

ДОНБАССКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ИНСТИТУТ

*Выпуск 26 (69) 2022*



СБОРНИК  
НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**Сборник  
научных трудов  
Донбасского государственного технического  
института**

Сборник  
Выходит 4 раза в год  
Основан в июне 1999 г.  
Выпуск 26 (69) 2022

**Collection of Scientific Papers of DonSTI**

Collection  
Publishing 4 times a year  
Founded in June 1999  
Issue 26 (69) 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 26 (69) 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 № 7 от 25.03.2022)*

*Включён в наукометрическую базу данных РИНЦ*

Формат 60×84½  
Усл. печат. л. 15,75  
Заказ № 65  
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

Вишневский 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

**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)*

## АНСАМБЛИ И СТРУКТУРЫ МИКРОДЕФЕКТОВ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ (ГОРНОЙ ПОРОДЕ)

*В работе рассмотрена актуальная для развития механики твердого тела проблема учета его поврежденности и сплошности при нагружении. В противовес устоявшимся упрощенным толкованиям скалярных мер поврежденности предложена концепция ее описания с помощью несимметричной матрицы второго ранга, элементами которой являются микроразрывы и микросдвиги. Показано, что они возникают в материале в виде структурного ансамбля Z-дефекта, по разному ориентированному в пространстве главных площадок НДС. Впервые доказано существование первичных (фоновых) микродефектов. Исследованы типы, ансамбли и структуры микродефектов в зависимости от НДС, показаны принципиальные различия их структур при растяжении и сжатии материала.*

**Ключевые слова:** поврежденность, сплошность, микродефекты, микросдвиг, микроразрыв, Z-ансамбль, матрица микродефектов, фоновые уровни микродефектов, структуры микродефектов.

### **1 Актуальность и цель исследований**

На протяжении последних 2–3-х десятилетий происходит интенсивное углубленное изучение термомеханических процессов развития поврежденности в твердом теле, связанных с изменением в нем всего комплекса механических свойств, определяющих его упругие, вязкие, пластичные и другие реологические показатели. В частности, одно из важнейших свойств твердого тела — прочность — повсеместно стали рассматривать не как набор статических величин, разделяющих его вначале стабильное, а затем разрушенное состояния, а как сложные термофлуктуационные процессы зарождения и развития микродефектов (поврежденности), которые при определенном сочетании условий переходят в прогрессирующее разрушение.

На основе экспериментальных данных, накопленных при испытаниях металлов, искусственных материалов и горных пород, были предложены многочисленные континуальные механико-математические модели влияния микродефектов (поврежденности) на прочностные и деформационные свойства материалов [1–12 и др.].

Физическим обоснованием введения понятия «поврежденность» послужили экспериментально установленные закономерности постепенной деградации во времени механических свойств материала вследствие образования и развития в нем систем плоских и объемных дефектных структур на микро-, мезо- и макроуровнях [1, 7, 8, 10, 12]. Как было убедительно доказано в фундаментальных работах отечественной школы физики твердого тела [13], основной причиной возникновения микродефектов являются термофлуктуационные процессы перераспределения энергии в нагруженном материале.

Большинство исследований, развивающих концепцию континуальной теории поврежденности, восходят к работам Качанова — Работнова [3, 4, 6, 12] и основаны на использовании скалярных мер поврежденности. И по этому направлению имеются обстоятельные аналитические обзоры [2–6 и др.].

В качестве скалярной меры сплошности материала, показывающей степень сохранности относительной остаточной площади, Качановым [3] был принят нормированный параметр сплошности

$$\Psi = \sigma / \sigma_S, (0 \leq \Psi \leq 1), \quad (1)$$

где  $\sigma, \sigma_S$  — действующее напряжение и прочность материала соответственно.

В дополнение к параметру (1) Работным [4] введено понятие скалярной нормированной меры поврежденности  $\omega$ , равной

$$0 \leq \omega = 1 - \Psi \leq 1. \quad (2)$$

Таким образом, поврежденность  $\omega$  материала здесь понимается как алгебраическое дополнение его сплошности  $\Psi$ . Простота и удобство предложенных мер сплошности (1) и поврежденности (2) способствовали их широкому распространению. В дальнейшем появились работы, где меру поврежденности вводят как тензор второго или более высокого ранга [5].

Большинство исследований, посвященных этой проблеме, используют именно такие скалярные меры поврежденности или их усложненные математические трактовки безотносительно к особенностям напряженно-деформированного состояния материала, тем более без привязки их к различным типам микродефектов [1–11 и др.]. Не были рассмотрены структура и комплекс микродефектов как ансамблей, из которых складывается поврежденность, отсутствуют удачные попытки дать физическую трактовку различных вариантов структуры микродефектов, нет исследований фоновых (первичных) микродефектов.

