

7. Рябичева, Л. А. Экспериментальное исследование противодействия при выдавливании полых деталей из порошковой пористой заготовки [Текст] / Т. Б. Коробко, А. В. Дядичев // Сборник научных трудов ДонГТИ. — 2021. — Вып. 25 (68). — С. 21–25.

© Рябичева Л. А.

© Дядичев А. В.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ПуХЛ ЛГУ им. В. Даля Гутько Ю. И.,
к.т.н., доц., зав. каф. ОМДМ ДонГТИ Денищенко П. Н.**

Статья поступила в редакцию 29.09.2022.

Doctor of Technical Sciences Riabicheva L. A. (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, ryabic@gmail.com), **Diadichev A. V.** (FSAEI HE “Crimean Federal University named after V. I. Vernadsky”, Simferopol, Republic of Crimea, mr.dyadichev@mail.ru)

INFLUENCE OF POWDER HOLLOW PARTS SIZES ON THE RELATIVE DENSITY

Computer simulation of compaction and moldability of a powdered porous blank is performed in the work. It is shown that high hydrostatic pressure allows us to obtain a high-density hollow part with a thin wall. It is proposed to take this dependence into account when designing a technological process with extra height and its subsequent removal.

Key words: direct extrusion, powder part, relative density, hydrostatic pressure.

УДК 669.054:669.782

к.т.н. Проценко М. Ю.,
к.т.н. Куберский С. В.,
Проценко В. И.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ИЗ ПЕСКА

В работе проанализировано распределение компонентов между контактирующими фазами при дуговом глубинном восстановлении кремния из песка, выполнен сравнительный анализ расчетного и экспериментального химического состава конечного шлака, а также показана высокая сходимость теоретических и практических результатов.

Ключевые слова: дуговое глубинное восстановление, материальный баланс, кремний, рудно-восстановительная смесь, баланс обработки, распределение компонентов, внепечная обработка расплава.

Для улучшения качества стали и обеспечения требуемого уровня ее физических свойств в традиционных технологических схемах производства предусмотрена внепечная обработка железоуглеродистых расплавов различными ферросплавами и лигатурами. Кроме того, ужесточение требований к качеству стали приводит к увеличению выпуска легированных марок, а следовательно, и к повышению удельного расхода ферросплавов.

Поэтому объемы производства стали в значительной степени определяют как качественный, так и количественный рост ферросплавного производства. Причем наибольшие объемы потребления в сталеплавильном производстве характерны для кремнийсодержащих ферросплавов и лигатур.

Динамика производства стали в мире и РФ за период 2015–2021 гг. приведена на рисунке 1 [1, 2], а ферросплавов и ферросилиция за период 2015–2019 гг. — на рисунке 2 [3–6].

Данные рисунков 1 и 2 подтверждают высказанную выше взаимосвязь между ростом объемов производства стали и кремнистых ферросплавов, а также динамику их изменения.

В настоящее время обработка жидкого металла ферросплавами остается одним из

основных методов воздействия на качество и свойства стали, чугуна и цветных сплавов. В последние годы отмечается значительный спрос на средне- и высоколегированные стали повышенного качества, что является предпосылкой к увеличению потребностей в ферросплавах и лигатурах, а также их стоимости.

Значительное влияние на себестоимость ферросплавов оказывают потери базовых элементов при традиционных схемах переработки рудного сырья и последующей обработке металлических расплавов. При раскислении и легировании стали марганцем с использованием ферромарганца сквозное извлечение его из оксидной марганецсодержащей руды не превышает 50 % от общего количества легирующего элемента, содержащегося в руде. Основная часть потерь, согласно данным работы [7], имеет место при выплавке марганецсодержащего сплава. Часть марганца возвращается в ферросплавное производство при использовании шлаков в качестве шихты или применении шлака непосредственно в сталеплавильном производстве для прямого легирования и частичной замены ферросплавов. Но даже с учетом этих факторов потери марганца снижаются незначительно и составляют 57–67 % [7, 8].

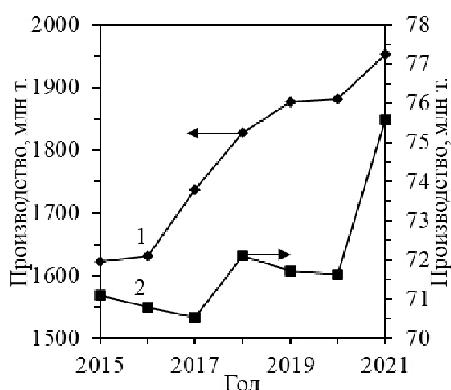


Рисунок 1 Производство стали в мире (1) и РФ (2)

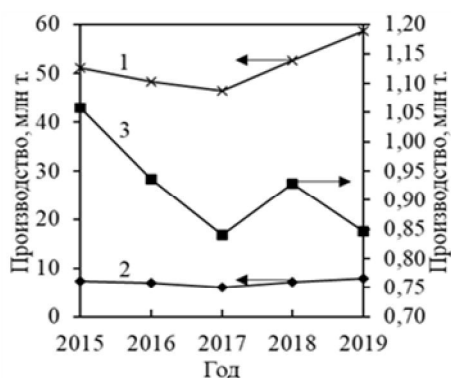


Рисунок 2 Производство ферросплавов в мире (1), в РФ (2) и кремнистых ферросплавов РФ (3)

При производстве силикомарганца сквозные потери марганца и кремния составляют ~45–50 % и ~70–80 % соответственно. Эффективная переработка силикомарганцевого шлака в сталеплавильных технологиях практически невозможна ввиду присутствия в нем марганца и кремния в виде силикатов. Анализ калькуляции себестоимости производства марганцевых сплавов показывает, что расходы на шихтовые материалы составляют 27–48 % всех затрат, поэтому особое внимание необходимо уделить рациональному использованию шихты и снижению потерь базовых элементов со шлаком, а также в результате испарения [7].

Одной из наиболее актуальных проблем современной металлургии являются поиск альтернативных традиционных шихтовых материалов и разработка новых технологиче-

ских приемов, позволяющих эффективно использовать их при производстве железоуглеродистых сплавов. Метод дугового глубинного восстановления (ДГВ) полезных элементов из вторичных материалов и отходов непосредственно в металлический расплав появился в металлургии довольно недавно и в настоящее время является актуальным направлением научных исследований [8].

Конкурентоспособность предложенного способа рафинирования и раскисления-легирования расплавов в первую очередь обусловлена снижением расходов на шихтовые материалы и энергоресурсы, а также увеличением сквозного извлечения примесей из материалов, содержащих их оксиды. Для повышения эффективности технологии обработки расплавов методом ДГВ важными являются разработка и описание механизма восстановления примесей и их распределения между контактирующими фазами.

Основной *целью* данной работы является комплексный анализ баланса элементов металла и компонентов шлака при легировании чугуна кремнием с использованием метода ДГВ.

Объект исследования — процесс ДГВ кремния.

Предмет исследования — анализ распределения компонентов между контактирующими фазами при обработке металла методом ДГВ кремния.

Основная *задача*, решаемая в исследованиях, заключается в анализе материального баланса метода ДГВ кремния в железоуглеродистый расплав на основании проведенной серии экспериментальных плавок.

При проведении исследований использовали стандартные методики подготовки сырья, отбора и подготовки проб для химического анализа состава чугуна и шлака. Химический анализ проб производился на спектрометре серии ARL 9900, относительное стандартное отклонение которого составляет 0,01–0,001. Полученные результаты экспериментальных данных обрабатывались на ПЭВМ с использованием стандартного пакета программ Microsoft Excel.

С целью развития теории и технологии дугового глубинного извлечения полезных элементов в железоуглеродистые расплавы авторами настоящей статьи были предложены теоретические и технологические аспекты извлечения кремния из песка, в котором содержание кремнезема может достигать 97 % [9].

При ДГВ основными затратными статьями являются шихтовые материалы и электроэнергия. Доля затрат на шихтовые материалы в себестоимости, как правило, не превышает 10÷15 % (для кремниевых и марганцевых ферросплавов 30÷40 %). Поэтому процесс будет рентабельным, если затраты на электроэнергию будут находиться в пределах 55÷70 %.

В работе [10] приведены материальные балансы процессов алюмотермического ДГВ магния из магнезита и карботермического ДГВ марганца из силикомарганцевого шлака. Ввиду относительной новизны метода ДГВ кремния из песка до настоящего времени отсутствовали данные о распределении компонентов между контактирующими фазами в процессе такой обработки железоуглеродистых расплавов.

Для анализа материального баланса процесса ДГВ кремния из песка в лабораторных

условиях были проведены балансовые экспериментальные плавки по обработке чугуна. Обработку чугуна производили в индукционной сталеплавильной тигельной печи ёмкостью 60 кг (ИСТ-0,06) с использованием источника питания ТИР-630. Для ДГВ кремния в металл погружали графитовый (контактный) электрод и с помощью специального кронштейна, где уже был закреплен опытный рудно-восстановительный блок (РВБ), производили обработку. Для исследований были изготовлены РВБ Ø55 мм. При изготовлении РВБ в качестве основного рудного сырья использовали песок (50,5 %), в качестве связующего — комбинацию жидкого стекла (ж. с.) и каменноугольного пека (к. п.) 15 % и 10 % соответственно, а в качестве восстановителя, количество которого рассчитывали по стехиометрии реакций восстановления кремния углеродом, — коксовую мелочь (24,5 %). В состав РВБ входила рудно-восстановительная смесь (РВС), комбинированный токопроводящий электрод (КЭ), состоящий из стальной трубки Ø18 мм, набитой внутри электродной смесью (ЭС) (MgO 11,1 %, графит 71,1 % и к. п. 17,8 %). Химический состав шихтовых материалов для изготовления РВБ и шлака представлен в таблице 1.

Таблица 1

Химический состав шихтовых материалов и конечных продуктов обработки

Материал	№ РВБ	Содержание компонентов, %							
		MnO	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Прочие ²
Песок	1–3	–	95,9	0,95	0,29	0,87	1,34	–	0,65
Шлак перед обработкой	1	0,50	66,75	7,20	1,23	3,150	11,24	–	9,93
	2	0,50	66,20	4,00	0,70	3,30	13,30	–	12,00
	3	0,50	68,50	2,62	0,60	3,30	13,6	–	10,88
Шлак после обработки	1	0,50	66,20	4,0	0,70	3,30	13,30	–	12,00
	2	0,50	68,5	2,62	0,60	3,30	13,6	–	10,88
	3	0,50	69,20	2,67	1,10	3,30	13,9	–	9,33
Зола кокса ¹	1–3	–	48,7	5,00	1,00	25,00	–	0,30	20,00
Магнезит		–	3,50	4,70	87,90	–	–	–	3,90
Жидкое стекло		–	36,70	0,20	–	0,15	0,10	–	62,85
Футеровка		–	98,00	0,50	0,50	1,00	–	–	–

¹В коксе содержится ~10 % золы.²В том числе ж. с. содержит 8,8 % Na₂O, остальное влага.

Стальная труба для комбинированного электрода использовалась такая же, как и в работе [7].

Основные технологические параметры и энергетические затраты при внепечной обработке железоуглеродистого расплава методом ДГВ кремния приведены в таблицах 2 и 3.

Длительность обработки составляла 5,5–10,8 мин и определялась энергетическими параметрами процесса. По окончании обработки производили замер температуры и отбирали пробу металла и шлака. Остатки рудно-восстановительного блока взвешивали и определяли их геометрические размеры.

РВБ сжигали поочередно при обработке чугуна в ИСТ-0,6 с кислой кварцевой футеровкой. Поэтому конечный шлак после сжигания блока № 1 в расчетах принимался как шлак перед обработкой при сжигании блока № 2. Аналогичное условие принималось при обработке металла блоком № 3.

Экспериментальные данные, полученные после проведения обработки металлического расплава методом ДГВ кремния, представлены в таблице 3.

Необходимо отметить, что прирост кремния в таблице 3 приведен за вычетом его количества, поступающего в металл из трубки комбинированного электрода, а общий прирост углерода в металле опре-

делялся с учетом перехода его из графитового (контактного) электрода.

Материальный баланс процесса оценивали по количеству компонентов и элементов, перешедших в шлак, пыль, газ и металл из рудно-восстановительных блоков, шлака, находящегося на поверхности расплава перед обработкой, и футеровки тигля печи.

Расчет материального баланса производился по методике, представленной в работе [7]. Для расчета компонентов, поступающих из футеровки и шлака перед обработкой плавки, задавались расходными величинами этих материалов, исходя из имеющегося опыта реализации процесса ДГВ и литературных данных. Принимали, что количество шлака на поверхности расплава перед обработкой блоками № 1, № 2, № 3 составляет 62, 83 и 81 г, а количество футеровки, перешедшей в шлак в процессе сжигания этих блоков, — 31, 41 и 37 г соответственно. Также учитывалась масса отобранных проб металла 96, 113 и 102 г для РВБ № 1, 2 и 3 соответственно.

Результаты расчета материального баланса процесса ДГВ кремния для РВБ № 1 представлены в таблице 4. Аналогичные расчеты были выполнены и для других РВБ, для которых получена невязка материального баланса не более 0,2 %, что подтверждает правильность выполненных расчетов и принятых допущений.

Таблица 2

Основные параметры обработки металла методом ДГВ кремния

№ РВБ	Масса металла, кг	Время обработки, с	Мощность, кВт	Затраты электроэнергии, кВт·ч
1	40,00	648	10,55	1,819
2	39,97	332	11,18	1,269
3	39,85	394	9,29	1,326

Таблица 3

Опытные данные после обработки

№ РВБ	Расход материалов, г				Прирост в металле, г		Степень восстановления Si, %
	РВС, г	КЭ		Графитовый электрод	С	Si	
		Стальная труба	ЭС				
1	247	164	30	111	164,28	51,96	68,56
2	160	110	20	94	47,95	3,91	85,54
3	173	173	23	114	35,89	27,81	65,37

Таблица 4

Материальный баланс обработки расплава РВБ № 1

Поступило	г	Получено	г
Металлического расплава	40000	Металла	40068
РВС	247	Металла пробы	96
ЭС	30	Шлака	329
Трубка КЭ	164	Газов и пыли	101
Графитового электрода	111		
Шлака перед обработкой	62		
Футеровка	31		
Всего:	40645		40594
Невязка:	~0,13 %		

По методике, представленной в работе [7], были выполнены расчеты химического состава шлака после обработки металла РВБ № 1, 2 и 3. Сравнение расчетного химического состава шлака и его состава, полученного при анализе проб рентгенофлуоресцентным методом, представлено в таблице 5. При расчете химического состава конечного шлака учитывали поступление магнезита из электродной смеси.

Из данных таблицы 5 видно, что расчетный химический состав шлака достаточно близок к результатам лабораторного анализа. Некоторое отклонение величин можно объяснить как погрешностью в химическом анализе, так и неточностями в определении массы расхода футеровки, конечного шлака и шлака перед обработкой, которые являются гетерогенными. Большее количество Fe_2O_3 (более чем в 2,5 раза), полученное в результате химического анализа, может свидетельствовать о возможности частичного окисления железа за счет оголения зеркала металла, однако этот факт требует дополнительных исследований. Полученные сравнительные результаты (табл. 5) еще раз подтвержда-

ют близкую сходимость экспериментальных и расчетных данных.

На основании данных таблиц 4 и 5 можно отметить, что извлечение кремния из песка при использовании процесса ДГВ составляет 65–85 % и является достаточно высоким показателем в сравнении со сквозным извлечением кремния из кварцита при производстве ферросплавов и дальнейшем легировании ими стали. При определении эффективности процесса необходимо учитывать шлак, который остается после обработки. Количество такого шлака будет больше количества, используемого в качестве основного рудного материала, а химический состав близок к составу шлаков, которые можно использовать для производства строительных материалов и в дорожном строительстве. Поэтому затраты на шихтовые материалы и, соответственно, себестоимость обработки будут еще ниже. Результаты проведенной работы в дальнейшем позволят прогнозировать распределение компонентов при обработке металла методом ДГВ кремния, что необходимо для организации эффективного технологического процесса.

Таблица 5

Состав расчетного шлака и полученного по факту

№ РВБ	Содержание компонента, %															
	MnO		SiO ₂		CaO		MgO		Al ₂ O ₃		Fe ₂ O ₃		P ₂ O ₅		Прочие	
	Факт	Расч.	Факт	Расч.	Факт	Расч.	Факт	Расч.	Факт	Расч.	Факт	Расч.	Факт	Расч.	Факт	Расч.
1	0,50	0,21	66,20	68,82	4,00	4,40	0,70	2,92	3,30	3,69	13,30	5,94	–	0,02	12,00	13,99
2	0,50	0,19	68,50	80,09	2,62	3,32	0,60	1,56	3,30	2,29	13,60	4,71	–	0,01	10,88	7,84
3	0,50	0,23	69,20	74,16	2,67	4,21	1,10	2,15	3,30	2,95	13,90	5,95	–	0,01	9,33	10,34

В результате проведенной работы выполнен анализ материального баланса процесса обработки расплава методом дугового глубинного восстановления кремния. В ходе анализа получена хорошая сходимости расчетных и экспериментальных данных, что подтверждает правильность принятых в работе ограничений и допущений (расход футеровки и количест-

во шлака перед обработкой). Полученные данные будут использованы для описания механизма процесса восстановления кремния из песка методом ДГВ и разработки эффективной промышленной технологии.

Дальнейшие работы будут направлены на уточнение механизма дугового глубинного восстановления кремния из песка.

Библиографический список

1. *Официальный сайт ассоциации «Русская сталь» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.russtal.ru>.*
2. *Основные показатели работы черной металлургии России в 2020 г [Текст] / В. В. Катунин, Н. Г. Зиновьева, И. М. Иванова, Т. М. Петракова // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. — 2021. — Т. 77. — № 4. — С. 367–392.*
3. *Щедровицкий, Я. С. Высокремнистые ферросплавы [Текст] / Я. С. Щедровицкий. — Свердловск : Металлургиздат, 1961. — 256 с.*
4. *Емлин, Б. И. Справочник по электротермическим процессам [Текст] / Б. И. Емлин, М. И. Гасик. — М. : Металлургия, 1978. — 288 с.*
5. *Сычѳв, В. А. Электрические параметры ферросплавных электропечей мощностью 16,5–22,5 МВ·А [Текст] / В. А. Сычѳв, Г. Д. Чистяков // Производство ферросплавов: тематический отраслевой сборник. — М. : Металлургия, 1975. — № 4. — С. 108–112.*
6. *Дашевский, В. Я. Ферросплавы: теория и технология [Текст] / В. Я. Дашевский. — М. : Издательский дом МИСИС, 2014. — 362 с.*
7. *Проценко, М. Ю. Теоретическая и экспериментальная оценка баланса компонентов при обработке металла методом дугового глубинного восстановления [Текст] / М. Ю. Проценко, С. В. Куберский, С. Б. Эссельбах // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2012. — Вып. 38. — С. 204–214.*
8. *Проценко, М. Ю. Разработка ресурсосберегающей технологии дугового глубинного восстановления марганца из шлака силикомарганца в железоуглеродистые расплавы [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.16.02 / Проценко Михаил Юрьевич ; ДонГТУ. — Лисичанск, 2017. — 191 с.*
9. *Использование метода дугового глубинного восстановления для извлечения кремния из песка в железоуглеродистые расплавы [Текст] / С. В. Куберский, М. Ю. Проценко, М. И. Воронько, И. А. Белан // Сб. науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2019. — Вып. 57. — С. 37–45.*
10. *Электродуговая и электромагнитная обработка расплавов [Текст] : монография / А. Н. Смирнов и др. — Алчевск : ДонГТУ, 2013. — 320 с.*

© Проценко М. Ю., Куберский С. В., Проценко В. И.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В., зам. нач. ЦЛК Филиала № 1 «АМК» ООО «ЮГМК» Тарасовым В. Н.

Статья поступила в редакцию 17.10.22.

PhD in Engineering Protsenko M. Yu., PhD in Engineering Kuberskiy S. V., Protsenko V. I.
(DonSTI, Alchevsk, LPR)

BURDEN BALANCE OF THE ARC DEPTH SILICON RECOVERY FROM SAND

The article analyses distribution of components between contacting phases at arc depth silicon recovery from sand, performs a comparative analysis of the calculated and experimental chemical composition of the final slag, and shows high convergence of theoretical and practical results.

Key words: arc depth recovery, burden balance, silicon, ore-reducing mixture, balance of processing, distribution of components, out-of-furnace melt processing.

**СТРОИТЕЛЬСТВО
И АРХИТЕКТУРА**

**CIVIL ENGINEERING
AND ARCHITECTURE**

УДК 692.415.004.2

*к.т.н. Будзило Е. Е.,
к.геол.н. Горвая Н. А.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, kirilch@i.ua),
к.т.н. Бондарчук В. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, bondarchuk_58@mail.ru)*

ПРОБЛЕМЫ РЕМОНТА И ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РУЛОННЫХ КРОВЕЛЬ КРУПНОПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ

Работа направлена на повышение эксплуатационных качеств кровельных покрытий после проведения текущих непредвиденных, профилактических и капитальных ремонтов. Установлена связь между качеством их проведения и эксплуатационной надежностью покрытия. Предложена методика совершенствования условий эксплуатации покрытия, что позволит увеличить срок проведения межремонтных работ.

Ключевые слова: *кровельные покрытия, ремонтные работы, эксплуатационная надежность, крупнопанельные здания.*

Обеспечение сохранности жилищного фонда является основной задачей коммунальных служб. Восстановление эксплуатационных характеристик здания производится при проведении текущих и капитальных ремонтов.

Учитывая, что панельные здания являются наиболее доступным жильем, позволяющим решить жилищный вопрос в короткие сроки, они получили наибольшее распространение в массовом строительстве. Спрос на такие здания достаточно высок и в настоящее время. Обладая рядом преимуществ (скорость возведения, технологичность, стоимость и т. д.), они имеют ряд недостатков, таких как неудачная планировка, низкие показатели звуко- и теплоизоляции. Основным недостатком является сырость, которая появляется как из-за некачественных панелей, материалов герметизации стыков, но и зачастую также связана с протечками кровли. Если в этих зданиях нарушена вентиляция, то на месте мокрых пятен появляется плесень или грибок.

Следовательно, одним из основных элементов крупнопанельных зданий, которые подлежат восстановлению, так как выполняют защитную функцию, является кровельное покрытие, предохраняющее его нижележащие конструкции, вплоть до фунда-

ментной части, от сырости и влаги, так как процесс миграции влаги часто бывает непредсказуемым. На ремонт кровель крупнопанельных зданий ежегодно расходуется более 15 % средств, предусмотренных на содержание всего жилищного фонда [1]. При их качественной эксплуатации и грамотном техническом обслуживании с регулярными квалифицированными осмотрами объем этих работ значительно снижается.

Задача исследования — совершенствование существующих рекомендаций по методам выполнения ремонта кровельных покрытий с учетом применения современных материалов, технологий и порядка их эксплуатации на примере крупнопанельных зданий, как наиболее проблемных в настоящее время в связи с их конструктивными особенностями (плоская кровля).

Объект исследования: в данной работе приведены результаты исследования качества кровельных покрытий на примере крупнопанельных домов серии 121 в первый год их эксплуатации после ремонта (г. Кировск, кв. 60 лет Октября).

Предмет исследования — кровельное покрытие крупнопанельных зданий.

Вопросы надежности и долговечности кровельных покрытий приобретают в настоящее время весьма актуальное значение

в связи с увеличением дефектов в них. Учитывая тот факт, что срок эксплуатации многих крупнопанельных зданий составляет более 40 лет, ремонт кровель в них осуществляется неоднократно — в основном текущий непредвиденный. Увеличение толщины рулонного покрытия, проведение локального ремонта (проблемных участков крыши) привело к тому, что эксплуатационная надежность отремонтированных зданий стала гораздо ниже, чем в первоначальные годы, несмотря на выполнение ремонтов более современными материалами.

Производственные ошибки при эксплуатации и ремонте кровельных покрытий существенно влияют не только на комфортность проживания и общие эстетические впечатления, но также могут привести к угрозе здоровья квартиросъемщиков. Связано это в основном с появлением сырости в помещениях и следствием этого — плесени, которую сложно ликвидировать даже при условии качественного выполнения ремонтных работ.

Ремонт кровель в нашем регионе в основном выполняется наплавленным материалом — стеклоизолом. Данный материал обладает следующими преимуществами: доступность и приемлемая цена, что позволяет использовать его при больших объемах работ; улучшенные изоляционные характеристики по сравнению с другими аналогичными материалами для восстановления покрытий; длительный срок эксплуатации; экологичность; простота укладки; способность сохранения своих эксплуатационных качеств при значительных температурных перепадах и воздействии ультрафиолетового излучения в течение длительного времени; эластичность и гибкость, что не позволяет повреждаться материалу при проведении ремонтных работ [2].

Недостатком использования стеклоизола является только невозможность проведения ремонта при низких температурах. Однако, учитывая тот факт, что эти работы чаще всего выполняются в теплый период, его нельзя считать существенным.

Ремонтные работы включали следующие процессы: подготовка поверхности основания с устранением неровностей; подготовка основания путем обработки поверхности праймером; раскройка полотнищ необходимых размеров с учетом припусков; приклеивание полотнищ стеклоизола с использованием горелки. При этом надо отметить, что их наклейка производилась в один слой, а данный материал не имел сертификата, что значительно ухудшило качество выполненных работ.

В процессе обследования при рассмотрении общих условий надежности кровельного покрытия учитывалось влияние комплекса показателей, а именно технологических (качества работ по ремонту и восстановлению покрытия, окружающей среды, внутренних процессов в материалах, используемых для ремонта кровель) и эксплуатационных воздействий (условий содержания кровли). Каждый из выявленных дефектов рассматривался в аспекте этих факторов.

В результате обследования были выявлены следующие дефекты (табл. 1):

1. На кровле по всему периметру здания повсеместно отсутствуют парапетные планки из оцинкованной стали. Это привело к затеканию воды как на парапет, так и на фасад здания. Результат — сырость и плесень в жилых помещениях, особенно торцевых панелей стен на верхних этажах.

2. На отдельных участках не было выполнено примыкание полотнищ стеклоизола к стенам, парапету, элементам вентканалов, выявлено отсутствие фиксирующих реек. Это может вызвать затекание воды под рулонный ковер, а в дальнейшем — сползание стеклоизола.

3. Некачественно выполнена стыковка полотнищ. Это приводит к расслаиванию кровельного материала, что вызвано недостаточной просушкой и плохой очисткой основания при выполнении ремонтных работ. Наклейка полотнищ по загрязненной поверхности, как правило, нарушает его целостность и водостойкость.

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

4. Появление разрывов между парапетными блоками в местах стыковки продольного и поперечного фасадов. Это связано с неравномерной осадкой фундамента и привело к разрыву и трещинам в рулонном ковре, а следовательно, к протеканию. Подтверждают данный факт солевые пятна и влага на техническом этаже.

5. На ливневых стоках повсеместно отсутствуют водоприемные воронки. С течением

времени вода с частичками грязи просачивается через открытые стоки ливневок, забивает их, что приводит к появлению сырых поверхностей на любом этаже здания вплоть до первого (подтверждено жалобами жильцов).

6. Систематически не выполняется уборка мусора на крыше, что привело к засору водоприемных воронок и застоев воды на крыше.

Таблица 1

Основные дефекты кровельных покрытий и методы их устранения

Нормативные требования к устройству кровли [3]	Выявленные дефекты	Методы устранения
Наличие защиты парапета	Отсутствие по всему периметру здания парапетных планок из оцинкованной стали (рис. 1)	Обязательное восстановление окантовки парапета
Закрепление кровельного покрытия на вертикальных элементах крыши (во избежание в дальнейшем сползания)	Частичное отсутствие реек, прикрепляющих кровельное покрытие к вертикальным элементам крыши (рис. 2)	Установка реек крепления кровельного материала в местах их отсутствия или заведение кровельного материала под парапетные планки
Тщательное выравнивание основания под кровлю	Наличие впадин и неровностей в основании под кровельное покрытие, что подтверждается наличием солевых пятен (рис. 3)	Частичная замена материала кровли: снятие данного участка покрытия, выравнивание основания и повторная наклейка кровельного покрытия
Наклейка рулонного материала только на сухое основание	Отслаивание покрытия от основания в местах стыковки и сопряжения с парапетом (рис. 4)	Просушка данных участков, устройство дополнительного кровельного слоя в местах обнаружения дефекта
Качественное устройство стыков между парапетами	Неплотности стыков соединения между парапетами (рис. 5). Протекание отдельных участков крыш, особенно в местах сопряжения их с наружной стеной (рис. 6)	Усиление данных участков и последующее устройство сопряжений кровли с парапетом. При этом необходимо тщательно обследовать фундаменты и при неравномерной их осадке провести работы по их усилению
Устройство водоприемных воронок и их сопряжение с покрытием в соответствии с ППР	Неудовлетворительный температурно-влажностный режим чердачных помещений и наличие солевых пятен (рис. 7, 8)	Проверка наличия воронок, правильности их устройства и сопряжения с покрытием, отсутствия засорения
Устройство необходимого количества слоев кровельного покрытия	Отсутствие требуемого количества слоев, что обнаружено при обследовании (если уклон до 10 % — должно быть 2 слоя)	Устройство дополнительного защитного слоя
Чистое кровельное покрытие	Мусор на кровле (рис. 9)	Уборка мусора как в процессе ремонтных работ, так и в процессе эксплуатации кровли



Рисунок 1 — Отсутствие защиты на парапетах



Рисунок 2 — Отсутствие примыканий полотнищ стеклоизола и фиксирующих планок



Рисунок 3 — Солевые пятна на кровельном покрытии



Рисунок 4 — Отслаивание покрытия от основания в местах стыковки



Рисунок 5 — Разрывы между парапетными блоками



Рисунок 6 — Последствия протекания в результате смещения между парапетными блоками



Рисунок 7 — Солевые пятна на техническом этаже



Рисунок 8 — Отсутствие водоприемных воронок



Рисунок 9 — Наличие мусора на крыше

Помимо этого, на долговечность существенное влияние оказывает качество используемых материалов. Зачастую в настоящее время ремонтные работы выполняются без наличия сертификатов на используемые материалы, что затрудняет выбор надежной технологии производства ремонтных работ.

Кроме этого, качество выполнения ремонтных работ, по нашему мнению, должно подтверждаться не только актами скрытых работ, но и видеоматериалами.

Выводы:

1. Все применяемые для кровельных ремонтных работ материалы должны иметь сертификаты.

2. Использование любого рулонного покрытия предполагает подготовительные работы по устройству идеального горизонтального основания. В противном случае на крыше скапливается вода после обильных дождей или таяния снега.

3. Отсутствие на парапетных плитах оцинкованных сливов приводит к появлению дефектов в местах примыкания рулонного ковра к ним, даже если первоначаль-

но работы были выполнены качественно. Без обязательного проведения работ по установке оцинкованных фартуков эксплуатационная надежность кровли снижается на первом этапе послеремонтной эксплуатации даже при использовании качественных покрытий.

4. Отсутствие водоприемных воронок в системах внутренних водостоков приводит в дальнейшем к засорению водосборника и образованию «водных бассейнов» на крышах. Результат — быстрое старение кровельных материалов.

5. Недостаточный уход за крышей в крупнопанельных зданиях (нерегулярная уборка снега, мусора, листьев) приводит к засорению воронок в связи с тем, что выполнение уборочных работ на крыше затрудняется сложностью попадания на нее (с лестничной площадки между верхними этажами по вертикальной металлической лестнице).

6. Необходим контроль не только за проведением ремонтных работ, но и при дальнейшей эксплуатации жилищно-коммунальные службы обязаны иметь в

своем штате квалифицированных работников, не только следящих за соблюдением условий правильной эксплуатации зданий, но и принимающих мобильные реше-

ния в случае возникновения неординарных стихийных ситуаций (взрывная волна, снегопад, изменение перепада температуры, обильные осадки, сильный ветер и т. д.).

Библиографический список

1. Айзерно, Х. П. *Изоляция плоских кровель [Текст] / Х. П. Айзерно.* — М. : Бизнес Медиа, 2011. — 272 с.
2. *Кровля. Современные материалы и технология [Текст] / В. И. Теличенко, В. Ф. Касьянов, С. Д. Сокова и др.* — М. : АСВ, 2012. — 816 с.
3. ДБН В.2.6-220: 2017. *Покрытия зданий и сооружений : на замену ДБН В.2.6-14-97 : утв. Минрегиона Украины 06.06.2017 № 139 ; действ. с 01.01.2018.* — К. : Минрегиона Украины, 2017. — 46 с.

© Будзило Е. Е.

© Горовая Н. А.

© Бондарчук В. В.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. ПС ДонГТИ Псюком В. В., д.т.н., проф. каф. проектирования сельскохозяйственных объектов ЛГАУ Давиденко А. И.

Статья поступила в редакцию 04.10.2022.

PhD in Engineering Budzilo E. E., PhD in Geological and Mineralogical Sciences Gorovaia N. A. (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, ki1ri1ch@i.ua), **PhD in Engineering Bondarchuk V. V.** (DonSTI, Alchevsk, LPR, bondarchuk_58@mail.ru)

PROBLEMS IN REPAIRING AND SUBSEQUENT FUNCTIONING OF ROLL ROOFING IN LARGE-PANEL BUILDINGS

The work is aimed at improving the performance of roofing coatings after ongoing unforeseen, preventive and major repairs. A connection has been determined between the quality of their implementation and the operational reliability of coating. The method of improving the operating conditions of coating is proposed, which will increase the duration of inter-repair work.

Key words: roofing coatings, repair work, operational reliability, large-panel buildings.

УДК 697

Андрійчук В. Н.,
д.т.н. Соколов В. И.,
д.т.н. Андрійчук Н. Д.

(ИСА и ЖКХ ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, vlad19790401@gmail.com)

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИТОЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В работе рассмотрен вопрос обоснования возможности совершенствования процессов регулирования систем отопления, вентиляции и кондиционирования использованием адаптивного прогнозирующего управления, повышения на его основе качества регулирования приточной вентиляционной системы. Изложен принцип управления с использованием прогнозирующей модели, отмечены особенности управления с использованием МРС-регулятора, рассмотрена структура регулятора и критерий выбора оптимальных значений управляющего сигнала. Показана реализация МРС-подхода на примере приточной вентиляционной системы VAV учебной аудитории. Для моделирования вентиляционной системы в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB разработана блок-диаграмма, для синтеза МРС-регулятора использован набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox. Проведено исследование переходных процессов в вентиляционной системе VAV, сопоставлены переходные процессы в системе без регулятора, с ПИД-регулятором и МРС-регулятором. Сравнение результатов показало, что использование МРС-регулятора позволяет совершенствовать процессы регулирования теплового режима в помещении и повысить качество регулирования приточной вентиляционной системы.

Ключевые слова: микроклимат, регулятор, вентиляционная система, температура, переходный процесс.

Системы отопления, вентиляции и кондиционирования (ОВК) являются одной из наиболее важных составляющих проектирования и разработки промышленных и административных зданий и жилых помещений [1–3]. Системы ОВК с помощью подачи наружного воздуха поддерживают в них безопасные и комфортные условия по температуре, влажности, скорости движения воздуха и чистоте воздушной среды.

Составной частью систем ОВК являются вентиляционные системы. Для управления инженерным оборудованием систем вентиляции ставятся следующие основные задачи [1, 4, 5]: создание и поддержание микроклимата в пределах здания, сооружения или помещения, комфортного для человека или животных и растений, а также материальных предметов (оборудования, веществ, изделий, произведений искусства и т. п.); энергосбережение или экономия энергии, затрачиваемой на создание и поддержание микроклимата; тех-

нологическая безопасность системы и снижение затрат на ее эксплуатацию.

Затраты на вентиляционные системы составляют значительную часть затрат на эксплуатацию здания и во многом определяются правильным построением автоматизированных систем управления микроклиматом. При анализе совокупных затрат в ряде случаев получается, что покупная стоимость составляет иногда очень небольшую часть, часто около 10 %. Остальные 90 % идут на эксплуатационные затраты.

Для эффективного управления системами ОВК необходимо вести оперативный контроль параметров микроклимата и состояния параметров исполнительных механизмов, а также формировать разные режимы работы оборудования [3, 5, 6]. Так, в системах вентиляции следует выбирать режим работы в соответствии с внешними и внутренними факторами (температура и влажность воздуха, загруженность помещений, концентрация вредных ве-

ществ). Чаще всего такое задание возникает в переходный период, когда диапазон изменения температуры варьируется в больших границах. Автоматизация и диспетчеризация требуют достижения определенных условий: комфортность, энергосбережение, технологическая безопасность, снижение затрат на эксплуатацию.

В этой связи актуальной задачей является совершенствование процессов регулирования систем ОВК, в частности повышение качества регулирования вентиляционных систем.

В настоящее время появились новые тенденции в построении систем автоматического управления [7, 8], которые дают возможности совершенствования процессов управления инженерным оборудованием зданий и помещений. И здесь следует отметить активно обсуждаемый подход для управления различными технологическими процессами, использующий прогнозирующие модели — Model Predictive Control (MPC) [9, 10].

Идея MPC-подхода к адаптивному управлению с обратной связью состоит в том, чтобы найти последовательность оптимальных управляющих воздействий, которая обеспечит наилучшее прогнозируемое состояние объекта управления на ограниченном горизонте прогнозирования [9, 11]. Задача синтеза адаптивного управления нелинейными объектами на основе данного подхода состоит из трех основных шагов. Сначала дифференциальные уравнения нелинейного объекта представляются приближенными линеаризованными системами на каждом интервале управления. Далее, с использованием линеаризованных моделей строятся прогнозирующие модели по выходным сигналам объекта управления на определенное количество шагов вперед. И на последнем этапе на основе прогнозирующих моделей минимизируется функционал качества по алгоритму квадратичного программирования для определения оптимального управляющего воздействия на систему.

MPC-подход хорошо зарекомендовал себя в различных областях управления нелинейными объектами, в том числе при решении задач управления тепловым режимом зданий [12]. К основным преимуществам MPC-подхода необходимо отнести то, что оптимальный регулятор, синтез которого проведен согласно данному подходу, обеспечивает отсутствие статической ошибки в системе, выполнение требуемых ограничений на управляющие и выходные переменные, а также достижение компромисса между робастностью и качеством регулирования [9, 10]. Вместе с тем, как и большинство других оптимальных систем, он требует наличия модели объекта управления. Поскольку MPC-подход реализует закон управления с обратной связью по состоянию, а управление рассматривается и выполняется на очень коротком временном промежутке, то важным его достоинством является то, что для синтеза системы управления можно использовать приближенные линейные модели.

В этой связи несомненный интерес вызывает апробация MPC-подхода для управления системами ОВК, его реализация на конкретном примере и сопоставление качества регулирования с традиционными подходами, в частности с использованием ПИД-регуляторов.

Целью работы является обоснование возможности совершенствования процессов регулирования систем ОВК использованием адаптивного прогнозирующего управления, повышение на его основе качества регулирования приточной вентиляционной системы.

Для наглядности реализации MPC-подхода рассмотрим систему ОВК как одномерную систему, т. е. рассматриваем ее как объект управления (ОУ) с одной выходной величиной y . Также считаем, что система автоматического управления (САУ) воспринимает одно задающее воздействие g и одно возмущающее воздействие f . Тогда САУ с MPC-регулятором можно представить структурной схемой, показанной на рисунке 1.

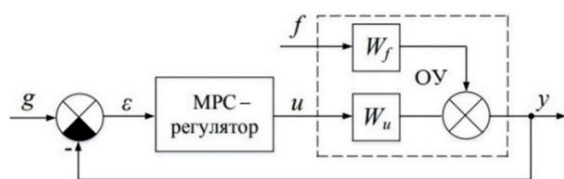


Рисунок 1 Структурная схема САУ с MPC-регулятором

На рисунке 1 обозначены: g — задающее воздействие (уставка); f — возмущающее воздействие (возмущение); u — управляющее воздействие (сигнал управления); W_u — передаточная функция ОУ по сигналу управления; W_f — передаточная функция ОУ по возмущению; y — выходная (регулируемая) величина (переменная); ε — ошибка управления, $\varepsilon = g - y$.

На рисунке 2 показана структурная схема MPC-регулятора. В состав регулятора входит прогнозирующая модель ОУ и оптимизатор.

Основная идея управления с прогнозирующей моделью заключается в следующем. Пусть имеются вход объекта по управлению $u(t)$ и выходная регулируемая переменная $y(t)$. Задающее воздействие $g(t)$ является желаемой величиной (зависимостью) изменения регулируемой переменной. Систему рассматриваем в дискретные моменты времени, т. е. только в моменты времени $t = k\Delta T$, где ΔT — период квантования, а k — целое число.

Главной особенностью управления с помощью MPC-регулятора является наличие математической модели ОУ, которая достаточно точно описывает его поведение. Наличие адекватной математической модели ОУ позволяет прогнозировать значения регулируемой переменной на определенное число шагов вперед (рис. 3).

На рисунке 3 значения регулируемой величины $y(t)$, предсказанные в момент времени t , обозначены через $\hat{y}(t)$. Горизонт предсказания строится на определенное число шагов n_p . Прогнозируемая траектория регулируемой переменной будет зависеть от будущих значений управляю-

щего воздействия $u(t)$. Суть MPC-подхода состоит в определении последовательности значений управляющего сигнала $u(t)$, которая позволит обеспечить наилучшую прогнозируемую траекторию для регулируемой переменной $y(t)$. Длина последовательности n_c рассчитываемых управляющих воздействий $u(t)$ является фиксированной величиной и называется горизонтом управления. Необходимая последовательность значений управляющего воздействия устанавливается решением задачи оптимизации. Выбор наилучшей траектории регулируемой переменной определяется показателем качества регулирования, которым принимают квадрат рассогласования между прогнозируемой выходной переменной $y(t)$ и задающим воздействием (желаемой траекторией) $g(t)$. Также оценивается изменение величины управляющего сигнала. Таким образом, для выбора оптимальных значений сигнала управления $u(t)$ MPC-регулятор стремится минимизировать следующий функционал:

$$J = \sum_{i=k}^{k+n_p} (y(i) - g(i))^2 + \sum_{i=k}^{k+n_c} (u(i) - u(k))^2, \quad (1)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$ — целое число, соответствующее текущему моменту времени; n_p — число шагов, на которые строится прогноз поведения регулируемой переменной $y(t)$ (горизонт предсказания); n_c — длина последовательности будущих значений управляющего сигнала $u(t)$ (горизонт управления).

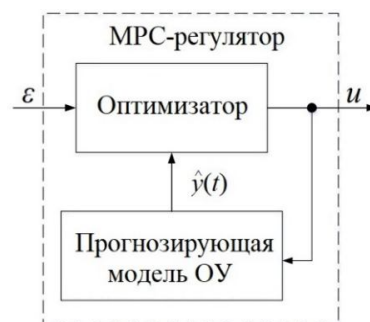


Рисунок 2 Структурная схема MPC-регулятора

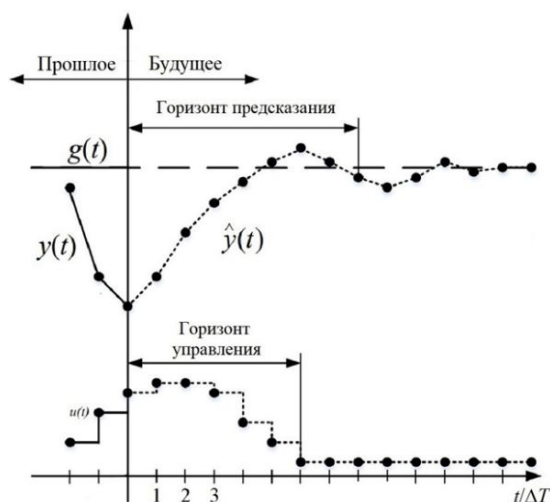


Рисунок 3 Принцип управления на основе MPC-подхода

После подачи на ОУ вычисленного оптимального управляющего воздействия $u(t)$ на следующем шаге вся процедура повторяется заново с учетом вновь поступившей информации.

Для реализации MPC-подхода в пакете прикладных программ MATLAB имеется набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox для проектирования и моделирования MPC-регуляторов [11].

Покажем реализацию MPC-подхода для управления системами ОВК на примере приточной вентиляционной системы VAV (от английского названия Variable Air Volume — переменный объем воздуха) [13–15] учебной аудитории (рис. 4) в осенне-весенний период, которая поддерживает заданный температурный режим $T(t)$ в помещении путем изменения объема подаваемого нагретого воздуха.

В рассматриваемой вентиляционной системе VAV изменение тепловой нагрузки помещения компенсируется изменением количества приточного воздуха $G(t)$, поступающего от центральной приточной вентиляционной установки при его постоянной температуре. Вентиляционная система VAV работает при общем значении расхода воздуха, меньшем, чем необходимо при суммарной максимальной тепловой нагрузке. Это обеспечивает снижение потребляемой энергии при сохранении заданного качества воздуха внутри помещения. Вентиляционная система VAV может быть полностью интегрирована с комплексной системой управления зданием BAS (Building Automation System), что обеспечивает пользователю здания возможность мониторинга и управления параметрами работы всей системы ОВК.

Основным элементом вентиляционной системы VAV является терминал VAV (регулятор или клапан VAV) [13–14], схема которого представлена на рисунке 5. Основной задачей терминала VAV является поддержание расхода воздуха в зависимости от необходимой потребности, величина которого определяется управляющим сигналом $u(t)$. Поддержание необходимого значения расхода обеспечивается положением дроссельной заслонки 1. Заданному значению расхода соответствует перепад давлений на дифференциальном манометре, установленном в воздуховоде 2. При отклонении перепада давлений от заданного значения электропривод изменяет положение дроссельной заслонки, тем самым поддерживая требуемое значение расхода.