Поскольку в процессе деформирования материала происходит зарождение, рост и усложнение структуры микродефектов, что кардинальным образом влияет на прочностные и деформационные свойства материала, важность задач изучения закономерностей структуры и развития микродефектов трудно переоценить.

**Цель** исследования — разработка математической модели пространственной структуры микродефектов твердого тела (горной породы), возникающих в результате термофлуктуационных процессов и внешних воздействий.

**Идея** работы заключается в использовании закономерностей возникновения и

взаимного пространственного распределения микродефектов сдвигового и разрывного типов как структурных элементов в объеме тела при его произвольном напряженно-деформированном состоянии (НДС).

**Объектом** исследований являются микродефекты сдвигов и разрывов, **предмет** исследований — закономерности геометрии их взаимного распределения.

К основным **задачам** исследования следует отнести:

1) выбор и обоснование базового набора микродефектов, предопределяющих внутреннюю структуру материала и, тем самым, весь комплекс его механических свойств;

2) анализ возможных ансамблей, пространственных сочетаний и структур разнонаправленных микродефектов;

3) привязку различных ансамблей микродефектов к особенностям напряженно-деформированного состояния материала.

## 2 Типы, ориентация и ансамбли микродефектов

Известно, что при нагружении материала (горной породы) неизбежно как ответная реакция возникают структурные дефекты разного масштаба, которые обобщенно называют поврежденностями.

Под поврежденностью материала понимают возникновение в его объеме в результате термофлуктуационных процессов любых микродефектов сдвигового или разрывного типов (рис. 1, 2), которые вносят существенное искажение в исходно однородное упругое распределение напряжений и деформаций.

В отличие от начальных понятий (1) и (2), лишь обобщенно описывающих поврежденность, мы вводим для микродефектов индексированные переменные  $W_{ij}$ , которые отражают их тип и ориентацию относительно ортонормированного базиса (орты  $i, j, k = 1, 2, 3$ ), связанного с напряженно-деформированным состоянием твердого тела.

Таким образом, главными элементами поврежденности материала  $W_{ij}$  являются

микродвиги  $W_{ij}$  ( $i \neq j$ ) и микроразрывы  $W_{ij}$  ( $i = j$ ). На рисунке 2 показана ориентация сдвиговых и разрывных микродефектов относительно главных площадок приложения внешних нагрузок, заданных ортами  $i, j, k$ .

Используя в качестве основных объектов исследований микродефекты в виде матрицы поврежденностей  $W_{ij}$ , можно дать им следующую физическую интерпретацию:

– **м-сдвиги** — микродефекты сдвиговой природы  $1 \geq W_{ij} > 0$ , ( $W_{ij} \neq W_{ji}$ ), (при  $i \neq j$ ) возникают на площадках с максимальными касательными напряжениями аналогичных индексов  $t_{ij}$ , причем напряжение на м-сдвигах не может превышать заранее заданного предела, который зависит от прочностных показателей материала;

– **м-разрывы** — микродефекты разрывной природы  $1 \geq W_{ii} > 0$ , которые расположены в основном на главных площадках с нормалью  $i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) и эквивалентны трещинам растяжения.

М-сдвиг  $W_{ij}$  представляет собой сдвиговую деформацию в виде нарушения сплошности тела в форме не всегда пра-

вильного «пятна» деформационной дисторсии со сдвинутыми по касательной и прижатыми (сомкнутыми) друг к другу берегами.

М-разрыв  $W_{ii}$  описывает принципиально иное нарушение: это микротрещина отрыва с образованием двух новых свободных поверхностей в виде двух раздвинутых берегов, ограниченных по контуру замкнутой плавной зоной смыкания.

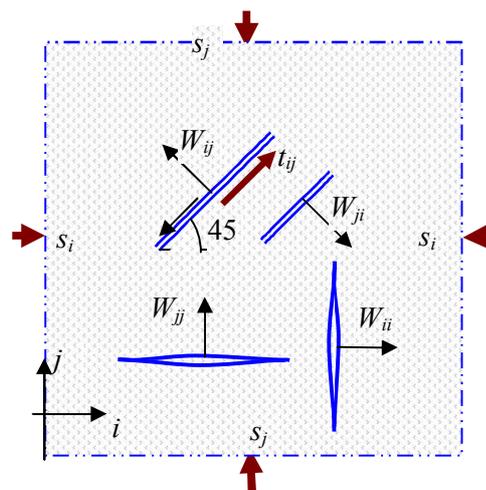


Рисунок 1 Микродефекты сдвигового  $W_{ij}$  и разрывного  $W_{ii}$  типов

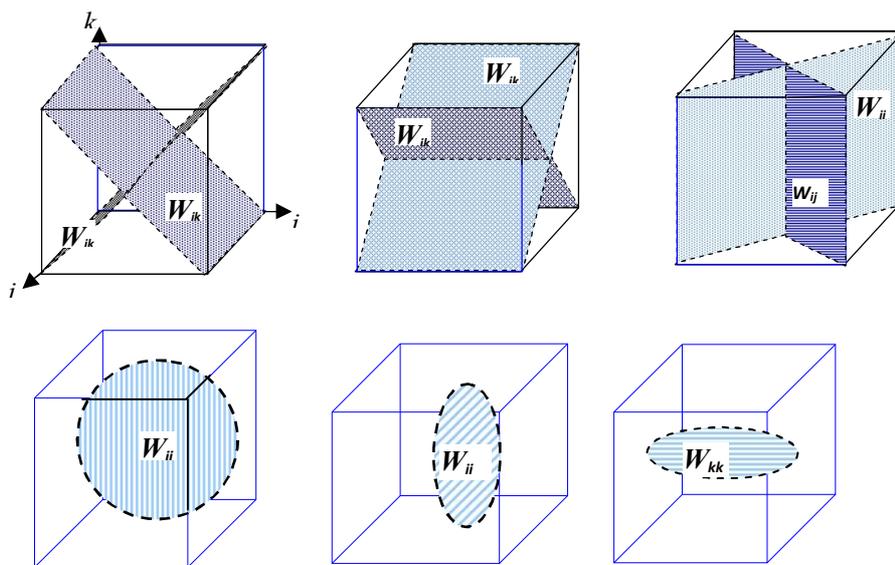


Рисунок 2 Основные направления возникновения сдвиговых  $W_{ij}$  и разрывных  $W_{ii}$  микродефектов в объеме нагруженного тела

Как было установлено термофлуктуационной концепцией прочности, оба м-дефекта, благодаря случайным термофлуктуациям энергии в объеме тела, могут самопроизвольно возникать и залечиваться в виде взаимно противоположных встречных процессов. Важно отметить, что в исследованиях, посвященных этой проблеме, процессы «залечивания» микродефектов остаются до настоящего времени вне поля зрения авторов.

Для математического описания всей совокупности микродефектов — м-сдвигов и м-разрывов — удобно использовать матрицу второго ранга  $\|W_{ij}\|$ , где индексы  $i, j = 1, 2, 3$  следует направить по ортогональным осям главных площадок нагруженного тела, а индексы  $ij$  в обозначении м-сдвигов (с круговой перестановкой) обозначают диагонали между главными площадками  $i, j$ . В нагруженном внешними усилиями твердом теле матрица микродефектов имеет вид

$$W_{ij} = \begin{vmatrix} W_{11} & W_{12} & W_{13} \\ W_{21} & W_{22} & W_{23} \\ W_{31} & W_{32} & W_{33} \end{vmatrix}. \quad (3)$$

Таким образом, вместо обобщенного понятия «поврежденность» вводится матрица микродефектов, где:

- м-сдвиги  $W_{ij} (i \neq j)$  действуют вдоль максимальных касательных напряжений;
- м-разрывы  $W_{ii} (i, j = 1 \dots 3)$  расположены на главной диагонали матрицы второго ранга  $\|W_{ij}\|$ .

Следует иметь в виду, что матрица микродефектов всегда несимметрична, т. е. в неравномерно нагруженном теле всегда соблюдаются неравенства

$$W_{ij} \neq W_{ji}, \quad W_{ii} \neq W_{jj}. \quad (4)$$

Возникновение такого рода поврежденностей при растяжении и сжатии элементарного объема образует характерные конфигурации (ансамбли) разрывных и сдвиговых дефектов.

При сжатии пластичных материалов вначале возникают м-сдвиги, а затем на их концах зарождаются и вырастают трещины нормального разрыва в виде м-разрывов. Последние в процессе своего развития быстро приближаются к направлению, параллельному сжимающим усилиям. Для хрупких материалов процесс образования ансамбля микродефектов обратный: м-разрывы оказываются первичными, а м-сдвиги — вторичными.

Отсюда можно заключить, что в нагруженном материале возникает особое структурное комплексное повреждение в виде естественно сформированной комбинации (ансамбля) м-сдвигов и м-разрывов, которое уместно назвать микродефектом Z-типа. Общее представление о пространственной ориентации при сжатии тела м-разрывов  $W_{ii}$  и м-сдвигов  $W_{ij}$  после их объединения в ансамбль типа  $Z_{ij}$  можно получить из рисунка 3.