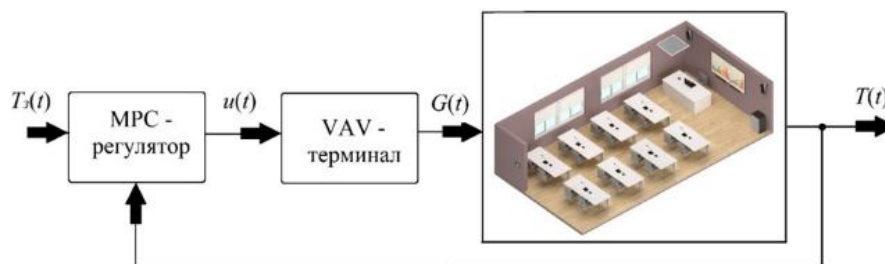
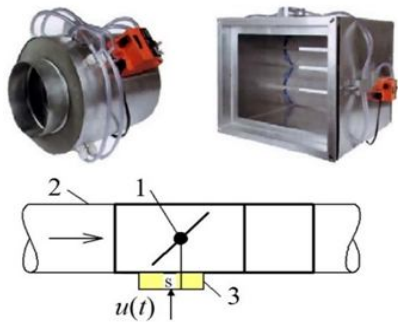


Рисунок 4 Схема вентиляционной системы VAV



1 — дроссельная заслонка; 2 — воздуховод;
3 — электропривод дроссельной заслонки

Рисунок 5 Терминалы VAV для воздушных каналов круглого и прямоугольного сечения

Исследование вентиляционной системы VAV проводим по задающему воздействию — заданной температуре в помещении $T_3(t)$. Предварительно известными методами [7, 8] на основе экспериментальных исследований выполнена параметрическая идентификация вентиляционной системы как ОУ температурой воздуха в помещении $T(t)$ по поступающему в него массовому расходу нагретого воздуха $G(t)$. Для идентификации математической модели использованы возможности блока программных инструментов System Identification Toolbox пакета прикладных программ MATLAB. Получена следующая передаточная функция для температуры в помещении по массовому расходу воздуха для безразмерных переменных:

$$W_{TG}(s) = \frac{e^{-54s}}{78s^2 + 320s + 1}, \quad (2)$$

где s — переменная Лапласа.

Передаточная функция (2) представляет собой произведение двух типовых звеньев: апериодического звена 2-го порядка и звена запаздывания со временем $\tau = 54$ с. Передаточная функция (2) составлена для безразмерных отклонений переменных.

Для моделирования вентиляционной системы VAV в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB разработана блок-диаграмма, представленная на

рисунке 6. Для синтеза МРС-регулятора использован набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox. Для этого предварительно в командной строке MATLAB была задана передаточная функция ОУ:

```
>> plant=tf(1,[78 320 1],'IODelay',54);
```

Далее следующими командами соответственно спроектирован МРС-регулятор и заданы его ограничения:

```
>> mpcobj=mpc(plant, 10, 100, 30);  
>> mpcobj.MV=struct('Min',0,'Max',2);
```

Период квантования задан $\Delta T = 10$ с, горизонт прогнозирования $n_p = 100$ шагов, горизонт управления $n_c = 30$ шагов. Минимальное значение управляющего сигнала $u(t)$ равно 0, что соответствует полностью закрытому терминалу VAV, а максимальное значение равно 2, что соответствует максимальному количеству воздуха на выходе терминала VAV, которое в 2 раза превышает среднее значение расхода приточного нагретого воздуха $G(t)$, поступающего в помещение от центральной вентиляционной системы.

Результаты расчета переходных процессов в вентиляционной системе VAV показаны на рисунке 7. Здесь сопоставлены переходные процессы в системе без регулятора, с ПИД-регулятором, оптимизированным по быстродействию, и МРС-регулятором. Сравнение результатов показывает, что использование МРС-регулятора позволяет совершенствовать процесс регулирования теплового режима в помещении. Во-первых, существенно повышается быстродействие системы. Так, длительность переходного процесса системы без регулятора составляет 1008 с (16,8 мин), с ПИД-регулятором 512 с (8,5 мин), с МРС-регулятором 262 с (4,2 мин). Во-вторых, при использовании МРС-регулятора практически отсутствует перерегулирование системы, что не приводит к «перетопам», когда температура в помещении поднимается выше заданной, что исключает дополнительные потери тепла.

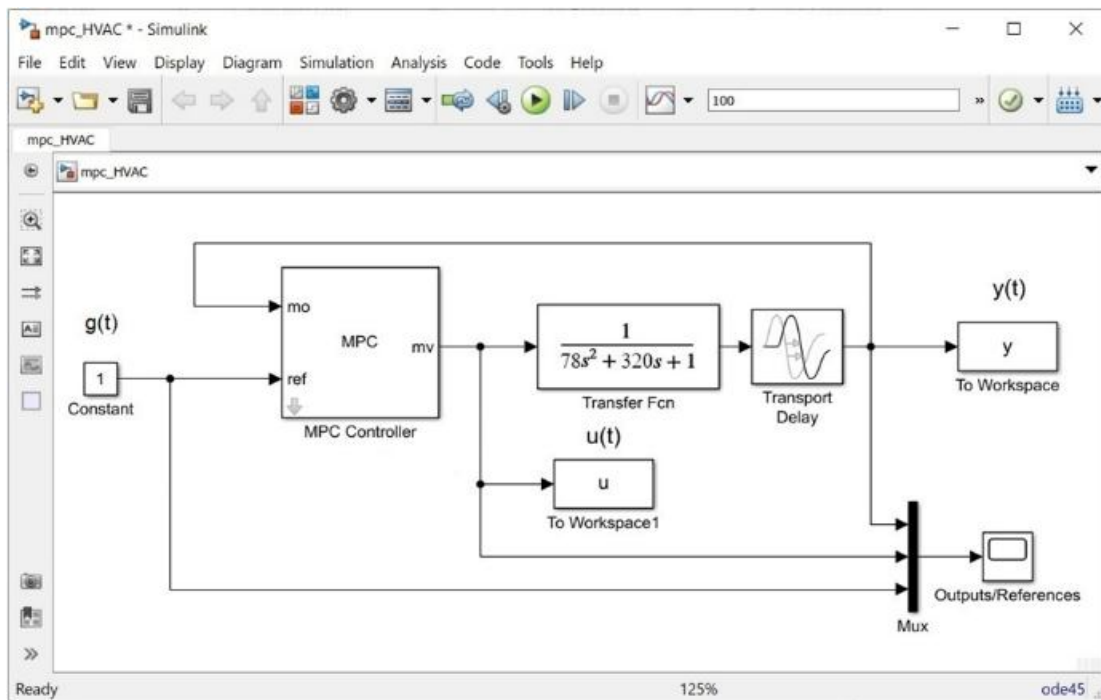


Рисунок 6 Блок-диаграмма системы в среде Simulink

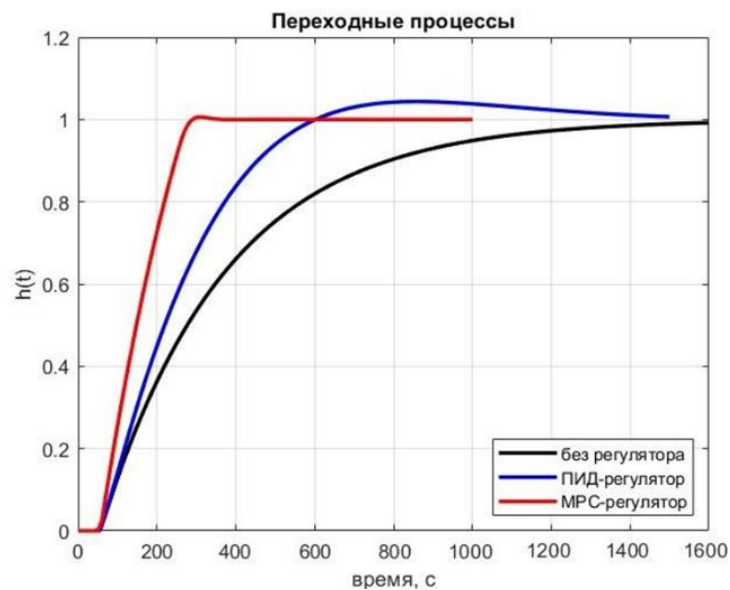


Рисунок 7 Переходные процессы в вентиляционной системе VAV

Следует отметить, что вышеизложенную методику управления системами ОВК на основе MPC-подхода можно обобщить в многомерные САУ и системы с несколькими задающими и возмущающими воздействиями.

Таким образом, в работе обоснованы возможности совершенствования процессов регулирования систем отопления, вентиляции и кондиционирования использованием адаптивного прогнозирующего управления, показано на его основе повы-

шение качества регулирования приточной вентиляционной системы.

С этой целью детально показана реализация MPC-подхода, изложен принцип управления с использованием прогнозирующей модели, отмечены особенности управления с использованием MPC-регулятора. Также рассмотрена структура регулятора и критерий выбора оптимальных значений управляющего сигнала.

Показана реализация MPC-подхода для управления системами ОВК на примере приточной вентиляционной системы VAV учебной аудитории. Для моделирования вентиляционной системы VAV в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB разработана блок-диаграмма, для

чего была использована предварительно установленная передаточная функция системы как ОУ. Для синтеза MPC-регулятора использован набор программных инструментов Model Predictive Control Toolbox пакета MATLAB.

Проведено исследование переходных процессов в вентиляционной системе VAV, сопоставлены переходные процессы в системе без регулятора, с ПИД-регулятором и MPC-регулятором. Сравнение результатов показало, что использование MPC-регулятора позволяет совершенствовать процессы регулирования теплового режима в помещении и повысить качество регулирования приточной вентиляционной системы.

Библиографический список

1. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика [Текст] / В. А. Ананьев, Л. Н. Балуева, А. Д. Гальперин [и др.]. — М. : Евроклимат, 2003. — 416 с.
2. Sokolov, V. Diffusion of circular source in the channels of ventilation systems [Text] / V. Sokolov // *Advances in engineering research and application. ICERA 2018. Lecture notes in networks and systems*. — 2019. — Vol. 63. — P. 278–283.
3. Соколов, В. І. Гідравліка [Текст] / В. І. Соколов, О. С. Кроль, О. В. Єніфанова. — Северодонецьк : СНУ ім. В. Даля, 2017. — 160 с.
4. Sokolov, V. Criteria analysis of diffusion processes in channels of industrial ventilation systems [Text] / V. Sokolov // *Proceedings of the 7th international conference on industrial engineering. ICIE 2021. Lecture notes in mechanical engineering*. — 2022. — Vol. 2. — P. 725–731.
5. Свистунов, В. М. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха объектов агропромышленного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства [Текст] / В. М. Свистунов, Н. К. Пушняков. — СПб. : Политехника, 2007. — 423 с.
6. Sokolov, V. Increased measurement accuracy of average velocity for turbulent flows in channels of ventilation systems [Text] / V. Sokolov // *Proceedings of the 6th international conference on industrial engineering. ICIE 2020. Lecture notes in mechanical engineering*. — 2021. — Vol. 2. — P. 1182–1190.
7. Теория автоматического управления [Текст] : учебник / Е. Э. Страшинин, А. Д. Заколяпин, С. П. Трофимов [и др.]. — Екатеринбург : УФУ, 2019. — 456 с.
8. Лурье, Б. Я. Классические методы теории автоматического управления [Текст] / Б. Я. Лурье, П. Дж. Энрайт. — СПб. : БХВ-Петербург, 2004. — 640 с.
9. Надеждин, И. С. Системы управления нестационарным объектом на основе MPC-регулятора и ПИД-регулятора с нечеткой логикой [Текст] / И. С. Надеждин, А. Г. Горюнов, Ф. Маненти // *Управление большими системами. Анализ и синтез систем управления*. — 2018. — Вып. 75. — С. 50–75.
10. Колодин, А. А. Разработка и исследование регулятора на основе прогнозирующей модели [Текст] / А. А. Колодин, В. В. Ёлиин // *Вест. Самар. гос. ун-та. Сер. : Технические науки*. — 2021. — Т. 29. — № 1. — С. 36–44.
11. Model predictive control toolbox [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.mathworks.com/help/mpc/>.
12. Марьясин, О. Ю. Управление тепловым режимом зданий с использованием прогнозирующих моделей [Текст] / О. Ю. Марьясин, А. С. Колодкина // *Вест. Самар. гос. ун-та. Сер. : Технические науки*. — 2017. — № 1 (53). — С. 122–132.

13. Судак, В. Системы VAV. Краткое описание / В. Судак, Я. Хендигер. — Краков : SMAU, 2009. — 80 с. ; То же [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://belimo.com.ua/files/VAV/VAV_book.pdf.

14. Соколов, В. И. Дифузійні процеси в системах вентиляції [Текст] / В. И. Соколов, О. С. Кріль, О. В. Єніфанова. — Сєвєродонецьк : СНУ ім. В. Даля, 2018. — 148 с.

15. Ратушняк, Г. С. Регулювання витрати аеродинамічних потоків в системах вентиляції та аспірації [Текст] : монографія / Г. С. Ратушняк, Р. В. Степанковський. — Вінниця : ВНТУ, 2015. — 112 с.

© Андрійчук В. Н.

© Соколов В. И.

© Андрійчук Н. Д.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ПГСА
ИСА и ЖКХ ЛНУ им. В. Даля Дроздом Г. Я.,
к.т.н., доц., зав. кафедрой ПС ДонГТИ Псюком В. В.*

Статья поступила в редакцию 06.10.2022.

**Andriychuk V. N., Doctor of Technical Sciences Sokolov V. I., Doctor of Technical Sciences
Andriychuk N. D. (IBA and HCS of LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, vlad19790401@gmail.com)
IMPROVING THE REGULATION QUALITY OF DRAW-IN AIR SYSTEM**

The paper considers the issue of substantiating the possibility of improving the processes of regulation of heating, ventilation and air conditioning systems using adaptive predictive control, improving the regulation quality of draw-in air system on its basis. The principle of control using a predictive model is described, the features of control using an MPC-controller are noted, the structure of the controller and the criterion for choosing the optimal values of the control signal are considered. The implementation of the MPC-approach is shown on the example of the draw-in air system VAV of the classroom. A block diagram has been developed to simulate the ventilation system in the Simulink environment of the MATLAB application software package, and a set of software tools Model Predictive Control Toolbox has been used to synthesize the MPC-controller. A study of transients in the VAV ventilation system was conducted, transients in a system without a regulator, with a PID-controller and an MPC-controller were compared. The comparison of the results showed that the use of the MPC-controller allows improving the processes of regulating the thermal regime in the room and improving the regulation quality of draw-in air system.

Key words: microclimate, regulator, ventilation system, temperature, transition process.

УДК 624.046

к.т.н. Псюк В. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, psukvv@gmail.com),
к.т.н. Антошина Т. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, tvantos@ukr.net),
Мерзляков И. А.
(ООО «НПЦ „Сваркон“», г. Алчевск, ЛНР, svarkon1@mail.ru,
Никушина И. А.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, nik1.ir@yandex.ru)

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГАЛЕРЕИ МОСТА У-4 КОКСОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ФИЛИАЛА № 1 «АМК» ООО «ЮГМК»

В статье приведены результаты оценки напряженно-деформированного состояния строительных конструкций галереи моста У-4 с учётом фактического технического состояния после длительного периода эксплуатации без надлежащего обслуживания. На основе полученных результатов предложены мероприятия по приведению строительных конструкций галереи в пригодное для нормальной эксплуатации техническое состояние.

Ключевые слова: *несущая способность, стропильная ферма, транспортная галерея, техническое состояние, мониторинг текущего состояния.*

Транспортерные галереи, предназначенные для перемещения сыпучих материалов, являются одним из наиболее распространенных видов транспортных коммуникаций на большинстве современных заводов различных отраслей промышленности. Предприятия чёрной и цветной металлургии, химической, энергетической, лёгкой и пищевой промышленности, промышленности строительных материалов, а также других отраслей народного хозяйства не могут обойтись без транспортерных галерей как наиболее функциональных транспортных коммуникаций сыпучих грузов.

При этом транспортерные галереи — одни из самых сложных в проектировании, возведении, эксплуатации и обслуживании сооружений, так как сочетание статических, динамических, а иногда аварийных нагрузок приводит к быстрому износу механизмов галерей, а также их несущих и ограждающих конструкций [1]. Выход их из строя влечёт за собой остановку сложных технологических процессов. Поэтому предотвращение выхода из строя галерей с

помощью обследований является актуальной темой.

Целью данной работы является определение максимальных усилий в конструкциях галереи с учетом изменений норм нагрузок от 2006 г., ослаблений проектных сечений элементов вследствие коррозии и других дефектов, а также проверка ослабленных сечений конструкций галереи на несущую способность.

Краткая конструктивная характеристика здания. Галерея моста У-4 с эстакадой № 3 была построена по проекту, разработанному институтом «ГИПРОКОКС» (г. Харьков) и предназначена для транспортировки углей от здания отделения предварительного дробления в здание закрытого склада углей. За время эксплуатации галереи моста У-4 (по проекту «УкраНИИпроектстальконструкция», г. Жданов, 1988 г.) была выполнена замена всех существующих строительных конструкций методом обстройки: замена металлоконструкций пролетных строений; установка новых опор для переопирания пролетных

строений (ферм); замена ограждающих конструкций; демонтаж всех существующих строительных конструкций.

Галерея моста У-4 (замененная) выполнена отапливаемой трехпролетной с консольным примыканием к эстакаде № 3. Угол наклона галереи $18^{\circ}20'14''$.

Проектные строения галереи по проекту приняты из металлических ферм (из прокатных профилей) решетчатого типа с параллельными поясами, развязанными между собой по верхним и нижним поясам прогонами, балками и связями, что образует единую жесткую пространственную систему. Опоры металлические сварные решетчатого типа из прокатных профилей. Опоры ОП2 и ОП3 — плоские, ОП1 — пространственная неподвижная.

Согласно проекту 11046-КМ «Комплекс коксовой батареи 9-бис. Техническое перевооружение. Замена строительных конструкций транспортной галереи У-4», выполненному в 1988 г. Ждановским комплексным отделом УкрНИИпроектстальконструкции, в качестве материала для поясов ферм пролетом 36 м несущих конструкций пролетных строений галереи У-4 принята сталь марки 09Г2с-6 с расчетным сопротивлением 315 МПа, для остальных элементов — сталь марки СтЗсп5 с расчетным сопротивлением 240 МПа.

Строительные конструкции галереи:

– фундаменты под колонны — монолитные железобетонные;

– стены — волнистые асбестоцементные листы в два слоя с утеплителем из минераловатных плит толщиной 80 мм;

– перекрытие и полы: покрытие пола — бетон М200 (по уклону), гидроизоляционный слой 10 мм, цементно-песчаная стяжка 20 мм, утеплитель (газобетон) 100 мм, ж. б. ребристые плиты перекрытия 140 мм;

– покрытие — волнистые асбестоцементные листы в два слоя с утеплителем из минераловатных плит 80 мм.

Внутри моста находится конвейер со следующими характеристиками: ширина ленты 1400 мм, скорость ленты 2,18 м/с,

производительность 800 т/ч, транспортируемый материал — уголь.

Галерея моста У-4 находится на территории углеподготовительного цеха, поблизости от коксовой батареи и тушильной башни, поэтому металлоконструкции, находящиеся на открытом воздухе, подвергаются атмосферному воздействию, воздействию окислов углерода, угольной пыли, сероводорода, сернистого ангидрида. Группа агрессивности газов по СНиП 2.03.11–85 — А; степень агрессивного воздействия среды («Методическим указанием по защите от коррозии строительных и технологических конструкций и коммуникаций лакокрасочными покрытиями» СТ8060, ГИПРОКОКС) — сильно-агрессивная.

Расчет конструкций галереи моста У-4 выполнялся с применением ПК ЛИРА [3] методом конечного элемента, основанного на методе перемещений.

При моделировании конструкций каркаса здания применялись следующие элементы:

– КЭ 4. Пространственный ферменный стержень. Применялся для моделирования элементов ферм, кроме верхних поясов, связей покрытия и перекрытия;

– КЭ 10. Пространственный стержень общего назначения. Применялся для моделирования ветвей опор, балок, а также верхних поясов ферм;

– КЭ 41, 42, 44. Треугольный, прямоугольный, четырехугольный соответственно элементы оболочки. Применялись для моделирования стенового ограждения и покрытия галереи. Общий вид конечно-элементной схемы указан на рисунке 1.

Жесткостные характеристики элементов задавались в соответствии с сечениями, определенными фактическими промерами поперечных сечений, а также с учетом уменьшения толщин вследствие коррозии. Вспомогательные элементы задавались в схеме с единичной жесткостью, чтобы исключить влияние на основные элементы схемы.

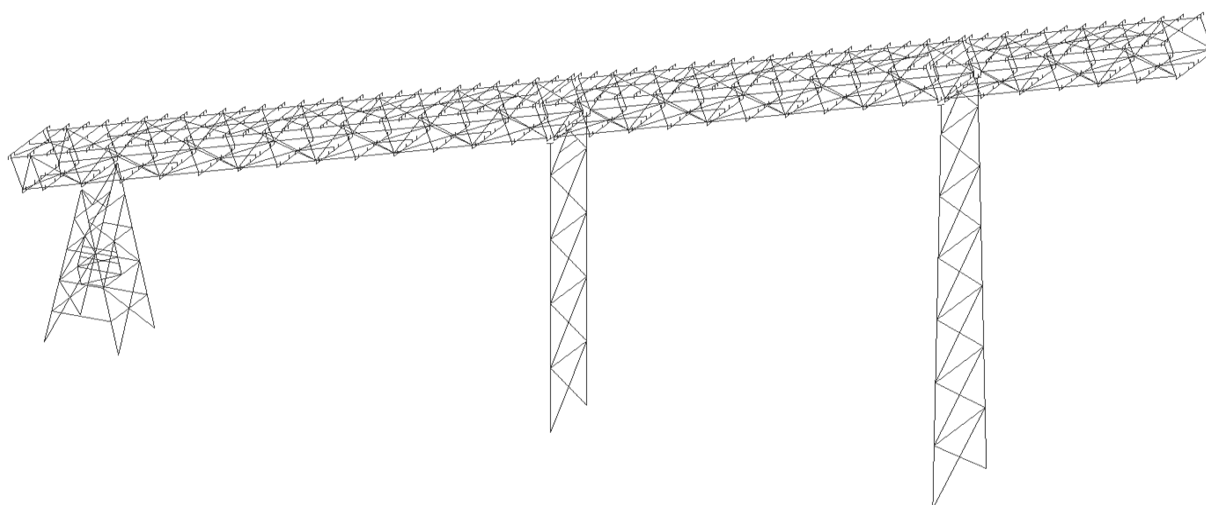


Рисунок 1 Вид пространственной конечно-элементной схемы галереи (вспомогательные элементы не показаны)

Условия закрепления: шарнирно-неподвижное закрепление для опор в уровне обреза фундамента; шарнирно-неподвижное закрепление нижних концов и шарнирно-подвижное закрепление верхних концов наклонных нижних поясов ферм к верхушкам опор.

Первоначально были смоделированы опорные узлы ферм по фактическим узлам галереи. В процессе расчета было выявлено, что второй и третий пролеты галереи представляют собой геометрически изменяемые схемы, расчет таких схем невозможен.

В опорные узлы модели были добавлены связи по нижним поясам ферм в соответствии с проектом, хотя по факту эти связи отсутствуют.

Также были смоделированы опорные узлы посередине пролета балок по нижним поясам смежных ферм с верхушками раскосов опор посредством КЭ10 с пластинчатым сечением, которое объединяет две смежные балки вдоль галереи.

При моделировании опорных узлов использовалось объединение перемещений узлов по трем или двум линейным направ-

лениям в зависимости от вида шарнирного закрепления.

Видоизменение расчетной схемы с фактической геометрически изменяемой на правильную показано на рисунке 2. Смоделированный опорный узел смежных ферм с опорой показан на рисунке 3.

Сбор нагрузок.

Постоянные нагрузки: выполнен сбор нагрузок на 1 м^2 покрытия, на 1 м^2 пола, на 1 м. п. стенового ограждения, на 1 м. п. стенового ограждения с окном.

Длительнодействующие нагрузки: расчетом предусмотрена нагрузка от пыли на 1 м^2 покрытия галереи 25 кг/м^2 , нагрузка от конвейера на 1 м. п. пола галереи 235 кг/м , нагрузка от транспортируемого материала (угольная шихта) и ленты на 1 м. п. пола галереи 187 кг/м .

Кратковременные нагрузки.

Снеговая нагрузка. Предельное расчетное и эксплуатационное расчетные значения снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия (конструкции) определялись в соответствии с действующими нормами ДБН В.1.2-2:2006 [1]. Варианты снеговых загрузок приведены на рисунке 4.

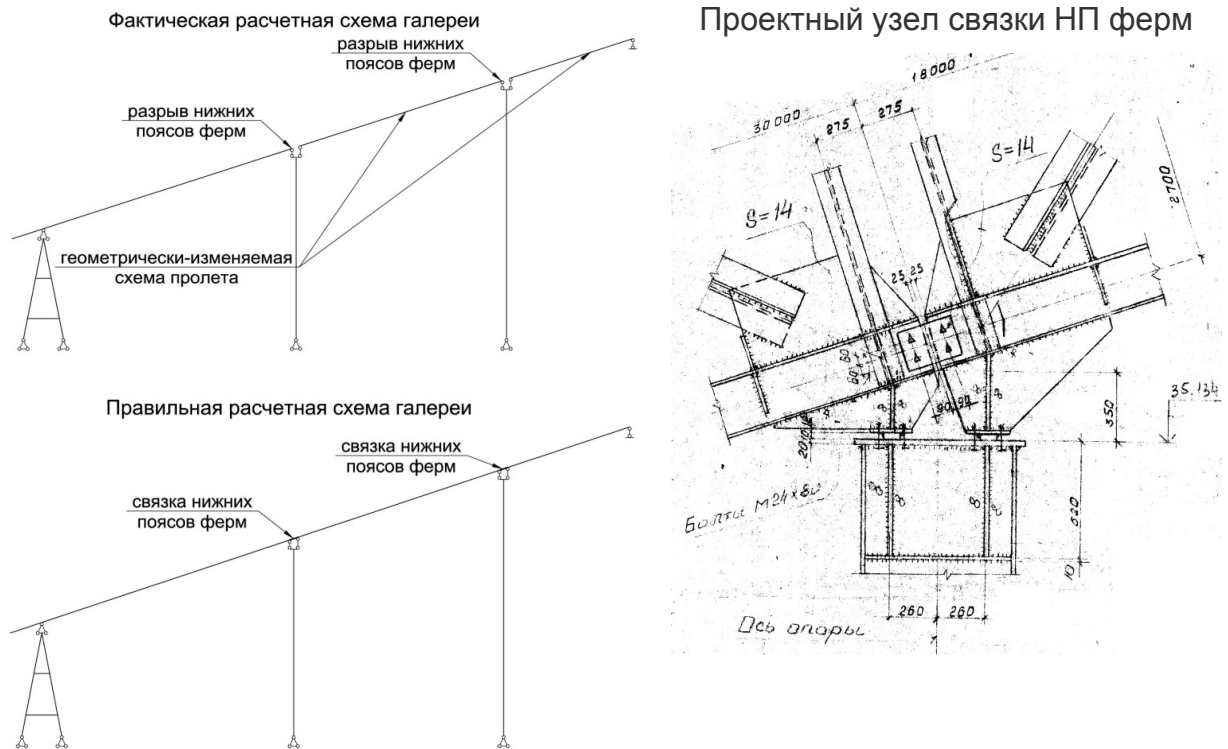


Рисунок 2 Упрощенная расчетная схема галереи

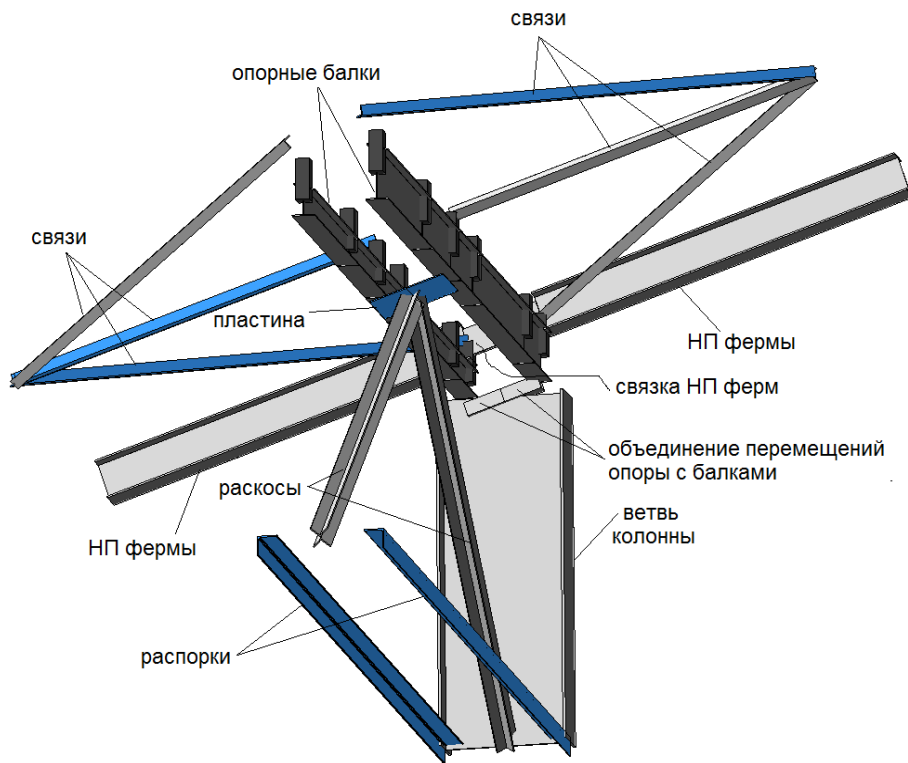


Рисунок 3 Опорный узел смежных блоков галереи, сформированный в расчетной схеме

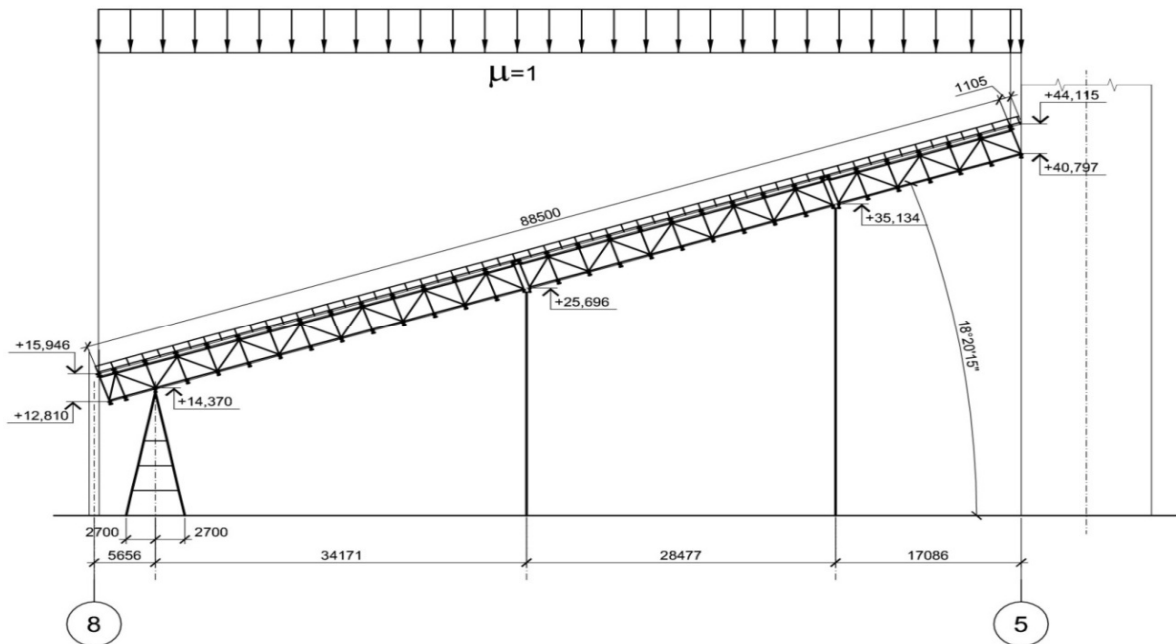


Рисунок 4 Варианты снеговых нагрузений

Ветровая нагрузка. Предельное расчетное и эксплуатационное расчетное значения ветровой нагрузки определялись в соответствии с действующими нормами ДБН В.1.2-2:2006 [1]. Варианты ветровых нагрузений приведены на рисунке 5.

Расчетом предусмотрена **полезная нагрузка** от веса людей и просыпи деталей на 1 м^2 пола 200 кг/м^2 .

Расчетные сочетания нагрузок.

В расчетной схеме галереи приняты следующие загрузки.

Загрузка № 1. Собственный вес конструкций. Постоянная.

Загрузка № 2. Длительнодействующая.

Загрузка № 3. Снеговая нагрузка.

Кратковременная.

Загрузка № 4. Ветровая нагрузка на стену ферм Ф1, 2, 3, I вариант. Кратковременная.

Загрузка № 5. Ветровая нагрузка на стену ферм Ф1', 2', 3', II вариант. Кратковременная.

Загрузка № 6. Полезная. Кратковременная.

Для расчетной схемы галереи приняты следующие варианты расчетных сочетаний нагрузок (РСН) с соответствующими коэффициентами сочетаний нагрузок.

РСН 1:

$$\text{№ } 1 \times 1 + \text{№ } 2 \times 0,95 + \text{№ } 3 \times 0,9 + \text{№ } 6 \times 0,9.$$

РСН 2:

$$\text{№ } 1 \times 1 + \text{№ } 2 \times 0,95 + \text{№ } 3 \times 0,9 + \\ + \text{№ } 4 \times 0,9 + \text{№ } 6 \times 0,9.$$

РСН 3:

$$\text{№ } 1 \times 1 + \text{№ } 2 \times 0,95 + \text{№ } 3 \times 0,9 + \\ + \text{№ } 5 \times 0,9 + \text{№ } 6 \times 0,9.$$

Результаты проверки пролетных строений и опор. Проверочный расчет сечений стержней элементов опор, связей и ферм выполнялся как для центрально-сжатых (растянутых) и внецентренно-сжатых (растянутых) элементов, а также изгибаемых элементов балок в соответствии с требованиями [2].

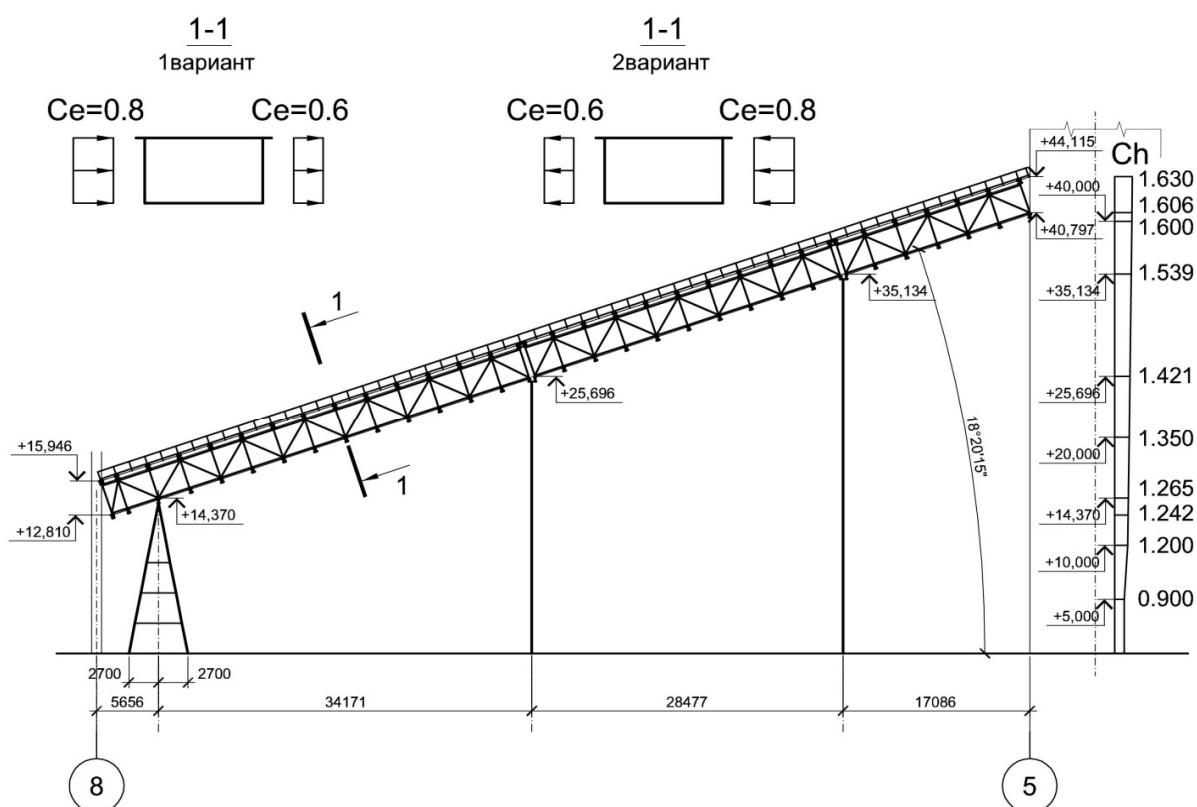


Рисунок 5 Варианты ветровых нагрузений

Расчет изгибаемых элементов выполнялся без учета или с учетом развития пластических деформаций в соответствии с типами сечений по п. 5.3.6 [2].

При расчете балок принят I класс сечения, предполагающий работу в пределах упругих деформаций.

Расчет на прочность балок в расчетных сечениях I класса необходимо выполнять по формулам [2]:

– при действии изгибающего момента M в одной из главных плоскостей:

$$\frac{M\gamma_n}{W_{n,\min}R_y\gamma_c} \leq 1. \quad (1.1)$$

– при действии поперечной силы Q , направленной параллельно срединной плоскости стенки:

$$\frac{QS_x\gamma_n}{J_x t_w R_s \gamma_c} \leq 1. \quad (1.2)$$

– при действии изгибающих моментов M_x и M_y в двух главных плоскостях:

$$\frac{M_x\gamma_n}{J_{xn}R_y\gamma_c} y \pm \frac{M_y\gamma_n}{J_{yn}R_y\gamma_c} x \leq 1, \quad (1.3)$$

где x и y — координаты рассматриваемой точки сечения относительно его главных осей.

Расчет на прочность элементов, подверженных центральному растяжению силой N , выполнялся по формуле [2]

$$\frac{N\gamma_n}{A_n R_y \gamma_c} \leq 1. \quad (1.4)$$

Расчет на устойчивость сплошностенчатых элементов, подверженных центральному сжатию силой N , выполнялся по формуле [2]

$$\frac{N\gamma_n}{\varphi A R_y \gamma_c} \leq 1. \quad (1.5)$$

Численные значения φ приведены в приложении Ж [2].

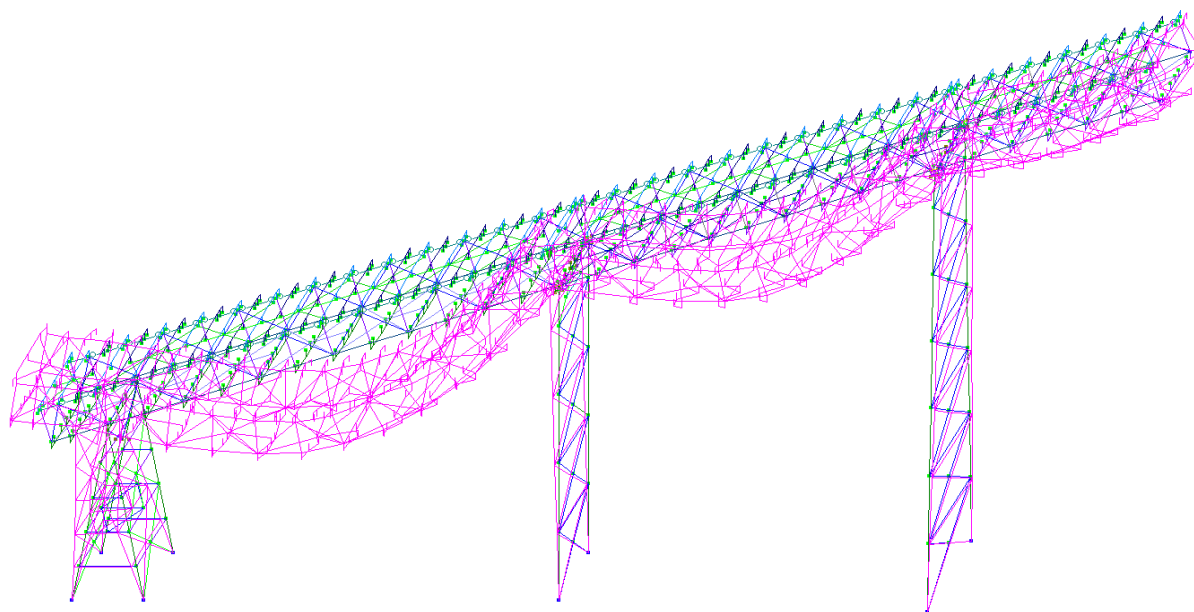


Рисунок 6 Деформированная схема галереи (масштаб деформаций сильно увеличен)

Проверочный расчет по деформациям.

Расчет перемещений узлов схемы галереи выполнялся в ПК Лира.

Ниже приведены рисунки исчерпания несущей способности элементов по первой группе предельных состояний (прочность и устойчивость) для пролетных строений и опор (рис. 7). На рисунках красным цветом выделены элементы, у которых перенапряжение свыше 100 %, розовым цветом показаны элементы, у которых исчерпание несущей способности находится в шкале 90–100 %.

Во всех пролетных строениях и опоре ОП1 присутствуют элементы, у которых напряжения свыше несущей способности, а также элементы, у которых напряжения приближены к несущей способности. А именно:

- фермы Ф1, Ф1', Ф3 — раскосы, ферма Ф2 — верхний пояс и раскос;
- балки и связи по нижним поясам ферм всех пролетов, причем в связях гибкость выше предельной;
- опора ОП1 — ветви.

В опоре ОП2 у верхней распорки гибкость выше предельной.

В опоре ОП3 гибкость ветвей в плоскости опоры между узлами решетки выше 80, поэтому ветви работают по деформированной схеме.

Выводы. В процессе длительной эксплуатации транспортной галереи, в результате воздействия химически агрессивной среды в условиях действующего предприятия коксохимического производства, произошла значительная коррозия элементов конструкций. Это привело к уменьшению расчетного сечения конструктивных элементов галереи (нижних поясов, стоек, раскосов и др.), что, в свою очередь, вызвало их перенапряжение, так как действующие нагрузки остались прежними.

В результате осмотра конструкций транспортной галереи при проведении оценки технического состояния, установлено, что проводившиеся в период эксплуатации ремонты были выполнены некачественно, с нарушением действующих норм проектирования. Особенно следует отметить дефекты сварных швов при усилении, а также выполнение антикоррозионного лакокрасочного покрытия без должной поверхностной подготовки.

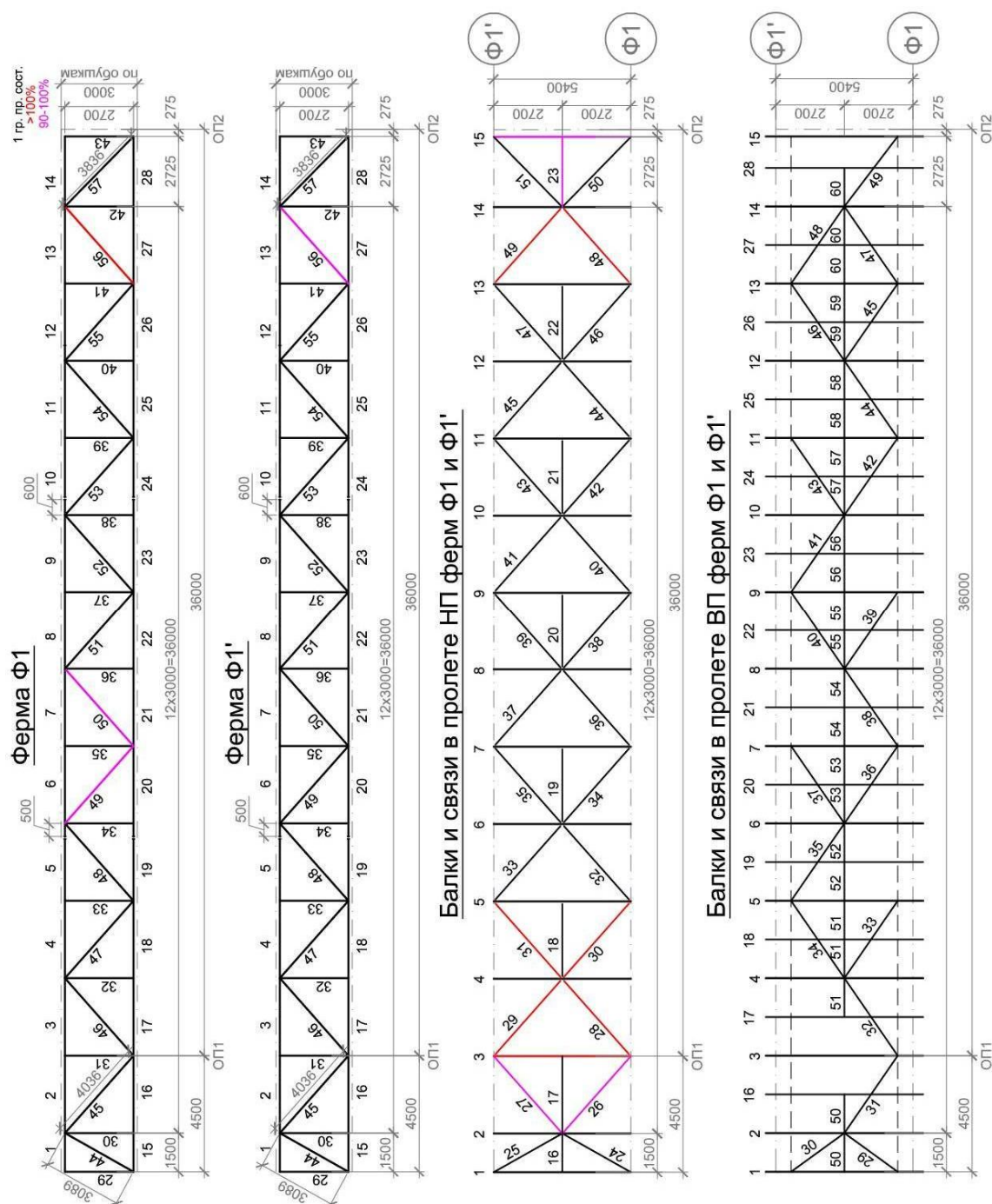


Рисунок 7 Исчерпание несущей способности элементов первого пролета

Рекомендации. Для обеспечения длительной и безаварийной работы транспортной галереи моста У-4 необходимо выполнить следующие мероприятия:

1. Для исключения геометрически изменяемой схемы работы галереи необходимо выполнить связки нижних поясов ферм.