Такие же ансамбли микродефектов будут наблюдаться и в перпендикулярном направлении в плоскости  $ik$ . Поэтому можно условно записать для ансамблей Z-дефектов при одноосном сжатии  $s_i > 0$ :

$$\begin{aligned} Z_{ij} &= W_{ij} + 2 \cdot W_{jj}; \\ Z_{ik} &= W_{ik} + 2 \cdot W_{kk}. \end{aligned} \quad (5)$$

На рисунке 3 показано два Z-дефекта в плоскости  $ij$ . Такие же ансамбли Z-дефектов будут наблюдаться и в плоскости  $ik$ .

Соотношение размеров м-сдвига и оперяющих его м-разрывов в Z-дефектах может изменяться в довольно широких пределах в зависимости от прочностных показателей тела (когезии сдвига и отрыва) и его НДС.

В случае одноосного сжатия тела  $s_i > 0$  длина центральных м-сдвигов  $W_{ij}$  и  $W_{ik}$  оказывается (по крайней мере, на начальных этапах нагружения материала) заметно больше длины оперяющих его м-разрывов  $W_{jj}$  и  $W_{kk}$  (рис. 3).

При этом в зависимости от знака приложенных напряжений масштабные соотношения между м-сдвигами и м-разрывами в комплексном Z-дефекте будут заметно от-

личаться. По сути, это будут подобные Z-дефекты с одинаковыми по строению составляющими, но разной длины.

При растяжении тела обычно центральный первичный м-сдвиг имеет малую длину и по мере нагружения опережается двумя м-разрывами большой длины (рис. 4).

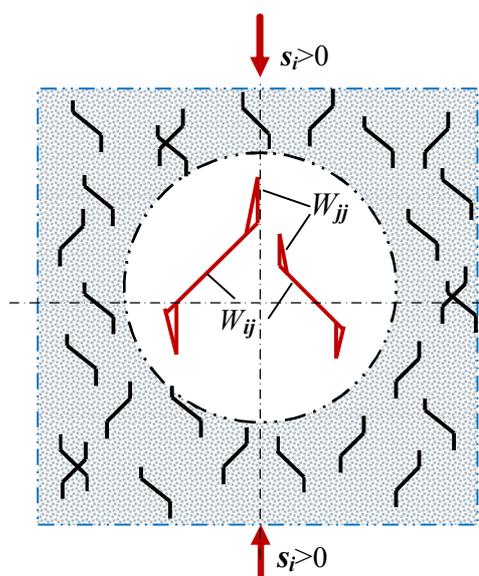


Рисунок 3 Характерные Z-ансамбли разрывных  $W_{ii}$  и сдвиговых  $W_{ij}$  микродефектов при одноосном сжатии ( $s_1 > 0$ )

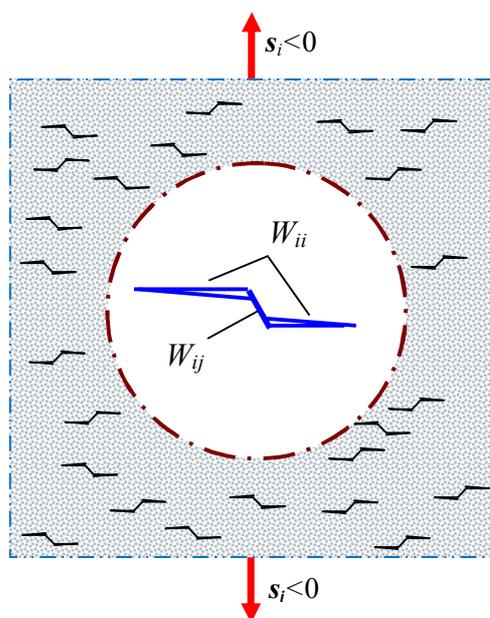


Рисунок 4 Характерный вид Z-ансамбля из разрывных  $W_{ii}$  и сдвиговых  $W_{ij}$  микродефектов при одноосном растяжении ( $s_1 < 0$ )

В ряде случаев (например, невысокие показатели когезии отрыва по сравнению с когезией сдвига) Z-дефект может при растяжении вырождаться в протяженную трещину, особенно на закритических стадиях разрушения материала.

Как и для одноосного сжатия, запишем формулу Z-дефектов в случае одноосного растяжения  $s_i < 0$ :

$$\begin{aligned} Z_{ij} &= W_{ij} + 2 \cdot W_{ii}; \\ Z_{ik} &= W_{ik} + 2 \cdot W_{ii}. \end{aligned} \quad (6)$$

Как нетрудно убедиться, формулы (5) и (6), несмотря на их сходство, существенно различаются, что еще раз доказывает принципиальное отличие механизмов разрушения при растяжении и сжатии. Нетрудно привести примеры НДС тела, при котором будут существовать условия возникновения обоих типов Z-дефектов (например, НДС в виде комбинации сжатия и растяжения по разным осям). Разумеется, процессы разрушения материала и методы его описания становятся заметно сложнее.