2. Выполнить усиление элементов, у которых предел исчерпания несущей способности выше 100 %; рекомендуется также выполнить усиление элементов, у которых предел исчерпания несущей способности свыше 80–90 % в соответствии с проектом.

3. Уменьшить гибкость связей по нижним поясам ферм во всех пролетах и верхней распорки ОП2 путем образования крестового сечения в соответствии с действующими нормами.

4. Уменьшить гибкость ветвей опоры ОПЗ.

5. Выполнить антикоррозионную защиту металлических конструкций галереи.

Дальнейшим направлением исследований эксплуатируемых транспортных галерей в условиях действующих предприятий является разработка мероприятий по их безопасной эксплуатации с учетом действительного технического состояния, а также совершенствование технологических операций по восстановлению их эксплуатационных свойств.

Библиографический список

1. СП 43.13330.2012. Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85 / Госстрой России. — Введ. 2013-01-01. — М. : ФГУПЦПП, 2012. — 66 с.
2. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування : чинні з 2015-01-01. — К. : Мінрегіон України, 2014. — 199 с. — (Державні будівельні норми України).
3. ПК ЛИРА, версия 9. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. — К. : НИИАСС, 2002. — 147 с.
4. ДБН В.1.2-14-2009. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ : чинні з 2009-12-01. — К. : Мінрегіонбуд України, 2009. — 32 с.
5. ДСТУ Б В.2.6-193:2013. Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги проектування : чинний з 2014-01-01. — К. : Мінрегіон України, 2013. — 46 с. — (Державний стандарт України).
6. ДБН 362-92. Оцінка технічного стану сталевих конструкцій експлуатованих виробничих будівель та споруд : чинні з 1992-07-01. — К. : Держбуд України, 1993. — 46 с.
7. ДСТУ-Н Б В.1.2-16:2013. Визначення класу наслідків (відповідальності) та категорії складності об'єктів будівництва : чинний з 2013-09-01. — К. : Мінрегіонбуд України, 2013. — 47 с.
8. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування : чинний з 2007-01-01. — К. : Мінбуд України, 2006. — 10 с.

© Псюк В. В.
 © Антошина Т. В.
 © Мерзляков И. А.
 © Никишина И. А.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СА ЛГУ им. В. Даля Емец Е. В., к.т.н., доц., зав. каф. АДиСК ДонГТИ Бондарчук В. В.

Статья поступила в редакцию 01.06.2022.

PhD in Engineering Psiuk V. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR, psukvv@gmail.com), **PhD in Engineering Antoshina T. V.** (DonSTI, Alchevsk, LPR, tvantos@ukr.net), **Merzliakov I. A.** (ООО “SPC ‘Svarkon’”, Alchevsk, LPR, svarkon1@mail.ru), **Nikishina I. A.**

(LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, nik1.ir@yandex.ru)

ASSESSING THE STRESS-STRAIN STATE OF U-4 BRIDGE GALLERY STRUCTURES OF THE COKE-CHEMICAL PRODUCTION OF THE BRANCH № 1 “ALCHEVSK IRON-AND-STEEL WORKS” ООО “YuGMK”

The article presents the results of assessing the stress-strain state of U-4 bridge gallery structures, considering the actual technical condition after a long period of operating without proper maintenance. Based on the results obtained, measures are proposed to bring the gallery structures into a technical condition suitable for normal operating.

Key words: load-bearing capacity, pitched truss, transport gallery, technical condition, monitoring of the current condition.

УДК 691.32

*к.т.н. Сороканич С. В.,
Парамонова А. В.*

*(ИСА и ЖКХ ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР,
stas.sorokanich.82@mail.ru, anastasia2405@inbox.ru)*

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ (АЛЮМОШЛАКА И ОТРАБОТАННОГО ГОРЕЛОГО ПЕСКА) ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА

В данной статье исследованы характеристики техногенных отходов алюмошлака (АШ) и отработанного горелого песка (ОГП), а именно: химический состав, гранулометрический состав, радиоактивность.

Ключевые слова: *техногенные отходы, алюмошлак, отработанные формовочные смеси, отработанные горелые пески.*

Донбасс — это крупнейший промышленный регион, который насчитывает сотни промышленных предприятий топливно-энергетического комплекса, горнодобывающей, металлургической, химической промышленности, строительной отрасли. В результате деятельности промышленности на данный момент на территории Луганской Народной Республики накопилось около 1,5 млрд т отходов [1].

Современная промышленность стремится к развитию безотходных технологических процессов, а также широкому применению в производстве всевозможных отходов и вторичных продуктов. Наиболее перспективным направлением по освоению и применению техногенных отходов в производстве является строительная индустрия.

Существуют экологические проблемы, связанные с размещением техногенных отходов, в частности с алюмосодержащими отходами производства, в виде шламов, шлаков, минеральной части углей [2].

Одним из видов отходов, не утилизируемых сегодня, являются отходы алюминия. К ним относятся алюминиевая стружка, шлаки, образующиеся в процессе плавки вторичного алюминиевого сырья, и другие. При хранении этих отходов на открытых полигонах происходит выщелачивание ионов алюминия, повышенное со-

держание которого отрицательно сказывается на окружающей среде и наносит вред здоровью населения [3]. Однако они являются ценным сырьём для производства строительных материалов. Содержание большого количества оксида алюминия и других металлов в алюмошлаках позволяет использовать их в строительной индустрии, а именно при производстве цементных бетонов [4].

Основу алюмосодержащих шлаков составляет оксид алюминия Al_2O_3 — свыше 50 %. По своим физико-химическим и минералогическим свойствам шлаки близки к обогащенной бокситовой руде и могут служить сырьем при изготовлении цементов и бетонов [5]. На предприятиях металлургической и других отраслей промышленности образуются десятки тонн алюмосодержащих отходов, которые, в большинстве своем, направляются в отвалы, значительно ухудшая экологическую обстановку.

Отходы литейного производства — отработанный горелый песок, шлак и пыль из фильтрующих устройств (классифицируется как «опасные отходы») — занимают большую часть поступающих на свалки промышленных отходов.

Одной из проблем литейного производства является сложность утилизации твердых отходов техногенного характера. Ре-

шением этой проблемы является использование промышленных отходов или частичная замена привычных сырьевых материалов в строительной индустрии. Отработанные формовочные смеси, а именно пески, представляют собой пористый материал, благодаря чему его возможно использовать при производстве композиционных материалов на основе портландцемента как агент внутреннего ухода. Внутренний уход за бетоном осуществляется благодаря введению в состав бетона пористых компонентов, которые выполняют функцию «водных резервуаров» в структуре твердеющей цементной системы. Введение водонасыщенного компонента снижает давление в обезвоженных порах, заполняя их жидкостью и предотвращая их появление в пределах гидратирующего цемента [6–7].

Существующие способы переработки этих отходов не позволяют в полной мере решить задачи их использования и устранить экологические проблемы, связанные с их хранением. Поэтому актуальностью темы исследования является возможность применения алюмосодержащих отходов и отработанного горелого песка в строительной индустрии.

Целью работы является установление возможности использования техногенных отходов (алюмошлака и отработанного горелого песка) в качестве добавки и мелко-го заполнителя при изготовлении композиционных материалов на основе портландцемента.

Алюмосодержащий отход в исходном виде и в виде отсева представлен на рисунке 1.

В результате сушки и отсева алюмошлака был получен порошок серого цвета, насыпная плотность которого составила 1150 кг/м^3 . Химический состав отсева алюмошлака представлен в таблице 1.

Зерновой (гранулометрический состав) отсева алюмошлака представлен в таблице 2.

В результате экспериментальных исследований был проведен сравнительный

анализ для установления необходимости предварительного измельчения алюмосодержащей добавки. Для этого было отобрано две просушенные пробы алюмошлака, равные по массе. Первая проба предварительно измельчалась и просеивалась, вторая проба не измельчалась и просеивалась. В качестве контрольного был принят состав без добавления алюмошлака. Составы цементного камня были испытаны на прочность при сжатии по истечении двухсуточного возраста. Результаты испытаний приведены в таблице 3.



а



б

Рисунок 1 Алюмосодержащий отход — алюмошлак: а — в исходном состоянии; б — отсев алюмошлака

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

Таблица 1
Химический состав отсева алюмошлака

Оксиды	Содержание, %
SiO ₂	7,48
Al ₂ O ₃	57,14
Fe ₂ O ₃	3,52
TiO ₂	0,384
CaO	4,7
MgO	2,56
Na ₂ O	2,92
K ₂ O	0,39
P ₂ O ₅	0,009
SO ₃	0,08
Потеря массы при прокаливании	17,97

Таблица 2
Гранулометрический (зерновой) состав отсева алюмошлака

Алюмошлак	Содержание фракций, %
0,10 мм	0,70
0,08 мм	1,40
0,071 мм	44,15
0,063 мм	3,60
0,050 мм	43,35
0,040 мм	0,80
Менее 0,040 мм	6,00

Так как результаты между измельченной и неизмельченной добавкой алюмошлака разнятся незначительно, а на помол алюмошлака необходимы дополнительные ресурсы, для дальнейших экспериментальных исследований было принято ис-

пользовать неизмельченную просеянную добавку алюмошлака.

Отработанный горелый песок представлен на рисунке 2.

Крупнотоннажные отходы литейного производства, представленные в виде отработанного горелого песка, включают в себя: SiO₂ (80–85 масс. %), CaO (5–7 %), Al₂O₃ (4–6 %) [7]. Благодаря тщательному химическому и гранулометрическому контролю отработанные горелые пески характеризуются стабильностью состава.

Химический состав отработанного горелого песка представлен в таблице 4.

Гранулометрический (зерновой) состав отработанного горелого песка представлен в таблице 5.

Физико-механические показатели отработанного горелого песка представлены в таблице 6.

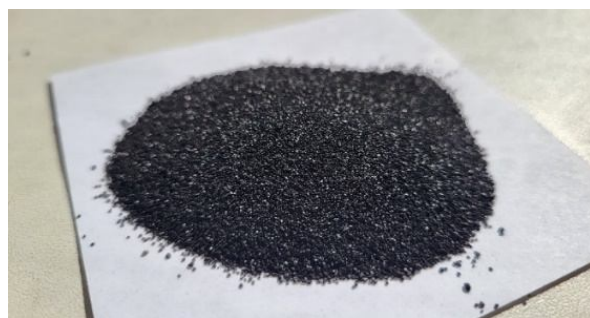


Рисунок 2 Отработанный горелый песок (отход формовочной смеси)

Таблица 3
Прочность цементного камня с неизмельченной добавкой алюмошлака и с предварительно измельченной добавкой алюмошлака

Компоненты цементной пасты, гр. (%)	Состав №		
	К	1	1'
Портландцемент (ПЦ)	400	400	400
Суперплатификатор(СП-1)	2,4 (0,6)	2,4 (0,6)	2,4 (0,6)
Алюмошлак (АШ)	–	8 (2)	8 (2)
Вода (В, мл)	100	102	102
Водотвердое отношение (В/Т)	0,25	0,25	0,25
Прочность (R _{сж} , МПа)	44	55	53

Таблица 4

Химический состав отработанного горелого песка

Формовочный горелый песок	Норма	Фактически
Определение массовой доли сульфидной серы, %	Не более 0,05	0,046
Определение массовой доли диоксида кремния, %	Не менее 99,0	99,44
Определение массовой доли оксида железа, %	Не более 0,20 (очень низкое)	0,04
Потери массы при прокаливании, %	Не более 0,2 (низкие)	0,14
Определение массовой доли влаги, %	Не более 0,5 (сухое)	0,01
pH	Свыше 7 (щелочные)	7,35

Таблица 5

Гранулометрический (зерновой) состав отработанного горелого песка

Размер отверстий сит, мм	Частные остатки, %	Полные остатки, %
2,5	0,0	0,0
1,25	0,04	0,04
0,63	0,28	0,32
0,315	71,51	71,89
0,16	26,77	98,66
<0,16	1,34	100

Таблица 6

Физико-механические показатели отработанного горелого песка

№ п/п	Наименование показателей	Ед. изм.	Результаты
1	Насыпная плотность	кг/м ³	1294,1
2	Влажность	%	0,1
3	Содержание пылевидно-глинистых частиц	%	5,7
4	Содержание глины в комках	%	0
5	Модуль крупности	%	1,71

Класс использования продукции отработанного горелого песка определялся с использованием метода гамма-спектрометрии, с помощью спектрометрической установки МКС-01А «МУЛЬТИРАД» (зав. № 1630), представленной на рисунке 3 [8].

Результаты измерений представленной пробы ОГП приведены в таблице 7.

Погрешность определения $\delta = \pm 10\%$, удельная эффективная активность составила $A_{\text{эф.м.}} = 8,98 \pm 4,04$.

Исследованный материал — отработанный горелый песок (участок недр «Водоток», Краснодарский район, ЛНР) — относится к I классу использования по радиационному фактору согласно ГН 6.6.1.-6.5.001-98 «Нормы радиационной безопасности Украины» и ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов».



Рисунок 3 Спектрометрическая установка МКС-01А «МУЛЬТИРАД» (зав. № 1630)

Таблица 7

Результаты испытаний по определению удельной эффективной активности естественных радионуклидов в строительных материалах

№ навески	Удельная активность БК/кг		
	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
25/2	4,25±2,33	1,44±2,59	24,8±21,0
26/2	4,82±2,33	0,75±1,83	8,90±20,4
27/2	8,30±2,83	1,28±1,98	10,8±23,1
28/2	7,42±2,43	1,69±1,75	24,8±22,3
29/2	4,82±2,38	1,48±1,97	9,30±22,6

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. В результате исследований определены исходные характеристики техногенных отходов алюмошлака и отработанного горелого песка, а именно: химический состав, гранулометрический состав.

2. Исследуемый материал — отработанный горелый песок — относится к I классу использования по радиационному фактору и может использоваться для всех видов строительства без ограничений.

3. Использование техногенных отходов алюмошлака и отработанного горелого

песка при производстве строительных материалов позволит улучшить экологическую обстановку региона и снизить нагрузку на окружающую среду.

Результаты полученных исследований подтверждают возможность использования техногенных отходов при производстве композиционных материалов на основе портландцемента. Использование комплексной добавки алюмошлака и отработанного горелого песка позволит получить эффективные быстротвердеющие тяжелые цементные бетоны для ремонтно-восстановительных работ.

Библиографический список

1. Дрозд, Г. Я. *Экологическая безопасность Донбасса [Текст] : учебное пособие / Г. Я. Дрозд. — Луганск : Ноулидж, 2021. — 438 с.*

2. Карпова, Н. Ю. *Оценка использования алюмосодержащих отходов в производстве строительных материалов [Текст] / Н. Ю. Карпова, А. В. Шаманова, Г. М. Батракова // Вестник ПНИПУ. — 2016. — № 3. — С. 49–61.*

3. Тужилин, А. С. *Физико-химические и технологические исследования комплексной переработки алюминийсодержащих отходов: стружки, шлака, гидроксидного осадка [Текст] : автореф. ... дис. канд. техн. наук : 05.16.02 / Тужилин Алексей Сергеевич ; Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН. — М. : Интерконтакт Наука, 2012. — 21 с.*

4. Степанов, С. В. *Комплексный ускоритель твердения цементных бетонов на основе гальванического алюмошлама [Текст] : автореф. ... дис. канд. техн. наук : 05.23.05 / Степанов Сергей Викторович ; Казанский государственный архитектурно-строительный университет. — Казань : ПМО КГАСУ, 2012. — 20 с.*

5. Волочко, А. *Использование отходов переработки алюминиевых сплавов (стружка, шлаки) в производстве [Электронный ресурс] / А. Волочков, И. Белов // Архитектурно-строительный портал. — Режим доступа: <https://ais.by/story/743>.*

6. Шалевская, И. А. *Исследование возможности утилизации отходов формовочных смесей [Текст] / И. А. Шалевская, Ю. И. Гутько // Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии : сборник научных трудов. — Краматорск : Изд-во ДГМА, 2011. — С. 169–173.*

7. Лахтарина, С. В. *Легкие высокопрочные бетоны с повышенным коэффициентом конструктивного качества [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Лахтарина Сергей Викторович ; Донбасская национальная академия строительства и архитектуры. — Макеевка, 2016. — 163 с.*

8. *ТЦ Поиск [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://tcpoisk.ru/catalog/radiation-control/catalog/1539-spektrometricheskij-kompleks-mul-tirad-s-po-progress>.*

© Сороканич С. В.

© Парамонова А. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ПС ДонГТИ Псюком В. В.,
к.т.н., доц. каф. ПСО ЛГАУ Скотаренко В. В.**

Статья поступила в редакцию 29.09.2022.

PhD in Engineering Sorokanich S. V., Paramonova A. V. (*IBA and HCS of LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, stas.sorokanich.82@mail.ru, anastasia2405@inbox.ru*)

CHARACTERISTICS OF TECHNOGENIC WASTE (ALUMINUM SLAG AND SPENT BURNT SAND) FOR THE PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON PORTLAND CEMENT

In this article, the characteristics of technogenic waste of aluminum slag (AS) and spent burnt sand (SPS) are studied, namely: chemical composition, granulometric composition, radioactivity.

Key words: *technogenic waste, aluminum slag, spent molding mixtures, spent burnt sands.*

УДК 624.138.24

Збицкая В. В.
(ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, ki1ri1ch@mail.ru),
к.т.н. Псюк В. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ БУРОИНЪЕКЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

В данной работе выполнен анализ изменения свойств грунтов при эксплуатации строительных объектов, обоснована возможность упрочнения таких грунтов с помощью буроинъекционной технологии.

Ключевые слова: *буроинъекционная технология, упрочнение, грунт, напряженно-деформированное состояние, глубина сжимаемой толщи, влажность грунта, уровень грунтовых вод, разуплотнение грунта.*

Анализ способов упрочнения неустойчивых оснований позволяет сделать вывод, что к настоящему времени разработано и внедрено большое количество способов, позволяющих решать различные инженерные задачи, а именно: уплотнение вибрационными механизмами; трамбовка; укатка; устройство песчаных, грунтовых и известковых свай; виброуплотнение; понижение уровня подземных вод; внешняя пригрузка; цементация; термическое закрепление; глинизация; силикатизация; закрепление электроосмосом; известкование; электросиликатизация; закрепление синтетическими смолами; замораживание. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки, рекомендуется для определенных грунтовых условий и производственных возможностей его выполнения, т. е. имеет ограниченное применение.

Сегодня одними из наиболее перспективных способов усиления грунтов основания фундаментов зданий и сооружений, в том числе реконструируемых и восстанавливаемых, являются способы, которые базируются на использовании буроинъекционных свай. Накоплен большой практический опыт их использования, разработаны многочисленные рекомендации.

В последние годы в практике усиления грунтов оснований все шире используют

буроинъекционные сваи, как вертикальные, так и наклонные. К настоящему времени такими сваями, сооруженными с применением напорной инъекции раствора в режиме гидроразрыва, усилены более тысячи оснований значимых памятников архитектуры, промышленных и гражданских сооружений.

Инъекция раствора в режиме гидроразрыва, в отличие от режима пропитки, может применяться в различных грунтовых условиях, в том числе в песчаных, просадочных и пылевато-глинистых грунтах, с целью армирования массивов для повышения несущей способности, улучшения свойств грунта, а также для прекращения осадков и деформаций объектов, вблизи которых ведутся геотехнические работы (проходка тоннелей, устройство котлованов, строительство новых заглубленных сооружений) [1].

Инъекционное упрочнение грунтов в режиме гидроразрыва впервые было предложено в середине 50-х годов XX века французской фирмой Soletanche. Гидроразрыв — это процесс, при котором при достижении определенного давления в зоне нагнетания формируются полости разрывных нарушений, которые при заполнении их связующей композицией создают разветвленный армирующий каркас, при

правильном производстве инъекционных работ значительно повышающий устойчивость грунта [2].

Целью работы является обоснование применения буроинъекционной технологии при упрочнении грунтов оснований эксплуатируемых строительных объектов.

Цель достигалась решением следующих **задач**:

– анализ изменения свойств грунтов при эксплуатации строительных объектов;

– обоснование возможности упрочнения грунтов оснований эксплуатируемых строительных объектов с помощью буроинъекционной технологии.

Объект исследования — грунты оснований эксплуатируемых строительных объектов.

Предмет исследований — буроинъекционная технология упрочнения грунтов основания.

Методика исследований — анализ литературных и нормативных источников; аналитическое исследование изменения свойств грунтов при эксплуатации строительных объектов.

Суть способа закрепления грунтов инъекцией растворов в режиме гидроразрыва заключается в управляемой поинтервальной по высоте инъекции раствора в грунт под высоким давлением через установленную в скважину перфорированную клапанную трубу или манжетную колонну. Труба по длине с определенным интервалом имеет отверстия, перекрытые с внешней стороны манжетами. Устройство трубы позволяет проводить инъекцию раствора на строго определенном уровне скважины. Манжетные колонны устанавливаются после забуривания скважин на проектную глубину. Пространство между трубой и стенами скважины заполняют цементной или глиноцементной суспензией. После схватывания суспензии образуется обойма, надежно связывающая трубу с грунтом и препятствующая выходу инжецируемых растворов по контуру между трубой и грунтом. Инъекция раствора производится

путем разрыва обоймы на заданном уровне скважины [3].

При изготовлении буроинъекционной сваи вокруг нее в грунте образуются разнонаправленные каналы гидроразрыва. В результате чего в грунте формируется система из инъекционной трубы и цементных уширений. Основными преимуществами таких свай являются: высокая скорость и низкая трудоемкость их выполнения; применение буроинъекционных свай исключает большой объем земляных работ, обеспечивает твердение бетона даже при отрицательных температурах.

Буроинъекционные сваи успешно используются не только при армировании грунта для улучшения его свойств и повышения несущей способности массива, но и при усилении оснований и фундаментов при необходимости стабилизации незатухающих осадок; изменении конструктивной схемы здания с перераспределением нагрузок на грунты либо догружение фундаментов; устройстве отдельностоящих фундаментов в зоне примыкания к существующему зданию в случаях, когда, например, опасна динамика от погружения готовых свай; анкеровке подпорных стен; превентивном усилении грунтов оснований существующих зданий и сооружений и др.

Столь широкая применяемость способа буроинъекционного усиления и успешная его реализация в условиях слабых и других грунтов доказывает перспективность данной технологии.

Технология сооружения таких свай известна и хорошо отработана. Однако постоянно растущие нагрузки, увеличение темпов строительства, снижение стоимости СМР вызывают необходимость совершенствования и дальнейшего развития технологии сооружения, методики проектирования параметров и нормативных документов для расчета несущей способности буроинъекционных свай. Многочисленные научные исследования и практический опыт эксплуатации промышленных и гражданских объектов показали, что грунты оснований

претерпевают сложные процессы во времени и подвержены изменениям свойств под влиянием различных геологических и техногенных факторов [4–7].

Установлено, что в процессе длительной эксплуатации строительных объектов в основаниях:

- происходят изменения напряженно-деформированного состояния;
- проявляются изменения глубины сжимаемой толщи грунта;
- происходит повышение влажности грунтов и подъем уровня грунтовых вод;
- наблюдается ухудшение водно-физических свойств и разуплотнение грунтов основания.

Наряду с уплотнением грунта в основании происходят и более сложные процессы, приводящие к изменению прочностных свойств грунта, что резко выражается в зависимости от времени действия нагрузки. Исследование природы деформаций песчано-глинистых грунтов показывает, что их прочность определяется прочностью межчастичных связей частиц грунта. Эти связи рассматриваются как сцепление, которое разделяется на две части. Часть сцепления, которая отображает способность частиц грунта вступать во взаимодействие между собой вследствие проявления молекулярных сил, называют первичным сцеплением. Вторая часть сцепления показывает суммарное влияние на прочность грунта многообразных процессов изменения физического состояния, минералогического и химического состава грунта, протекающих на стадии диагенеза и называется сцеплением упрочнения. Именно эту часть сцепления следует рассматривать на стадии формирования искусственного основания.

Обычно в практике проектирования новых сооружений грунты оснований рассматриваются в статическом состоянии и выявленные при изысканиях свойства грунтов считаются неизменными.

Однако известно, что после возведения зданий и сооружений состояние грунтов

значительно изменяется во времени эксплуатации объектов. Это указывает на необходимость строгого соблюдения правил эксплуатационного поддержания или реконструкции оснований.

Устройство фундаментов и прокладка коммуникаций нарушают гидрогеологические условия площадки застройки, происходит обжатие грунтов оснований нагрузкой от сооружения, что изменяет их физико-механические свойства.

Следовательно, в основании сооружений происходят изменения: естественного напряженного состояния грунта под влиянием дополнительного давления; природного сложения грунтов; гидрогеологического режима участка. В отличие от естественных, эти изменения в грунтах оснований следует относить к техногенным и осуществлять их прогнозирование на стадии проектирования и сооружения основания объекта.

Наряду с этим глубина сжимаемого массива грунта под фундаментом также претерпевает изменения. В настоящее время давление грунтов основания и деформацию его слоев определяют по теории линейно-деформируемого пространства. Однако существует целый ряд новых методов расчета сжимаемой толщи грунта с учетом временного фактора. [6]. Самое широкое распространение получил метод, согласно которому граница сжимаемой толщи находится на глубине, где выполняется условие

$$p_z \leq 0,1p_0, \quad (1)$$

где p_z — дополнительное давление на глубине от подошвы фундамента;

p_0 — дополнительное давление на уровне подошвы фундамента.

Однако исследования фактической глубины сжимаемой толщи в основании фундаментов показали следующее:

- для полутвердых и тугопластичных суглинков сжимаемая толщина не превышает $2,2b$. Ее фактическая глубина возрастает пропорционально увеличению ширины подошвы фундаментов b ;

– чем больше глубина заложения подошвы фундамента, тем меньше глубина фактически сжимаемой толщи;

– фактическая глубина деформируемой толщи пропорциональна давлению; для жилых и общественных зданий (давление до 0.3 МПа) эта зависимость линейная.

Влажность грунтов основания жилых и особенно промышленных районов по истечении некоторого времени после строительства повышается. Это явление связано с уплотнением застройки, покрытием больших площадей асфальтом, озеленением, нарушением естественного сложения грунтов при устройстве фундаментов, техногенными утечками и т. д. Нарушения сложившегося динамического равновесия в водном балансе в связи с застройкой территории, как правило, приводит к подъему уровня грунтовых вод, что отрицательно сказывается на свойствах грунтов [5, 6, 8].

Отметим, что, когда напластования грунтов не обладают хорошей водопроницаемостью, происходит подтопление территории, сопровождающееся деформациями зданий и сооружений. Важную роль здесь играют не только утечки из водонесущих коммуникаций, но и устройство водоёмов, каналов, накопителей и другие ирригационные мероприятия.

Повышение уровня грунтовых вод ведет к разуплотнению грунтов, что вызывает изменения коэффициента пористости и коэффициента фильтрации.

Модуль деформации, например, суглинков при обводнении снижается в 1,5–2 раза, а их сцепление снижается в 2–3 раза, угол внутреннего трения изменяется на 10–15°. Поэтому грунты основания, обладавшие достаточно высокой несущей способностью и низкой деформативностью при естественной влажности, после подтопления превращаются в слабые разуплотненные грунты. Естественно, что в этих условиях фундаменты зданий проявляют повышенные деформации вплоть до разрушения [4, 9].

Под действием геологических или техногенных процессов грунты оснований

могут разуплотняться. К таким процессам относятся, например, суффозия, карстообразование, подъем уровня грунтовых вод. Этот факт подтверждается на практике при реконструкции оснований.

Разуплотнение грунта представляет собой физический процесс уменьшения его скелетной части. Причем процесс разуплотнения грунта имеет нарастающий характер, вплоть до полного разрушения минерального скелета грунта. При этом в зоне разуплотнения наблюдается дефицит объемного веса скелета грунта:

$$\Delta\gamma_d = \Delta\gamma_{d_0} - \Delta\gamma_{d_1}, \quad (2)$$

где $\Delta\gamma_{d_0}, \Delta\gamma_{d_1}$ — объемный вес скелета грунта до и после разуплотнения соответственно.

Поэтому разуплотненный (или деконсолидированный) грунт характеризуется коэффициентом деконсолидации

$$k_d = \frac{\Delta\gamma_{d_0}}{\Delta\gamma_{d_1}}. \quad (3)$$

Коэффициент деконсолидации характеризует степень разуплотнения грунта, т. е. при $k_d > 1$ свойства грунта не удовлетворяют нормальной эксплуатации инженерного объекта и приводят к аварийным ситуациям. Очевидно, что коэффициент деконсолидации грунта имеет непосредственную связь со всеми его свойствами. Например, изменение пористости грунта может быть выражено через коэффициент пористости

$$e_2 = \frac{\gamma_s \cdot k_d}{\gamma_{d_0}} - 1, \quad (4)$$

где γ_s — удельный вес частиц грунта.

Таким образом, за счет разуплотнения в грунте происходит образование дополнительной пустотности, а межчастичные связи ослабевают. Это позволяет выполнить инъекцию цементирующего раствора в режиме гидрорасчленения и восстановить начальную плотность грунта, т. е. обеспечить условие

$$k_{d_0} = k_{d_1}. \quad (5)$$

Если принять грунт изотропным, то процесс инъекции характеризуется радиусом и мощностью заходки h_1 . Поэтому суммарная мощность полости, заполненной раствором,

$$h_3 = h_1 \left(\frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} \right). \quad (6)$$

Следовательно, условие достижения начальной плотности грунта за счет инъекционной консолидации имеет вид

$$h_3 = h_1 \left(1 - \frac{k_{d1}}{k_{d0}} \right), \quad (7)$$

где k_{d1} — коэффициент деконсолидации, соответственно, консолидированного и разуплотненного грунтов.

Это означает, что разуплотненные грунты основания могут реконструироваться инъекционным способом.

Анализ изменения свойств грунтов при эксплуатации строительных объектов по-

зволяет сделать вывод, что под влиянием различных геологических и техногенных факторов в основаниях происходят изменения напряженно-деформированного состояния, появляются изменения глубины сжимаемой толщи грунта, происходит повышение влажности грунтов и подъем уровня грунтовых вод, наблюдается ухудшение водно-физических свойств и разуплотнение грунтов основания.

Разуплотненные грунты основания могут реконструироваться инъекционным способом, который обеспечивает уплотнение грунта и повышение его прочности за счет формирования искусственных жесткокристаллических межчастичных связей.

Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование методики расчета параметров буроинъекционной технологии упрочнения грунтов оснований фундаментов.

Библиографический список

1. Пат. 22454428. Российская Федерация, МПК7 E 02 D 31/8. Способ возведения подземных сооружений в зоне городской застройки [Текст] / В. П. Петрухин, О. А. Шулятьев, О. А. Мозгачева ; заявитель и патентообладатель ГФУП «Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н. М. Герсеванова». — № 2002121806/03 ; заявл. 15.08.02 ; опубл. 27.01.05, Бюл. № 3. — 1 с.
2. Инъекционное упрочнение горных пород [Текст] / Ю. З. Заславский [и др.]. — М. : Недра, 1984. — 177 с.
3. Ермолаев, В. А. Закрепление оснований зданий и сооружений методом гидроразрыва при неоднократном инъектировании [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Ермолаев Вадим Александрович ; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. — СПб., 2013. — 166 с.
4. Диагностика технического состояния жилых зданий [Текст] : монография / Н. П. Куркин, М. С. Розенфельд, А. Г. Неверов, М. Н. Волошко ; под ред. Н. П. Куркина. — Луганск : Янтарь, 2012. — 368 с.
5. Рекомендации по ликвидации аварий жилых зданий и объектов социального назначения [Текст] / П. Н. Должиков [и др.]. — Донецк : Норд-пресс, 2014. — 52 с.
6. Коновалов, П. А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий [Текст] / П. А. Коновалов. — М. : Стройиздат, 1988. — 287 с.
7. Леденев, В. В. Предупреждение аварий [Текст] / В. В. Леденев, В. И. Скрылев. — Тамбов : ТГТУ, 2000. — 278 с.
8. Добромыслов, А. Н. Анализ аварий промышленных зданий и инженерных сооружений [Текст] / А. Н. Добромыслов // Промышленное строительство. — 1996. — № 9. — С. 9–10.

9. Должиков, П. Н. Исследование параметров и процесса тампонажа зон разуплотнений горного массива [Текст] / П. Н. Должиков, В. Д. Рябичев, Д. В. Пронский // Науковий вісник НГУ. — 2004. — № 1. — С. 35–37.

© Збицкая В. В.

© Псюк В. В.

Рекомендована к печати к.геол.н., доц., зав. каф. СИА ЛГУ им. В. Даля Горовой Н. А., к.т.н., доц. каф. ПС ДонГТИ Емец Е. В.

Статья поступила в редакцию 28.09.2022.

Zbitskaia V. V. (LSU named after V. Dahl, Lugansk, LPR, ki1ri1ch@mail.ru), **PhD in Engineering**

Psiuk V. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

JUSTIFICATION OF USING THE DRILLING INJECTION TECHNOLOGY IN STRENGTHENING THE SOILS OF BASES OF THE OPERATED CONSTRUCTION FACILITIES

In this paper, the analysis of changes in the properties of soils during the operation of construction facilities is carried out, the possibility of hardening such soils using drilling injection technology is substantiated.

Key words: *drilling injection technology, hardening, soil, stress-strain state, depth of compressible thickness, soil moisture, groundwater level, soil decompression.*

**МАШИНОСТРОЕНИЕ
И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**MECHANICAL ENGINEERING
AND MACHINE SCIENCE**

УДК 669:628.16.06

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

ПРЯМОТОЧНЫЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ С ЭЖЕКЦИОННОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ШЛАМА

Дано обоснование актуальности и выполнен критический анализ применения гидродинамических фильтров (ГД-фильтров). Показаны их конструктивные достоинства и обсуждены недостатки. Сформулированы требования к ГД-фильтрам и предложены критерии их экономической и технической эффективности. Рассмотрены конструкции и работа современных ГД-фильтров, в том числе нового технического уровня. Проведено сравнение технических показателей существующих и новых ГД-фильтров, рассмотрены возможности заметного их улучшения. Предложена новая конструкция прямоточного центробежного ГД-фильтра с эжекционной рециркуляцией шлама, дано описание принципов его работы. Особое внимание уделено принципиально новому способу удаления шлама, основанному на инжекторном и эжекторном струйных насосах в шламолушнике, создающих рециркуляцию шлама. Даны расчетные показатели работы завихрителя входного потока и оценены условия очистки жидкости за счет центробежных сил.

Ключевые слова: *фильтр, гидродинамическая очистка, фильтроэлемент, тонкость очистки, критерии эффективности фильтра, прямоточность потока, обтекатель, завихритель, профиль лопаток завихрителя, грязевой поток, шлам, шламолушник, рециркуляция шлама, эжекция и инжекция шлама.*

1 Актуальность и цель исследований

Работа любой отрасли промышленности, особенно горной, связана с необходимостью применения гидравлики и смазочных устройств. При этом гидравлические рабочие жидкости и смазки должны отвечать строго регламентированным требованиям, из которых к числу первоочередных относятся их чистота и уровень загрязненности. Повышение уровня загрязненности в 1,5–2 раза уменьшает ресурс работы гидроустройств в 4–8 раз. В итоге загрязненность смазочных и рабочих жидкостей — причина 60–80 % аварийных остановок промышленного оборудования [1]. Поэтому последний период развития техники сопровождается бурным совершенствованием фильтрационной индустрии и появлением новых областей микро-, ультра- и нанопермации.

Источники и интенсивность появления загрязнений рабочих и смазочных жидкостей весьма разнообразны [2]: изготовление и сборка машин и устройств; заправка и обслуживание гидросистем; износ дета-

лей, омываемых жидкостью; разборка и сборка машин и агрегатов при их ремонтах и др. Стремление поддержания концентрации и размеров механических примесей в допустимых пределах в течение всего срока службы машины привело к разработке разнообразных конструкций фильтров, которые являются центральным элементом систем гидроочистки.

Там, где необходимо выполнять очистку больших объемов жидкости, что часто возникает в горной, металлургической, химической и других отраслях промышленности, все большее распространение получают гидродинамические (ГД) фильтры большой производительности (2000–2500 м³/час и более) [3]. Попутно заметим, что хотя термин «гидродинамические» фильтры технически мало обоснован и не вполне удачен, но тем не менее ввиду его распространенности нами используется в дальнейшем.

Заметный вклад в теорию и практику очистки жидкостей и особенно в разработку новых конструкций ГД-фильтров боль-

шой производительности сделал профессор З. Л. Финкельштейн в ДонГТИ [1, 4 и др.]. Он был в числе первых, кто осознал и в полной мере использовал главное достоинство ГД-фильтров: их способность к самоочистке [5].

В результате ГД-фильтры получают все большее применение в силу целого ряда преимуществ:

- относительной простоты конструкции из-за отсутствия подвижных и сложных элементов;

- низкой потери давления вдоль потока и на выходе;

- эффективной самоочистки в широком диапазоне скоростей и температур потоков жидкости;

- надежной работы без отказов при длительной эксплуатации без обслуживания и ремонтов фильтроэлементов;

- высокой степени очистки от механических примесей с частицами размером от 5 мкм до 20...30 мм и более;

- широкого диапазона производительности от 0,1 до 10^3 л/с;

- уменьшенного объема сливаемой жидкости (5...15 %) по сравнению с обычными фильтрами (20...30 %);

- гибкости и адаптивности применения в самых разных производственных условиях.

Тем не менее далеко не все потенциальные возможности ГД-фильтров удалось использовать. К тому же в предложенных ранее конструкциях фильтров имеется и ряд недостатков. К их числу относятся: возможное проникновение загрязнений при падении скорости потока на фильтроэлементе в моменты запуска и остановок, непрямоточность течения потоков жидкости; излишне сложное распределение скоростей потоков в фильтре; повышенное сопротивление из-за несоблюдения принципа обеспечения прямоточности потока; отсутствие попыток применения комбинированных методов очистки, дополняющих и улучшающих работу фильтроэлемента (например, центробежной очистки); малоэффективное использование эжекционной

рециркуляции на выходе грязепотоков; редкое применение ГД-фильтров не только для воды, но и других типов жидкостей, газов и т. д.

Цель исследования — совершенствование конструкции ГД-фильтров с использованием идеи комбинации их с принципами центробежной очистки и эжекционной рециркуляции. **Объектом исследований** являются конструкция ГД-фильтров и особенности их работы, а **предметом** — обоснование конструкционных параметров и технических показателей.

Основными **задачами исследования** являются:

- краткий анализ лучших существующих ГД-фильтров;

- формулирование технических требований к ГД-фильтрам;

- обоснование конструкции нового ГД-фильтра и особенностей его работы;

- изучение технических параметров и методики расчета нового фильтра.

2 Требования к ГД-фильтрам и критерии их технической эффективности

К настоящему времени [1–5 и др.] сложились вполне устоявшиеся требования к основным параметрам фильтрационных систем механической очистки, которые после обобщения сводятся к следующим:

- способность отфильтровывать минимальные по крупности частицы загрязнений в широком диапазоне изменения скоростей потока;

- непрерывная очистка жидкости с максимальной верхней границей крупности при заданной тонкости очистки;

- постоянство очистки независимо от колебаний массы и гранулометрического состава механических примесей;

- низкий и постоянный перепад давления независимо от массы загрязнений в исходном потоке жидкости;

- минимальный объем сливаемой жидкости и неограниченная грязеемкость;

- максимальная производительность по фильтрату при минимальных габаритах;

– отказ от потребности в техническом обслуживании, смены или регенерации фильтроэлементов;

– возможность установки непосредственно в гидросистему без изменения или переделки, в том числе для разного рода жидкостей;

– низкая стоимость, длительный срок службы, высокая надежность и безопасность.

Разумеется, адекватная оценка работы фильтров при таком обилии разноплановых характеристик становится затруднительной. Поэтому весьма желательно получить некоторые свертки этих параметров в виде одного или нескольких обзримых численных критериев. Обычно такие критерии можно получить даже для достаточно сложных технических систем с помощью теории подобия и размерностей по методике, изложенной в [6, 7].

Разработка критериев технической эффективности, всесторонне отражающих особенности и параметры систем очистки флюидов, является сложной самостоятельной задачей, которая выходит за рамки данного исследования.

Ограничим свою задачу сравнением фильтров, аналогичных по области применения, тонкости очистки, требованиям по уровню и гранулометрическому составу механических загрязнителей. Тогда для сравнительной оценки фильтров окажется достаточным использование наиболее простого и доступного критерия эффективности конструкторского решения фильтра $\Lambda_{Q/M}$.

Критерий $\Lambda_{Q/M}$ оценивает фильтр с точки зрения его производительности и материалоемкости в виде их отношения. Иными словами, критерий $\Lambda_{Q/M}$ показывает удельную производительность по фильтрату Q , которую дает каждая единица массы фильтра M :

$$\Lambda_{Q/M} = \frac{Q}{M}, [(m^3/c)/кг]. \quad (1)$$

Чем больше критерий $\Lambda_{Q/M}$, тем меньше удельная материалоемкость фильтра, тем выше его производительность, приходя-

щаяся на единицу массы, тем меньше затраты на материалы при изготовлении, тем ниже его стоимость при прочих равных факторах.

Кроме того, есть смысл использовать более универсальный критерий экономической эффективности $\Lambda_{Q/C}$, который отражает отношение производительности Q к стоимости C изготовления и эксплуатации фильтра:

$$\Lambda_{Q/C} = \frac{Q}{C}, [(m^3/ч)/₽]. \quad (2)$$

В затратные параметры, характеризующие систему очистки или отдельный фильтр, могут быть включены разного рода экономические показатели (затраты на обслуживание, ремонт и восстановление, сроки окупаемости и др.), что делает этот критерий $\Lambda_{Q/C}$ не вполне однозначным. Это обусловлено тем, что в рыночной экономике подобная информация обычно относится к коммерческой тайне фирм или сознательно извращается, что поневоле заставляет ограничиваться сравнением лишь технических данных, таких как критерий (1). Более того, нередко некоторые технические показатели также оказываются недостоверными или во многом сомнительными, так как под влиянием рыночной конкуренции в рекламных проспектах или описаниях конструкции они намеренно приводятся не вполне объективно.

Поэтому рассмотрим и сравним наиболее представительные конструкции ГД-фильтров по их идейному воплощению и по предложенным критериям эффективности.

3 Современные ГД-фильтры профессора З. Л. Финкельштейна

Известно достаточно много конструкций ГД-фильтров, предназначенных для отделения механических примесей из жидкостей. Как правило, такие фильтры состоят из цилиндрического корпуса с двумя торцевыми и одной боковой стенками. К боковой стенке радиально подведен входной патрубок, установленный в торце цилинд-

рического корпуса, а выходной патрубков, служащий для удаления твердой фазы, радиально прикреплен к боковой поверхности корпуса напротив входного патрубка.

Внутри корпуса симметрично ему установлен сетчатый фильтрующий элемент цилиндрической формы, образующий внутреннюю камеру, соединенную с выходным патрубком очищенной жидкости. Между сетчатым элементом и боковой стенкой корпуса расположена внешняя кольцевая камера, которая одним концом соединена с входным патрубком, а другим — с выходным патрубком фильтра.

Патенты на такую конструкцию ГД-фильтров были получены в СССР, РФ, Украине, США, Франции, Японии и др. В этих патентах проводилось постепенное совершенствование конструкции фильтра, в основном направленное на перераспределение потоков вокруг сетчатого элемента различной формы.

Самоочищающиеся ГД-фильтры стали принципиально новыми высокоэффективными фильтрами для отделения механических примесей из различных типов жидкостей (вода, масло, СОЖ и т. д.).

В качестве достаточно представительного примера таких конструкций рассмотрим ГД-фильтр, разработанный профессором З. Л. Финкельштейном.

Фильтр (рис. 1) состоит из цилиндрического корпуса 1 с входным 2, выходным 3 и сливным 4 патрубками и крышкой 5. В корпусе 1 установлен фильтроэлемент 7 с цилиндрической сеткой. К фильтроэлементу нержавеющая сетка крепится при помощи натяжного устройства, а по краям — при помощи бандажной проволоки. На крышке фильтра имеется вентиль 6 сброса воздуха в процессе заполнения фильтра водой.

В процессе очистки загрязненная жидкость поступает в каналы между корпусом и фильтроэлементом, обтекая последний по щели, сужающейся между ними. Большая часть жидкости проникает через фильтроэлемент во внутреннюю его полость, а затем через выход поступает потребителю. Мень-

шая часть потока смывает частицы грязи вдоль поверхности сетки и выходит через патрубок 4 на сброс в емкость отстоя.

Общий вид таких фильтров представлен на рисунке 2. Данные ГД-фильтры были успешно применены в широких промышленных масштабах на многих заводах и промышленных предприятиях (Мариупольский ММК им. Ильича, ЗАО «ММЗ „Истил-Украина“», Донецкий металлургический завод, Макеевский меткомбинат и коксохим и пр.) [<https://www.mashprom-zvd.ru/гидродинамические-фильтры/>].

Недостатком этих ГД-фильтров является сложное обратоточное движение потока жидкости, что значительно повышает гидравлическое сопротивление фильтра, снижает его пропускную способность, уменьшает качество очистки, усложняет конструкцию и увеличивает габариты. Кроме того, шламоловушка, представленная в виде бункера, имеет большой объем, её опорожнение от загрязнений производится циклично, что существенно усложняет обслуживание, причем объем слива достигает 10–20 % от общего объема фильтруемой жидкости.

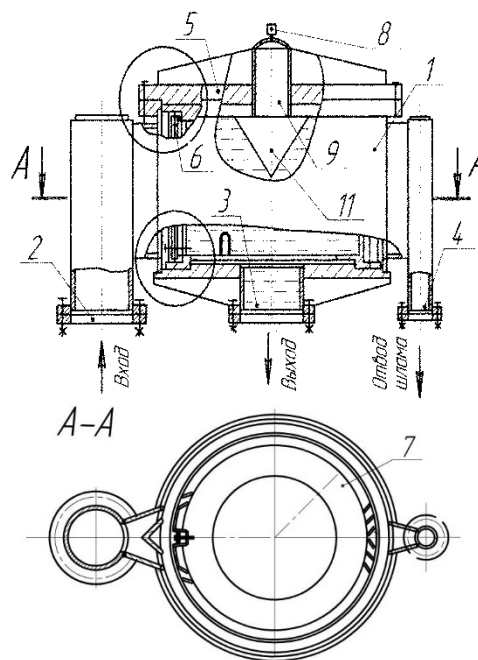


Рисунок 1 Устройство ГД-фильтра профессора З. Л. Финкельштейна



Рисунок 2 Общий вид ГД-фильтра конструкции проф. З. Л. Финкельштейна [8]

Одним из основных недостатков известных ГД-фильтров являются сложные изломанные трассы движения в нем потоков жидкости, создающие их турбулентность и дополнительные перепады давления. Такие потоки значительно повышают гидравлическое сопротивление фильтра, снижают его пропускную способность (производительность по фильтрату), что существенно увеличивает габариты и массу, ухудшают его технические показатели.