Полезно ввести наряду с понятием поврежденности (типа м-сдвига и м-разрыва) понятие сплошности материала. Сплошности характеризуют бездефектную часть рассматриваемой площади материала, где все или один из микродефектов отсутствуют.

Для каждого заданного направления  $i, j = 1, 2, 3$  как алгебраическое дополнение микродефектам (поврежденности) в качестве сплошностей примем

$$T_{ij} = 1 - W_{ij}; \quad (i, j = 1, 2, 3). \quad (7)$$

Таким образом, симметричная матрица сплошностей второго ранга подобна матрице микродефектов и содержит девять объектов, при этом  $T_{ij} \neq T_{ji}; (i, j = 1, 2, 3)$ , из которых шесть (при  $i \neq j$ ) — на диагональных плоскостях с максимальными касательными напряжениями, а остальные три (при  $i = j$ ) — сплошности на главных площадках, компланарно которым расположены разрывные дефекты.

Как следует из вышеприведенных соотношений, вся совокупность микродефектов  $W_{ij}$  и сплошностей  $T_{ij}$  представляет собой объект, не обладающий тензорной природой (как ранее предполагалось для поврежденности некоторыми исследователями [1, 5 и др.]). Поэтому будет некорректно оперировать этими объектами посредством мощного аппарата тензорного исчисления, что заметно осложняет их использование для практических целей, в том числе и посредством методов физической мезомеханики [1] для оценки физико-механических свойств материалов (упругости, деформируемости, вязкости, прочности и др.).

Поскольку эти совокупности  $W_{ik}$  и  $T_{ik}$  подчиняются закономерностям теории множеств, можно с их помощью определить, например, размеры оставшейся полной сплошности материала  $T_{c_k}$  на каждой главной площадке по формуле

$$T_{c_k} = T_{kk} \cdot T_{kl} \cdot T_{km}, \quad (k, l, m = 1, 2, 3). \quad (8)$$

Полные сплошности  $T_{c_k}$  имеют простую физическую интерпретацию: они показывают относительную площадь главной площадки, свободную от каких-либо повреждений (дефектов)  $W_{ij}$ . Поэтому логично ввести еще одно понятие — общую поврежденность  $W_{c_k}$  главной площадки как относительную площадь, на которой находится хотя бы один микродефект. Таких объектов будет также три по числу главных площадок:

$$W_{c_k} = 1 - T_{c_k}, \quad (k = 1, 2, 3). \quad (9)$$

### 3 Фоновые уровни микродефектов и их искажение при нагрузке

Даже без какого-либо внешнего нагружения в любом твердом теле (материале, горной породе) в соответствии с законами физики твердого тела происходят непрерывные термофлуктуационные процессы [13]. В связи с этими процессами по всему объему тела самопроизвольно возникают и исчезают начальные (фоновые) микродефекты

в виде случайно (стохастически равномерно) расположенных и беспорядочно ориентированных в пространстве элементарных м-сдвигов и м-разрывов. Они создают фоновый исходный уровень поврежденности в теле в виде постоянного «мерцания» (зарождения и залечивания) микродефектов. Таким образом, в любом материале некоторый исходный (фоновый) уровень микродефектов (поврежденности) существует изначально.

Создание в материале напряженно-деформированного состояния, например путем внешнего нагружения нормальными силами  $s_i$  и  $s_j$ , приводит к тому, что возникновение элементарных микродефектов в виде сдвигов и разрывов происходит в соответствии с полями напряжений и деформаций в теле (рис. 5 и 6).

Рассмотрим особенности распределения микросдвигов в материале, нагруженном нормальными напряжениями  $s_i \geq s_j \geq s_k$ .

Можно с достаточной уверенностью полагать, что вдоль направления действия касательных (сдвигающих) напряжений  $t_{ij}$  и деформаций  $\gamma_{ij}$  м-сдвиги  $W_{ij}$  будут больше, а в противоположном направлении  $W_{ji}$  — меньше. При этом эти изменения будут нарастать по мере приближения к направлению максимальных касательных напряжений, т. е. под углом  $45^\circ$  к главным площадкам с ортами  $i, j, k$ .