Кроме того, поскольку трасса входного потока повторяет внутренние контуры корпуса фильтра и фильтроэлемента, то механические загрязнения равномерно распределены по его сечению. Поэтому большая часть механических частиц вынуждена динамически взаимодействовать с сеткой фильтроэлемента, что приводит к ударам, скоплению и скольжению частиц по ее поверхности. Тем самым сетка фильтроэлемента как бы аккумулирует на своей поверхности воздействие всех частиц загрязнений, чем усугубляется ее непрерывный износ, засорение (кольматация) отверстий сетки, повышение перепада давления и снижение качества и тонкости очистки жидкости.

Большие габариты и масса известных ГД-фильтров высокой производительности (более 1000...2000 м³/ч) требуют проведе-

ния достаточно сложных работ по проектированию и переделке систем очистки жидкостей под такие фильтры. К тому же конструкция фильтра требует, как правило, фиксированного вертикального положения в пространстве (рис. 2) для обеспечения работы шламоловушки со шламоотстойником, что накладывает дополнительные ограничения на условия их промышленного применения.

Таким образом, существующие конструкции ГД-фильтров имеют значительные потенциальные резервы их совершенствования.

4 ГД-фильтры нового поколения

Прежде всего, следует сформулировать цели и задачи для разработки конструкции ГД-фильтров нового поколения, которые кратко сводятся к следующим:

- обеспечить прямолинейность движения входного и выходного потоков без резких торможений и поворотов, в идеальном случае реализованного в виде отрезка трубы, врезанного в разрыв линии общего трубопровода системы;

- осуществить взаимосогласованное сочетание в одной конструкции центробежного и гидродинамического способов фильтрации, в результате чего положительные качества каждого способа увеличиваются, а отрицательные — взаимно компенсируются;

- разработать новую конструкцию шламоловушки, в которой для регулировки густоты шлама в широких пределах и возможности снижения объемов слива использовать для грязевого потока принцип эжекционной рециркуляции;

- одновременно выполнить все требования к основным параметрам фильтрационных систем механической очистки, сформулированные в разделе 1.

Воплощение поставленных задач можно проследить по конструкции прямолинейного центробежного ГД-фильтра с эжекционной рециркуляцией (ПЦФ+ЭР). Техническая сущность и принцип действия пред-

ложенного устройства фильтра представлены на рисунке 3 [9].

Фильтр состоит из корпуса 1 с патрубками: подводящим 2 для входа рабочей жидкости и отводящим 3 для выхода очищенной жидкости. В корпусе 1 соосно с ним размещён фильтроэлемент 4, а внутри соосно с ним установлен обтекатель 5. Между корпусом 1 фильтра и обтекателем 5 находится рабочая полость 6 постоянного сечения.

Входная полость 7 между корпусом 1 фильтра и поверхностью фильтроэлемента 4 выполнена сужающейся по ходу движения жидкости. Фильтроэлемент 4 меньшим своим основанием закреплён на обтекателе 5, а большим основанием примыкает к кольцевой щели 8, переходящей в спирально-винтовой канал 9 шламолушки. Входная полость 7 сужается вдоль потока жидкости. Перед кольцевой щелью 8 входной полости 7 размещён завихритель 10.

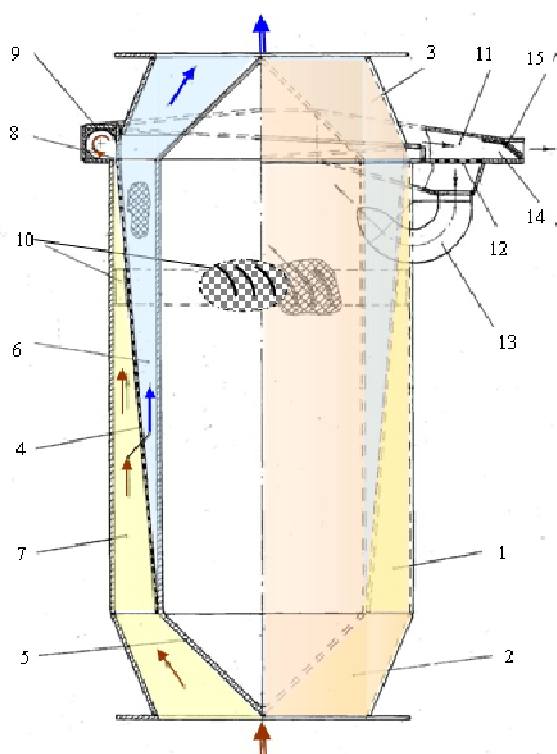


Рисунок 3 Устройство прямоточного центробежного ГД-фильтра (ПЦДФ) с эжекционной рециркуляцией [9]

Шламолушка содержит спирально-винтовой канал 9 вокруг корпуса 1, переходящий в разделительную камеру 11 сгустителя, выполненную в виде сужающейся усечённой пирамиды. Одна из ее граней снабжена фильтроэлементом 12 возврата, за которым расположен возвратный канал 13. Он, в свою очередь, после завихрителя 10 подсоединён к входной полости 7 по касательной к скорости потока жидкости. Разделительная камера 11 переходит в шламный канал 14, который снабжён дроссельным клапаном 15 в виде регулируемой заслонки и заканчивается сливом.

Прямоточный ГД-фильтр работает следующим образом.

Подлежащая очистке жидкость поступает в корпус 1 через подводящий патрубок 2, обгибает обтекатель 5 и попадает во входную полость 7, проходит через фильтроэлемент 4 и, после очистки от загрязнений, в виде фильтрата выходит в отводящий патрубок 3.

Загрязнённая часть потока вне фильтроэлемента 4, проходит через завихритель 10, который приводит её во вращательное движение. Вращательно-поступательно перемещаясь в сужающейся части входной полости 7, жидкость продолжает проходить через фильтроэлемент, а оставшаяся ее часть поступает в виде грязевого потока через кольцевую щель 8 в спирально-винтовой канал 9 шламолушки.

Сброшенный в канал 9 грязевый поток совершает сложное бивихревое движение из двух взаимно перпендикулярных векторов угловой скорости, представляющих вихревое вращение относительно оси корпуса и перпендикулярное ему вращение относительно оси спирально-винтового канала 9. Это обеспечивает полную зачистку канала 9 по всему периметру от скопления грязевых отложений. Поперечное сечение спирально-винтового канала 9 выполнено переменным пропорционально увеличению поступающего грязевого потока по мере его сбора в шламолушку.

Грязепоток вдоль канала 9 попадает в разделительную камеру 11 сгустителя, которая выполнена сужающейся по ходу его движения. В камере 11 происходит отделение излишка жидкости от грязепотока с помощью фильтроэлемента возврата 12. Этот излишек жидкости за счёт перепада давлений, приводящего к эффекту эжекции, попадает во входную полость 7 через возвратный канал 13. Последний подсоединён после завихрителя 10 к входной полости 7 по касательной к скорости потока жидкости, где грязепоток с ней смешивается и проходит повторную очистку.

Сгущённый грязепоток, который не прошёл через фильтроэлемент возврата 12, поступает в шламовый канал 14, где он уплотняется до консистенции шлама и через регулируемый дроссельный клапан 15 направляется через слив 16 в шламонакопитель (не показан).

Обтекатель обеспечивает повышение скорости движения рабочей жидкости в рабочей полости и при неизменной её аксиальной компоненте вдоль всей трассы потока. Это позволяет заметно улучшить эффект гидродинамического смыва загрязнений с поверхности фильтроэлемента и абсолютную тонкость очистки. Постоянное сечение рабочей полости обеспечивает постоянство скорости движения жидкости относительно фильтроэлемента, что, в свою очередь, даёт неизменную тонкость очистки по всей его площади и улучшает работоспособность фильтра. Кроме того, наличие обтекателя позволяет уменьшить длину фильтра за счёт незначительного увеличения его диаметра.

Завихритель создает вращение потока жидкости относительно оси фильтроэлемента, что позволяет за счет центробежных сил отбросить частицы загрязнений с поверхности сетки фильтроэлемента. Тем самым исключается скопление загрязнений и очищается спирально-винтовой канал шламовой камеры.

Кольцевая щель существенно ограничивает расход жидкости, попадающей в шламовую камеру, а эксцентричное подсоединение кольцевой щели относительно

центра тяжести поперечного сечения спирально-винтового канала создает в нем бивихревое вращение грязепотока, что гарантирует его перемещение вдоль спирально-винтового канала, ускоряет сегрегацию частиц и повышает концентрацию грязепотока. Это существенно улучшает работоспособность фильтра.

Выполнение канала шламовой камеры спирально-винтовой формы позволяет обеспечить изменение её поперечного сечения в соответствии с объёмом поступающего грязепотока, при этом поперечное сечение спирали выполнено круглым, что заметно снижает гидравлическое сопротивление.

Разделительная камера сгустителя в форме усечённой пирамиды позволяет отделить излишки жидкости от грязепотока с помощью фильтроэлемента возврата 12, выполняющего роль одной из граней пирамидальной камеры. Это заметно снижает потери рабочей жидкости на сливе и позволяет повторно фильтровать эти излишки путём направления их во входную полость, т. е. обеспечить её рециркуляцию. За счёт того, что возвратный канал подсоединён между завихрителем и кольцевой щелью к входной полости фильтра по касательной к скорости исходного потока жидкости, возникает перепад давлений, приводящий к эффекту эжекции и облегчающий рециркуляцию жидкости в фильтре. При этом увеличивается эффективность работы фильтра.

То, что разделительная камера сгустителя переходит в шламовый канал, который снабжён дроссельным клапаном в виде регулируемой заслонки и соединён со сливом, позволяет уменьшить объём слива, регулировать концентрацию шлама и, повышая её до необходимого уровня, значительно уменьшить объёмы шламонакопителей и хвостохранилищ.

Выполним ориентировочную оценку эффективности сравниваемых конструкций фильтров, используя результаты раздела 2. Для фильтра-аналога [3] воспользуемся данными рекламного сайта, а для фильтра ПЦГФ-1 — проектными расчетными параметрами (табл. 1).

Таблица 1
Сравнение технических показателей фильтров

Технические параметры ГД-фильтра	Тип ГД-фильтра	
	Ф-1*	ПЦГФ
Входной поток, м ³ /ч	4000	4000
Поток фильтрата, м ³ /ч	3200	3800
Объем грязепотока, %	20	5
Мах размер частиц, мм	5	5
Тонкость очистки, мкм	500	20
Падение давления, кПа	50	20
Масса, кг	6500	960
Критерий эффект. $\Lambda_{Q/M}$	0,57	3,96

*<http://vector99.narod.ru/filters.html>.

За счет своих явных принципиальных конструктивных преимуществ перед аналогами (прямоточность потока, центробежное отделение крупных частиц загрязнений, эжекционная рециркуляция, устройство для удаления грязепотока и пр.) фильтр нового технического уровня ПЦГФ оказывается существенно лучше. Так, только по критерию технической эффективности фильтр ПЦГФ превосходит аналог в $3,96/0,57=7,8$ раза (табл. 1). Примерно такого же порядка преимущества наблюдаются и по большинству остальных технических характеристик (объем грязепотока сброса, тонкость очистки, падение давления, β -характеристики и др.). Тем самым становится очевидной необходимость перехода к системам фильтрации с фильтрами нового поколения.

5 Разработка ГД-фильтров новой конструкции

Анализируя конструкцию нового ГД-фильтра, можно заключить, что она несовершенна. В частности, критический анализ конструкции такого фильтра позволяет выявить ряд присущих ему недостатков (рис. 3):

– внешние контуры корпуса 1 фильтра выходят за габариты подающих основной поток труб, что усложняет размещение и монтаж фильтра;

– не вполне целесообразно устанавливать внутри фильтра объемный обтекатель 5, который хотя и служит для увеличения скорости потока и способствует уменьшению угла наклона фильтроэлемента 4, но при этом увеличивается диаметр корпуса, создается повышенное сопротивление и тем самым повышается перепад давления;

– завихритель потока 10 установлен не в подводящем патрубке 2 в начале фильтроэлемента 4, а заметно ближе к отводящему патрубку 3, что существенно снижает эффективность использования центробежных сил по отбросу грязевых частиц от фильтроэлемента 4 к стенкам корпуса 1;

– в конструкции завихрителя 10 не указаны его параметры и не рассмотрены особенности его взаимодействия с исходным потоком жидкости;

– ряд замечаний вызывает конструкция шламоловушки, которая, несмотря на сохраняющуюся функциональность, остается неоправданно сложной, а реализация эжекционной рециркуляции явно нуждается в пересмотре для повышения эффективности.

Вновь предлагаемый ГД-фильтр представлен на рисунке 4. Прежде всего, обращает на себя внимание общая конфигурация корпуса 1 фильтра, которая является продолжением основного трубопровода очищаемой жидкости.

Преимущества такого конструктивного исполнения фильтра очевидны с позиций возможностей его практической реализации, простоты монтажа, замены и эксплуатации.

Вход 2 и выход 3 фильтра являются продолжением основного трубопровода, они прикреплены к нему обычными фланцевыми соединениями. Поступающий поток загрязненной жидкости через вход 2 попадает на обтекатель 4, а затем в рабочую полость 5, внутри которой установлен фильтроэлемент 6 соосно с завихрителем 7, которые закреплены совместно на обтекателе 4. Фильтроэлемент 6 выполнен в виде усеченного расширяющегося конуса, который своим концом опирается на кольцевой канал 8 и примыкает к внутреннему периметру кор-

пуса 1 фильтра перед выходом 3. Канал 8 улавливает и распределяет шлам, оставшийся в рабочей полости 5 после фильтрации потока, в шламовушку 9 (рис. 4).

Шламовушка 9 (рис. 4) состоит из корпуса 10 и соосного с ним цилиндрического фильтроэлемента 11 с примыкающим к нему шламосборником 12.

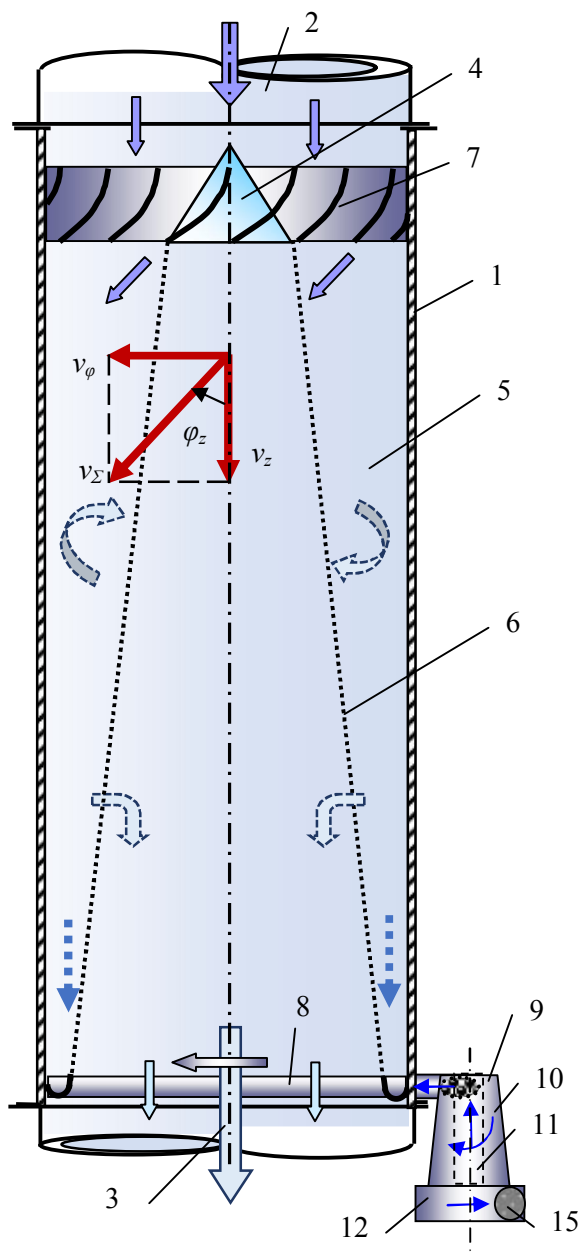


Рисунок 4 Новый прямооточный центробежный ГД-фильтр (ПЦГФ) с эжекционной рециркуляцией

К кольцевому каналу 8 шламовушка 9 подсоединена двумя патрубками 13 и 14. Входной патрубок 13, направлен против кольцевого движения загрязненной струи из канала 8 и является инжекционным струйным насосом. Он выводит струю в верхнюю часть шламовушки 9 по касательной к ее конусообразной стенке корпуса 10.

Выходной патрубок 14 выполняет функцию эжекционного струйного насоса. Он соединяет внутреннюю верхнюю часть фильтроэлемента 11 с кольцевым каналом 8, где он направлен по ходу движения загрязненной струи. Из шламосборника 12 по касательной к его внутренней стенке выходит шламовый канал 15, который снабжен дроссельным клапаном в виде регулируемой заслонки и заканчивается сливом (не показаны).

Новый прямооточный ГД-фильтр работает следующим образом.

Загрязненный механическими частицами исходный поток поступает в корпус 1 через подводящий патрубок 2, огибает обтекатель 4, проходит через завихритель 7 и, закручиваясь, приобретает окружную компоненту скорости v_φ (рис. 4, 5). Поскольку обтекатель закрывает своей площадью A_O живое сечение A_F корпуса 1 фильтра, то осевая скорость v_z потока увеличится (рис. 4):

$$v_z = \frac{v_{z0}}{1 - A_O / A_F}, \text{ м/с}, \quad (3)$$

где v_{z0} — исходная осевая скорость потока, м/с.

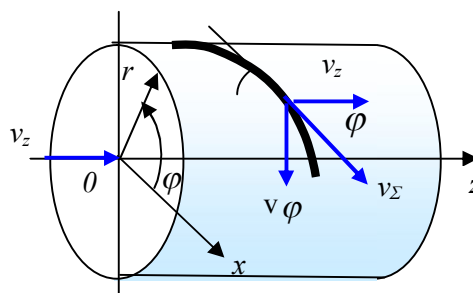


Рисунок 5 Схема распределения скоростей грязепотока на завихрителе 7

Так как осевая скорость v_z потока должна оставаться постоянной по всей длине фильтра, то, если известен угол φ_z , на который завихритель 7 поворачивает весь поток, нетрудно определить окружную, полную и угловую скорости потока:

$$\begin{aligned} v_\varphi &= v_z \cdot \operatorname{tg} \varphi_z; \quad v_\Sigma = v_z / \operatorname{Cos} \varphi_z, \\ d\varphi / dt &= \dot{\varphi} = v_\varphi / r = v_z \cdot \operatorname{tg} \varphi_z / r, \end{aligned} \quad (4)$$

где φ_z — угол закрутки потока на завихрителе, рад.

Исходный поток с грязевыми частицами совершает поступательно-вращательное движение, за счет чего на каждую частицу в нем действует центробежная сила $F(r, \varphi)$, отжимающая ее к стенке фильтра и возрастающая пропорционально радиусу вращения:

$$\begin{aligned} F(r, \varphi) &= m \cdot V_\varphi^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi_z / r, \\ F(r, \varphi) &= mr \cdot (\dot{\varphi} \cdot \operatorname{tg} \varphi_z)^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где m — масса частицы, кг;

r — текущий радиус (радиальная координата) частицы в фильтре, $r_f \leq r \leq R_\phi$, м;

r_f, R_ϕ — радиусы соответственно фильтроэлемента и стенки фильтра, м;

$\dot{\varphi} = d\varphi / dt$ — угловая скорость вращения потока жидкости, рад/с.

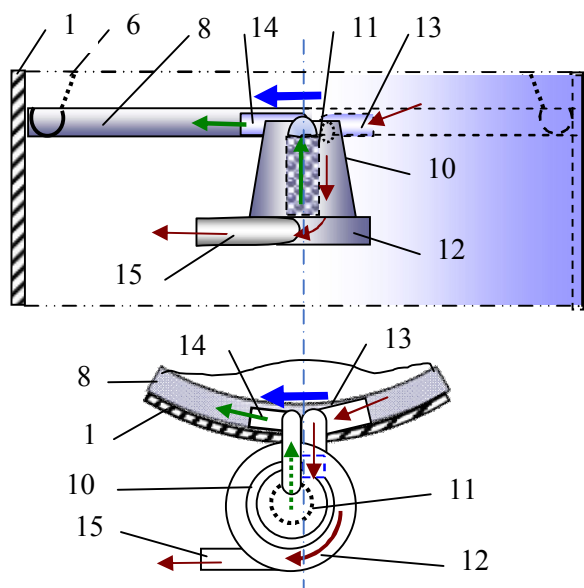


Рисунок 6 Шламолушка 9 с инъекцией 13 и эжекцией 14 шлампотоков

Следовательно, центробежные силы, действующие на частицу, тем больше, чем больше ее масса и удаление от оси фильтра, и пропорциональны квадрату угловой скорости вращения потока жидкости. Тем самым достигается отброс от фильтроэлемента к стенке фильтра всех самых тяжелых частиц, что предохраняет фильтроэлемент 6 от износа и заметно (иногда в разы) улучшает β -характеристику фильтра.

После завихрителя 7 струя получает вращательно-поступательное движение во входной полости 5 и вытесняется, очищаясь от загрязнений, во внутреннюю полость фильтроэлемента 6, из которой в виде фильтрата выходит в отводящий патрубок 3.

Оставшаяся загрязнённая часть потока вне фильтроэлемента 6 после завихрителя 7 получает вращение. Поступательно двигаясь в сужающейся части входной полости 7, струя концентрации загрязнений увеличивает поток частиц, отброшенных центробежными силами к стенкам фильтра, в конце грязепопота через кольцевую щель 8 попадает в шламолушку 9 через входной патрубок 13. Входная струя с загрязнениями входит в конусообразный корпус 10 по касательной и, вращаясь вокруг цилиндрического фильтроэлемента 11, переводит свою кинетическую энергию в статический напор, отправляя грязевые частицы через шламоборник 12 в шламовый канал 15. Необходимую плотность выходящего шлама обеспечивает запорно-регулирующая арматура (не показана).

Излишек жидкости за счёт перепада давлений и эффекта эжекции попадает из корпуса 10 через фильтроэлемент 11 в выходной патрубок 14 и затем вливается в грязепопота канала 8.

Ввиду того, что решающим фактором, обуславливающим движение грязевых частиц внутри фильтра, являются скоростной напор потока и центробежные силы, силами тяжести можно пренебречь. Поэтому фильтр можно располагать под каким угодно углом в пространстве, горизонтально или вертикально.

Эжекционная циркуляция шламового потока позволяет добиться почти сухого (20–30 % влажности) выхода загрязнений, что в разы сокращает площадь под их складирование и улучшает экологию окружающей среды.

6 Параметры ГД-фильтров нового поколения

Каждый элемент ГД-фильтра должен получить расчетное обоснование своих конструктивных параметров.

Попадая в фильтр, входящий поток встречается с обтекателем 4. Обтекатель обеспечивает повышение скорости движения рабочей жидкости в рабочей полости 5. Это позволяет заметно улучшить эффект гидродинамического смыва загрязнений с поверхности фильтроэлемента 6 и повысить абсолютную тонкость очистки. Постоянство скорости движения жидкости относительно фильтроэлемента 6 дает неизменную тонкость очистки по всей его площади и улучшает работоспособность фильтра.

Выбор способа создания вращательной компоненты движения потока жидкости имеет большое значение. Экспериментальному и теоретическому изучению гидродинамики и тепломассообмена вихревых течений посвящено огромное количество работ. Однако из-за большого разнообразия вихревых устройств и направленности многих исследований на изучение процессов в конкретных аппаратах их нельзя в настоящее время считать окончательно завершенными.

Поле центробежных сил можно, как известно, создавать различными устройствами: за счет вращения корпуса фильтра (ротаторный способ) или за счет закрутки потока относительно стенок фильтра (вихревой способ). Устройства такого типа называют завихрителями, и они имеют простую и более надежную конструкцию.

Завихритель 7 создает вращение потока жидкости относительно оси фильтроэлемента 6, что улучшает качество очистки жидкости и позволяет за счет центробеж-

ных сил отбросить частицы загрязнений от поверхности сетки фильтроэлемента.

Завихритель для фильтра должен удовлетворять целому комплексу требований, из которых, помимо обычных конструктивных (минимум массы и габаритов, простота, удобство монтажа и обслуживания и пр.), главнейшие:

- обеспечить равномерную закрутку поступающего потока флюида по всему сечению, т. е. выполнить условие постоянства угловой скорости;

- исключить резкие перепады скоростей и ускорений по оси потока, что гарантирует отсутствие срыва потоков и возникновения застойных зон;

- до минимума снизить перепад давления на фильтре, затраты энергии на перемешивание потоков жидкости, трение и гидравлическое сопротивление;

- удобно сопрягаться с обтекателем, не изменять конструкцию фильтра и не увеличивать его габариты.

Если завихритель выполнить, как обычно, в виде винтовой (геликоидальной) поверхности, у которой угол закрутки потока постоянный, то при попадании элементарной струйки на эту поверхность возникает гидроудар, когда вначале завихрителя параметры углового движения меняются скачком

$$\varphi = d\varphi / dt = \dot{\varphi} = 0 \text{ и } d^2\varphi / dt^2 = \ddot{\varphi} \rightarrow \infty, \quad (6)$$

а затем остаются постоянными

$$\varphi = \text{var}; \quad d\varphi / dt = \dot{\varphi} = \text{Const}; \quad \ddot{\varphi} = 0, \quad (7)$$

что не оправдано с позиций энергетических затрат.

Поэтому нужно стремиться к тому, чтобы завихритель плавно менял направление входящего потока жидкости при условии создания требуемого угла поворота при входе его в рабочую полость. Отсюда можно записать следующие условия для контура лопатки завихрителя на произвольной цилиндрической $\varphi = f(z)$ поверхности (рис. 5) радиуса $r = \text{Const}$:

$$0 \leq z \leq z_z; 0 \leq \varphi \leq \varphi_z, \quad (8)$$

при $\varphi = 0 \quad d^2\varphi / dz^2 = d\varphi / dz = 0.$

Эти условия равносильны требованию постепенного возрастания угла наклона лопатки и его второй производной по координате z . Среди всех возможных наиболее простым будет дифференциальное уравнение, удовлетворяющее граничным условиям (9):

$$d^2\varphi / dz^2 = az, \quad (9)$$

где a — некоторая постоянная, которая зависит от длины лопатки завихрителя по координате z .

Решение уравнения (9) дает профиль лопатки завихрителя, удовлетворяющий поставленным условиям (8):

$$\varphi = kz^3, \quad (0 \leq z \leq z_z). \quad (10)$$

Таким образом, одна из возможных форм лопатки завихрителя должна удовлетворять уравнению кубической параболы.

Рассмотрим вклад центробежных сил в работу ГД-фильтра. При движении во вращающемся криволинейном потоке жидкости частицы загрязнений находятся главным образом под действием центробежной силы, силы выталкивания воды (Архимеда) и силы сопротивления движению (Стокса), тогда как силами тяжести можно пренебречь. Частицы двигаются вместе с потоком, поэтому их вращательная и осевая скорости совпадают с полной скоростью потока.

Под действием центробежной силы частицы начинают двигаться в радиальном направлении к стенкам фильтра, преодолевая вязкое сопротивление жидкости.

Поскольку критерий Рейнольдса для такого движения невысок ($Re < 103$), можно применить для оценки силы вязкого сопротивления жидкости движению частицы закон Стокса:

$$F_C = 3\pi \cdot d \cdot \mu \cdot v_r, \quad (11)$$

где d — диаметр частицы, м;

μ — динамическая вязкость жидкости, Па·с;

$v_r = dr / dt$ — радиальная скорость частицы, м/с;

r — радиальная координата частицы.

Кроме того, на частицу будет действовать центробежная сила $F_{ц}$, которая, с учетом выталкивающей силы Архимеда, равна

$$F_{ц} = V_z \cdot (\rho_z - \rho_{жс}) \cdot \frac{v_\varphi^2}{r}, \quad (12)$$

где V_z — объем частицы загрязнений с приведенным диаметром d :

$$V_z = \frac{\pi d^3}{6}. \quad (13)$$

При равенстве сил (11) и (12) частица будет двигаться равномерно с постоянной скоростью v_* . Для этого приравняем (11) и (12) и с учетом (13) получим:

$$\pi d^3 (\rho_z - \rho_{жс}) \frac{v_\varphi^2}{r} = 18\pi \cdot d \cdot \mu \cdot v_*. \quad (14)$$

Отсюда предельная радиальная скорость частицы v_* равна

$$v_* = (\rho_z - \rho_{жс}) \frac{d^2 \cdot v_\varphi^2}{18 \cdot \mu \cdot r}. \quad (15)$$

Поскольку частицы непрерывно перемещаются в радиальном направлении, то величина их радиальной координаты r возрастает, и поэтому их предельные радиальные скорости v_* равны производной

$$\frac{dr}{dt} = v_* = (\rho_z - \rho_{жс}) \frac{d^2 \cdot v_\varphi^2}{18 \cdot \mu \cdot r}. \quad (16)$$

Уравнение (16) представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение относительно переменной $r=f(t)$ первого порядка, которое после разделения переменных решается прямыми квадратурами:

$$\int_{R_1}^{R_2} r dr = (\rho_z - \rho_{жс}) \frac{d^2 \cdot v_\varphi^2}{18 \cdot \mu \cdot r} \int dt. \quad (17)$$

Решение (17) дает:

$$R_2^2 - R_1^2 = (\rho_z - \rho_{жс}) \frac{d^2 V_\phi^2}{9\mu} t. \quad (18)$$

Для каждой частицы диаметром d и объемным весом ρ_z можно найти время ее прохождения от радиуса R_1 до радиуса R_2 :

$$t(R_1, R_2) = \frac{9\mu}{d^2 \cdot V_\phi^2} \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{\rho_z - \rho_{жс}}. \quad (19)$$

Большой практический интерес представляет собой задача определения такого диаметра $d_{Ц}$ частицы, которая, благодаря центробежной силе, проходит весь путь в фильтре от радиуса R_o обтекателя 4 до радиуса R_k стенки 1 корпуса, минуя фильтроэлемент 6. Из (19) получаем

$$d_{Ц} = \frac{3}{v_\phi} \sqrt{\frac{\mu}{t_L} \cdot \frac{R_k^2 - R_o^2}{\rho_z - \rho_{жс}}}, \quad (20)$$

где t_L — время движения частицы в поле центробежных сил на дину фильтра L , с.

Таким образом, все частицы загрязнений заданной плотности ρ_z с диаметром, большим $d \geq d_{Ц}$, отделяются центробежными силами и скользят по стенкам корпуса фильтра, не достигая сетки фильтроэлемента 6, а затем проходят через кольцевой канал 8 и инжекционный патрубок 13 в шламоловушку 9.

Остальные частицы загрязнений с диаметром $d < d_{Ц}$ последовательно, по мере поступательного движения в рабочей полости 5 и увеличения их диаметра d , входят в контакт с сеткой фильтроэлемента 6. На ней происходит разделение частиц в соответствии с заданной тонкостью очистки d_{\min} . Отметим, что тонкость фильтрации d_{\min} , ранее определяемая только условиями гидродинамического взаимодействия частиц с сеткой фильтроэлемента, при учете действия центробежных сил на

все частицы заметно повышается по сравнению с обычными ГД-фильтрами. Этому способствует прохождение некоторой доли частиц $d < d_{\min}$ мимо фильтроэлемента прямо в кольцевой канал.

Остальные частицы с размерами $d < d_{\min}$ проходят через сетку фильтроэлемента в фильтрат на выход 3 из фильтра, тогда как частицы размером $d \geq d_{\min}$ попадают в шламоловушку 9.

7 Численные оценки параметров ГД-фильтров нового поколения

Проведем численные оценки показателей нового ГД-фильтра средней производительности $Q = 280 \text{ м}^3/\text{ч}$, у которого:

– внутренний диаметр трубопровода $D = 0,2 \text{ м}$, его площадь $A = 0,031 \text{ м}^2$, а скорость движения жидкости $v = 2,5 \text{ м/с}$;

– площадь и диаметр обтекателя $A_o = 0,1 A = 0,003 \text{ м}^2$; $d_o = 0,063 \text{ м}$;

– угол закрутки потока в завихрителе $\varphi_z = 45^\circ$, угловая скорость потока после завихрителя $\omega = 25 \text{ с}^{-1}$;

– длина фильтра $L_f = 4D = 0,8 \text{ м}$, угол наклона фильтроэлемента $\alpha = 4,9^\circ$; время скольжения частиц загрязнений вдоль фильтроэлемента $t_f = L_f/v_z = 0,32 \text{ с}$;

– динамическая вязкость жидкости при 20°C $\mu = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$; коэффициент загрязненности потока твердыми частицами $\varepsilon = 3 \%$; поток шлама с 50%-ной влажностью $Q_z = 16,8 \text{ м}^3/\text{ч}$;

– диаметр инжекторного патрубка в канал 8 $d_z = 0,05 \text{ м}$; диаметр инжекторного патрубка из шламонакопителя $d_i = 0,05 \text{ м}$.

Подставляя в формулу (20), получим размер частиц, выше которого они не попадают на фильтроэлемент данного ГД-фильтра:

$$d_{Ц} = \begin{cases} 0,08 \text{ мм} \\ 0,15 \text{ мм} \end{cases} \text{ при } \rho = \begin{cases} 7800 \text{ кг/м}^3, \\ 2500 \text{ кг/м}^3. \end{cases}$$

Это резко увеличит работоспособность и длительность эксплуатации ГД-фильтра. Заметим, что полученные оценки $d_{Ц}$ от-

носятся лишь к тем частицам, которые перед завихрителем двигались по центру входного потока. На самом деле дополнительно и частицы меньшего диаметра, которые двигаются не по центру потока жидкости, будут отброшены к стенке фильтра и попадут в шламоотстойник, минуя фильтроэлемент.

В качестве примера возьмем ГД-фильтр сверхвысокой производительности $Q=4000 \text{ м}^3/\text{ч}$ с диаметром трубопровода 0,7м и для той же жидкости. На рисунке 7 показаны графики изменения минимального диаметра $d_{ц}$ частиц загрязнений разной плотности в зависимости от радиуса их попадания во входной поток жидкости.

Графики показывают, что по мере возрастания радиуса R_2 все меньшего диаметра частицы загрязнений имеют вероятность попадания на фильтроэлемент, причем их число прямо пропорционально квадрату радиуса.

Чем больше плотность грязевых частиц, тем меньше их попадает и ударяет по сетке фильтроэлемента. В частности, для ГД-фильтров сверхвысокой производительности ($4000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более) даже без фильтроэлемента гарантирована очистка жидкости от частиц более 0,33 мм при сбросе жидкости в пределах 2–4 %.

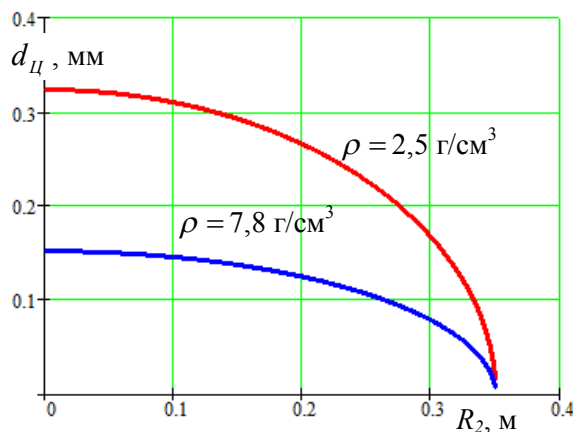


Рисунок 7 Зависимости диаметра частиц $d_{ц}$, не попадающих на фильтроэлемент, от расстояния до центра потока жидкости R_2

Важно отметить, что благодаря прямо-точности потока и низкой потере давления предлагаемый ГД-фильтр позволяет использовать самую прогрессивную систему очистки жидкости (газа) [3] путем его установки на подающих (всасывающих) гидромагистралях перед насосами и вентиляторами без риска появления кавитации.

Выводы

На основании выполненных оценок технических показателей и конструктивных параметров ГД-фильтров нового технического уровня можно заключить, что их высокую эффективность обеспечивают:

- прямоточность потока жидкости и возможность вписать фильтр в стандартные размеры обычных трубопроводов;
- обтекатель, повышающий скорость потока в рабочей полости и создающий радиальную компоненту скорости для частиц загрязнений в центре потока;
- завихритель потока, который отбрасывает большинство частиц загрязнений мимо фильтроэлемента и у которого профиль лопаток выбран так, чтобы не допустить скачков скорости потока, что минимизирует затраты энергии;
- кольцевой канал, формирующий в виде вихря грязевой поток перед шламоловушкой;
- принципиально новая шламоловушка с использованием инжекционного и эжекционного струйных насосов, которые отделяют шлам и его жидкую фазу через фильтроэлемент и позволяют получать любую, вплоть до жесткой, консистенцию шлама.

В результате применения ГД-фильтров нового технического уровня можно значительно улучшить системы очистки жидкостей от взвешенных твердых частиц (примесей, загрязнений). Перспективным является применение новых ГД-фильтров для очистки газов, в частности вместо циклонов. Предлагаемые фильтры можно с успехом использовать в машиностроительной, химической, горной, металлургической, нефтеперерабатывающей и других областях промышленности.

Данную работу автор посвящает памяти профессора З. Л. Финкельштейна, основателя научной школы гидромеханики в ДонГТИ, известного ученого в области рабочих и смазочных жидкостей.

Библиографический список

1. Финкельштейн, З. Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин [Текст] / З. Л. Финкельштейн. — М. : Недра, 1986. — 232 с.
2. Бродский, Г. С. Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин [Текст] / Г. С. Бродский. — М. : Гемос, 2004. — 360 с.
3. Бондаренко, В. П. Системы гидродинамической очистки жидкостей от механических примесей в потоке // Современные научные исследования и инновации. — 2012. — № 3. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://web.snauka.ru/issues/2012/03/10598> (05.08.2022).
4. Финкельштейн, З. Л. Опыт применения фильтров сверхвысокой производительности для очистки промышленных стоков [Текст] / З. Л. Финкельштейн, Л. З. Финкельштейн // Вестник МАНЭБ. — СПб. : Изд-во МАНЭБ, 2003. — Т. 8. — № 5 (65). — С. 94–97.
5. Чебан, В. Г. Преимущества, недостатки и перспективы самоочищающихся очистителей жидкости [Текст] // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2010. — Вып. 30. — С. 177–183.
6. Литвинский, Г. Г. Обоснование критериев технической эффективности объемных гидромашин [Текст] / Г. Г. Литвинский // Промышленная гидравлика и пневматика. — 2011. — № 2 (32). — С. 24–26.
7. Литвинский, Г. Г. Критерии оценки технического уровня горной техники [Текст] / Г. Г. Литвинский // Уголь Украины. — 2015. — № 9. — С. 41–46.
8. А.с. 161894 RU U1, МПК³ В 01 D 24/46. Гидродинамический фильтр / О. В. Федотов, З. Л. Финкельштейн, А. А. Пирожник ; КГМИ (Украина). — № 161894 ; заявл.08.10.215 ; опубл. 10.05.16, Бюл. № 13.
9. Пат. 96546 Украина, МПК В01D 27/08, В01D 29/11. Фильтр гидродинамический прямоточный / Г. Г. Литвинский, Г. П. Ковалев, З. Л. Финкельштейн. — № а201015715 ; заявл. 10.06.11 ; опубл. 10.11.11, Бюл. № 21.

© Литвинский Г. Г.

Рекомендована к печати зам. директора РАНИМИ АН ДНР д.т.н., проф. Дрибаном В. А., к.т.н., доц., зав. каф. ПГМ им. З. Л. Финкельштейна ДонГТИ Чебаном В. Г.

Статья поступила в редакцию 01.10.2022.

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

DIRECT-FLOW CENTRIFUGAL HYDRODYNAMIC FILTERS WITH EJECTION SLUDGE RECIRCULATION

The substantiation of relevance is given and a critical analysis of using the hydrodynamic filters (HD-filters) is performed. Their constructive advantages are shown and their disadvantages are discussed. The requirements for HD-filters are formulated and criteria for their economic and technical efficiency are proposed. The designs and operation of modern HD-filters, including a new technical level, are considered. A comparison of the technical indicators of existing and new HD-filters is carried out, the possibilities of their noticeable improvement are considered. A new design of a direct-flow centrifugal HD-filter with ejection sludge recirculation is proposed, and the principles of its operation are described. Special attention is paid to the work of a fundamentally new method of sludge removal based on injection and ejector jet pumps in a sludge trap that create sludge recirculation. The calculated performance indicators of the inlet flow swirler are given and the conditions of liquid purification due to centrifugal forces are estimated.

Key words: filter, hydrodynamic cleaning, filter element, fineness of cleaning, filter efficiency criteria, flow straightness, fairing, swirler, swirler blade profile, mud flow, sludge, sludge trap, sludge recirculation, sludge ejection and injection.

УДК 622.232.32

д.т.н. Вишневский Д. А.,

д.т.н. Корнеев С. В.,

Мулов Д. В.

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, mulovd@yandex.ru)

ОБОСНОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОЗАЩИТЫ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОТБОЙНЫХ МОЛОТКОВ С ОБОСОБЛЕННЫМ СТВОЛОМ

В результате математического моделирования системы «стандартный испытательный стенд — пневматический отбойный молоток с обособленным стволом» установлены рациональные значения коэффициентов жесткости амортизирующей пружины и кольцевых канатных виброизоляторов молотка, при которых обеспечиваются минимальные среднеквадратические значения виброскорости и виброускорения рукоятки. Произведено сопоставление вибрационных характеристик молотков МО-2Б и с обособленным стволом, выявлены преимущества молотка с обособленным стволом.

Ключевые слова: отбойный пневматический молоток, обособленный ствол, амортизирующая пружина, кольцевые канатные виброизоляторы, жесткость, стандартный испытательный стенд, математическая модель, виброускорение, виброскорость.

В результате моделирования [1] установлено, что пневматический молоток с обособленным стволом, идея которого впервые отражена в патенте [2] и получила дальнейшее развитие [3–5], при удачном сочетании параметров системы является вполне работоспособной машиной. Для нормального функционирования молотка наряду с установленной между стволом и корпусом амортизирующей резиновой шайбой, как и в серийно выпускаемых молотках типа МО, рекомендовано вместо пусковой пружины применять предварительно сжатую амортизирующую пружину. Значительного снижения вибраций рукоятки можно достичь благодаря применению кольцевых канатных виброизоляторов (ККВ), встроенных между инструментом и корпусом, а также между корпусом и рукояткой.

Вместе с тем остается открытым вопрос выбора рациональных значений коэффициентов жесткости амортизирующей пружины и ККВ, обеспечивающих уровень вибраций в пределах санитарных норм.

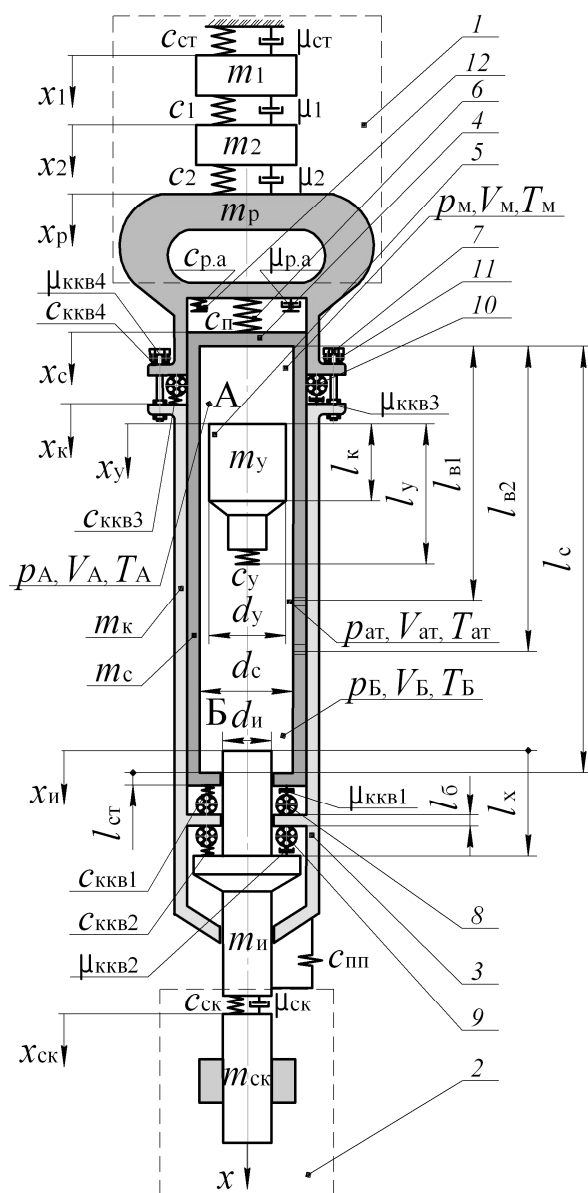
Цель работы — определение рациональных значений коэффициентов жесткости амортизирующей пружины и установ-

ленных в трактах передачи силовых воздействий на рукоятку кольцевых канатных виброизоляторов пневматического молотка с обособленным стволом, обеспечивающих наименьшие значения вибрационных характеристик.

В качестве инструмента для проведения исследований принимается математическая модель системы «стандартный испытательный стенд — пневматический отбойный молоток», которая описывается в работе [1]. Для лучшего понимания поставленной задачи и способов ее решения на рисунке 1 приводится обобщенная расчетная схема системы. Стандартный испытательный стенд содержит имитатор руки в виде двух масс m_1 и m_2 , соединенных между собой и с молотком пружинами (коэффициенты жесткости c_1 и c_2) и демпферами (коэффициенты вязкости μ_1 и μ_2) [6]. Нами добавлена стенка, имитирующая туловище человека.

Меньшая масса m_2 , коэффициенты жесткости c_2 и демпфирования μ_2 соответствуют динамическим свойствам мягких тканей кисти руки (ладони и пальцев). Объект обработки представляется в виде скалки, зажатой с определенным усилием

гидравлическими тисками и способной перемещаться под воздействием инструмента в тисках, преодолевая силу трения $F_{тр}$, возникающую между скалкой и гидравлическими тисками.



1 — имитатор руки, 2 — имитатор объекта обработки, 3 — корпус, 4 — ствол, 5 — поршень-ударник, 6 — пружина, 7 — стяжные болты, 8 — ККВ1, 9 — ККВ2, 10 — ККВ3, 11 — ККВ4, 12 — резиновый амортизатор

Рисунок 1 Расчетная схема пневматического отбойного молотка с обособленным стволом, установленного на стандартном испытательном стенде

Стандарт [6] допускает возможность изменения ряда параметров стенда, например массы m_1 в пределах от 10 до 40 кг. При разработке конструкции отбойного молотка с обособленным стволом в качестве базовой модели принимался выпускаемый серийно молоток МО-2Б. В новом молотке в узлах соединения элементов конструкции сохраняются, как в молотке МО-2Б, резиновая амортизирующая шайба и амортизирующая пружина, выполнявшая в молотке МО-2Б пусковые функции, а также применяются находящиеся непосредственно в местах контактирования силовых элементов молотка ККВ i (i — номер узла контактирования, $i = 1, 2, 3, 4$). В общем случае те или иные значения коэффициентов жесткости и вязкости i -го узла виброзащиты могут обеспечиваться в результате формирования пакета, в котором последовательно устанавливаются единичные виброизоляторы ККВ i числом $n_{кквi}$ с нажимными элементами типа пуансон-матрица.

В конструкции молотка с ОС сохраняется некоторое расстояние $l_{п}$ между резиновым амортизатором в рукоятке и стволом, однако его назначение изменилось. Если в серийных молотках зазор необходим для включения молотка в работу при нажатии рукоятки, то в новом молотке с клавишным включением он служит для обособления ствола от корпуса и возможности передачи напорного усилия от рукоятки через корпус на инструмент, в основном минуя ствол. Однако чрезмерное увеличение $l_{п}$ нежелательно, так как может привести к значительным смещениям ствола относительно инструмента, ограниченного в движении корпусом, в его крайнем в момент нанесения удара положении и нарушению функций. Необходимо сохранить пружину в рукоятке, которая в данной конструкции выполняет амортизационные функции, обеспечивая обособленную работу ствола и создавая упор для него при реактивном движении к рукоятке. Очевидно, пружина должна иметь большую жесткость, чем пусковая пружина в молотке МО-2Б.

Рукоятка и корпус стягиваются посредством болтовых соединений числом n_6 с некоторой заданной приходящейся на один болт силой F_6 . При этом обеспечивается предварительное сжатие пружины в корпусе силой F и расстояние $l_{\text{п}}$ между резиновой амортизационной шайбой и стволом.

Принимаются следующие обозначения: А — верхняя камера, Б — нижняя камера; индексы: 1 и 2 — номера элементов стенда, имитирующих руку человека-оператора, ст — стенка, р — рукоятка, к — корпус, с — ствол, у — ударник, и — инструмент, ск — скалка, п — пружина амортизационная, р.а — резиновый амортизатор; пп — пружина, удерживающая инструмент; $m_1, m_2, m_{\text{р}}, m_{\text{к}}, m_{\text{с}}, m_{\text{у}}, m_{\text{и}}, m_{\text{ск}}, x_1, x_2, x_{\text{р}}, x_{\text{к}}, x_{\text{с}}, x_{\text{у}}, x_{\text{и}}, x_{\text{ск}}$ — массы (m) и перемещения (x) элементов системы; $c_{\text{ст}}, c_1, c_2, c_{\text{п}}, c_{\text{р.а}}$ и $c_{\text{р.а.мак}}, c_{\text{у}}, c_{\text{и}}, c_{\text{пп}}, c_{\text{ск}}, c_{\text{ккв1}}, \dots, c_{\text{ккв4}}$ и $c_{\text{ккв1мак}}, \dots, c_{\text{ккв4мак}}$ — коэффициенты жесткости, соответственно, стенки, упругой связи между массами m_1 и m_2 , упругих связей между m_2 и рукоятью молотка сверху или снизу, амортизирующей пружины, резинового амортизатора до и после его посадки на жестко, имитирующей упругие свойства ударника и инструмента связи, связи инструмента со стволом, удерживающей инструмент пружины, скалки, виброизоляторов ККВ1, ..., ККВ4 до и после их посадки на жестко; $\mu_{\text{ст}}, \mu_1, \mu_2, \mu_{\text{р.а}}, \mu_{\text{ск}}, \mu_{\text{ккв1}}, \dots, \mu_{\text{ккв4}}$ — коэффициенты вязкости стенки, связи между массами m_1 и m_2 руки человека, между m_2 руки и рукоятью молотка сверху или снизу, резинового амортизатора, скалки, виброизоляторов ККВ1, ..., ККВ4; $z_{\text{ккв1}}, \dots, z_{\text{ккв4}}$ — толщина ККВ1, ..., ККВ4; $l_{\text{ккв1}}, \dots, l_{\text{ккв4}}$ — ход ККВ1, ..., ККВ4 до их посадки на жестко; $p_{\text{м}}$ — давление в магистрали; $p_{\text{ат}}$ — атмосферное давление; $p_{\text{А}}$ — давление в камере А; $p_{\text{Б}}$ — давление в камере Б; $V_{\text{А}}, V_{\text{Б}}$ — объемы воздуха в верхней (А) и нижней (Б) камерах; $T_{\text{А}}, T_{\text{Б}}, T_{\text{м}}$ и $T_{\text{ат}}$ — абсолютная температура воздуха в камерах А, Б, в магистрали и в атмосфере; $l_{\text{с}}$ — длина внутренней поверхности ствола; $l_{\text{в1}}$ и $l_{\text{в2}}$ —

расстояния от верхнего основания ствола до первого и второго яруса выхлопных отверстий; $l_{\text{у}}$ — длина ударника; $l_{\text{к}}$ — длина образующей цилиндрической поверхности ударника, контактирующей со стволом; $d_{\text{с}}$ и $d_{\text{у}}$ — внутренний диаметр ствола и диаметр ударника; $d_{\text{и}}$ — диаметр хвостовика инструмента; $l_{\text{х}}$ — длина хвостовика инструмента; $l_{\text{ст}}$ — толщина днища ствола; l_6 — длина буксы в корпусе.

При моделировании принимаются следующие исходные данные, отвечающие экспериментальному молотку [5]. Геометрические параметры: длина участка ствола, на котором при перемещении ударника над отверстиями соответственно 1-го и 2-го ярусов осуществляется выхлоп воздуха: $\Delta l_1 = 2,6 \cdot 10^{-2}$ м, $\Delta l_2 = 8 \cdot 10^{-3}$ м, $l_{\text{с}} = 0,270$ м, $l_{\text{в1}} = 0,146$ м, $l_{\text{в2}} = 0,220$ м, $l_{\text{у}} = 8 \cdot 10^{-2}$ м, $l_{\text{к}} = 0,043$ м, $l_{\text{х}} = 7 \cdot 10^{-2}$ м, $l_{\text{ст}} = 6,3 \cdot 10^{-2}$ м; свободный ход инструмента в стволе $l_{\text{сх}} = 2 \cdot 10^{-2}$ м; осадка пружины, имитирующей связь массы m_2 с рукояткой, $l_{\text{р.п}} = 5 \cdot 10^{-3}$ м; ход резинового амортизатора до посадки на жестко $l_{\text{р.а}} = 6 \cdot 10^{-3}$ м, $l_{\text{п}} = 9 \cdot 10^{-3}$ м; ход единичного ККВ $l_{\text{ккв}} = 6 \cdot 10^{-3}$ м; $d_{\text{с}} = d_{\text{у}} = 3,2 \cdot 10^{-2}$ м; $d_{\text{и}} = 2,4 \cdot 10^{-2}$ м; толщина единичного ККВ $z_{\text{ккв}} = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м; конструктивные площади отверстий из магистрали в камеры А и Б: $f_{\text{Ам}} = 2,69 \cdot 10^{-4}$ м², $f_{\text{Бм}} = 1,77 \cdot 10^{-4}$ м²; конструктивные площади выхлопных отверстий из камер А и Б в атмосферу: $f_{\text{в1}} = 5,5 \cdot 10^{-4}$ м², $f_{\text{в2}} = 10^{-4}$ м²; объем ударника $V_{\text{уд}} = 5,9 \cdot 10^{-5}$ м³; угол отклонения продольной оси молотка от вертикали $\beta = 0$ град.

Динамические параметры: $m_2 = 3,6$ кг; $m_{\text{р}} = 1,595$ кг; $m_{\text{к}} = 4,2$ кг; $m_{\text{с}} = 3,1$ кг; $m_{\text{у}} = 0,404$ кг; $m_{\text{и}} = 1,2$ кг; $m_{\text{ск}} = 1,8$ кг; $c_{\text{ст}} = 10^5$ Н/м; $c_1 = 2500$ Н/м; $c_2 = 2,7 \cdot 10^5$ Н/м; $c_{\text{р.а}} = 5 \cdot 10^4$ Н/м; $c_{\text{р.а.мак}} = 2 \cdot 10^5$ Н/м; $c_{\text{у}} = 4 \cdot 10^6$ Н/м; $c_{\text{и}} = 3 \cdot 10^5$ Н/м; $c_{\text{пп}} = 2 \cdot 10^4$ Н/м; $c_{\text{ск}} = 2 \cdot 10^6$ Н/м; $c_{\text{ккв}i \text{мак}} = 2,5 \cdot 10^5$ Н/м; $\mu_{\text{ст}} = 150$ Н·с/м; $\mu_1 = 350$ Н·с/м; $\mu_2 = 350$ Н·с/м; $\mu_{\text{ск}} = 500$ Н·с/м; $\mu_{\text{ккв}i} = 290$ Н·с/м; $F_{\text{т}} = 8000$ Н; $F_6 = 100$ Н; $F = 50$ Н.

Число ККВ в узлах 1–4: $n_{\text{ккв1}} = n_{\text{ккв2}} = 1$, $n_{\text{ккв3}} = 3$, $n_{\text{ккв4}} = 2$.

Газотермодинамические параметры: $p_m = 5 \cdot 10^5$ Па, $p_{ат} = 10^5$ Па; давления, при которых клапан перебрасывается в режим холостого хода и в режим рабочего хода: $p_{х.х} = 3 \cdot 10^5$ Па, $p_{р.х} = 2,4 \cdot 10^5$ Па; время перебрасывания клапана $\tau = 3 \cdot 10^{-4}$ с; коэффициенты расхода воздуха через отверстия, соединяющие камеры А и Б с магистралью: $v_{АМ} = 0,7$, $v_{БМ} = 0,7$; коэффициенты расхода воздуха через отверстия, соединяющие камеры А и Б с атмосферой: $v_{АВ} = v_{БВ} = 0,4$, $T_m = 303$ К, $T_{ат} = 293$ К.

Варьируются: $c_{ккв}$ в пределах от $5 \cdot 10^4$ до $2 \cdot 10^5$ Н/м, $c_{п}$ — от 10^4 до $1,6 \cdot 10^5$ Н/м, m_1 — от 20 до 40 кг.

В начальный момент времени перемещения и скорости всех масс полагаются равными нулю, $p_A = p_m$, $p_B = p_{ат}$, $T_A = T_m$, $T_B = T_{ат}$.

Компьютерная программа составлена на алгоритмическом языке Турбо Паскаль.

Критерием выбора рациональных значений величин $c_{ккв}$ и $c_{п}$ являются показатели уровня вибраций — наименьшие достижимые значения действующих (среднеквадратических) значений ускорения \bar{a}_p и скорости \bar{v}_p рукоятки, которые определяются по формулам:

$$\bar{a}_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_{pi}^2 \Delta t}{T - t_{п}}}; \quad \bar{v}_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_{pi}^2 \Delta t}{T - t_{п}}},$$

где T — продолжительность измерений; $t_{п}$ — продолжительность переходных процессов в системе при включении молотка; Δt — шаг квантования исследуемых величин; a_{pi} , v_{pi} — текущие i -е значения ускорения и скорости рукоятки.

Моделируемые величины сопоставляются с аналогичными величинами, полученными для молотка МО-2Б, рассчитанными с применением математических моделей, приведенных в работе [8]. В частности, показатели вибраций МО-2Б $\bar{a}_p = 18,6$ м/с² и $\bar{v}_p = 0,123$ м/с значительно

превышают соответствующие санитарные нормы показателей локальной вибрационной нагрузки для длительности смены 8 ч ($a = 2,0$ м/с² и $v = 0,02$ м/с), приведенные в стандарте [7], и даже допустимые максимальные значения, приведенные для установленных на стандартном испытательном стенде отбойных молотков в стандарте [6]: $a = 8,0$ м/с² и $v = 0,08$ м/с.

При моделировании установлено, что индикаторная диаграмма молотка не зависит от напорного усилия и практически не отличается от аналогичной диаграммы молотка МО-2Б. То же можно заметить и в отношении прочих термодинамических процессов.

Значения действующих (среднеквадратических) значений ускорения \bar{a}_p и скорости \bar{v}_p рукоятки, полученные для нового молотка при значениях $c_{ккв}$ в пределах от $0,5 \cdot 10^5$ до $2 \cdot 10^5$ Н/м, $c_{ккв \max} = 2,5 \cdot 10^5$ Н/м, $n_{ккв1} = n_{ккв2} = 1$, $n_{ккв3} = 3$, $n_{ккв4} = 2$, $m_1 = 20$ кг, представлены в таблице 1 и на рисунке 2. Значения скорости \bar{v}_p при малых и больших значениях $c_{ккв}$ ККВ примерно одинаковы. Это объясняется тем, что при малых значениях $c_{ккв}$ ход ККВ выбирается даже при малых нагрузках, и они переходят работать на участок механической характеристики с жесткостью $c_{ккв \max}$. При больших значениях $c_{ккв}$, близких по своему значению к $c_{ккв \max}$, ККВ изначально работают таким образом. В рассматриваемом случае в совокупности наименьшие значения \bar{a}_p и \bar{v}_p достигаются в диапазоне значений $c_{ккв} 0,7 \cdot 10^5 \dots 1,1 \cdot 10^5$ Н/м.

Влияние $c_{п}$ на \bar{a}_p и \bar{v}_p при достаточно благоприятном значении $c_{ккв}$, равном 10^5 , отражено в таблице 2 и на рисунке 3.

Из анализа полученных данных видно, что наилучшие вибрационные характеристики достигаются при $c_{п} = 8 \cdot 10^4$ и $c_{ккв} = 10^5$ Н/м. Динамические процессы в молотке, полученные при этих значениях $c_{п}$ и $c_{ккв}$, отражены на рисунках 4–12.

Таблица 1

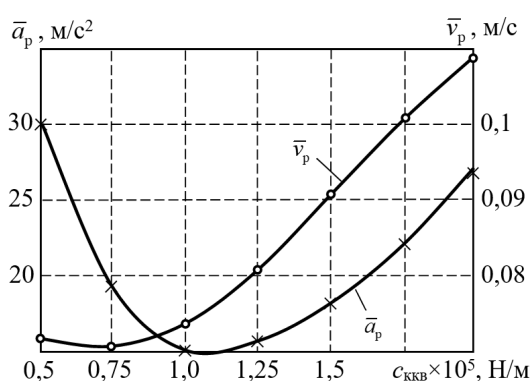
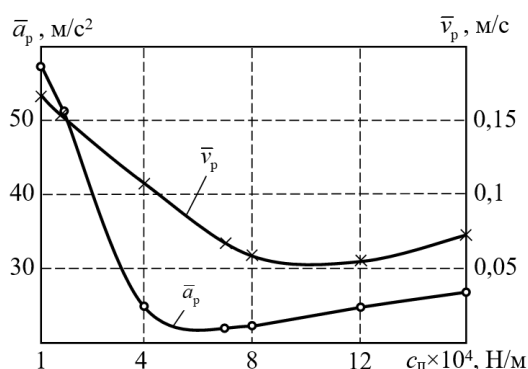
Зависимости ускорения \bar{a}_p и скорости \bar{v}_p рукоятки, от жесткости ККВ $c_{\text{ККВ}}$

$c_{\text{ККВ}}$, Н/м	$0,5 \cdot 10^5$	$0,75 \cdot 10^5$	$1,0 \cdot 10^5$	$1,25 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$	$1,75 \cdot 10^5$	$2,0 \cdot 10^5$
\bar{a}_p , м/с ²	16,15	15,16	16,91	20,6	25,57	30,2	34,56
\bar{v}_p , м/с	0,1	0,079	0,07	0,071	0,076	0,084	0,094

Таблица 2

Зависимости ускорения \bar{a}_p и скорости \bar{v}_p рукоятки, от жесткости $c_{\text{п}}$ пружины

$c_{\text{п}}$, Н/м	10^4	$2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$7 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^5$
\bar{a}_p , м/с ²	55,2	52,1	25,2	14,8	14,75	25,35	27,88
\bar{v}_p , м/с	0,174	0,171	0,125	0,066	0,06	0,067	0,079

Рисунок 2 Зависимости ускорения \bar{a}_p и скорости \bar{v}_p рукоятки от жесткости ККВ $c_{\text{ККВ}}$ Рисунок 3 Зависимости ускорения \bar{a}_p и скорости \bar{v}_p рукоятки от жесткости амортизирующей пружины $c_{\text{п}}$

Перемещения масс системы при $m_1 = 20$ кг и $m_1 = 40$ кг представлены на рисунке 4. Диаграммы перемещения ударника являются маркером процессов в систе-

ме. Как видно, все массы системы, за исключением инструмента, колеблются с частотой ударника, причем масса m_2 руки, рукоятка и корпус — в противофазе с ним. Ствол, находясь под воздействием реактивных сил, пружины, амортизатора и ККВ1, совершает сложные движения. При перемещениях масс наблюдается некоторый тренд в положительном направлении, обусловленный периодическими при ударах смещениями скалки.

При $m_1 = 20$ кг (см. рис. 4, а) частота колебаний инструмента по окончании переходного процесса в молотке примерно в два раза больше частоты колебаний ударника. При этом соударения ударника с инструментом в большинстве случаев совершаются при их встречном движении. При $m_1 = 40$ кг, т. е. при допускаемом стандартом [6] максимальном значении напорного усилия на рукоятке, инструмент совершает быстро затухающие колебания с частотой в 5–6 раз большей, чем частота нанесения ударов ударником. При этом к моменту нанесения очередного удара ударником инструмент практически останавливается. При $m_1 = 40$ кг смещения и амплитуды колебаний элементов системы, за исключением ударника, меньше примерно в 1,5 раза, чем при $m_1 = 20$ кг. При $m_1 = 20$ кг амплитуда колебаний рукоятки менее выражена и в 2–3 раза меньше, чем в базовом молотке МО-2Б, что указывает на снижение вибраций.

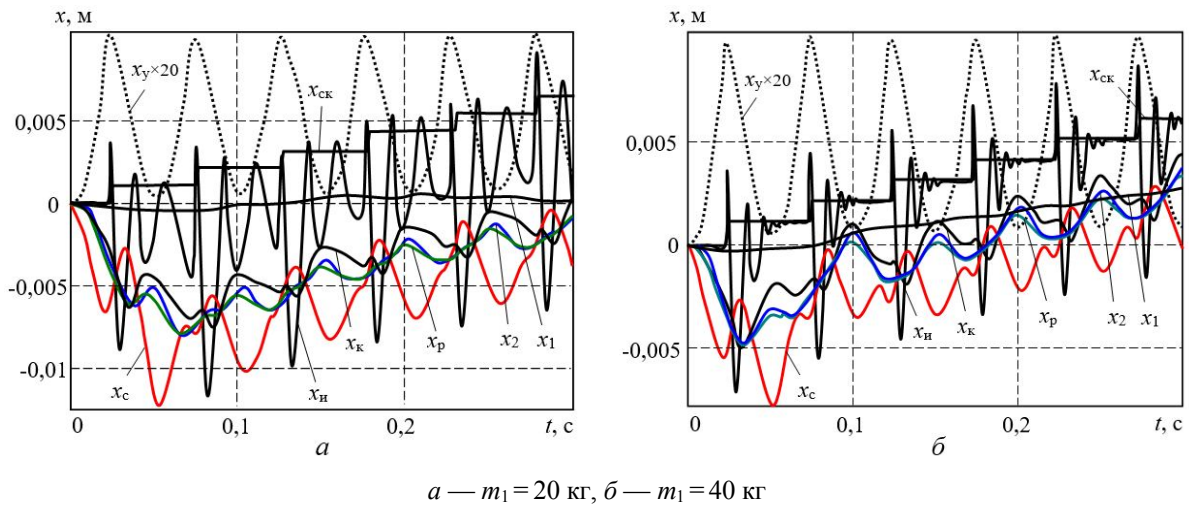


Рисунок 4 Диаграммы перемещений элементов системы «стенд — молоток»

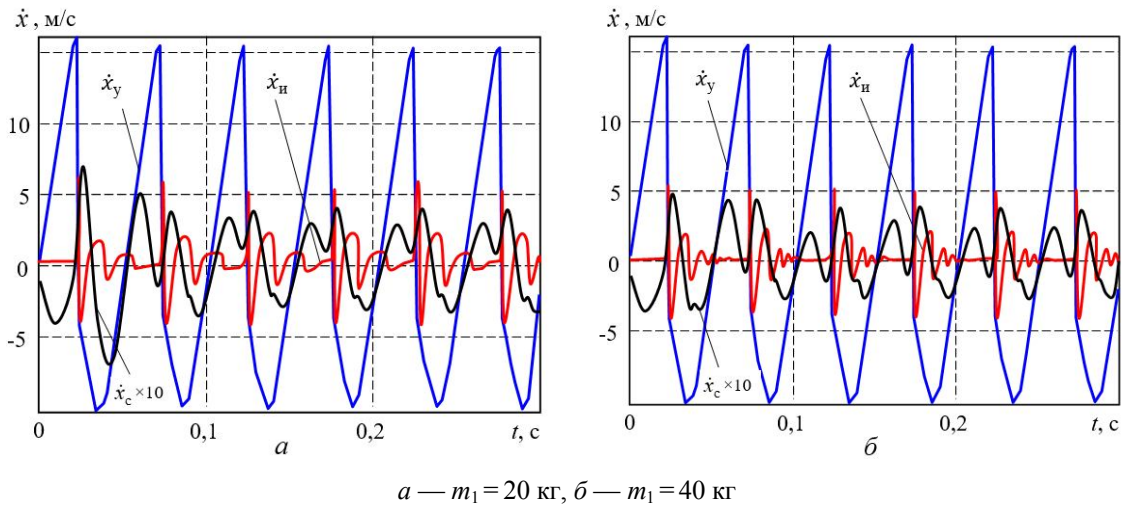


Рисунок 5 Диаграммы скоростей элементов системы «стенд — молоток»

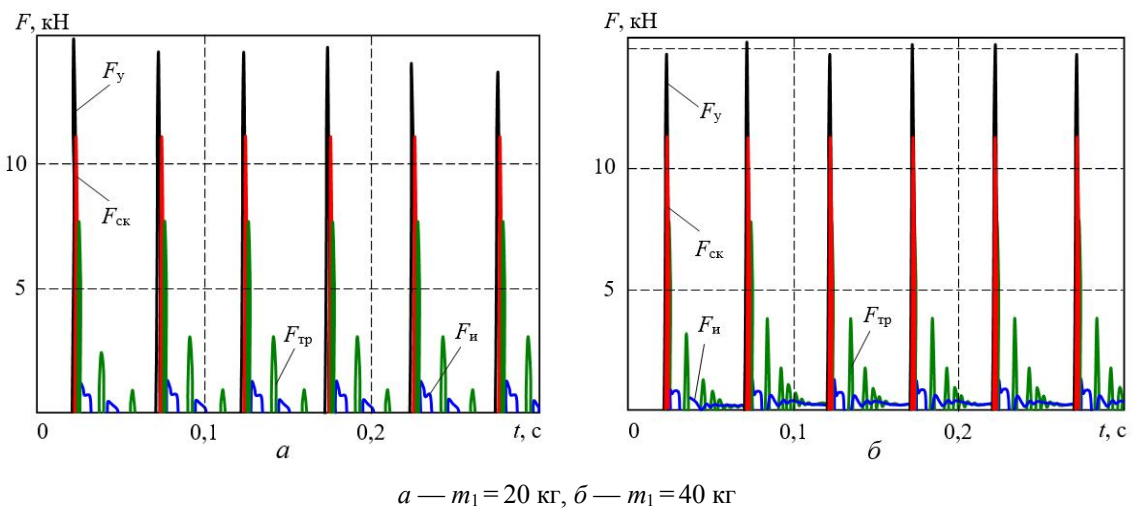
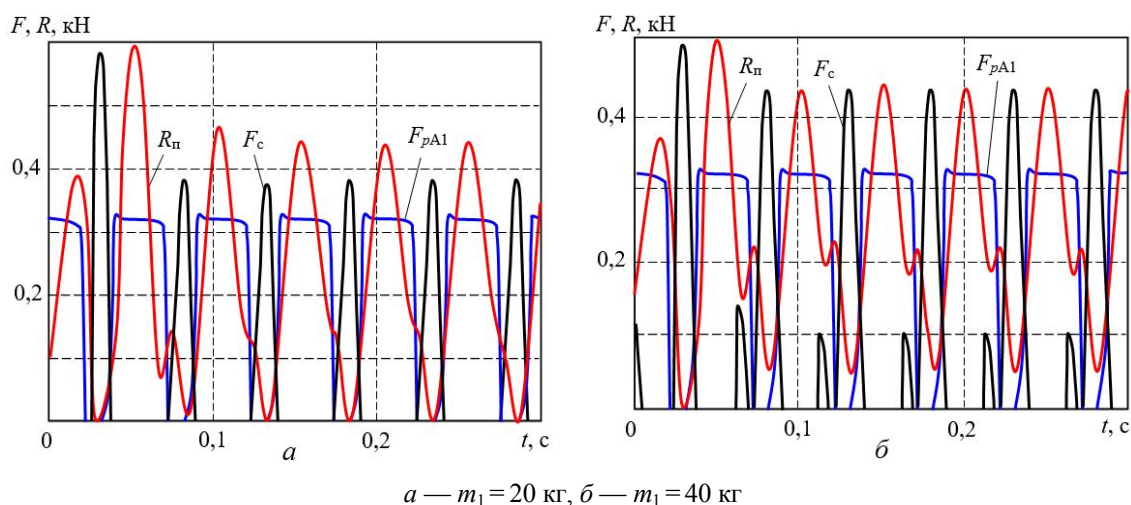


Рисунок 6 Диаграммы сил, действующих на инструмент и скалку

Рисунок 7 Диаграммы сил R_n , F_c и F_{pA1} , действующих на ствол

На рисунке 5 представлены диаграммы скоростей элементов системы. Скорость $v_{и}$ инструмента в момент его соударения с ударником в обоих случаях, особенно при $m_1 = 40$ кг, несоизмеримо меньше скорости ударника v_y и может быть исключена из числа факторов, определяющих как энергию удара, так и уровень вибраций рукоятки.

Сила F_y , действующая на вставной инструмент, а затем сила $F_{ск}$ взаимодействия инструмента со скалкой и сила $F_{и}$ первого удара инструмента по корпусу при его отскоке от скалки практически не зависят от m_1 , т. е. от напорного усилия (рис. 6). Сила $F_{и}$ в результате применения ККВ, прежде всего ККВ2, в 11,5 раза меньше F_y . В молотке МО-2Б — меньше в 9,4 раза.

Суммарная сила сжатия пусковой пружины и резинового амортизатора в рукоятке управления R_n и сила сжатия ККВ1 F_c (рис. 7), действующие на ствол, несколько снижаются по мере увеличения напорного усилия, при $m_1 = 40$ кг в 1,18 раз меньше, чем при $m_1 = 20$ кг. Хотя сила R_n в 1,4 раза больше, чем в молотке МО-2Б, однако отсутствие весьма значительной реакции инструмента, которая перекладывается на корпус, в целом позволяет снизить нагрузки на ствол. Напорное усилие мало влияет на силу первого удара инструментом по корпусу (по ККВ2), однако

при его увеличении частота ударов в течение одного цикла молотка возрастает, причем амплитуда силы взаимодействия инструмента со стволом $F_{и}$ в каждой серии ударов резко уменьшается.

Силы, действующие на корпус молотка, представлены на рисунке 8.

Силы F_c и $F_{и}$ сжатия ККВ1 и ККВ2, возникающие при ударах, соответственно, ствола и инструмента по корпусу, при $m_1 = 20$ кг практически совпадают по времени и направлены навстречу друг другу, что при их взаимном гашении снижает динамику корпуса и является неоспоримым достоинством данной конструкции молотка. Равенства этих сил, очевидно, можно достичь в результате применения ККВ1 и ККВ2 с соответствующими коэффициентами жесткости.

Силы сжатия F_k и $F_{p,k}$ пакетов с ККВ3 и ККВ4 находятся в противофазе. Соотношение между ними определяется числом единичных ККВ в каждом из пакетов, их жесткостями и, в значительной степени, напорным усилием на рукоятке. Максимальные значения силы F_k при $m_1 = 40$ кг в 1,23 раза больше, чем при $m_1 = 20$ кг, а максимальные значения силы $F_{p,k}$ — в 1,5 раза меньше.

Группа сил, приложенных к рукоятке, представлена на рисунке 9. Очевидно, сила

$F_{p,v}$, действующая на руку, определяется силой $R_{п}$ и разностью сил $F_{к}$ и $F_{p,k}$. Силы $F_{к}$ и $F_{p,k}$, являющиеся силами взаимодействия корпуса и рукоятки, соизмеримы с силой $R_{п}$, однако в 4,3 и в 5,3 раза, соответственно, меньше силы $F_{и}$, что указывает на значительный эффект снижения нагрузок от инструмента. Также следует отметить, что силы $F_{к}$ и $F_{p,k}$ имеют встречное направление. Это снижает их суммарное воздействие на рукоятку, что особенно заметно при $m_1 = 20$ кг.

Характер изменения ускорения \bar{a}_p и скорости \bar{v}_p рукоятки отражен, соответственно, на рисунках 10 и 11. Рассчитанные на их основании действующие (средне-

квадратические) значения ускорения \bar{a}_p и скорости \bar{v}_p рукоятки составляют при $m_1 = 20$ кг, соответственно, $14,75 \text{ м/с}^2$ и $0,06 \text{ м/с}$, а при $m_1 = 40$ кг — $12,43 \text{ м/с}^2$ и $0,0596 \text{ м/с}$. С увеличением напорного усилия действующие (среднеквадратические) значения ускорения \bar{a}_p улучшаются, а действующие скорости \bar{v}_p практически не меняются. Таким образом, в конструкции молотка с ОС и ККВ, установленного на стандартном стенде, при $m_1 = 20$ кг достигнуто, по сравнению с молотком МО-2Б, снижение уровня виброускорений в 1,26 раза и виброскорости в 2,06 раза.

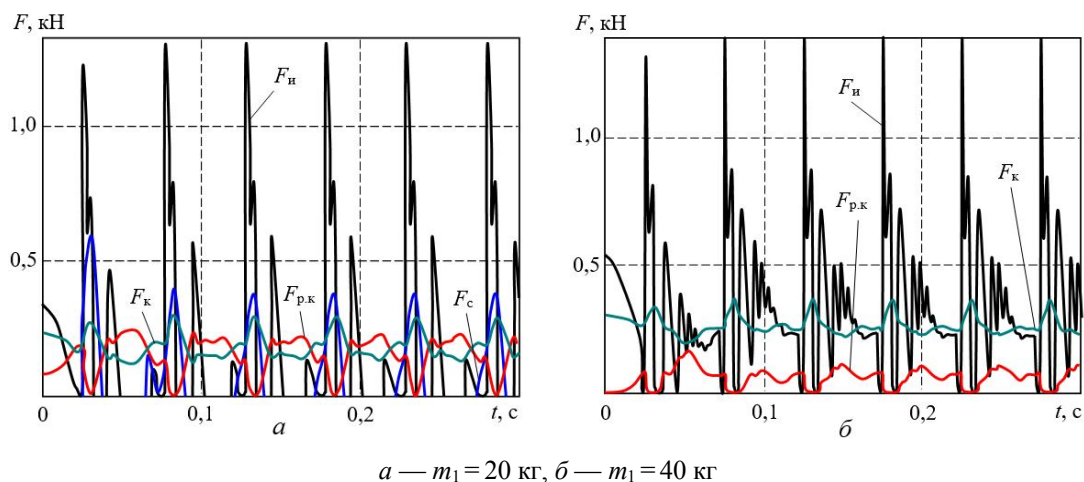


Рисунок 8 Диаграммы сил, действующих на корпус

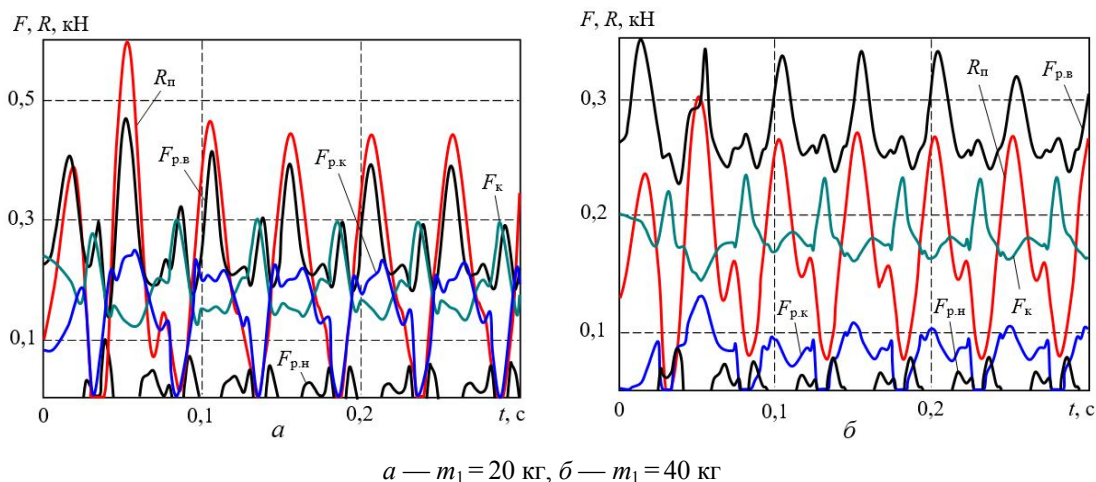


Рисунок 9 Диаграммы сил, действующих на рукоятку молотка

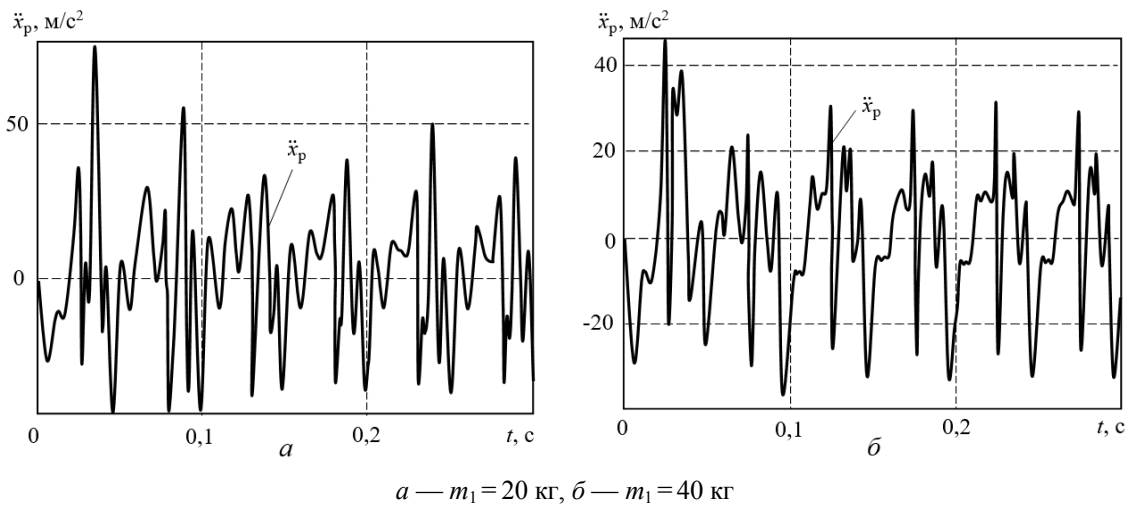


Рисунок 10 Диаграмма ускорения рукоятки

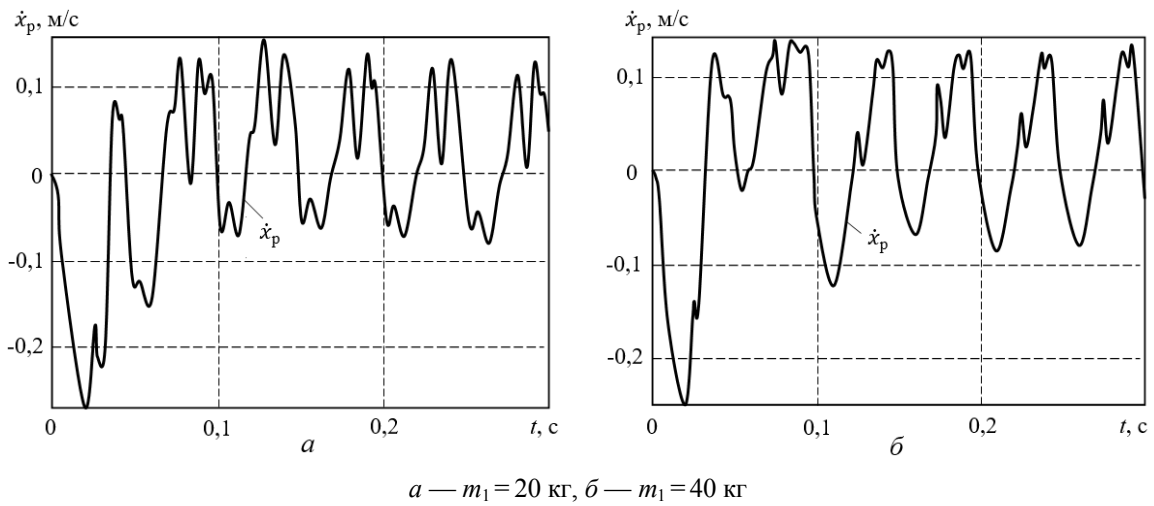


Рисунок 11 Диаграммы скорости рукоятки

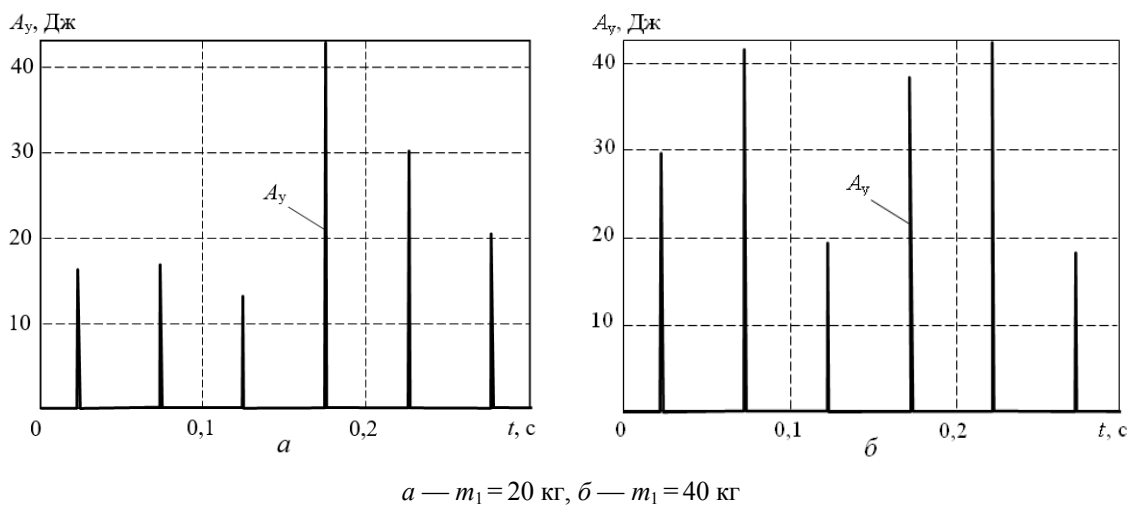


Рисунок 12 Диаграммы энергии удара

Энергия удара изменяется в пределах от 15 до 43 Дж (рис. 12). В качестве наилучшего приближения к истинному значению и в данном случае следует принимать наибольшее значение A , равное 43 Дж. Расхождение значений A , полученных в данном случае и в случае базового молотка, не превышает 12 %. Поскольку термогазодинамические процессы в обоих молотках практически одинаковы, то в новом молотке энергия удара будет, надо полагать, не меньше, чем в молотке МО-2Б.

Наибольшее снижение вибраций обеспечивается в случае применения кольцевых канатных виброизоляторов, встроенных между инструментом и корпусом, стволом и корпусом, а также между корпусом и рукояткой, если коэффициент жесткости единичных ККВ составляет $9 \cdot 10^4 \dots 1,1 \cdot 10^5$ Н/м. В некоторых случаях целесообразно применять пакеты из последовательно расположенных ККВ. Ме-

тодом проб установлено, что пакет ККВ между корпусом и рукояткой должен содержать три единичных ККВ, а пакет между рукояткой и головкой стягивающего болта — два ККВ. Большее число ККВ в этих пакетах может привести к истощению при их деформации зазора между рукояткой и стволом. Корпус и рукоятка стягиваются двумя болтами с усилием примерно 75 Н, приходящимся на один болт. В конструкции молотка с ОС и ККВ, установленного на стандартном стенде, при $m_1 = 20$ кг, $c_{пр} = 8 \cdot 10^4$ Н/м и $c_{ккв} = 10^5$ Н/м достигнуто, по сравнению с молотком МО-2Б, снижение действующих (среднеквадратических) значений виброускорений в 1,26 и виброскорости в 2,06 раза.

Задачей последующих исследований является определение рациональных конструктивных параметров молотка, обеспечивающих уровень вибраций в пределах допустимых санитарных норм.

Библиографический список

1. Вишневецкий, Д. А. Математическая модель пневматического отбойного молотка с обособленным стволом [Текст] / Д. А. Вишневецкий, С. В. Корнеев, Д. В. Мулов // *Фундаментальные основы механики*. — СПб. : НИЦ МС, 2022. — № 9. — С. 30–39.
2. Пат. 36012 Украина, МПК В 25 D 17/00. Пневматичний молоток / Д. В. Мулов, О. Ю. Рутковский ; заявник і патенто власник Донбас. держ. техніч. ун-т. — № 200806164 ; заявл. 12.05.08 ; опубл. 10.10.08, Бюл. № 19. — 4 с. : ил.
3. Пат. 2677903 С2 Российская Федерация, МПК В 25 D 11/00. Машина ударного действия / Б. С. Доброборский ; заявитель и патентообладатель Доброборский Б. С. — № 2017118021 ; заявл. 23.05.17 ; опубл. 22.01.19, Бюл. № 3. — 7 с. : ил.
4. Пат. 190818 U1 Российская Федерация, МПК В 25 D 11/00. Машина ударного действия / Б. С. Доброборский, С. А. Евтюков, Е. Е. Медрес ; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. — № 2017146875 ; заявл. 28.12.17 ; опубл. 12.07.19, Бюл. № 20. — 4 с. : ил.
5. Мулов, Д. В. Экспериментальные исследования вибрационных параметров ручной ударной машины с виброзащитной системой [Текст] / Д. В. Мулов // *Гірничий вісник : науково-технічний збірник*. — Кривий Ріг : КНУ, 2012. — Вып. 95 (1). — С. 124–128.
6. ГОСТ Р 55162–2012. Оборудование горно-шахтное. Молотки отбойные пневматические. Требования безопасности и методы испытаний [Текст]. — Введ. 2014-01-01. — М. : Стандартинформ, 2014. — 28 с.
7. СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. — Введ. 1996-10-31. — М., Инф.-изд. центр Минздрава России, 1996. — 30 с.
8. Корнеев, С. В. Имитация стендовых испытаний пневматических отбойных молотков по ГОСТ Р 55162–2012 [Текст] / С. В. Корнеев, Д. А. Вишневецкий, Д. В. Мулов // *Сборник научных трудов ДонГТИ*. — 2022. — № 26 (69). — С. 71–82.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиМ ДонГТИ Денищенко П. Н.,
к.т.н., доц., зав. каф. электромеханики и транспортных систем
СИПИМ ЛГУ им. В. Даля Петровым А. Г.*

Статья поступила в редакцию 28.09.2022.

**Doctor of Technical Sciences Vishnevskiy D. A., Doctor of Technical Sciences Korneev S. V.,
Mulov D. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR, mulovd@yandex.ru)**

**SUBSTANTIATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF VIBROPROTECTION OF
PNEUMATIC JACKHAMMERS WITH A SEPARATE BARREL**

As a result of mathematical modeling of the system “standard test bench — pneumatic jackhammer with a separate barrel”, rational values of the stiffness coefficients of the shock-absorbing spring and ring rope vibration isolators of hammer are determined, at which the minimum root mean square values of vibration velocity and vibration acceleration of handle are provided. A comparison of vibration characteristics of the MO-2B hammers and with a separate barrel was made, the advantages of a hammer with a separate barrel were revealed.

Key words: *pneumatic jackhammer, separate barrel, shock-absorbing spring, ring rope vibration isolators, stiffness, standard test bench, mathematical model, vibration acceleration, vibration velocity.*

УДК 620.179.16

д.т.н. Сотников А. Л.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР),
Орлов А. А.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Выполнен анализ эксплуатационных характеристик отечественных ультразвуковых дефектоскопов, использующих технологию фазированных и антенных решеток, по разрешающей способности, особенностям настройки и качеству отображаемых томограмм с целью выработки рекомендаций по их выбору для различных областей применения. Проведенный сравнительный анализ технических возможностей дефектоскопов на фазированных и антенных решетках информативно позволяет показать преимущества и недостатки каждого из них.

Ключевые слова: дефектоскопия, фазированные и антенные решетки, неразрушающий контроль, фокальный закон, искусственный отражатель, цифровая фокусировка.

Современные технологии и приборы, позволяющие визуализировать внутренний объем твёрдого тела, например из металла, композита или бетона, находят все большее применение в практике неразрушающего контроля ответственных изделий и конструкций.