М-сдвиги, коллинеарные касательным напряжениям (например,  $W_{ij}$ ), будем называть главными, а противоположного направления ( $W_{ji}$ ) — встречными. По мере приближения направления главных  $W_{ij}$  и встречных  $W_{ji}$  м-сдвигов к поверхности максимальных касательных напряжений  $t_{ij}$  их амплитуда будет постепенно увеличиваться (уменьшаться) по закону (3):

$$\begin{vmatrix} W_{ij}(\alpha) \\ W_{ji}(\alpha) \end{vmatrix} = W_{0s} \pm \left[ 1 + \sin\left(4\alpha - \frac{\pi}{4}\right) \right] \begin{vmatrix} A_{ij} \\ A_{ji} \end{vmatrix}, \quad (10)$$

где  $i, j$  — орты главных площадок;  
 $\alpha$  — угол наклона направления м-сдвига к максимальному касательному напряжению  $t_{ij}$ ;

$W_{os}$  — фоновый уровень м-сдвигов в теле при отсутствии касательных напряжений  $t_{ij} = 0$ , в однородном теле распределение и плотность фоновых микродефектов одинаковы;

$A_{ij}, A_{ji}$  — полуамплитуды отклонения соответствующих сдвигов от фонового уровня  $W_{os}$ .

Зависимость (10) отражает приближенную закономерность распределения сдвигов, справедливую только на начальный период их роста, а затем она существенно усложняется.

На рисунке 5 диагональными стрелками показаны направления максимальных касательных напряжений  $t_{ij}$ , а радиус-вектор пропорционален вариации амплитуд главных  $W_{ij}$  и встречных  $W_{ji}$  м-сдвигов. Формула (10) отражает разницу изменений главных и встречных сдвигов в зависимости от угла отклонения от максимальных касательных напряжений.

Разрывные микродефекты (м-разрывы) в ненагруженном теле, также как и м-сдвиги, возникают стохастически равномерно по разным направлениям и по всему объему, формируя тем самым фоновый уровень  $W_{or}$ . После приложения внешних сил и создания в теле неравномерного напряженного состояния возникают условия для искажения исходного  $W_{or}$  изотропного поля распределения м-разрывов. М-разрывы, ориентированные перпендикулярно растягивающим деформациям, растут быстрее и становятся преобладающими, тогда как по нормали к направлению сжимающих деформаций их число сокращается. Эта закономерность отражена на рисунке 6, где радиус-вектор пропорционален плотности м-разрывов в разных направлениях.

В отличие от м-сдвигов, которые в основном ориентируются вдоль направления максимальных касательных напряжений, м-разрывы в нагруженном материале возникают и формируются на главных площадках и зависят от распределения деформаций. Плотность м-разрывов достига-

ет максимума в плоскости с минимальными (растягивающими) деформациями, и наоборот — они минимальны в плоскости, где действуют деформации сжатия.

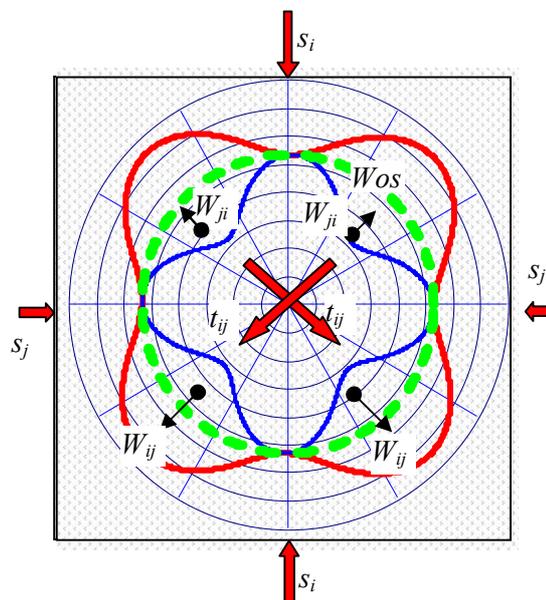


Рисунок 5 Ориентация и плотность распределения главных  $W_{ij}$  и встречных  $W_{ji}$  м-сдвигов относительно их фонового уровня  $W_{os}$  и главных напряжений  $s_i$  и  $s_j$