Одними из таких приборов являются ультразвуковые (УЗ) дефектоскопы на фазированных и антенных решетках (ФАР или ФР и АР соответственно).

При УЗ-контроле обычно используются одноэлементные пьезопреобразователи, создающие УЗ-колебания, которые распространяются вдоль акустической оси преобразователя с небольшим расхождением (рис. 1). Расхождение колебаний помогает обнаруживать и измерять размеры

дефектов, расположенных под углом к УЗ-лучу.

Особенностью технологии ФАР является способность управлять формой и направлением УЗ-луча электронным способом при помощи одного преобразователя с множеством элементов (рис. 2). Пьезоэлемент решетки разрезан на множество идентичных элементов, ширина каждого из которых многократно меньше его длины. Элементы расположены на одной подложке на одинаково малом расстоянии друг от друга и связаны между собой электрически и акустически. Каждый из этих элементов может рассматриваться как источник цилиндрической волны. Волновые фронты от множества узких пьезоэлементов будут интерферировать, создавая суммарный волновой фронт [1].

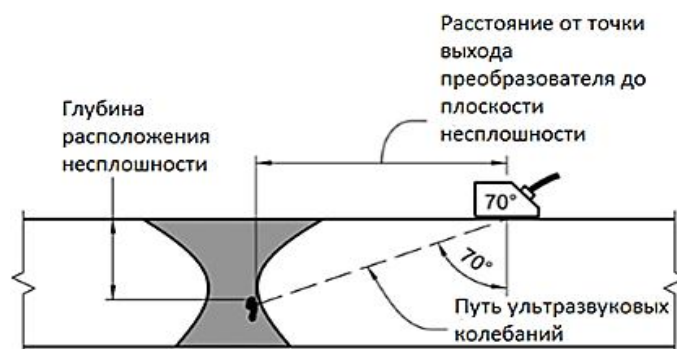


Рисунок 1 Определение глубины и расположения несплошностей сварного шва геометрическим способом с помощью традиционного УЗ-контроля

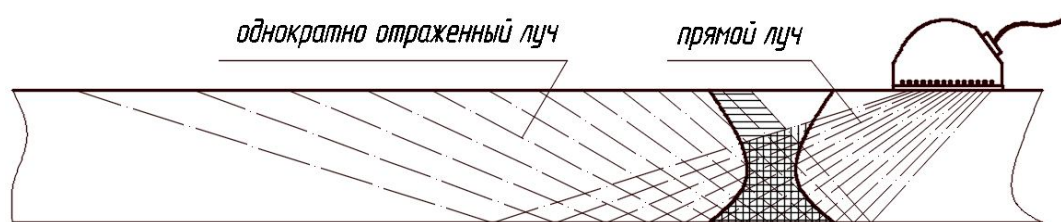


Рисунок 2 УЗ-контроль сварного шва с помощью технологии ФАР

На рисунке 2 показана секторная раз-
вертка, полученная с помощью ФАР, воз-
буждающей УЗ-колебания, как правило, в
диапазоне углов $35\text{--}75^\circ$. Для удобства по-
нимания на этом рисунке показаны только
первый и второй сегменты сканирования.
Часть сварного соединения, сканируемая
прямым лучом, заштрихована вертикаль-
ными линиями. Часть сварного соедине-
ния, сканируемая однократно отраженным
лучом, заштрихована горизонтальными
линиями. Стоит обратить внимание, что
при этом сканировании нижняя часть
сварного шва исследуется как прямым, так
и однократно отраженным лучом.

В сравнении с классическим УЗ-
контролем применение УЗ-дефектоскопов
с ФАР предоставляет гораздо более ин-
формативное двумерное изображение се-
чения внутреннего объема материала —
томограмму, — а также даёт возможность
генерации преобразователем разных углов
ввода сигнала, что намного увеличивает
контролируемую зону и скорость сканиро-
вания. Вместе с тем генерация эхосигна-
лов диапазона углов и последующая их
обработка повышает требования к вычис-
лительной мощности применяемых УЗ-
дефектоскопов для получения высокого
качества изображения с приемлемой час-
тотой обновления, что особенно важно при
автоматизированном сканировании [2].

В случае использования ФР волновые
фронты, излучаемые отдельными элемен-
тами преобразователя, могут быть задер-
жаны во времени и синхронизированы по
фазе и амплитуде таким образом, чтобы
создавать сфокусированный и управляе-
мый УЗ-луч. АР отличается тем, что в

процессе ее работы зондирование проис-
ходит поочередно каждым отдельным
элементом, а прием — одновременно все-
ми элементами преобразователя [3].

По принципу действия УЗ-дефектоскопы
с ФАР можно разделить на две группы:

1) приборы, в которых ФР физически
формируют в объекте контроля (ОК) скани-
рующий УЗ-сигнал;

2) приборы с виртуально синтезируемой
фокусируемой апертурой, где АР поэлемент-
но зондирует ОК рассеянным УЗ-сигналом.

В первом случае, перед проведением
контроля, задаётся тип фокусировки, по
которому для конкретной ФР, призмы и
ОК рассчитываются задержки при излуче-
нии и приёме в заданном диапазоне углов.
При зондировании все элементы преобра-
зователя излучают акустические импульсы
с некоторыми взаимными временными за-
держками, которые заданы фокальным за-
коном, благодаря чему происходит фоку-
сировка импульсов в выбранную точку
пространства. В процессе приема сигналов
применяется тот же, что и при излучении
сигналов, фокальный закон, который, бла-
годаря взаимным задержкам сигналов в
приемных каналах, обеспечивает сумми-
рование эхо-сигналов от выбранной точки
пространства. При этом каждый элемент
ФР (активной группы) работает независи-
мо от других элементов. Полезным эффек-
том от их совместной работы является
сумма эхо-сигналов, пришедших из точки
фокусировки в ОК [3].

После процедуры расчёта задержек, ко-
торая может длиться несколько секунд,
УЗ-дефектоскоп на ФР начинает формиро-
вать секторное изображение отражателей

(S-скан) либо с некоторым периодом, либо по сигналам с датчика положения [2]. Заключение о размерах и типе обнаруженного отражателя делается не по одному эхосигналу, как в традиционном УЗ-контроле, а по двумерному изображению S-скана, которое значительно информативнее.

Во втором случае, при использовании АР, регистрируются эхосигналы, поочередно излученные и принятые всеми парами элементов решётки. Такой метод регистрации эхосигналов в зарубежной литературе называют «полноматричный захват» — Full Matrix Capture (FMC) [4]. Затем по измеренным эхосигналам восстанавливаются изображения отражателей. Один из алгоритмов, позволяющий обработать этот объём информации, — метод общей фокусировки (в зарубежной литературе называют Total Focusing Method (TFM) [4]). Объединенную работу методов FMC+TFM в русскоязычной литературе называют методом цифровой фокусировки антенной решетки (ЦФА) [2, 5, 6].

В России на сегодняшний день выпускаются следующие УЗ-дефектоскопы на ФАР, внесенные в реестр средств измерений (табл. 1):

- АВГУР-АРТ компании «Эхо+» (рис. 3, а) [5];
- A1550 IntroVisor компании «АКС» (рис. 3, б) [6];
- УСД-60ФР компании «Кропус» (рис. 3, в) [7].

УЗ-дефектоскоп АВГУР-АРТ (рис. 3, а) имеет достаточно большие габаритные размеры и массу (7 кг), а также аккумуляторную батарею с продолжительностью работы 4 часа [5], что не позволяет с приемлемым комфортом работать в полевых условиях. Размеры данного дефектоскопа дали возможность вместить мощную вычислительную базу, однако при этом он не отличается простотой настройки и эксплуатации. Прибор обладает большим спектром настроек под разнообразные конфигурации ОК и условия сканирования. Высокая скорость обработки данных позволяет проводить авто-

матизированное сканирование при помощи АВГУР-АРТ с высокой производительностью. Ограничением данного прибора является возможность его работы только при температуре окружающей среды выше 0 °С.

A1550 IntroVisor (рис. 3, б), так же как и следующая модель УЗ-дефектоскопа, обладает простым и удобным меню основных настроек и установки параметров рабочей конфигурации под каждый конкретный ОК. По утверждению разработчиков, освоить работу с прибором под силу специалистам любого уровня квалификации, в том числе не имеющим предварительной подготовки [6]. Прибор имеет небольшие габаритные размеры и массу (1,8 кг), что является важным качеством при работе в полевых условиях. Быстросменные аккумуляторные батареи позволяют использовать дефектоскоп в рабочем режиме около 8 часов непрерывной работы.

К преимуществам УСД-60ФР (рис. 3, в) можно отнести несложный интерфейс, простую и быструю настройку дефектоскопа для заданных условий контроля конкретных объектов. Малая масса (1,4 кг) и габаритные размеры, аккумулятор большой емкости позволяют использовать прибор в полевых условиях около 10 часов в рабочем режиме. Также в данном дефектоскопе реализована функция автоматической калибровки призмы преобразователя и самодиагностики коммутатора [7].

Отличительной чертой УЗ-дефектоскопов на ФР является способность фокусироваться в любой желаемой точке в ОК. При фокусировке используются задержки, как при передаче, так и при приеме, для синхронизации времени пролета коротких импульсных сигналов в интересующих точках. В фокальной зоне объекта ширина генерируемого акустического луча уменьшается (рис. 4, а — зона ярко-оранжевого и красного цвета), а соответствующее разрешение обнаружения существенно увеличивается. Реализация указанного принципа фокусировки возможна на УЗ-дефектоскопах УСД-60ФР и АВГУР-АРТ.

Таблица 1

Сравнение технических возможностей УЗ-дефектоскопов на ФАР

Технические характеристики	УЗ-дефектоскоп на ФАР		
	АВГУРТ-АРТ	A1550 IntroVisor	УСД-60ФР
Количество пьезоэлементов в решетке, шт.	32	16	16
Сектор обзора поперечной волной	35–75°	35–80°	35–75°
Диапазон измерений глубины с прямой решеткой, мм	1–200	2–300	<2900
Диапазон измерений глубины с наклонной решеткой, мм	–	2–160	–
Диапазон частот решетки, МГц	0,4–25	1–10	0,5–12
А-СКАН — режим классического дефектоскопа	+	+	+
В-СКАН — режим томографа	+	+	+
С-СКАН — представление результатов в виде сечения ОК в плане, параллельного поверхности сканирования	+	+	+
D-СКАН — представление результатов в виде поперечного сечения ОК, перпендикулярного к поверхности сканирования и перпендикулярного к проекции оси УЗ-пучка на поверхность сканирования	+	+	+
S-СКАН — секторное сканирование	+	–	+
L-СКАН/E-СКАН — линейное сканирование	+	–	+
TOFD — дифракционно-временной метод	+	–	+
Возможность использования датчика пути (энкодера)	+	+	+
Притираемость призмы (дополнительного модуля) под конкретные радиусные поверхности, мм	–	+	+
Цифровая фокусировка сигнала (ЦФА)	+	+	+
Физическая фокусировка луча решетки	+	–	+
Временная регулировка чувствительности (ВРЧ)	+	+	+
Пространственная регулировка чувствительности (ПРЧ)	+	+	–
Угловая регулировка чувствительности (УРЧ)	+	–	+
Способность к автоматической калибровке	–	–	+
Возможность самодиагностики коммутатора и преобразователя	–	–	+
Возможность автоматизированного сканирования	+	+	+
Работоспособность при температурах, °С	+1...+40	–10...+55	–30...+55

На рисунке 4, б представлена томограмма (S-скан) ОК с искусственными боковыми цилиндрическими отверстиями (БЦО) в количестве 8 шт. и установленным базовым углом ввода ФР-преобразователя 50° [8].

В УЗ-дефектоскопе A1550 IntroVisor реализуется метод ЦФА. Его особенность в том, что всё изображение отображается со сфоку-

сированной амплитудой (рис. 5, б), тогда как в случае УЗ-контроля с помощью ФР (рис. 5, а) изображение имеет высокое разрешение только в зоне фокусировки луча [7].

На рисунке 6 представлена реализация фокальных законов УЗ-дефектоскопом УСД-60ФР. Применяя активную апертуру с

количеством пьезоэлементов 8 шт. (рис. 6, а), можно наблюдать небольшое ухудшение четкости получаемого изображения томограммы. В этом случае частота обновления кадров на экране прибора составляет 13 кадров в секунду (13,2 Гц). С увеличением количества задействованных пьезоэлементов до 16 шт. (рис. 6, б) качество полученного изображения томограммы повышается. Одна-

ко частота обновления кадров на экране уменьшается до 4 кадров в секунду (4 Гц). Апертуру из 16 активных элементов целесообразно использовать при внимательной оценке уже найденных дефектов либо на малых развертках [7]. Таким образом, ФР позволяет находить баланс между производительностью и качеством получаемых изображений томограмм.

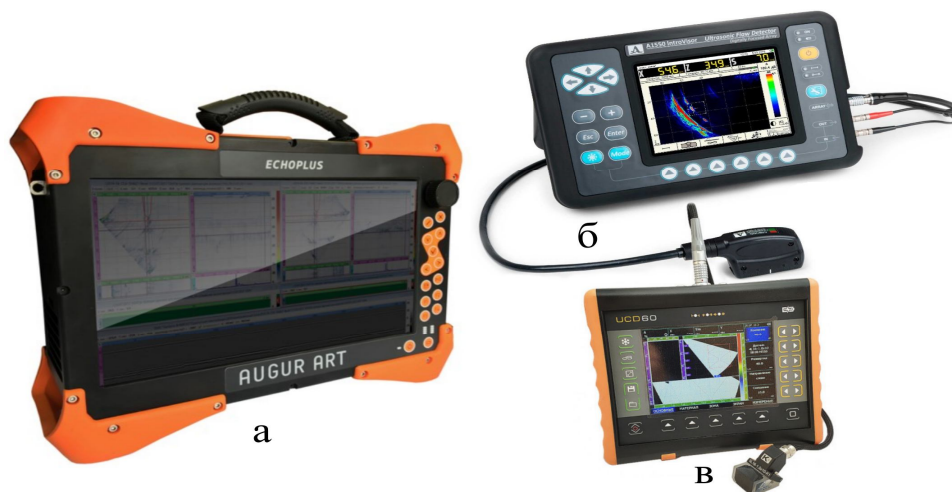


Рисунок 3 Внешний вид отечественных УЗ-дефектоскопов на ФАР

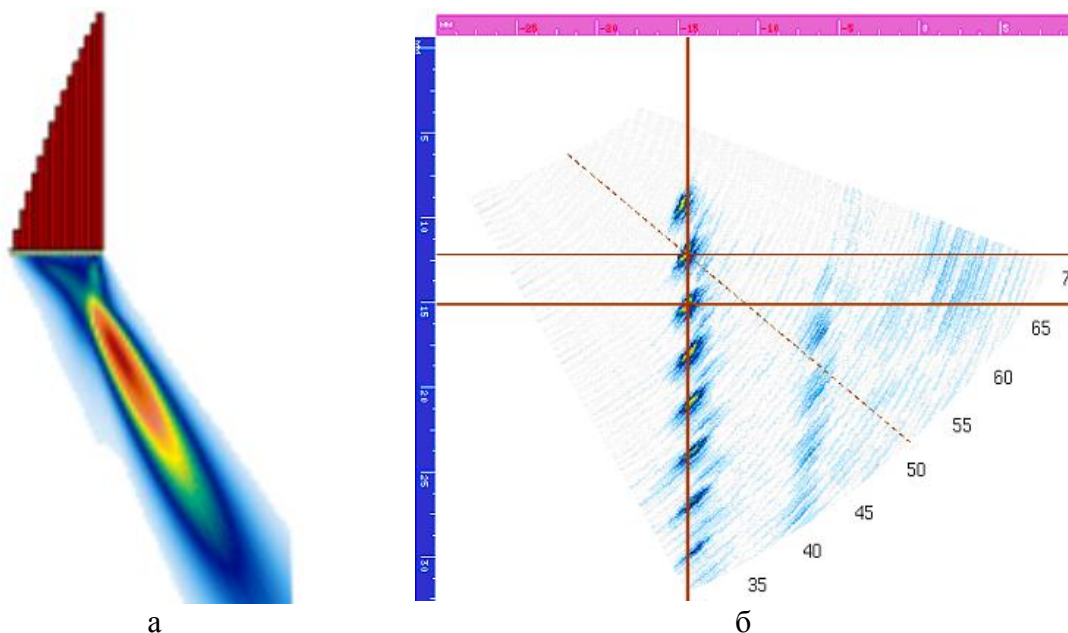


Рисунок 4 Пример фокальных законов для обнаружения БЦО поперечными волнами [8]

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

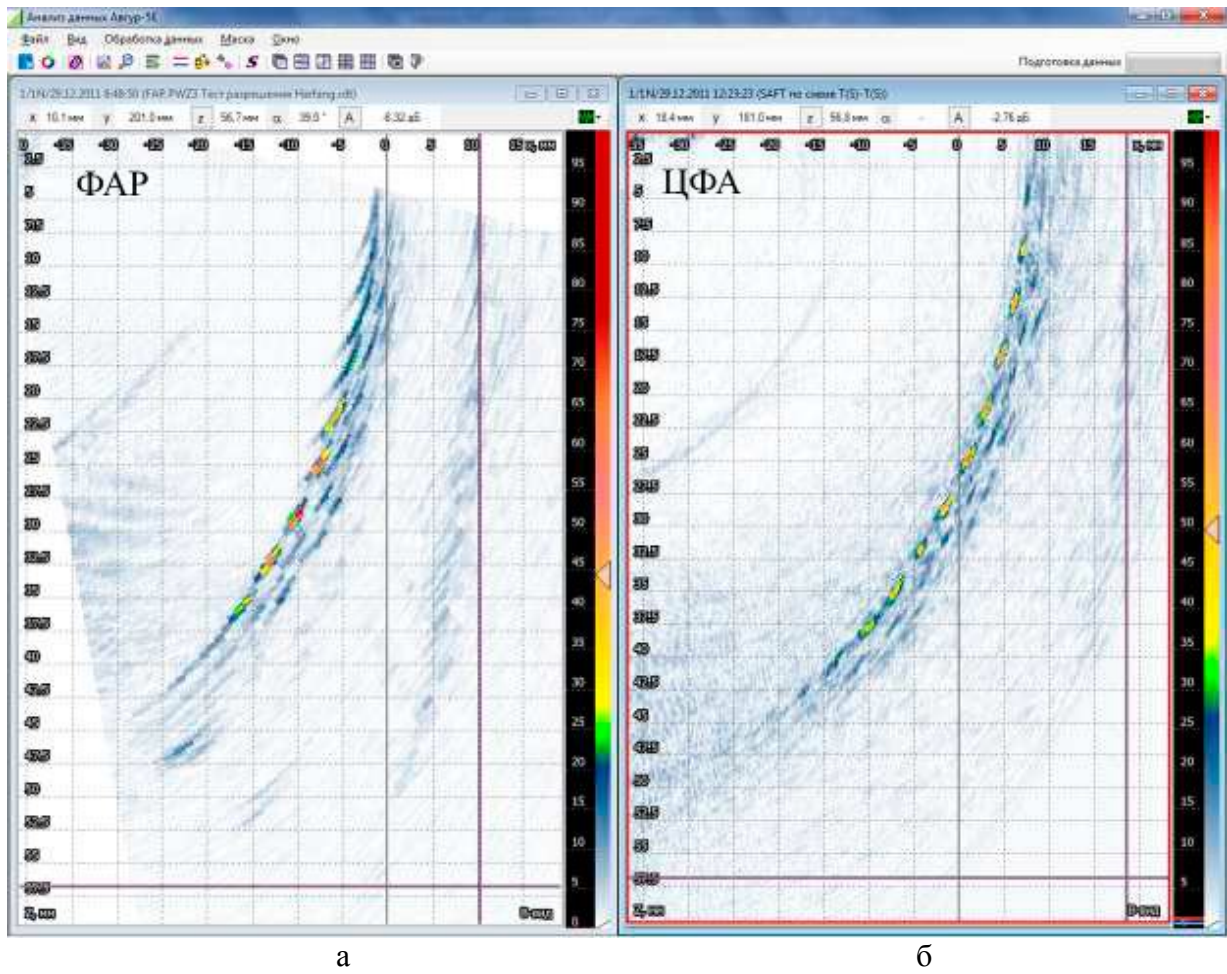
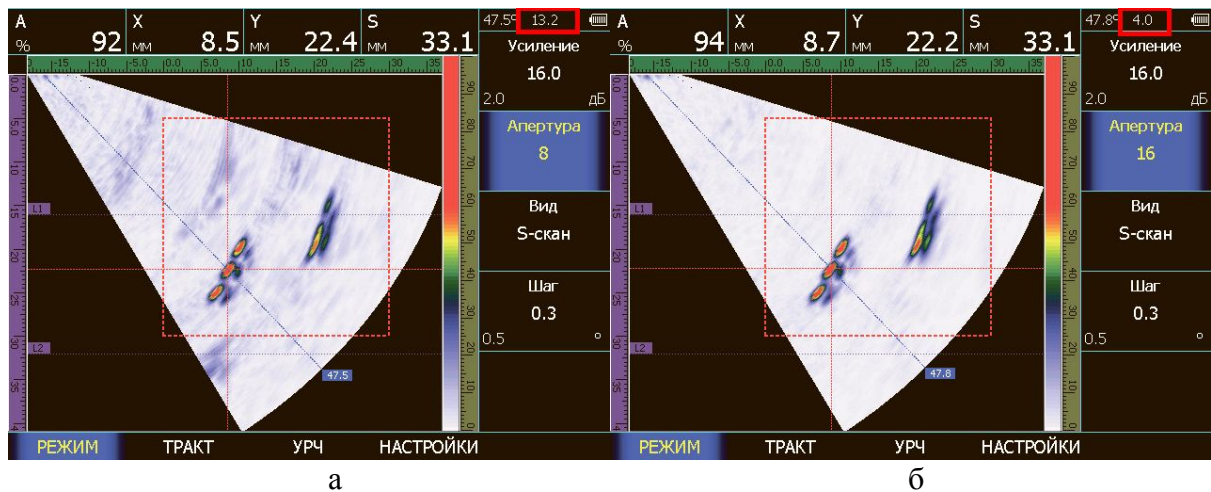


Рисунок 5 Изображение фронтального разрешения результата сканирования БЦО [2]



а — 8 элементов; б — 16 элементов

Рисунок 6 Сравнение S-сканов при разной апертуре [7]

Ещё одним способом повышения производительности УЗ-дефектоскопа с ФР является изменения шага углов, с которым строится развертка. При смене шага с $0,5^\circ$ (рис. 7, а) до $1,0^\circ$ (рис. 7, б) скорость обновления экрана УЗ-дефектоскопа вырастает с 20,6 до 35,7 Гц соответственно. Вместе с тем качество получаемого изображения томограммы уменьшается. Это связано с тем, что прибору необходимо обработать в два раза больше эхо-импульсных сигналов, т. к. шаг изменения угла при построении развертки определяет количество классических А-сканов, из которых состоит S-скан.

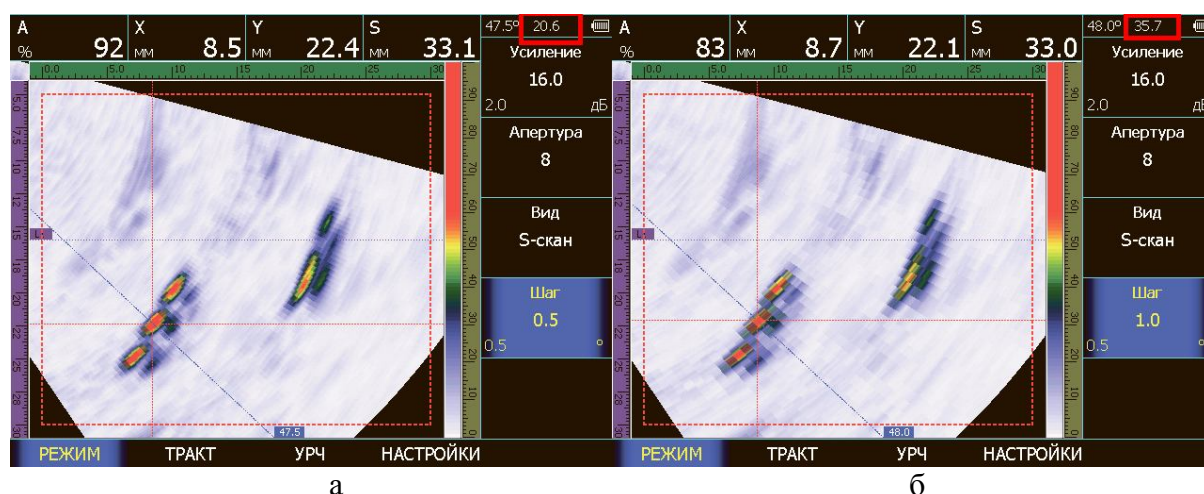
Таким образом, видно, что производительность УЗ-дефектоскопа с ФР находится в жесткой взаимосвязи с качеством получаемого изображения томограммы.

Для полной прорисовки гладких трещин в приборе A1550 IntroVisor предусмотрены специальные режимы, при которых изображение реконструируется с использованием УЗ-сигналов, отражающихся от трещин зеркально и диффузно [3]. Результат такой реконструкции показан на рисунке 8, где электроэрозионный пропил у донной поверхности образца (рис. 8, а) прорисован полностью (рис. 8, б). Иден-

тифицировать объемную несплошность труднее, т. к. её более удаленная от АР поверхность не отображается. В этом случае вид образа ближайшей поверхности может указать на характер несплошности, например, изогнутой в сторону АР формой. Оценивать несплошности, соизмеримые с длиной волны, можно только по амплитудам их образов на экране, т. к. форма и размеры образов мало связаны с формой и размерами самих несплошностей [9].

В УЗ-дефектоскопе A1550 IntroVisor реализована функция пространственной регуляции чувствительности (ПРЧ), которая позволяет вести поиск и оценку малых дефектов, а также оценивать размеры дефектов по всей контролируемой толщине ОК.

Возможности A1550 IntroVisor позволяют выводить на экран УЗ-дефектоскопа одновременно В-, С-, D-скан (рис. 9, а). Сканирование вдоль линии сварного шва с помощью АР с установленным на ней датчиком пути позволяет в режиме реального времени получать наглядное и достоверное представление о внутренней структуре ОК в виде С- и D-сканов (рис. 9, б). Новые модели УЗ-дефектоскопов с АР компании «АКС» позволяют выводить на экран прибора ещё и А-скан [6].



а — сканирование с шагом изменения угла $0,5^\circ$; б — сканирование с шагом изменения угла 1°

Рисунок 7 Сравнение S-сканов, полученные при разном шаге углов построения развертки [7]

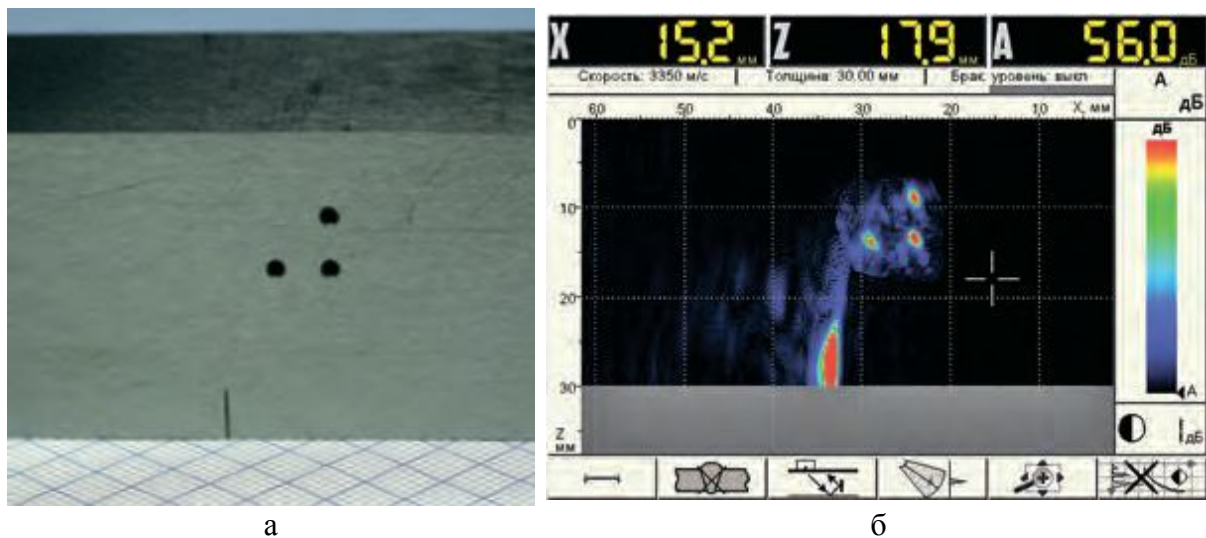
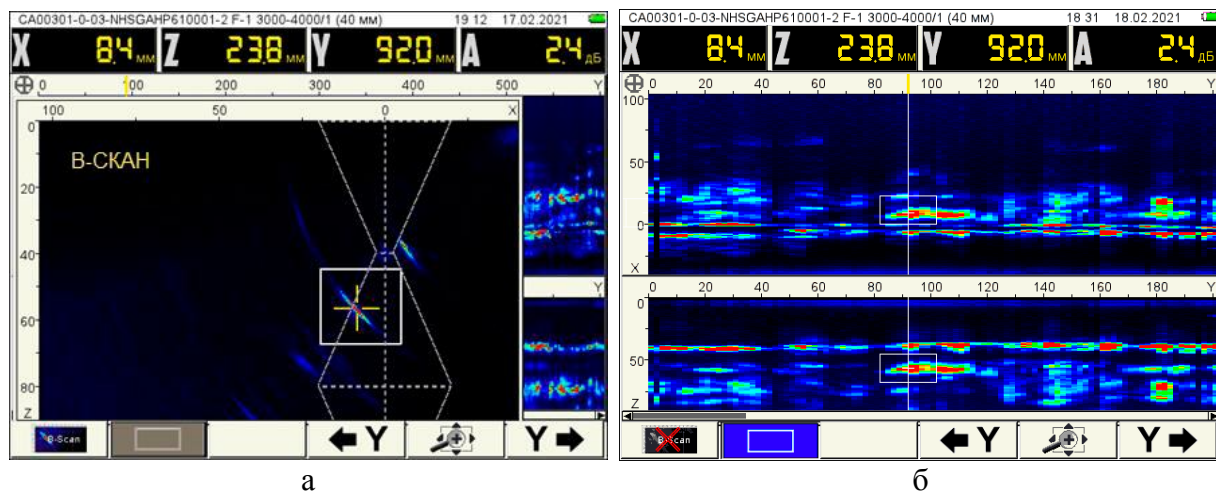


Рисунок 8 Результат реконструкции методом ЦФА (б) боковых отверстий и электроэрозионного пропила у донной поверхности образца (а) [9]



а — одновременно выведены В-, С- и D-скан; б — одновременно выведены С- и D-скан

Рисунок 9 Томограмма, реализованная A1550 IntroVisor, в режиме «Сканер» [6]

На рисунке 10 представлены томограммы, реализованные УЗ-дефектоскопом АВГУР-АРТ. На экране прибора одновременно расположены S-скан (а), D-скан (б), C-скан (в) и классический А-скан (г). Кроме этого, прибор позволяет проводить анализ и выявлять размеры и характер дефектов на сохраненной томограмме при помощи специализированного программного обеспечения на персональном компьютере. В дефектоскопе также реализована функция угловой регулировки чувствительно-

сти (УРЧ). На рисунке 10 угол фокусировки УЗ-луча равен 50° (можно видеть на S-скане), что совпадает с отражателем.

Следует отметить, что работ, отражающих опыт практического применения в реальных рабочих и производственных условиях рассматриваемых УЗ-дефектоскопов, авторам данной работы найти не удалось. Все приведенные выше томограммы, демонстрирующие внутренний объем ОК, являются результатом испытаний на стандартных образцах (СО, СОП, V2 и т. д.).

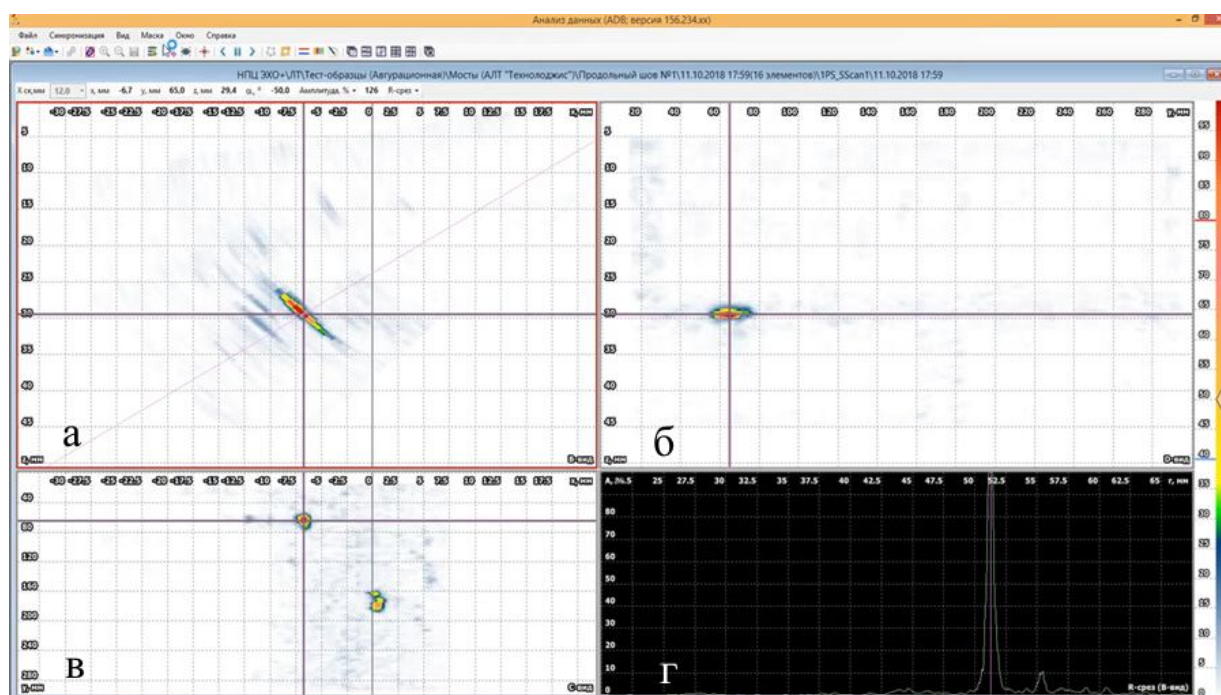


Рисунок 10 Томограмма, реализованная АВГУР-АРТ [10]

Несмотря на то, что изображение при ЦФА сильно сфокусировано по всей области контроля, отображённой на экране УЗ-дефектоскопа, оно по-прежнему подвержено тем же акустическим ограничениям, что и УЗ-контроль с применением ФР. Амплитудные флуктуации и искажения наблюдаются как при физической фокусировке, так и при цифровой, но результаты для группы идентичных рассеивателей в ОК более устойчивы в режиме цифровой фокусировки [11]. Если сразу формировать ЦФА-изображение без излучения эхосигналов, то скорость контроля резко возрастёт, но пропадёт возможность хранить эхосигналы и возможность их постобработки.

Дефектоскопы компаний «Кропус» и «Эхо+» имеют возможность фокусировки УЗ-луча как цифровым способом, так и физическим — при помощи выбора фокальных законов и регулировкой рабочей апертуры, что позволяет выбрать оптимальное соотношение между производительностью контроля и точностью отображаемого изображения внутреннего объёма ОК. Благодаря этому появляется возможность фоку-

сировки УЗ-луча в ближней зоне для поиска и локализации возможных дефектов в тонких подповерхностных слоях объекта. УЗ-дефектоскоп A1550 IntroVisor работает с АР, поэтому не имеет возможности использовать преимущества ФР по применению различных законов фокусировки.

Все представленные дефектоскопы обладают функцией конструктора сварного соединения с возможностью задания параметров разделки кромок с отображением геометрических особенностей сварного шва на экране во время сканирования. При этом прибор УСД-60ФР в режиме настройки способен моделировать процесс контроля: направление луча на всех углах; смещение датчика относительно сварного соединения с одновременным отображением на экране захватываемой зоны сканирования S-сканом и L-сканом прямым лучом, однократно отраженным и т. д. [6]. Как показали ранее проведенные исследования авторов [12], УЗ-контроль с применением технологии ФАР, обладает рядом преимуществ применительно к сварным соединениям деталей из цветных метал-

лов, полученных сваркой трением с перемешиванием (СТП). Однако работ, описывающих реальный практический опыт применения рассматриваемых дефектоскопов для контроля сварных соединений, полученных СТП, найти авторам не удалось. Как правило, в известных работах по идентификации дефектов сварных соединений, полученных СТП, использовались УЗ-дефектоскопы с ФАР зарубежных разработчиков-производителей.

Таким образом, рассмотренные УЗ-дефектоскопы имеют возможность работать в режимах:

1) «томограф» — обеспечивает работу с ФАР и формирование томограмм в реальном масштабе времени;

2) «сканер» — обеспечивает работу с ФАР и датчиком пути, при сканировании вдоль линии сварного шва;

3) «дефектоскоп» — обеспечивает работу прибора в качестве классического УЗ-дефектоскопа с наклонными и прямыми пьезоэлектрическими преобразователями.

При работе в режиме «томограф» у всех приборов есть возможность выводить на экран УЗ-дефектоскопа помимо В-скана (у прибора A1550 IntroVisor) и В-, S-, L-сканов (у приборов УСД-60ФР и АВГУР-АРТ) D-скан, С-скан и классический А-скан, что повышает информативность полученных данных о внутреннем объёме ОК. Однако размер таких изображений неизбежно уменьшается, что затрудняет расшифровку (ухудшает читаемость таких изображений) результатов в режиме реального времени. Данный недостаток отсутствует в приборе АВГУР-АРТ ввиду его больших габаритных размеров и, соответственно, больших размеров экрана (примерно в 2,5 раза).

Особенность дефектоскопа A1550 IntroVisor заключается в том, что в используемых АР апертура равна 40 мм, что в полтора-два раза больше размеров стандартных 32-элементных решёток зарубежного производства. Это приводит к более высокой фронтальной разрешающей способности полученных изображений томограммы. К

тому же цена данных решёток на порядок меньше аналогов. К недостаткам АР конструкции фирмы «АКС» можно отнести занижение амплитуды бликов дефектов, залегающих близко к поверхности.

Для систем автоматизированного контроля малый вес и габариты дефектоскопа не являются решающим критерием, а важнейшим свойством таких систем является возможность получать предельно точное заключение о типе и размерах отражателей. Очень важна скорость работы таких систем.

Компания «Эхо+» разработала большой ассортимент сканеров для автоматизированного и механизированного УЗ-контроля как магнитных, так и немагнитных материалов; радиальных ОК диаметром 159–4000 мм; планшетных ОК длиной до 20 м. Способность реализации метода ЦФА в дефектоскопе АВГУР-АРТ позволит не терять скорости механизированного контроля. Оператор имеет возможность проводить контроль как в непосредственной близости от ОК, так и на удалении от него благодаря наличию сигнального кабеля длиной от 3 до 100 м.

Выводы. Выполненный анализ эксплуатационных характеристик по разрешающей способности, особенностям настройки и качеству отображаемых томограмм отечественных УЗ-дефектоскопов, использующих технологию ФАР, позволил сформулировать следующие рекомендации по области их применения:

1. Для автоматизированного УЗ-контроля рационально применять дефектоскоп АВГУР-АРТ в цеховых условиях.

2. Для механизированного и ручного УЗ-контроля как в цеховых, так и в полевых условиях наиболее подходят дефектоскопы УСД-60ФР и A1550 IntroVisor.

3. Для детектирования сварных соединений больших толщин, а также для контроля основного металла ОК наиболее продуктивно применение дефектоскопов A1550 IntroVisor и АВГУР-АРТ с реализацией технологии ЦФА.

Простотой освоения характеризуются дефектоскопы УСД-60ФР и A1550 IntroVisor.

Библиографический список

1. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications: Advanced practical NDT series [Text] / series coordinator: Noël Dubé. — Waltham, MA : Olympus NDT, 2007. — 369 p.*
2. Базулин, Е. Г. Сравнение систем для ультразвукового неразрушающего контроля, использующих антенные решетки или фазированные решетки [Электронный ресурс] / Е. Г. Базулин ; Научно-производственный центр «ЭХО+». — Режим доступа: <https://echoplus.ru/upload/iblock/d7b/d7bcfa054ec1281f035bca25829a56ef.pdf> (05.05.2022).
3. О применимости технологии антенных решеток в решении задач УЗК опасных производственных объектов [Текст] / В. А. Воронков, И. В. Воронков, В. Н. Козлов [и др.] // В мире НК. — 2011. — № 1 (51). — С. 64–69.
4. *Time of flight inverse matching reconstruction of ultrasonic array data exploiting forwards models / S. Chatillon, A. Fidahoussen, E. Iakovleva, P. Calmon // NDT in Canada 2009 National Conference, Aug. 25–27, 2009. — [Electronic resource]. — Mode of access: <https://www.ndt.net/article/aspnde2009/papers/10.pdf> (05.05.2022).*
5. Дефектоскоп АВГУР-АРТ : техническое описание. — М. : Эхо+, 2021. — 19 с.
6. Дефектоскопы ультразвуковые: A1550 Intro Visor / A1525 Solo. Методические рекомендации по применению режима «томограф» [Текст]. — М. : Акустические контрольные системы, 2021. — 144 с.
7. УСД-60ФР: ультразвуковой дефектоскоп на фазированных решетках [Текст] : руководство пользователя. — М. : Кропус, 2018. — 59 с.
8. Фазированные решетки [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://shearwave.ru/wp-content/uploads/2013/09/Лекция_ФР_МЭИ.pdf (05.05.2022).
9. Самокрутов, А. А. Особенности оценки несплошностей [Текст] / А. А. Самокрутов, В. Шевалдыкин // Территория «Нефтегаз». — 2015. — № 8. — С. 30–32.
10. Базулин, А. Е. Универсальный ручной дефектоскоп АВГУР-АРТ 2020 для ручного, механизированного и автоматизированного ультразвукового контроля [Электронный ресурс] / А. Е. Базулин // Современные методы и средства УЗК с применением ФР и УЗ голографии : семинар, 21 сентября 2021 г., г. Санкт-Петербург. — Режим доступа: <https://echoplus.ru/news/povuyu-defektoskop-avgur-art/> (09.05.2022).
11. Использование метода общей фокусировки (TFM) для лучшей визуализации дефектов при ФР-контроле [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.olympus-ims.com/ru/applications/using-the-total-focusing-method-to-improve-phased-array-ultrasonic-imaging/> (29.04.2022).
12. Сотников, А. Л. Классификация методов неразрушающего контроля сварных соединений из меди, полученных сваркой трением с перемешиванием [Текст] / А. Л. Сотников, А. А. Муховатый, А. А. Орлов // Сварка и диагностика. — 2022. — № 3. — С. 19–24.

© Сотников А. Л.

© Орлов А. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ММК ДонГТИ Вишневым Д. А.,
д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еронько С. П.*

Статья поступила в редакцию 05.09.2022.

Doctor of Technical Sciences Sotnikov A. L. (DonNTU, Donetsk, DPR), Orlov A. A. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

VISUALIZATION OF DEFECTS IN WELDED JOINTS

The analysis of the operational characteristics of domestic ultrasonic flaw detectors using phased array and antenna array technology in terms of resolution, configuration features and quality of the displayed tomograms is carried out in order to develop recommendations for their choosing for various applications. The comparative analysis of the technical capabilities of flaw detectors on phased arrays and antenna arrays informatively allows us to show the advantages and disadvantages of each one.

Key words: *flaw detection, phased array and antenna arrays, non-destructive testing, focal law, artificial reflector, digital focusing.*

УДК 669.02/.09:004.422.422:159.9.078

*д.т.н. Вишнеvский Д. А.,
к.т.н. Козачишен В. А.,
Бондарь Н. А.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)*

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПНЕВМОСИСТЕМЫ МАНИПУЛЯТОРА, МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА И ПОВОРОТА СВОДА И ЭЛЕКТРОДОВ АГРЕГАТА «ПЕЧЬ-КОВШ» В АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ

Разработана структурно-логическая схема оценки отказа пневмосистемы манипулятора и механизма подъема и поворота свода агрегата «печь-ковш» с учетом отказов технических узлов и преднамеренных или непреднамеренных ошибок оператора. Представлены вероятности возникновения человеческого и машинного отказа пневмосистемы манипулятора. Разработана математическая модель оценки итоговой вероятности отказа всей системы с учетом отказов технических узлов и ошибок оператора. Разработана математическая модель расчета чувствительности системы влияния технических отказов и ошибок человека на надежность системы. В качестве примера взяты два объекта: пневмосистема манипулятора и механизм подъема и поворота свода и электродов агрегата «печь-ковш».

Ключевые слова: чувствительность модели, человеческий фактор, отказ системы, дерево отказов.

При эксплуатации металлургического оборудования человеческий фактор (ЧФ) оказывает значительное влияние на возникновение аварийных ситуаций. Металлургическое оборудование в большинстве случаев представляет собой сложные технические системы (СТС), которые требуют: своевременного технического обслуживания, планово-предупредительных ремонтов, соблюдения технологического процесса при эксплуатации и т. д. Все вышперечисленные требования выполняет человек, который в процессе своей работы может совершить преднамеренные или непреднамеренные ошибки, влекущие за собой аварийный выход из строя эксплуатируемого оборудования [1–3].

Согласно изученной литературе, около 40 % отказов различных технических систем прямо или косвенно связано с ЧФ, а 20 % — напрямую с человеком [4–6]. В этой связи актуально создание моделей оценки на чувствительность технических отказов и человеческих ошибок.

Для определения причин возникновения отказов на производственном оборудова-

нии применяется анализ методом дерева неполадок. Оценка возможности отказа или безотказной работы отдельных элементов технических систем проводится на основе статистических данных по интенсивности их отказа.

В данной работе рассмотрено, как влияет человеческий фактор при эксплуатации, на примере двух действующих механизмов: пневмосистемы манипулятора; механизма подъема и поворота свода и электродов агрегата «печь-ковш».

При использовании манипулятора с пневмоприводом для погрузки и выгрузки заготовок из печи можно констатировать, что он состоит из большого количества технических элементов, отказ которых может привести к его выходу из строя или преждевременному износу основных узлов; может существенно повлиять на сроки осуществления технологических процессов, принимая во внимание то, что в состав простейшей пневмосистемы входят компрессор, редуктор, электропривод, валы с подшипниками, баллон, конечные выключатели и т. д.

Структурно-логическая схема оценки отказа пневмосистемы манипулятора в зависимости от отказов технических узлов и ошибок оператора представлена в виде дерева отказов на рисунке 1, соответствующие вероятности отказов приведены в таблице 1.

Для оценки вероятности $P(Y)$ отказа всей системы используем формулы алгебры вероятностей, учитывая, что при параллельном соединении элементов в схеме необходимо применить теорему сложения вероятностей, при последовательном — теорему умножения. Расчет базируется на следующих формулах:

– для вероятности противоположного события:

$$P(\bar{A}) = 1 - P(A); \quad (1)$$

– для вероятности суммы совместных независимых событий:

$$P(A_1 + A_2 + \dots + A_n) = 1 - P(\bar{A}_1 \cdot \bar{A}_2 \cdot \dots \cdot \bar{A}_n); \quad (2)$$

– для вероятности произведений независимых событий:

$$P(A_1 \cdot A_2 \cdot \dots \cdot A_n) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot \dots \cdot P(A_n). \quad (3)$$

Для исходных вероятностей из таблицы 1 примем обозначения:

$$P(A_{ч1}) = p_{ч1}, P(A_{ч2}) = p_{ч2}, \dots, P(A_{ч11}) = p_{ч11}, \\ P(A_{Т1}) = p_{Т1}, P(A_{Т2}) = p_{Т2}, \dots, P(A_{Т15}) = p_{Т15}.$$

Рассмотрим вероятность выхода из строя пневмосистемы манипулятора (рис. 1, 2).

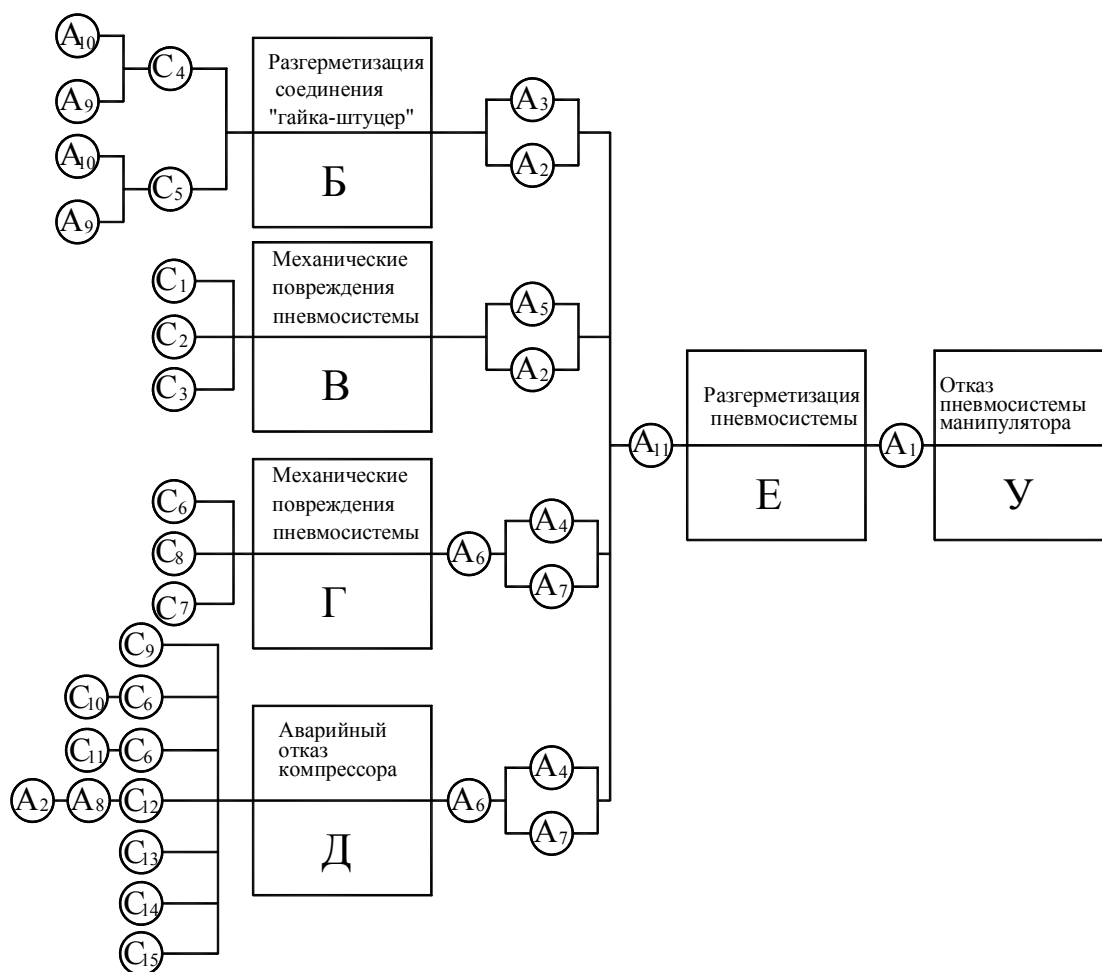


Рисунок 1 Дерево отказов пневмосистемы манипулятора

Таблица 1

Вероятности возникновения человеческого и машинного отказов пневмосистемы манипулятора

Обозначение вероятности человек/машина	Событие А	Вероятность P(A)
A1	Нарушение правил безопасности	0.05
A2	Выполнение ремонта оборудования во время работы	0.004
A3	Совершение ошибки при поиске органов управления и осуществлении заданного управляющего действия	0.039
A4	Необнаружение сигнала	0.062
A5	Невыполнение операции нажатия кнопки	0.015
A6	Невыполнение операции включения тумблера	0.01
A7	Невыполнение операции выдачи или принятия голосовой команды	0.002
A8	Невыполнение действия по соединению кабеля	0.014
A9	Некачественно выполнено действие по подсоединению шланга	0.045
A10	Некачественно выполнено действие по установке уплотнения	0.09
A11	Неиспользование средств защиты съёмных ограждений	0.25
C1	Механическое повреждение редуктора баллона	0.003
C2	Механическое повреждение трубопровода пневмосистемы	0.005
C3	Механическое повреждение редуктора трубопровода пневмосистемы	0.005
C4	Выход из строя гайки редуктора	0.00002
C5	Выход из строя прокладки редуктора	0.04
C6	Превышение давления воздуха в баллоне	0.00004
C7	Эксплуатация неисправного баллона	0.0002
C8	Эксплуатация неисправной компрессорной установки	0.0002
C9	Отказ предохранителя	0.00003
C10	Выход из строя подшипника электродвигателя	0.00002
C11	Выход из строя крыльчатки электродвигателя	1.1E-06
C12	Отказ конечного выключателя	0.00003
C13	Износ сальникового уплотнителя	0.00003
C14	Выход из строя подшипника вала компрессора	0.00002
C15	Износ муфты	0.000025

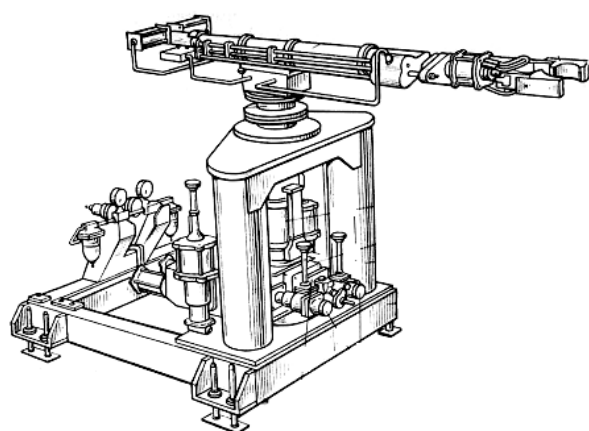


Рисунок 2 Промышленный пневматический манипулятор

Вероятности противоположных событий обозначим q_i с соответствующими индексами.

Запишем формулы событий, соответствующих схеме рисунка 1:

– событие Б — разгерметизация соединения «гайка — штуцер»:

$$B = (A_9 + A_{10}) \cdot (C_4 + C_5);$$

– событие В — механическое повреждение пневмосистемы:

$$B = C_1 + C_2 + C_3;$$

– событие Г — механическое повреждение пневмосистемы:

$$\Gamma = C_6 + C_7 + C_8;$$

– событие Д — аварийный отказ компрессора:

$$D = C_9 + C_{13} + C_{14} + C_{15} + C_6 \cdot C_{10} + C_6 \cdot C_{11} + A_2 \cdot A_8 \cdot C_{12};$$

– событие Е — разгерметизация пневмосистемы:

$$E = (B \cdot (A_2 + A_3) + B \cdot (A_2 + A_5) + \Gamma \cdot A_6 \cdot (A_4 + A_7) + D \cdot A_6 \cdot (A_4 + A_7)) \cdot A_{11};$$

– финальное событие У — отказ пневмосистемы манипулятора:

$$Y = E \cdot A_1.$$

Вероятности описанных событий рассчитываются последовательно по формулам (1–3) [7].

Запишем результаты для основных событий: $P(B)=0,00524$; $P(V)=0,01295$; $P(\Gamma)=0,00044$; $P(D)=0,0001$; $P(E)=0,00012$.

Вероятность отказа всей системы равна $P(Y)=5,9 \cdot 10^{-6}$.

Для выявления силы влияния ЧФ в итоговой вероятности отказа системы $P(Y)$ проведем исследование модели на чувствительность к изменению входных параметров — вероятностей отказов (из таблицы 1).

Случай А. Чувствительность модели к поодиному изменению входных показателей.

Расчет осуществляем по формулам [8]:

$$\Delta R_* = f(p_{q1}, \dots, p_* + \Delta p_*, \dots, p_{qn}, p_{T1}, p_{T2}, \dots, p_{Tm}) - f(p_{q1}, \dots, p_*, \dots, p_{qn}, p_{T1}, p_{T2}, \dots, p_{Tm}),$$

$$\delta R_* = \frac{\Delta R_*}{f(p_{q1}, \dots, p_*, \dots, p_{qn}, p_{T1}, p_{T2}, \dots, p_{Tm})} \cdot 100\%,$$

$$\bar{d} = \{\delta R_{q1}, \dots, \delta R_{qn}, \delta R_{T1}, \dots, \delta R_{Tm}\}.$$

Показатель чувствительности, характеризующий процентное изменение итоговой вероятности отказа $P(Y)$, если i -й параметр увеличился на 1 %, рассчитывается для каждой вероятности отказа входных событий (табл. 2). На диаграмме рисунка 3 показан ранжированный по показателю чувствительности ряд отказов технических узлов и ошибок оператора, соответствующих обозначениям таблицы 1.

Анализ полученных результатов позволяет выделить как наиболее влияющие на отказ всей системы события, связанные с ЧФ: А1 — нарушение правил безопасности; А11 — неиспользование средств защиты съемных ограждений; А3 — совершение ошибки при поиске органов управления и осуществлении заданного управляющего действия; А5 — невыполнение операции нажатия кнопки; А10 — некачественное выполнение действия по установке уплотнения. Из технических отказов выделяется событие С5 — выход из строя прокладки редуктора.

Таблица 2

Показатели чувствительности ряда отказов технических узлов и ошибок оператора пневмосистемы

№ п/п	Событие	Событие	Показатель чувствительности
1	2	3	4
1	Нарушение правил безопасности	А1	1
2	Выполнение ремонта оборудования во время работы	А2	0.151344965
3	Совершение ошибки при поиске органов управления и осуществлении заданного управляющего действия	А3	0.433008027
4	Необнаружение сигнала	А4	0.00071709
5	Невыполнение операции нажатия кнопки	А5	0.411398058
6	Невыполнение операции включения тумблера	А6	0.000740268
7	Невыполнение операции выдачи или принятия голосовой команды	А7	2.17412E-05

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
8	Невыполнение действия по соединению кабеля	A8	2.29133E-09
9	Некачественно выполнено действие по подсоединению шланга	A9	0.149351784
10	Некачественно выполнено действие по установке уплотнения	A10	0.313474624
11	Неиспользование средств защиты съёмных ограждений	A11	1
12	Механическое повреждение редуктора баллона	C1	0.119661505
13	Механическое повреждение трубопровода пневмосистемы	C2	0.199836717
14	Механическое повреждение редуктора трубопровода пневмосистемы	C3	0.199836717
15	Выход из строя гайки редуктора	C4	0.000229137
16	Выход из строя прокладки редуктора	C5	0.47735878
17	Превышение давления воздуха в баллоне	C6	5.43168E-05
18	Эксплуатация неисправного баллона	C7	0.000271621
19	Эксплуатация неисправной компрессорной установки	C8	0.000271621
20	Отказ предохранителя	C9	4.07499E-05
21	Выход из строя подшипника электродвигателя	C10	1.0866E-09
22	Выход из строя крыльчатки электродвигателя	C11	7.08628E-11
23	Отказ конечного выключателя	C12	2.29133E-09
24	Износ сальникового уплотнителя	C13	4.07499E-05
25	Выход из строя подшипника вала компрессора	C14	2.71664E-05
26	Износ муфты	C15	3.39581E-05

Показатель чувствительности

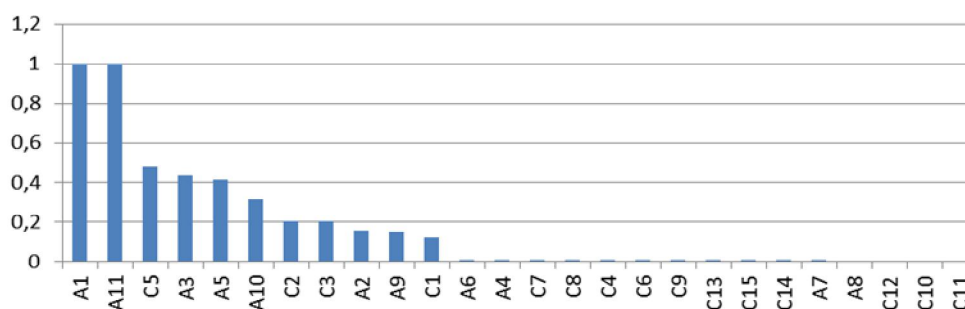


Рисунок 3 Показатели чувствительности отказов технических узлов и ошибок оператора согласно таблице 2

Анализируя полученные результаты проведенных исследований, видим, что по показателям чувствительности человеческих отказов из 26 вероятностей возникновения отказов в диапазоне от 1 до 0,3 пять относятся к человеческим отказам и один — к отказу технических узлов.

Это говорит о том, что показатель чувствительности ЧФ занимает высокое процентное значение: изменение параметров

A11, A1 на 1 % приводит к изменению итоговой вероятности отказа пневмосистемы на 1 %. Полученные данные дают подтверждение о влиянии человека на безотказность пневмосистемы.

Случай Б. Оценка чувствительности модели к групповым изменениям входных показателей.

Изменяем входные вероятности для каждого из факторов групп ЧФ и ТФ поочеред-

но, а затем для всех вероятностей вместе. Расчет выполняем по формулам 6–8 [8]. Получаем следующие результаты:

- чувствительность модели к изменению вероятностей группы ЧФ равна 3,5 %;
- чувствительность модели к изменению вероятностей группы ТФ равна 1 %;
- общая чувствительность модели к изменению всех факторов равна 4,5 %.

Отсюда видно, что ЧФ является основным фактором, влияющим на создание аварийной ситуации при эксплуатации пневмосистемы манипулятора.

Структурно-логическая схема оценки отказа данной технической системы (рис. 4) в зависимости от отказов технических узлов и ошибок оператора представлена в

виде «дерева отказов» на рисунке 5, а соответствующие вероятности отказов приведены в таблице 3.

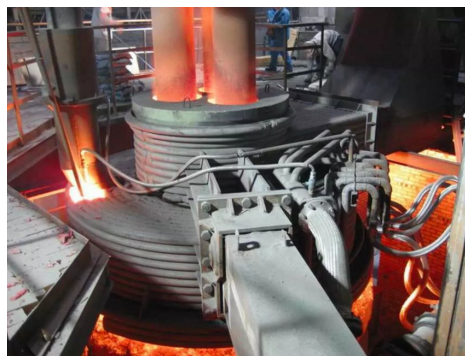


Рисунок 4 Механизм подъема и поворота свода и электродов агрегата «печь-ковш»

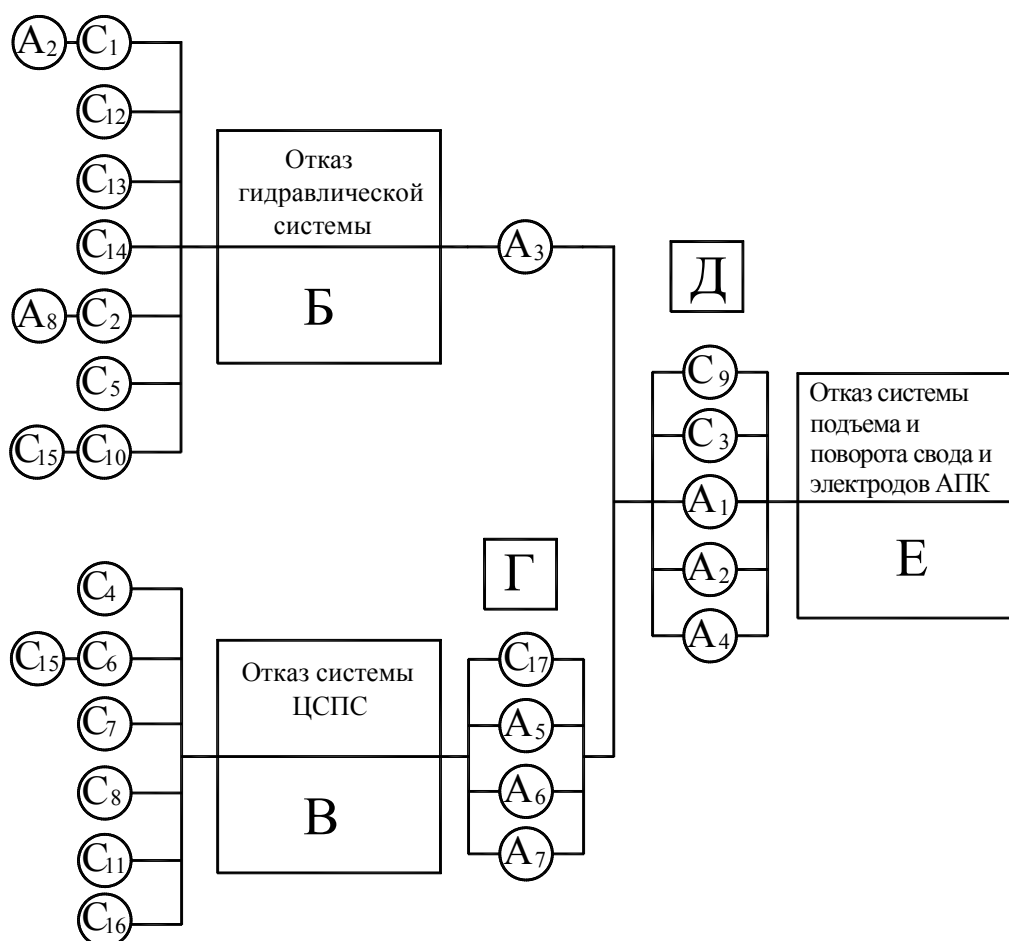


Рисунок 5 Дерево отказов механизма подъема и поворота свода и электродов агрегата «печь-ковш»

Таблица 3

Вероятности отказов при возникновении аварийной ситуации в процессе эксплуатации механизма подъема и поворота свода и электродов агрегата «печь-ковш»

Обозначение вероятности человек/машина	Событие А	Вероятность P(A)
A1	Нарушение правил безопасности	0.05
A2	Выполнение ремонта оборудования во время работы	0.004
A3	Совершение ошибки при поиске органов управления и осуществлении заданного управляющего действия	0.039
A4	Необнаружение сигнала	0.062
A5	Невыполнение операции нажатия кнопки	0.015
A6	Невыполнение операции включения тумблера	0.01
A7	Невыполнение операции выдачи или принятия голосовой команды	0.002
A8	Некачественно выполнено действие по установке уплотнения	0.014
C1	Механическое повреждение трубопровода	0.00005
C2	Выход из строя прокладки	0.04
C3	Превышение давления в системе	0.00004
C4	Отказ электромагнитного распределителя	0.0000035
C5	Отказ предохранителя	0.000003
C6	Выход из строя подшипника электродвигателя	0.00002
C7	Выход из строя крыльчатки электродвигателя	1.1E-06
C8	Отказ конечного выключателя	0.00003
C9	Износ сальникового уплотнителя	0.00003
C10	Выход из строя подшипника вала насоса	0.00002
C11	Выход из строя муфты	0.000025
C12	Дефекты сварных соединений	0.000076
C13	Отказ предохранительного клапана	0.026
C14	Отказ нагнетательного клапана	0.00086
C15	Отказ датчика контроля температуры	0.029
C16	Отказ фланца	0.000086
C17	Отказ предохранительной арматуры	0.026

Оценка итоговой вероятности отказа всей системы выполняется аналогично пункту 1.

Запишем основные события согласно схеме рисунка 5:

$$B = C_{12} + C_{13} + C_{14} + C_5 + A_2 \cdot C_1 + A_8 \cdot C_2 + C_{15} \cdot C_{10},$$

$$V = C_4 + C_7 + C_8 + C_{11} + C_{16} + C_{15} \cdot C_6,$$

$$Г = C_{17} + A_5 + A_6 + A_7,$$

$$Д = C_9 + C_3 + A_1 + A_2 + A_4.$$

Финальное событие E — отказ системы подъема и поворота свода и электродов агрегата «печь-ковш»:

$$E = (B \cdot A_3 + B \cdot Г) \cdot Д.$$

Запишем результаты для основных событий: $P(B) = 0,0275$; $P(V) = 0,00015$; $P(Г) = 0,0521$; $P(Д) = 0,1125$.

Вероятность отказа всей системы равна $P(E) = 1,21 \cdot 10^{-4}$.

Для выявления силы влияния ЧФ в итоговой вероятности отказа системы $P(E)$ исследуем модель на чувствительность к изменению входных параметров — вероятностей отказов (из таблицы 3).

Случай А. Чувствительность модели к одиночному изменению входных показателей.

Результаты показаны в таблице 4 и на диаграмме рисунка 6.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Таблица 4

Показатели чувствительности ряда отказов технических узлов и ошибок оператора механизма подъема и поворота свода и электродов агрегата «печь-ковш»

№ п/п	Событие	Событие	Показатель чувствительности
1	Нарушение правил безопасности	A1	0.41509
2	Выполнение ремонта оборудования во время работы	A2	0.03168
3	Совершение ошибки при поиске органов управления и осуществлении заданного управляющего действия	A3	0.99294
4	Необнаружение сигнала	A4	0.52130
5	Невыполнение операции нажатия кнопки	A5	0.00195
6	Невыполнение операции включения тумблера	A6	0.00130
7	Невыполнение операции выдачи или принятия голосовой команды	A7	0.00026
8	Некачественно выполнено действие по установке уплотнения	A8	0.01970
9	Механическое повреждение трубопровода	C1	0.00001
10	Выход из строя прокладки	C2	0.01970
11	Превышение давления в системе	C3	0.00032
12	Отказ электромагнитного распределителя	C4	0.00017
13	Отказ предохранителя	C5	0.00011
14	Выход из строя подшипника электродвигателя	C6	0.00003
15	Выход из строя крыльчатки электродвигателя	C7	0.00005
16	Отказ конечного выключателя	C8	0.00145
17	Износ сальникового уплотнителя	C9	0.00024
18	Выход из строя подшипника вала насоса	C10	0.00002
19	Выход из строя муфты	C11	0.00121
20	Дефекты сварных соединений	C12	0.00267
21	Отказ предохранительного клапана	C13	0.93873
22	Отказ нагнетательного клапана	C14	0.03027
23	Отказ датчика контроля температуры	C15	0.00005
24	Отказ фланца	C16	0.00415
25	Отказ предохранительной арматуры	C17	0.00343

Показатель чувствительности

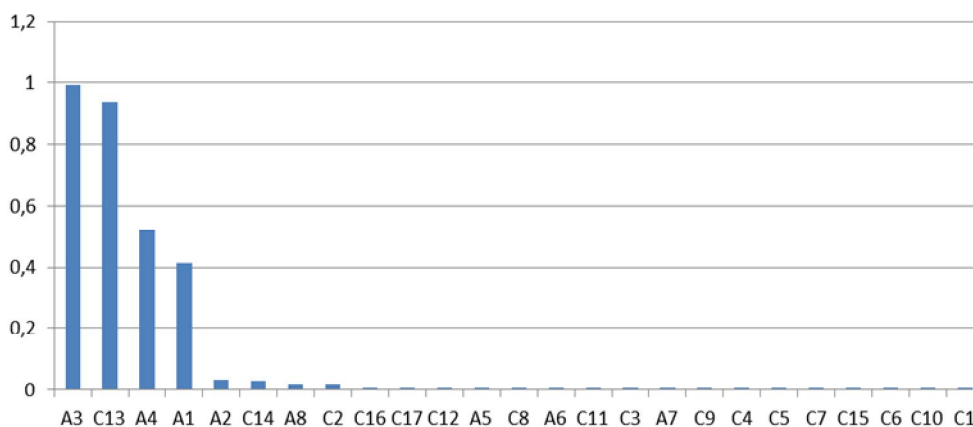


Рисунок 6 Показатели чувствительности отказов технических узлов и ошибок оператора согласно таблице 4

Согласно выполненному анализу, выделяются следующие наиболее влияющие на вероятность отказа всей системы факторы:

- в группе ЧФ: А3 — совершение ошибки при поиске органов управления и осуществлении заданного управляющего действия; А4 — необнаружение сигнала; А1 — нарушение правил безопасности;
- в группе ТФ: С13 — отказ предохранительного клапана.

Случай Б. Оценка чувствительности модели к групповым изменениям входных показателей.

Изменяем входные вероятности для каждого из факторов групп ЧФ и ТФ поочередно, а затем для всех вероятностей вместе.

Получаем следующие результаты:

- чувствительность модели к изменению вероятностей группы ЧФ равна 1,998 %;
- чувствительность модели к изменению вероятностей группы ТФ равна 1,003 %;
- общая чувствительность модели к изменению всех факторов равна 3,001 %.

Отсюда видно, что ЧФ и в этом случае является основным фактором, влияющим на создание аварийной ситуации при эксплуатации механизма подъема и поворота свода и электродов агрегата «печь-ковш».

Выводы. В данной работе был произведен расчет оценки влияния ЧФ в аварийной ситуации при эксплуатации пневмосистемы манипулятора с учетом ТФ и ЧФ. Из анализа полученных результатов проведенных исследований видно, что по показателям чувствительности человеческих отказов из 26 вероятностей возникновения отказов в диапазоне от 1 до 0,3 пять относятся к человеческим отказам и один — к отказу технических узлов.

Показатель чувствительности ЧФ имеет высокое процентное значение: изменение параметров А11, А1 на 1 % приводит к изменению итоговой вероятности отказа пневмосистемы на 1 %. Полученные данные дают подтверждение о влиянии человека на безотказность пневмосистемы.

Оценка чувствительности модели к групповым изменениям входных показателей дает следующую картину: чувствительность модели к изменению вероятностей группы ЧФ равна 3,5 %; чувствительность модели к изменению вероятностей группы ТФ равна 1 %; общая чувствительность модели к изменению всех факторов равна 4,5 %.

Для подтверждения правильности полученных результатов был рассмотрен еще один механизм оценки влияния человеческого фактора в аварийной ситуации при эксплуатации механизма подъема и поворота свода и электродов агрегата «печь-ковш». Расчет оценки влияния ЧФ в аварийной ситуации показал, что наиболее влияющие на вероятность отказа всей системы факторы:

- в группе ЧФ: А3 — совершение ошибки при поиске органов управления и осуществлении заданного управляющего действия; А4 — необнаружение сигнала; А1 — нарушение правил безопасности;
- в группе ТФ: С13 — отказ предохранительного клапана.

Оценка чувствительности модели к групповым изменениям входных показателей дает следующую картину: чувствительность модели к изменению вероятностей группы ЧФ равна 1,998 %; чувствительность модели к изменению вероятностей группы ТФ равна 1,003 %; общая чувствительность модели к изменению всех факторов равна 3,017 %.

Из проведенного анализа полученных результатов исследований видно, что в двух случаях — при эксплуатации пневмосистемы манипулятора, при эксплуатации механизма подъема и поворота свода и электродов агрегата «печь-ковш» — человек является основным фактором, влияющим на создание аварийной ситуации. Чувствительность моделей к изменению вероятностей группы ЧФ от 2 до 3,5 %.

Библиографический список

1. Безопасность машин и человеческий фактор [Текст] : монография / под ред. С. А. Волкова. — СПб. : СПбГАСУ, 2011. — 111 с.
2. Вишнеvский, Д. А. Анализ влияния «человеческого фактора» на надежность металлургического оборудования [Текст] / Д. А. Вишнеvский, Б. А. Сахаров // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. — Вып. 12 (55). — С. 97–104.
3. Руу, Р. Human reliability analysis methods for probabilistic safety assessment [Text] / Pekka Ruu. — Espoo : Technical Research Centre of Finland (VTT), 2000. — 63 p.
4. Вишнеvский, Д. А. Влияние организационных факторов на надежность металлургического оборудования [Текст] / Д. А. Вишнеvский // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование : сб. науч. тр. 4-й междунар. молодеж. науч.-практ. конф. ; отв. ред. Е. В. Павлов. — Курск : Университетская книга, 2017. — Т. 1. — С. 146–149.
5. Зарубежный опыт проведения профессионального отбора [Текст] // Охрана труда. Зарубежный опыт: экспресс-информация. — М. : ВНИИ охраны и экономики труда, 2009. — Вып. 3. — С. 3–25.
6. Сулейманов, М. Г. Оценка надежности персонала при профессиональном отборе кадров в металлургии [Текст] / М. Г. Сулейманов, Л. Ш. Абдуллина // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. — 2014. — № 3. — С. 73–78.
7. Vishnevsky, D. A. Reliability calculation for metallurgical equipment considering the probability of operator's error [Text] / D. A. Vishnevsky // Journal of Advanced Research in Natural Science. — 2019. — Iss. 12. — P. 21–26.
8. Vishnevsky, D. A. Mathematical modeling for human factor influence on the equipment reliability in the machine building shops of metallurgical enterprises ability calculation for metallurgical equipment considering the probability of operator's error [Text] / D. A. Vishnevsky, A. L. Sotnikov // Journal of Advanced Research in Technical Science. — 2021. — Iss. 24. — P. 41–46.

© Вишнеvский Д. А.

© Козачишен В. А.

© Бондарь Н. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ТМиИК ЛГУ им. В. Даля Витренко В. А., д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТИ Харламовым Ю. А.

Статья поступила в редакцию 14.10.2022.

Doctor of Technical Sciences Vishnevskiy D. A., PhD in Engineering Kozachischen V. A., Bondar N. A. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

ASSESSING THE INFLUENCE OF HUMAN FACTOR ON FUNCTIONING OF THE PNEUMATIC MANIPULATOR SYSTEM AND THE MECHANISM OF LIFTING AND ROTATING THE ARCH AND ELECTRODES OF THE FURNACE-LADLE UNIT IN AN EMERGENCY SITUATION

A structural and logical scheme for assessing the failure of the pneumatic manipulator system has been developed, considering the failures of technical components and intentional or unintentional operator errors. The probabilities of human and machine failure of the pneumatic manipulator system are presented. A mathematical model has been developed for assessing the final probability of failure of the entire system, considering the failures of technical components and operator errors. A mathematical model has been developed for calculating the response of technical failure system and human errors on system reliability. Two objects are taken as an example: the pneumatic manipulator system of lifting and turning mechanism of the arch and electrodes of the furnace-ladle unit.

Key words: model sensitivity, human factor, system failure, failure tree.

УДК 621.746, 62-83, 669.02/.09

к.т.н. Ткачев М. Ю.

(АДИ ДонНТУ, г. Горловка, ДНР, mishel-tkachev@ya.ru)

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ ЗАМЕНЫ ПОГРУЖНОГО СТАКАНА СЛЯБОВОЙ МНЛЗ

Разработаны математическая модель манипулятора для замены погружного стакана слябовой машины непрерывного литья заготовок и алгоритм ее реализации с помощью специальных программ и соответствующего аппаратного обеспечения с использованием персонального компьютера. С использованием физической модели системы быстрой смены погружных стаканов и системы автоматического управления выполнено тестирование работы всех их компонентов. Комплекс мероприятий направлен на максимальное повышение уровня автоматизации технологической операции замены погружных стаканов с целью исключения субъективного фактора, влияющего на соблюдение правил охраны труда и положений техники безопасности.

Ключевые слова: манипулятор, сляб, УНРС, МНЛЗ, автоматизация, система автоматического управления (САУ), двигатель, привод, роботизированный комплекс.

Современное высокомеханизированное и автоматизированное производство немислимо без применения промышленных роботов (ПР), гибких автоматизированных производств (ГАП), обрабатывающих модулей или центров.

Первые промышленные роботы появились в США в 1959 году, когда были созданы роботы с программным управлением. В 1962 нашли своё применение роботы «Юнимейт», «Версатран» для обслуживания процессов литья,ковки, механической обработки, точечной сварки, покраски. В автомобильной и металлургической промышленности сроки окупаемости составляли 1,5–2,5 года, что было довольно высоким показателем для того времени [1].

Динамику роста выпуска ПР можно проследить по следующим цифрам: в 1978 г. в мире было 16000 ПР, в 1980 г. — 25000, в 1983 г. — в капиталистических странах — 31000 штук.

По такому показателю, как число роботов на 10000 рабочих на первом месте в мире Швеция — 40, в Японии — 13, в США и ФРГ — 3–4 шт. По ориентировочным данным в СССР в 1983 г. действовало около 7000 ПР и к 1990 г. число ПР планировалось довести до 375000 штук. В настоящее время

Япония продолжает удерживать первенство по проектированию новых типов роботов. Большое внимание уделяется созданию так называемых гуманоидных роботов, повторяющих движения человека, разрабатываются и выпускаются специализированные роботы для помощи людям с дефектами зрения, слуха, опорно-двигательного аппарата.

В условиях непрерывной разливки стали длинными сериями с применением защитных погружных стаканов стабилизация скоростных режимов истечения металла из промежуточного ковша в кристаллизатор МНЛЗ является важной технологической задачей, решение которой требует создания специальных устройств, позволяющих при необходимости осуществлять быструю замену огнеупорного элемента, экранирующего струю расплава от окружающей атмосферы.

Практика эксплуатации подобных устройств на ряде зарубежных и отечественных металлургических предприятий показала, что эффективность их применения значительно повышается, если они работают в комплексе с манипуляторами, обеспечивающими механизированную подачу на приемные направляющие разливочного устройства промежуточного ков-

ша предварительно разогретого до требуемой температуры резервного огнеупорного изделия, которое должно за доли секунды под действием силового цилиндра сменить вышедший из строя стакан.

Многообразие схем относительного расположения оборудования современных МНЛЗ и особенности их функционирования являются главными предпосылками для разработки системы автоматического управления операцией быстрой замены погружных стаканов [2, 3], которая в наибольшей мере соответствует условиям непрерывной разливки металла данного сталеплавильного цеха.

Целью работы является исследование базовой платформы системы автоматического управления манипулятора для замены погружного стакана слябовой машины непрерывного литья заготовок.

Задачей данной работы является разработка программ, реализующих в автоматическом режиме работу модулей кинематической цепи манипулятора для замены огнеупорного стакана установки непрерывной разливки стали.

Объект исследования — блок управления манипулятором с механической автоматикой (БУМ), оснащенный электромеханическими приводами, число которых рационально подобрано конструктором в стесненных производственных условиях с точки зрения критериальной оценки совершенства его концепции построения.

Предмет исследования — отработка структурных единиц системы автоматического управления приводами манипулятора новой конструкции на участке «промежуточный ковш — кристаллизатор» слябовой МНЛЗ.

В современной системе технологий промежуточный ковш МНЛЗ рассматривается как один из важнейших элементов, который непосредственным образом влияет на качество непрерывно литой заготовки.

В цепи технологических переливов он является промежуточной емкостью, поскольку с его помощью согласовывается поступление металла из сталеразливочно-

го ковша в кристаллизатор. При этом обеспечивается усреднение по химическому составу поступающей порции жидкого металла и предотвращение попадания шлака в кристаллизатор. Конструкция промежуточного ковша должна обеспечивать минимальные потери тепла металлом.

Промежуточный ковш обеспечивает поступление металла в кристаллизатор с определенным дозированным расходом и, обеспечивая хорошо организованную струю, позволяет разливать сталь в несколько кристаллизаторов одновременно, а также осуществлять серийную разливку методом «плавка на плавку» при смене сталеразливочных ковшей без прекращения и снижения скорости разливки. Конструкция и вместимость промежуточного ковша в значительной степени определяют стабильность процесса разливки стали и качество заготовки.

Причины смены положения промковша в вертикальной плоскости следующие:

1. Переход к разливке слитка другого сечения.

2. Переход на разливку других марок стали с отличающимся от предыдущего химическим составом. Изменение положения промковша обусловлено при этом необходимостью формирования соответствующих новой марке стали гидродинамических потоков в кристаллизаторе МНЛЗ.

3. Необходимость увеличения срока службы огнеупорного стакана в зоне его усиления циркониевой вставкой в шлаковом поясе.

Структурно-функциональная блок-схема управления электроприводами поворота штанги манипулятора и подъема (опускания) его базы. Для создания математико-механической модели, а также программы автоматического управления манипулятора для замены погружного стакана необходимо создать соответствующий задаче алгоритм его работы [4]. Задача заключается в поочередной реализации функционирования четырех двигателей, которые, в свою очередь, работают с разной скоростью вращения, а также необходимости постоянного учета параметров датчиков, сле-

дящих за положением каждого захватного устройства (ЗУ) в пространстве [5].

Первым звеном в данном алгоритме (рис. 1) выступает операция «Подъем/опускание манипулятора», необходимая в том случае, если положение ЗУ установки стакана находится выше (ниже) паза разливочного устройства промежуточного ковша.

Системой, оценивающей уровень рассогласования в данном агрегате, выступает оптический датчик, установленный на штоке переталкивающего погружной стакан устройства. Когда манипулятор опустился или же поднялся на необходимую величину, включается электропривод, отвечающий за поворот стрелы установки погружного стакана. Стрела, в свою очередь, поворачивается на 90° , и в этот момент по механической связи кинематической цепи внутри нее стакан переходит из горизонтального в вертикальное положение. Как только стрела совершит перемещение на 90° , будет достигнуто конечное положение. Затем срабатывает привод переталкивающего устройства стакана и электропривод поворота стрелы ЗУ отработанного стакана. После того как отработанный стакан будет успешно извлечен, манипулятору необходимо вернуться в исходное положение до следующего запуска данной системы.

Реализация типовых перемещений при установке (захвате) разливочного стакана. Основные операции при установке (извлечении) погружного стакана следующие:

1. Погружной стакан находится в так называемом накопителе, из которого с помощью специального приспособления переносится в ЗУ манипулятора и устанавливается в исходном положении с помощью фиксаторов.

2. Из этого положения новый огнеупорный стакан будет перемещаться в рабочую зону разливки («промежуточный ковш — кристаллизатор») с помощью системы электропривода; угол поворота заранее задан и равен 90° .

3. В процессе поворота штанги стакан из горизонтального положения должен пе-

рейти в вертикальное и затем быть установлен между промежуточным ковшом и кристаллизатором.

Поворот стакана на 90° осуществляется с помощью специальной механической передачи, расположенной внутри штанги.

В процессе разливки стали база манипулятора должна подняться (опуститься) на 50–100 мм.

С учетом отмеченных технологических требований к функционированию роботизированного блока разработан алгоритм управления системой взаимосвязанных электроприводов поворота штанги и ее подъема (опускания) и на его базе создан аналог модели управления. Общий вид математической модели механической системы приведен на рисунке 2, где в качестве базового устройства представлена неподвижная часть манипулятора. Для моделирования механической части роботизированного блока используется библиотека SimMechanics [6] в среде Matlab.

Разработанная модель была создана по отдельным участкам звеньев: первое звено отвечает за подъем конструкции манипулятора. Затем следует отработка поворота штанги со стаканом, и в это же время начинает свою работу механизм ЗУ стакана. Затем манипулятор возвращается в исходное положение. Также в системе присутствует регулятор положения, который позволяет отслеживать перемещение каждого звена манипулятора.

В первую очередь за подъем отвечает часть модели «Подъем конструкции», где величину регулирует блок Repeating Sequence, а блок Body — положение звена в пространстве. Следующим звеном рассматривается ЗУ для установки погружного стакана и его фиксации. За эту операцию отвечает часть модели «Общая стрела». В модели реализуется 2 режима: установка нового стакана (ЗУ для подачи стакана) и захват изношенного (ЗУ для забора стакана). В процессе подачи участвует ЗУ (подающий стакан схват), а в процессе уборки стакана участвует второй блок ЗУ (забирающий стакан схват).



Рисунок 1 Алгоритм реализации системы автоматического управления манипулятором для замены погружного стакана

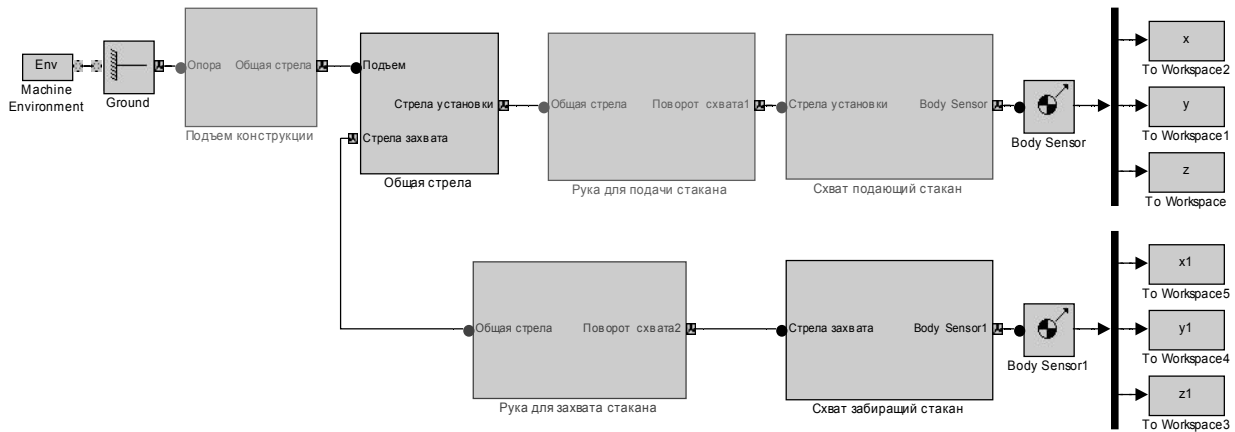


Рисунок 2 Математическая модель робота-манипулятора

В качестве задающего воздействия в подпрограммах выступает блок Repeating Sequenc. Подробные данные для каждого звена рассмотрены в таблице.

Выбор элементов, реализующих автоматическое управление манипулятором для замены погружного стакана. На данный момент существует множество способов автоматизации роботов-манипуляторов, но самые актуальные на данный момент — это преобразователи частоты и микроконтроллеры. Для данной работы в первую очередь рассматривался преобразователь частоты EMERSON Commander SK. Commander SK — это недорогой компактный частотный преобразователь общего назначения. Отличительной особенностью Commander SK является простота настройки и ввода в эксплуатацию. Благодаря большому набору параметров (доступны при подключении ПК) и поддержке некоторых SM-модулей согласовывается работа Commander SK с другими компонен-

тами системы управления. За счет встраиваемого PLC (Logic Stick) на базе Commander SK можно реализовать небольшую систему управления. При этом количество точек ввода-вывода увеличивается устанавливаемыми в Commander SK опциональными SM-модулями. Но, несмотря на множество преимуществ данного преобразователя, основными недостатками являются монтаж, громоздкость системы управления, а также стоимость.

Основу системы автоматического управления составляет микроконтроллер. В настоящее время значимыми являются несколько семейств процессоров, основные из которых созданы на архитектуре ARM. Архитектура ARM (от англ. Acorn RISC Machine) — семейство лицензируемых 32-битных и 64-битных микропроцессорных ядер разработки компании ARM Limited. Большинство представителей данного семейства программируются при помощи аппаратно-программных средств — Arduino.

Таблица

Данные блока Repeating Sequenc для каждого звена манипулятора

Звено	Time values	Output values
Подъем конструкции	[0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 18]	[0 0.005 0.01 0.015 0.02 0.025 0.03 0.03]
Общая стрела	[0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12]	[0 15 30 45 60 75 90 75 60 45 30 15 0]
Рука для подачи стакана	[0 3 6 9 12]	[0 0 0 0]
Рука для захвата стакана	[0 3 6 9 12]	[90 45 5 45 90]
Схват подающий стакан	[0 3 6 9 12]	[0 -45 -90 -45 0]
Схват забирающий стакан	[0 3 6 9 12]	[0 15 45 15 0]

За основу была взята библиотека Waijung Blockset в среде Matlab. Данная библиотека позволяет создать компактную программу и прошить ее в подходящий контроллер, одним из которых является STM32F4 Discovery, выбранный для реализации системы автоматического управления манипулятором.

Основанные на ARM Cortex-M4 микроконтроллеры серии STM32 F4 являются продолжением ведущей линейки STM32, обладая еще более высокой производительностью [7]. Так же, как серия STM32 F2, эти микроконтроллеры используют запатентованный STMicroelectronics'ом ART Accelerator для достижения наилучших результатов тестов среди основанных на ядре Cortex-M микроконтроллеров, достигая показателей в 225 DMIPS/606 CoreMark и работая с флеш-памятью на частоте 180 МГц. Инструкции DSP и модуль операций с плавающей точкой дают возможность применять данные контроллеры в широком спектре проектов. Динамическое потребление питания позволяет снизить потребление тока при выполнении кода из флеш-памяти до 140 мкА/МГц для STM32F401 (максимальная частота до 84 МГц) и до 238 мкА/МГц для STM32F42x/43x, работающих на частоте до 180 МГц. Микроконтроллеры серии STM32 F4 являются результатом взаимодействия возможности управления в реальном времени с производительностью обработки сигналов, свойственной сигнальным процессорам.