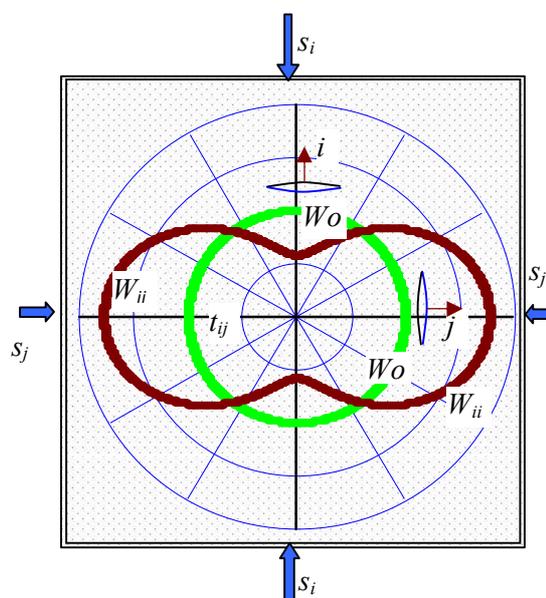


Рисунок 6 Ориентация и плотность распределения м-разрывов  $W_{ii}$  и  $W_{jj}$  относительно фонового уровня  $W_{or}$  и главных напряжений  $s_i > s_j$

Сравнивая кривые распределения плотностей м-сдвигов и м-разрывов (рис. 3 и 4), следует отметить их заметное отличие. М-сдвиги главного направления (вдоль касательных напряжений) по мере изменения угла наклона всегда выше фонового уровня м-дефектов  $W_0$ , а встречные м-сдвиги существенно ниже, но те и другие становятся равными фоновому уровню  $W_0$  на главных площадках и имеют экстремумы на диагональных направлениях, т. е. на площадках максимальных касательных напряжений.

Плотность м-разрывов в нагруженном теле отклоняется от фонового их уровня всюду, увеличиваясь до максимума в направлении минимальных нормальных напряжений и снижаясь до минимума в перпендикулярном напряжении.

Более того, априори можно полагать, что если создано НДС в твердом теле, при котором нормальные и касательные напряжения удовлетворяют неравенствам

$$s_i \geq s_j \geq s_k \geq 0, \quad t_{ik} \geq t_{ij} \geq t_{jk} \geq 0, \quad (11)$$

то, согласно рисункам 3 и 4, будут соблюдаться вытекающие из них более сильные утверждения для микродефектов в виде следующих неравенств:

– для главных и встречных м-сдвигов:

$$\begin{aligned} W_{ik} &\geq W_{ij} \geq W_{jk} \geq W_{0s} > 0, \\ W_{0s} &\geq W_{jk} \geq W_{ji} \geq W_{ki} > 0; \end{aligned} \quad (12)$$

– для м-разрывов:

$$W_{jj} \geq W_{kk} \geq W_{or} > W_{ii} > 0, \quad (13)$$

где  $W_{0s}$ ,  $W_{or}$  — фоновые уровни соответственно м-разрывов и м-сдвигов, они изотропны и однородны в ненагруженном материале.

Матрица фоновых микродефектов в ненагруженном материале, как следует из (3) и последующих формул, является полностью симметричной, т. е.

$$W_{ii} = W_{or}; \quad W_{ij} = W_{0s}. \quad (14)$$

#### 4 Структуры микродефектов

Следует, тем не менее, обратить внимание на полезную для будущих теоретических построений возможность вероятностной трактовки микродефектов  $W_{ij}$  и сплошностей  $T_{ij}$ . Так, поскольку м-разрывы  $W_{ii}$  и м-сдвиги  $W_{ik}$  удовлетворяют неравенствам

$$0 \leq W_{ii} \leq 1, \quad 0 \leq W_{ij} \leq 1$$

и обладают всеми свойствами, присущими вероятностям (аддитивности, объединения и др.), их можно с полным правом трактовать как вероятность повреждения тем или иным микродефектом части соответственно ориентированной площади. При этом микродефекты  $W_{ik}$  и  $T_{ik}$  представляют собой взаимно исключающие события.

Микродефекты как объекты, обладающие свойством случайного и равномерного распределения по объему изотропного материала, могут, в соответствии с теорией множеств, образовывать различные совокупности (структуры) при наложении друг на друга.

В самом общем случае в теле существуют различные по составу структурные области микродефектов (рис. 7).

Перечислим эти области:

– свободные от микродефектов, которые принято называть сплошностью, и являющиеся дополнением к тому или иному участку с заданным типом дефектов;

– однородные, где распространены микродефекты  $W_{ij}$  одной природы, а другие типы микродефектов отсутствуют;

– смешанные, где происходит перекрытие (пересечение множеств) двух и более типов микродефектов  $W_{ii} \cap W_{ij}$ ,  $W_{ij} \cap W_{ik}$ ,  $W_{ii} \cap W_{ij} \cap W_{ik}$  и т. д.

Для каждого из видов напряженно-деформированного состояния тела характерны свои конфигурации поврежденностей. На рисунке 8 показан один из простейших случаев однородного напряженного состояния материала — одноосное растяжение.