Также был произведен подбор подходящих контроллеров двигателя постоянного тока. Исходя из паспортных данных двигателей, а также условий окружающей среды, было принято решение использовать контроллер шагового двигателя 2C-VNH2SP30 [8].

Драйвер VNH2SP30-E является связующим звеном между микропроцессором и двигателем, предназначенным для широкого спектра автоматических систем. Устройство включает в себя двойной монолитный драйвер с верхней стороны и два

переключателя с нижней стороны. Переключатель высокого уровня для драйвера разработан с использованием известной и проверенной технологии VIPower™ M0 фирмы STMicroelectronics, которая обеспечивает эффективную интеграцию на одном и том же кристалле силового транзистора MOSFET с интеллектуальной схемой защиты сигналов/защиты. Модуль может управлять двумя моторами с большими токами или мощным биполярным шаговым двигателем в режимах «Прямой ход» и «Реверс». Данное устройство было специально разработано для сложных условий эксплуатации, обеспечивает улучшенные тепловые характеристики благодаря открытым колодкам.

В качестве логической связи между оценочной платой STM32F4 Discovery и драйвером 2C-VNH2SP30 был использован 8-канальный двунаправленный преобразователь логических уровней напряжения 3,3/5 В на микросхеме TXS0108E. Преобразователь работает в широком диапазоне питающих напряжений от 1,2 В до 5,5 В. Источники питания могут быть раздельными, но с общим отрицательным выводом. Для переключения направления преобразования дополнительного сигнала не требуется; микросхема преобразователя выполнит это автоматически.

Преобразователь имеет небольшие размеры и идеально подходит для портативных устройств, а также устройств с автономным питанием.

Создание базовой платформы системы управления. Для реализации системы автоматического управления манипулятором для замены погружного стакана была разработана программа в среде Matlab на основе библиотеки WaijungBlockset. В данной программе осуществляется управление двигателями отдельных звеньев манипулятора, что позволяет изменять скорость вращения двигателей и их время работы.

Отработка системы начинается с нажатия зеленой кнопки на блоке управления, которая подключена к отладочной плате

STM32F4 Discovery. После замены стакана необходимо повторно нажать на зеленую кнопку, чтобы манипулятор вернулся в исходное положение.

Начальным блоком, реализующим нажатие кнопки и, соответственно, запуск программы, является блок Digital input. После этого осуществляется задержка входного сигнала при помощи блока Debounce. Сигнал с этого блока идет на подпрограммы «Ход вперед» и «Ход назад», которые выполнены при помощи блоков MultiportSwitch. В это же время сигнал поступает на вход первого таймера (TimerMS) «Подъем/опускание конструкции». Входные сигналы блока TimerMS — сигнал с кнопки (Reset) и время работы таймера (Constant). На выходе осуществлено инвертирование сигнала, поскольку таймер работает в режиме «отключения на время». Заданное время работы поступает на вход блока AdvanvedPWM, реализующего запуск двигателя и регулирование ШИМ. Блок Gain служит для задания скорости вращения двигателя в относительных единицах.

После отработки первого таймера сигнал идет по логической связи на следую-

щий таймер. Затем происходит аналогичная отработка программы для оставшихся двигателей.

Подпрограммы данной автоматической системы приведены на рисунках 3–4.

В данной подпрограмме сигнал задания с кнопки (зеленая) поступает на вход переключателя MultiportSwitch, переключая из положения «0» в положение «1». Это позволяет программе работать в режиме «Ход вперед». Также в подпрограмме предусмотрен обрыв на случай, если необходимо совершить аварийную остановку манипулятора. Эту функцию выполняет блок «Разрешение на работу/остановка программы», переключая входящее задание в положение «0». Наличие светодиода «Зеленый» на контакте PD12 позволяет оператору наблюдать, в каком режиме в данный момент работает программа. Данная подпрограмма работает по аналогии с режимом «Прямой ход» за исключением того, что во время нажатия на кнопку запуска программы переключатель переходит в положение «0», после повторного нажатия переключает в положение «1».

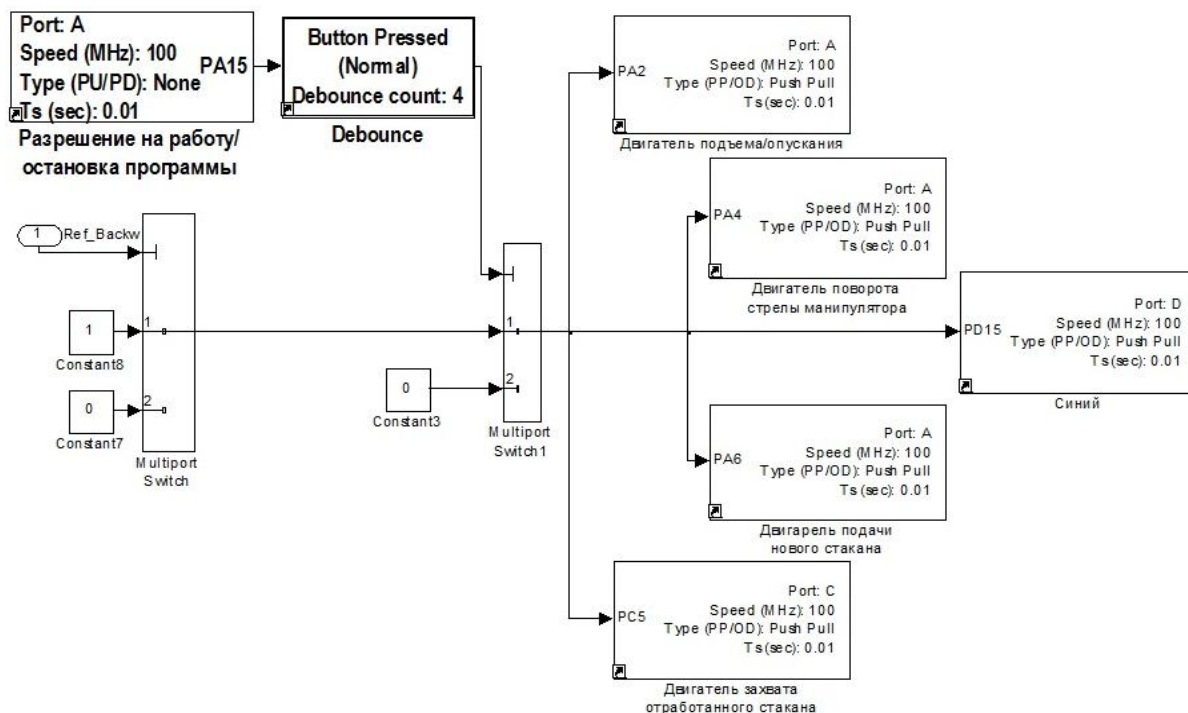


Рисунок 3 Подпрограмма реализации прямого хода четырех двигателей

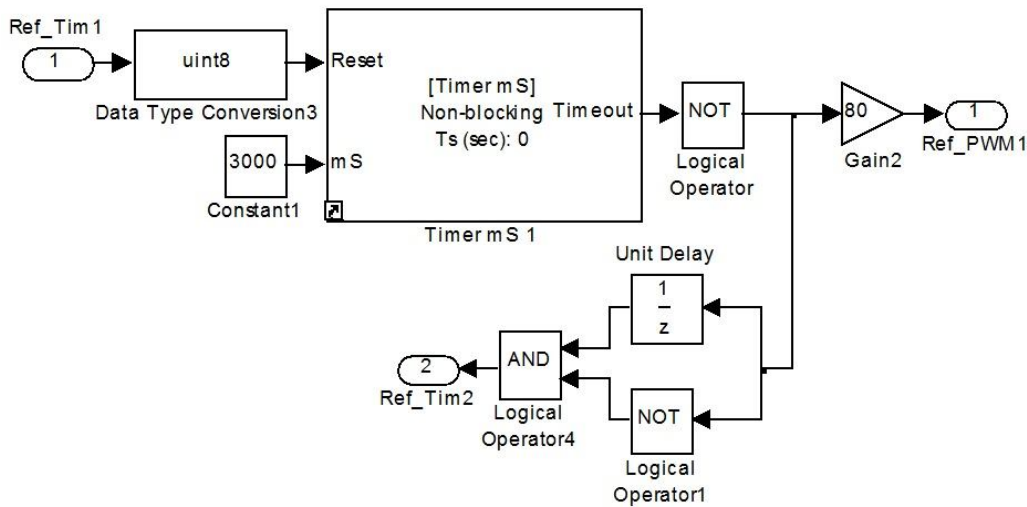


Рисунок 4 Подпрограмма реализации обратного хода четырех двигателей

Необходимо рассмотреть содержимое подпрограмм, управляющих временем и скоростью вращения каждого двигателя. Сигналы с данных подпрограмм переходят на вход блока AdvanvedPWM, запускающего двигатель.

Сборка системы управления на базе лабораторного образца манипулятора для замены погружного стакана. В настоящее время на отечественных металлургических предприятиях в МНЛЗ практически не используются следящие электроприводы. В основном применяются позиционные приводы, реализующие контроль над перемещением ряда звеньев системы, положение которых определяется технологическими требованиями, в частности, контролем над положением разрезаемого слитка и его проходом на транспортировку с линии машины. Известны устройства по типу промышленного манипулятора [1, 2], реализующие установку погружного стакана. Для данной системы предложено использование простой системы на базе асинхронного короткозамкнутого двигателя.

Установка погружного стакана — трудоемкая операция, требующая достаточно высокой квалификации обслуживающего персонала. В данном исследовании рассматривается автоматизация процесса ус-

тановки/снятия погружного стакана промежуточного ковша (МНЛЗ). Поставленная задача решалась в планировании выбора системы электропривода, ее звеньев, обратных связей, реализующих законы оптимального управления.

Система подобного рода, находящаяся в стадии разработки, как правило, требует значительных усилий для ее реализации. Это относится в первую очередь к выбору преобразователя частоты и совместимого с ним приводного электродвигателя.

Основа разрабатываемой системы слежения заключается в том, что разливающий ковш МНЛЗ меняет свое местоположение в процессе разливки стали в зависимости от ряда технологических факторов. Лабораторная модель манипулятора настраивается таким образом, что она всегда готова к работе в режиме «замена стакана». Приводной двигатель выбран из серии машин 4А, которые обладают высокими КПД и перегрузочной способностью; преобразователь частоты позволяет получить широкий диапазон регулирования скорости, а обратные связи обеспечат высокую жесткость механических характеристик. С другой стороны, за счет датчика интенсивности возможно формирование желаемой (оптимальной) тахограммы движения по ограничению ускорения и рывка на начальном этапе дви-

жения погружного стакана. Для ограничения перемещений используем оптический датчик, который устойчив к высоким температурам окружающей среды.

Важным достоинством большинства оптических датчиков является возможность производить бесконтактные измерения; кроме того, такие датчики обычно довольно точны и имеют высокое быстродействие. Таким образом, полученные результаты анализа рекомендованы к использованию при проектировании и наладке опытно-промышленного образца манипулятора для замены погружных огнеупорных стаканов слябовой МНЛЗ.

Для создания автоматизированной системы управления в первую очередь необходимо собрать схему подключения комплектующего оборудования и провести ее диагностику.

Схема подключения полностью должна соответствовать заданному алгоритму, а соединительные контакты расположены в соответствии с программой. Помимо управления манипулятором для замены погружного стакана, данная система имеет возможность управлять любым промышленным роботом, имеющим от одного до четырех приводов. Благодаря компактности плат и схемы подключения данная система была вмонтирована в БУМ (рис. 5).

Экспериментальные исследования системы автоматического управления приводами манипулятора для замены погружного стакана на участке «промежуточный ковш — кристаллизатор МНЛЗ». В качестве эксперимента БУМ был подключен к действующему лабораторному стенду, разработанному кафедрой механического оборудования заводов черной металлургии им. проф. Седуша В. Я. (ДонНТУ, г. Донецк). Демонстрация ключевых моментов работы системы автоматического управления проиллюстрирована рисунках 6–12. Первым действием для начала отработки системы является подача команды разрешения нажатием на красную кнопку БУМ (рис. 6), индикатором чего будет включение синего светодиода.

Для начала работы манипулятора необходимо нажать на зеленую кнопку БУМ (рис. 7). Подтверждением начала работы является включение зеленого светодиода. Следующим этапом является работа манипулятора в соответствии с заданным алгоритмом управления (рис. 8–11).

Завершающим этапом является повторное нажатие зеленой кнопки БУМ для запуска режима «Обратный ход» каждого электропривода манипулятора. О начале работы данного режима свидетельствует включение синего светодиода (рис. 12).

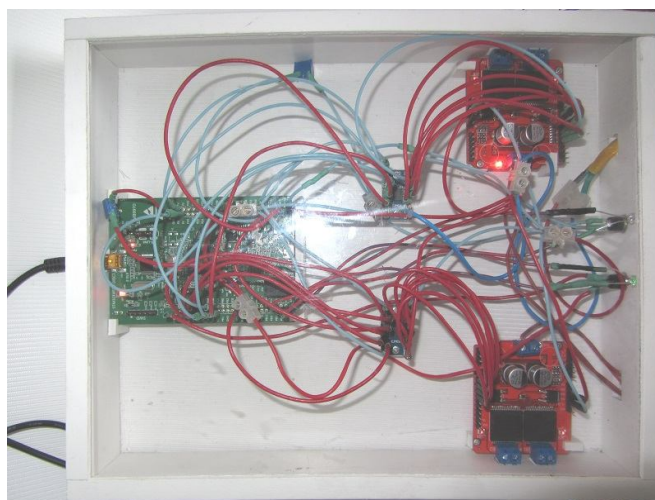


Рисунок 5 Внешний вид блока управления манипулятором (БУМ)



Рисунок 6 Подача команды разрешения на отработку системы БУМ посредством нажатия красной кнопки

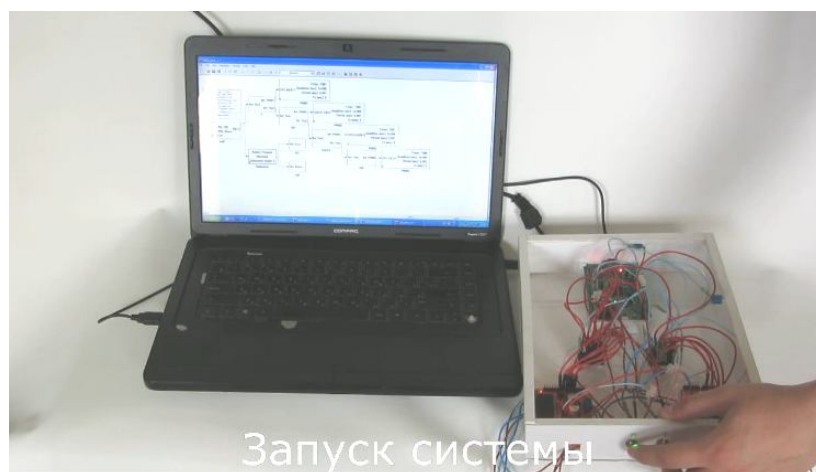


Рисунок 7 Запуск БУМ посредством нажатия зеленой кнопки

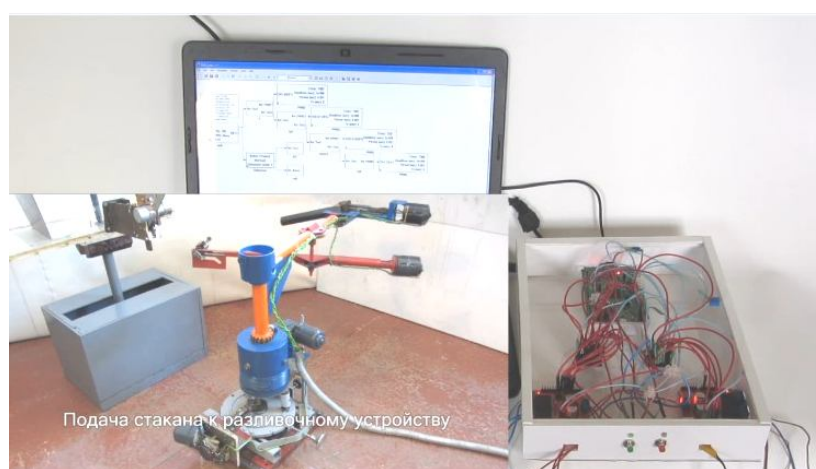


Рисунок 8 Подача нового погружного стакана в кристаллизатор МНЛЗ

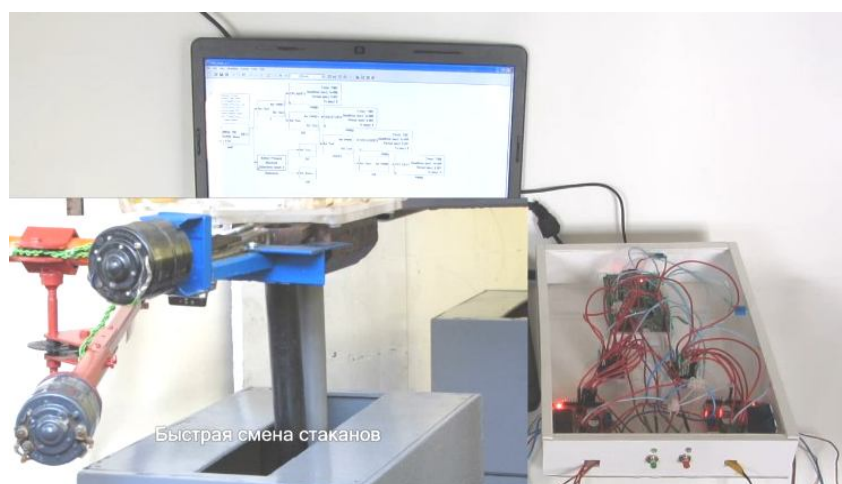


Рисунок 9 Запуск электропривода переталкивающего устройства смены погружного стакана

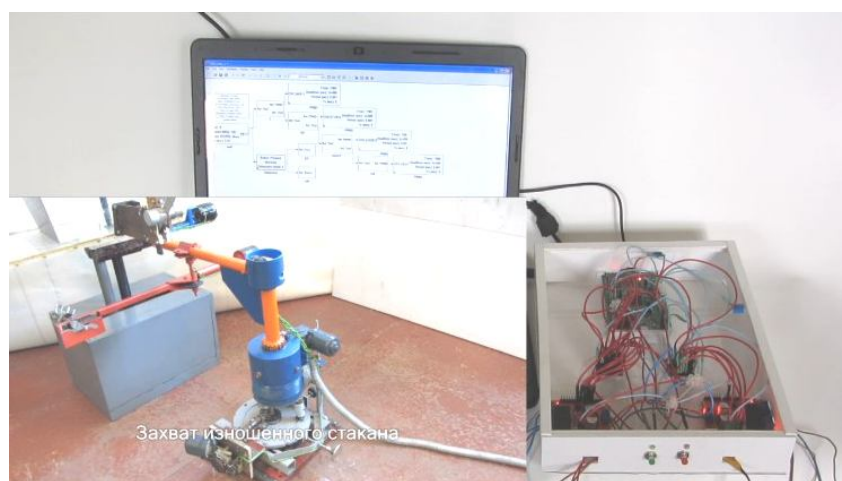


Рисунок 10 Запуск электропривода захвата изношенного погружного стакана

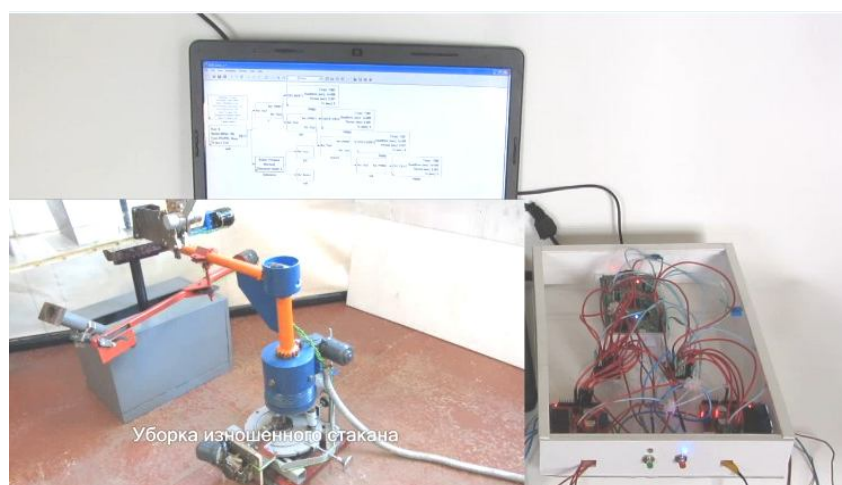


Рисунок 11 Удаление из полости кристаллизатора

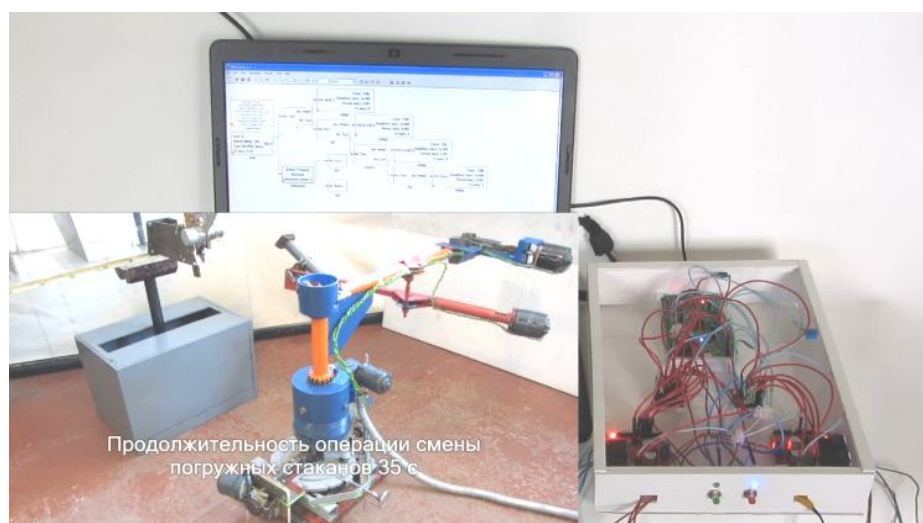


Рисунок 12 Возврат манипулятора в исходное положение (индикация — включение синего светодиода)

Таким образом, в работе проведены исследования процесса автоматизации манипулятора для замены промежуточного стакана на участке «промежуточный ковш — кристаллизатор» слывовой МНЛЗ.

Для автоматизированной системы управления (АСУ) подъемом (опусканием) базы манипулятора была выбрана система электромеханического привода с двигателем постоянного тока. Для полной автоматизации технологической операции замены вышедшего из строя погружного огнеупорного стакана система управления приво-

реализующего ее механизма была сконструирована с помощью микроконтроллера STM32 F4. Для этого была предварительно спроектирована математическая модель при помощи прикладного пакета MatLab и его внутренней библиотеки SimMechanics.

Направлением дальнейших исследований является совершенствование архитектуры САУ с позиции уточнения параметров математической модели промышленного образца модели манипулятора для замены погружного стакана в течение срока его гарантированной эксплуатации.

Библиографический список

1. Борисенко, В. Ф. Введение в специальность [Текст] / В. Ф. Борисенко. — Донецк : ДонНТУ, 2014. — 357 с.
2. Патент 2639089 РФ, МПК В22D41/56. Манипулятор для замены погружного стакана на слывовой машине непрерывного литья заготовок [Текст] / Е. Н. Смирнов, С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев, В. А. Скляр, А. В. Сазонов ; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“». — № 2016111482 ; заявл. 29.03.2016 ; опубл. 19.12.2017, Бюл. № 35. — 21 с. : ил.
3. Разработка роботизированного комплекса для замены погружного стакана на участке промежуточный ковш — кристаллизатор МНЛЗ [Текст] / М. Ю. Ткачев, В. Ф. Борисенко, К. Н. Шаповалов и др. // Вестник ДонНТУ. — 2016. — № 1. — С. 27–32.
4. Ткачев, М. Ю. Совершенствование конструкции и перспективы внедрения системы быстрой смены погружных стаканов слывовой МНЛЗ [Текст] / М. Ю. Ткачев // Вестник ДонНТУ. — 2019. — № 4. — С. 10–17.
5. Еронько, С. П. Конструктивные и энергосиловые параметры манипулятора для замены погружного стакана МНЛЗ [Текст] / С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, М. Ю. Ткачев // Вестник ДонНТУ. — 2016. — № 3. — С. 33–42.

6. *SimMechanics* — моделирование механических систем [Электронный ресурс] / Matlab.ru. — Режим доступа: <http://matlab.ru/products/simmechanics> (по состоянию на 22.02.2022).

7. Обзор микроконтроллеров семейства STM32F4 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://fpga.in.ua/dsp/dsp-theory/obzor-mikrokontrollerov-semejstva-stm32f4.html> (по состоянию на 22.02.2022).

8. Драйвер для управления двигателями VNH2SP30 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.dessy.ru/catalog-pdc436299.html> (по состоянию на 22.02.2022).

© Ткачев М. Ю.

Рекомендована к печати д.т.н., доц., зав. каф. ММК ДонГТИ Вишневским Д. А., д.т.н., проф., зав. каф. АТ АДИ ДонНТУ Мищенко Н. И.

Статья поступила в редакцию 21.02.2022.

PhD in Engineering Tkachev M. Yu. (*Automobile and Road Institute of DonNTU, Gorlovka, DPR, mishel-tkachev@ya.ru*)

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL AND AN AUTOMATIC CONTROL MANIPULATOR SYSTEM TO REPLACE THE SUBMERGED NOZZLE OF A SLAB CCM

A mathematical model of a manipulator has been developed to replace the submerged nozzle of a slab continuous casting machine and an algorithm for its implementation using special programs and appropriate hardware on a personal computer. Using a physical model of the quick-change system of immersion nozzles and an automatic control system, the operation of all their components was tested. The complex of measures is aimed at maximizing the level of automation of the technological operation of replacing submerged nozzles in order to eliminate the subjective factor affecting compliance with labor protection rules and safety regulations

Key words: *manipulator, slab, CCP, CCM, automation, automatic control system (ACS), engine, drive, robotic complex.*

ТРЕБОВАНИЯ
к рукописям научных статей в сборник научных трудов
государственного образовательного учреждения
высшего образования Луганской Народной Республики
«Донбасский государственный технический институт»

Научные статьи, предоставляемые в редакцию, должны соответствовать требованиям ВАК МОН ДНР (Приложение 1 к правилам формирования в уведомительном порядке перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (п. 4)) и базовым издательским стандартам по оформлению статей по ГОСТ 7.5–98 «Журналы, сборники, информационные издания».

Сборник научных трудов издаётся не менее 4 раз в год. Сборник формирует информационный отдел: 94204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16, ДонГТИ; тел./факс: (06442) 2-68-87, e-mail: info@dstu.education (тема: для редакции сборника научных трудов ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»); секретарь редакционной коллегии Скомская Светлана Анатольевна.

Сборник содержит следующие разделы: «Науки о земле», «Металлургия и материаловедение», «Машиностроение и машиноведение», «Строительство и архитектура».

Представляемые в статье материалы должны быть актуальными, отвечать новым достижениям науки и техники, иметь практическую значимость, соответствовать направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

Название статьи должно быть лаконичным и понятным, включать в себя объект и предмет исследований, иметь прямое отношение к области исследований и её результатам.

Обязательные элементы статьи:

- 1) постановка проблемы, обоснование её актуальности;
- 2) анализ последних исследований и публикаций по данной проблеме, вскрытие их недостатков и противоречий;
- 3) выделение не решённых ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;
- 4) формулирование цели, идеи, объекта и предмета исследований, постановка задач исследований;
- 5) описание и обоснование принятой методики исследований;
- 6) изложение основного материала теоретических и (или) экспериментальных исследований с обоснованием достоверности полученных научных результатов;
- 7) выводы о научной новизне и практической ценности результатов, направление дальнейших исследований.

По решению редколлегии в каждом номере сборника может быть опубликовано не более одной статьи обзорного характера, включающей большую часть рекомендованных выше основных элементов.

Редакция оставляет за собой право отклонять рукописи обзорного и компилятивного характера с нечётко сформулированными научными результатами, новизна и достоверность которых недостаточно обоснованы.

Результаты работы не должны предоставляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, несоблюдение действующих стандартов и недостоверность приведённых в статье данных полностью несут авторы статьи.

Статья должна сопровождаться:

- внутренней и внешней рецензиями;

– лицензионным договором с автором(и).

Текст статьи предоставляется на электронном носителе и в печатном виде, сопроводительная документация только в печатном виде.

Рекомендуемое количество авторов статьи — до 3-х человек. При необходимости, по решению редколлегии, количество авторов может быть увеличено до 5-ти.

Языки предоставления статей: русский, английский.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Текст рукописи статьи от 5 до 10 страниц в книжной ориентации на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) с полями: верхнее, нижнее — 27 мм; левое, правое — 24 мм. Различать колонтитулы чётных и нечётных страниц: от края до верхнего колонтитула — 2 см; от края до нижнего колонтитула — 2 см. Страницы не нумеруются. Рукопись статьи оформляется с применением редактора **MS Word в формате, полностью совместимом с Word 97–2003**: шрифт — Times New Roman, размер — 12 пт, интервал — одинарный, выравнивание — по ширине, абзацный отступ — 0,5 см.

Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **активирована**. Весь материал подаётся в чёрно-белом оформлении (без градиентов серого или цветовой палитры).

Не допускается использование списков (маркированных и нумерованных) и элементов «Надпись». **Запрещено использование стилей!**

Оформление статей

Статья подаётся отдельным файлом «*Статья.doc*».

УДК проставляется вверху, выравнивание по левому краю, шрифт полужирный, без абзацного отступа. УДК можно определить самостоятельно с помощью классификатора <https://teacode.com/online/udc>. Проверить корректность расшифровки известного УДК можно здесь — <http://scs.viniti.ru/udc/Default.aspx>.

Через один интервал — учёная степень, фамилия, инициалы, разделённые пробелом. С новой строки в круглых скобках через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. Шрифт полужирный, курсив, выравнивание по правому краю, без абзацного отступа.

С новой строки — название статьи. Выравнивание по центру, шрифт Arial, полужирный, видоизменение — все прописные, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца — 12 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. **Не допускается** набор всего названия заглавными буквами (Caps Lock).

С новой строки — краткая аннотация на языке статьи: размер шрифта — 11 пт, курсив. В аннотации сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

После аннотации с новой строки — ключевые слова (6–8 слов на языке статьи), курсивом, размером 11 пт, интервал после абзаца — «Авто». Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

С новой строки — текст статьи в **две колонки** одинаковой ширины, промежуток между колонками — 0,5 см.

Слова «рисунок» и «таблица» при упоминаниях в тексте пишутся полностью (пример: «... на рисунке 2 ...»), а в ссылках в конце предложения — сокращённо в скобках (примеры: «... схема инвертора (рис. 2).», «... получены экспериментальные данные (табл. 4).»).

После текста статьи полужирным шрифтом размером 11 пт располагается заголовок «Библиографический список»: интервал перед абзацем — 12 пт, после абзаца — 8 пт, выравнивание по левому краю.

Библиографический список оформляется согласно ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления» размером 11 пт, курсивом и должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Рекомендованное количество ссылок — не более восьми источников с датой их издания не ранее чем 20 лет назад.

Оформление аннотаций отдельным файлом

Аннотация и ключевые слова дополнительно подаются на языке статьи отдельным файлом «*Аннотация.doc*», размером шрифта 11 пт.

Учёная степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. В круглых скобках курсивом через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. С новой строки, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю — название статьи заглавными буквами.

С новой строки — краткая аннотация курсивом.

С новой строки — ключевые слова курсивом. Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

Не допускается внедрение в текст аннотации объектов (формул, рисунков и т. д.).

Оформление рефератов отдельным файлом

Реферат подаётся на языке статьи отдельным файлом «*Реферат.doc*»: размер шрифта — 11 пт, без абзацного отступа, выравнивание — по левому краю. Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **выключена**.

Фамилия, имя, отчество оформляются полужирным шрифтом.

С новой строки — учёная степень, должность.

С новой строки — название подразделения.

С новой строки через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора.

Через интервал повторить данные для каждого автора.

Через интервал — название статьи (полужирным начертанием).

Через интервал — текст реферата. Реферат объёмом от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель, методика, результаты, научная новизна, практическая значимость. Фразы «**Цель.**», «**Методика.**», «**Результаты.**», «**Научная новизна.**», «**Практическая значимость.**» (для статьи на русском языке); «**Aim.**», «**Technique.**», «**Results.**», «**Scientific novelty.**», «**Practical significance.**» (для статьи на английском языке) размещаются с новой строки и выделяются полужирным начертанием. Реферат не должен повторять название статьи.

Не допускается внедрение в текст реферата объектов (формул, рисунков, и т. д.).

Рисунки

Рисунки вставляются в текст единым объектом и могут быть представлены:

– *растровыми форматами* — gif, tiff, jpg, bmp и им подобными (качество 300 dpi);

– *векторными форматами* — emf, wmf (графики, диаграммы).

Рисунки, выполненные в программах Corel, CAD, Word и др., переводятся в один из описанных выше форматов, предпочтительно векторный.

Графический материал следует располагать непосредственно после текста, в котором он упоминается впервые, или на следующей странице. Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте и нанесены слева направо, сверху вниз. Перед рисунком интервал 12 пт. Выравнивание по центру, ширина в одну колонку (большие рисунки располагают на ширину страницы вверху или внизу). Рисунки размещают в тексте (не в таблицах), обтекание рисунка — «в тексте». Все рисунки подаются дополнительно отдельными файлами.

Допускается размещение пояснительных данных под иллюстрацией (подрисуночный текст) с выравниванием по центру, без абзацного отступа, размером 10 пт.

Под каждым рисунком (подрисуночным текстом) располагается надпись в формате «Рисунок № Название» с выравниванием по центру без абзацного отступа, интервалом перед и после абзаца — «Авто», размером шрифта 11пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. Статья не должна заканчиваться рисунком. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема статьи.

Формулы

Абзац, содержащий формулы, должен иметь следующие параметры: выравнивание по левому краю, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца 6 пт, позиции табуляции — 3,93 см по центру (для расположения формулы) и 7,85 см по правому краю (для расположения номера формулы). Формулы целиком (включая размерности) выполняются с помощью редактора формул **Microsoft Equation 3** или **MathType** математическим стилем, обычное начертание шрифта (нормальный), со следующими размерами:

Full (обычный).....	12 pt
Subscript/Superscript (крупный индекс)	9 pt
Sub-Subscript/Superscript (мелкий индекс)	7 pt
Symbol (крупный символ).....	14 pt
Sub-Symbol (мелкий символ).....	12 pt
Формат	по центру
Междустрочный интервал	200 %

Недопустимо масштабирование и размещение формул в табличном формате. В одном блоке формулы, попадающем на границу колонок, допускается только одна строка (многострочные формулы разбиваются на блоки).

Упоминание элементов формул в тексте статьи также выполняется в редакторе формул.

Двоеточие перед формулой не ставится, независимо от правил пунктуации.

Таблицы

Все таблицы располагаются после упоминания в тексте и должны иметь нумерационный заголовок и название (размер шрифта 11 пт). Нумерационный заголовок (*Таблица 1*) выравнивается по правому краю над таблицей, курсив, интервал перед абзацем — 12 пт. С новой строки помещают название выравниванием по центру, без абзацного отступа, с запретом автоматического переноса слов в абзаце; интервал после абзаца — 6 пт.

Таблица выравнивается по центру контейнера, в книжной ориентации, шириной в 1 колонку (большие таблицы располагаются на ширину страницы вверху или внизу). Текст в таблице оформляется размером шрифта 11 пт или 12 пт без абзацного отступа. **Не допускается** заливка ячеек таблицы цветом. **Запрещается** располагать таблицу в альбомной ориентации. После таблицы отступается один интервал.

СОДЕРЖАНИЕ**НАУКИ О ЗЕМЛЕ**

<i>Литвинский Г. Г.</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СТАТИКИ НДС В ТЕЛЕ С МИКРОДЕФЕКТАМИ	9
<i>Доценко О. Г., Кизияров О. Л., Аверин Г. А.</i> КОМПРЕССИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ОБРУШЕННЫХ ПОРОД	22
<i>Аверин Г. А., Доценко О. Г., Корецкая Е. Г.</i> ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСЕДАНИЙ ПОДРАБОТАННОЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ ШАХТЫ «ВЕРГЕЛЕВСКАЯ» С УЧЕТОМ КРЕПКИХ ПОРОД, ЗАЛЕГАЮЩИХ В МАССИВЕ	30

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

<i>Снитко С. А., Денищенко Н. П., Яковченко А. В., Денищенко П. Н.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧАГОВ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ПРОКАТКЕ ПРЕДЧИСТОВЫХ ОВАЛЬНЫХ РАСКАТОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ В КРУГЛОМ КАЛИБРЕ	37
<i>Рябичева Л. А., Коробко Т. Б., Королько В. В.</i> ВЛИЯНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЕ И СВОЙСТВА ПРИ СВОБОДНОМ ДОРНОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ ПОРОШКОВОЙ ЗАГОТОВКИ	48
<i>Куберский С. В., Великоцкий Р. Е., Должиков В. В.</i> ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И СТАРЕНИЯ НА ХЛАДОСТОЙКОСТЬ ТРУБНОЙ СТАЛИ КАТЕГОРИИ ПРОЧНОСТИ К60	56
<i>Рябичева Л. А., Дядичев А. В.</i> ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ПОРОШКОВЫХ ПОЛЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ОТНОСИТЕЛЬНУЮ ПЛОТНОСТЬ	66
<i>Проценко М. Ю., Куберский С. В., Проценко В. И.</i> МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ КРЕМНИЯ ИЗ ПЕСКА	73

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

<i>Будзило Е. Е., Горовая Н. А., Бондарчук В. В.</i> ПРОБЛЕМЫ РЕМОНТА И ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ РУЛОННЫХ КРОВЕЛЬ КРУПНОПАНЕЛЬНЫХ ЗДАНИЙ	81
<i>Андрійчук В. Н., Соколов В. И., Андрійчук Н. Д.</i> ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ ПРИТОЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ	90
<i>Псюк В. В., Антошина Т. В., Мерзляков И. А., Никишина И. А.</i> ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГАЛЕРЕИ МОСТА У-4 КОКСОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ФИЛИАЛА № 1 «АМК» ООО «ЮГМК»	98
<i>Сороканич С. В., Парамонова А. В.</i> ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ (АЛЮМОШЛАКА И ОТРАБОТАННОГО ГОРЕЛОГО ПЕСКА) ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА	107
<i>Збицкая В. В., Псюк В. В.</i> ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ БУРОИНЪЕКЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ УПРОЧНЕНИИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ	113

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Литвинский Г. Г.

ПРЯМОТОЧНЫЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ
С ЭЖЕКЦИОННОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ШЛАМА 121

Вишневский Д. А., Корнеев С. В., Мулов Д. В.

ОБОСНОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОЗАЩИТЫ
ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОТБойНЫХ МОЛОТКОВ С ОБОСОБЛЕННЫМ СТВОЛОМ 136

Сотников А. Л., Орлов А. А.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ 147

Вишневский Д. А., Козачишен В. А., Бондарь Н. А.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
ПНЕВМОСИСТЕМЫ МАНИПУЛЯТОРА И МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА И ПОВОРОТА
СВОДА И ЭЛЕКТРОДОВ АГРЕГАТА «ПЕЧЬ-КОВШ» В АВАРИЙНОЙ СИТУАЦИИ 158

Ткачев М. Ю.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ МАНИПУЛЯТОРА ДЛЯ ЗАМЕНЫ ПОГРУЖНОГО СТАКАНА
СЛЯБОВОЙ МНЛЗ 168

CONTENT**GEOSCIENCES**

<i>Litvinsky G. G.</i> MATHEMATICAL MODEL OF THE SSS STATICS IN A BODY WITH MICRODEFECTS	9
<i>Dotsenko O. G., Kiziyarov O. L., Averin G. A.</i> COMPRESSION TESTS OF CAVED ROCKS	22
<i>Averin G. A., Dotsenko O. G., Koretskaia E. G.</i> SUBSIDENCE PREDICTION OF THE UNDERMINED EARTH'S SURFACE IN CONDITIONS OF THE "VERGELEVSKAIA" MINE, CONSIDERING THE STRONG ROCKS LYING IN THE MASSIF	30

METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES

<i>Snitko S. A., Denishchenko N. P., Yakovchenko A. V., Denishchenko P. N.</i> INVESTIGATION OF ROLL PASSES OF THE PRE-FINISHING OVAL ROLLS OF VARIOUS TYPES IN A ROUND GROOVE	37
<i>Riabicheva L. A., Korobko T. B., Korolko V. V.</i> INFLUENCE OF THE STRESS-STRAIN STATE ON STRUCTURE FORMATION AND PROPERTIES DURING FREE MANDRELLING OF POWDERED BLANK HOLES	48
<i>Kuberskiy S. V., Velikotskiy R. E., Dolzhikov V. V.</i> EFFECT OF HEAT TREATMENT AND AGING ON THE COLD RESISTANCE OF PIPE STEEL, STRENGTH CATEGORY K60	56
<i>Riabicheva L. A., Diadichev A. V.</i> INFLUENCE OF POWDER HOLLOW PARTS SIZES ON THE RELATIVE DENSITY	66
<i>Protsenko M. Yu., Kuberskiy S. V., Protsenko V. I.</i> BURDEN BALANCE OF THE ARC DEPTH SILICON RECOVERY FROM SAND	73

CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE

<i>Budzilo E. E., Gorovaia N. A., Bondarchuk V. V.</i> PROBLEMS IN REPAIRING AND SUBSEQUENT FUNCTIONING OF ROLL ROOFING IN LARGE-PANEL BUILDINGS	81
<i>Andriychuk V. N., Sokolov V. I., Andriychuk N. D.</i> IMPROVING THE REGULATION QUALITY OF DRAW-IN AIR SYSTEM	90
<i>Psiuk V. V., Antoshina T. V., Merzliakov I. A., Nikishina I. A.</i> ASSESSING THE STRESS-STRAIN STATE OF U-4 BRIDGE GALLERY STRUCTURES OF THE COKE-CHEMICAL PRODUCTION OF THE BRANCH № 1 "ALCHEVSK IRON-AND-STEEL WORKS" OOO "YUGMK"	98
<i>Sorokanich S. V., Paramonova A. V.</i> CHARACTERISTICS OF TECHNOGENIC WASTE (ALUMINUM SLAG AND SPENT BURNT SAND) FOR THE PRODUCTION OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON PORTLAND CEMENT	107
<i>Zbitskaia V. V., Psiuk V. V.</i> JUSTIFICATION OF USING THE DRILLING INJECTION TECHNOLOGY IN STRENGTHENING THE SOILS OF BASES OF THE OPERATED CONSTRUCTION FACILITIES	113

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Litvinsky G. G.</i> DIRECT-FLOW CENTRIFUGAL HYDRODYNAMIC FILTERS WITH EJECTION SLUDGE RECIRCULATION	121
--	-----

<i>Vishnevskiy D. A., Korneev S. V., Mulov D. V.</i> SUBSTANTIATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF VIBROPROTECTION OF PNEUMATIC JACKHAMMERS WITH A SEPARATE BARREL	136
<i>Sotnikov A. L., Orlov A. A.</i> VISUALIZATION OF DEFECTS IN WELDED JOINTS	147
<i>Vishnevskiy D. A., Kozachischen V. A., Bondar N. A.</i> ASSESSING THE INFLUENCE OF HUMAN FACTOR ON FUNCTIONING OF THE PNEUMATIC MANIPULATOR SYSTEM AND THE MECHANISM OF LIFTING AND ROTATING THE ARCH AND ELECTRODES OF THE FURNACE-LADLE UNIT IN AN EMERGENCY SITUATION	158
<i>Tkachev M. Yu.</i> DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL AND AN AUTOMATIC CONTROL MANIPULATOR SYSTEM TO REPLACE THE SUBMERGED NOZZLE OF A SLAB CCM	168

Distribution and replication is forbidden without official allowance of SEI HE "DonSTI"

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

**Collection of scientific papers
of Donbass State Technical Institute**

Collection
Issue 28 (71) 2022

Establisher:
SEI HE "DonSTI" (LPR)

*Certificate of the Ministry of Communications
and Mass Media of the LPR
for mass media registration III 000169
dated 08.12.2020*

*By order of the Department of Education and Science
of the Donetsk People's Republic of 2 May 2017
№ 464 the Collection of scientific papers is being
offered in the list of peer-reviewed scientific editions
with required publications of the main scientific PhD
and Doctor's thesis results, approved by an order of
the Department of Education and Science of
the Donetsk People's Republic of 1 November 2016
№ 1134, according to annex 1*

*By order of the Department of Education and Science
of the Lugansk People's Republic № 911-ОД
of 10.10.2018 the Collection of scientific papers of
DonSTI is being offered in the list of peer-reviewed
scientific editions with required publications of the
main scientific PhD and Doctor's thesis results,
approved by an order of the Department of Education
and Science of the Lugansk People's Republic
of 15 May 2018 № 477-ОД*

*Recommended by academic council
of SEI HE "DonSTI"
(Record № 3 dated 28.10.2022)*

Added to scientometrical database of RSCI

Format 60×84½
Conventional printed sheet 23,63
Order № 251

Circulation 100 copies
Publishing office is not responsible for material
content giving by author for publishing

Address of editorial office, publishing and establishing:
SEI HE "DonSTI"
Lenin avenue, 16, Alchevsk, LPR
94204
e-mail: info@dstu.education
web-site: <http://www.dstu.education>

PUBLISHING AND PRINTING CENTER
room 2113, tel/fax 2-58-59
Certificate of State registration for mass media
publisher, owner and distributor
МИ-СГР ИД 0000055 dated 05.02.2016

Editor-in-chief

Vishnevskiy D. A. — Doctor of Tech. Sc., Asst. 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.
Borshchevskiy S. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Korneyev S. V. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Leonov A. A. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Kharlamov Yu. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Artiukh V. G. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Zinchenko A. M. — PhD in Economics, Asst. Prof.
Snitko S. A. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Kuberskiy S. V. — PhD in Engineering, Prof.
Dolzhikov V. V. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Denischenko P. N. — PhD in Engineering, Asst. Prof.
Sholukh N. V. — Doctor of Arch., Prof.
Andriychuk N. D. — Doctor of Tech. Sc., Prof.
Pilavov M. V. — 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

Computer layout
Ismailova L. M.

© SEI HE "DonSTI", 2022
© Chernyshova N. V., graphic cover
design, 2022