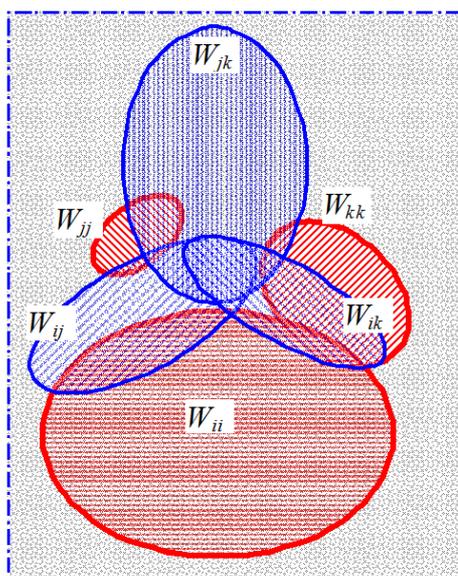


Рисунок 7 Условный вид структурных областей микродефектов при объемном НДС тела

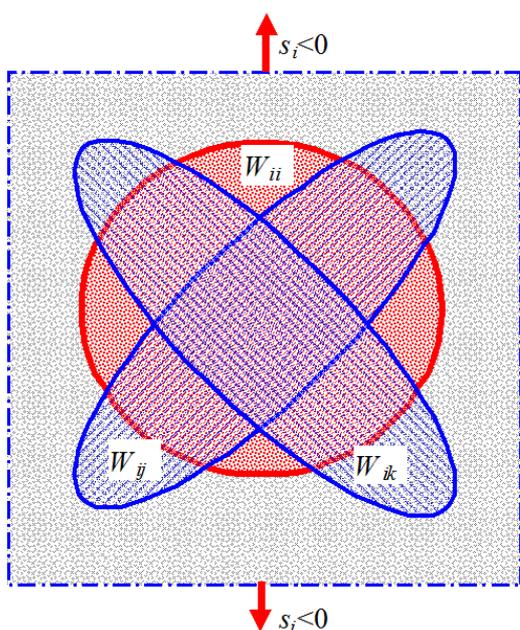


Рисунок 8 Взаимодействие разрывных  $W_{ii}$  и сдвиговых  $W_{ij}$ ,  $W_{ik}$  дефектов при растяжении тела по направлению  $i$

Условно показаны без соблюдения масштабов занимаемых площадей возникающие при растяжении дефекты. Таких совокупностей микродефектов будет всего три: дефекты разрыва  $W_{ii}$  на площадке с нормалью  $i$ , на которой действуют растягиваю-

щие напряжения  $s_i < 0$ , и микродефекты сдвига на примыкающих наклонных (под углом 45 градусов) площадках  $W_{ij}$  и  $W_{ik}$ . Всего при одноосном растяжении материала будут существовать три площадки с однотипными микродефектами, три области с наложением двух типов дефектов и одна область, где пересекутся все три возникающих при растяжении микродефекта (один тип разрыва и два типа сдвига).

Соотношения между микродефектами при одноосном растяжении можно записать следующими неравенствами:

$$W_{ij} = W_{ik} > W_{ij} \cap W_{ik} > W_{ij} \cap W_{ik} \cap W_{ii} > 0 = W_{jk}, \\ W_{ii} > 0 = W_{jj} = W_{kk}.$$

Взаимодействием  $m$ -разрывов друг с другом и с  $m$ -сдвигами можно пренебречь, поскольку влияние этих пересечений как структур микродефектов на НДС тела оказывается незначительным, особенно на начальных этапах нагружения материала.

Более сложным является случай нагружения материала одноосным сжатием, в чем можно убедиться по рисунку 9. Как следует из дальнейшего рассмотрения процессов возникновения и залечивания микродефектов, здесь будут области существования иных типов микродефектов: уже четыре области с одним из типов микродефектов  $W_{jj}$ ,  $W_{kk}$ ,  $W_{ij}$ ,  $W_{ik}$  и три области с пересечением двух типов микродефектов, у которых совпадает один из индексов, а именно:  $W_{jj} \cap W_{ij}$ ,  $W_{kk} \cap W_{ik}$  и  $W_{ik} \cap W_{jk}$ . Области пересечения трех типов микродефектов в этом случае не существует.

Запишем в виде неравенств соотношения между возникающими структурами микродефектов при одноосном сжатии:

$$W_{ij} = W_{ik} > W_{ij} \cap W_{ik} > W_{ij} \cap W_{ik} \cap W_{ii} > 0 = W_{jk}, \\ W_{ii} = 0 < W_{jj} = W_{kk}.$$

Как видно из приведенных соотношений, уже на начальном этапе введения базовых понятий реономной микромеханики обнаруживается существенная разница в протекании, казалось бы, подобных про-

цессов нагружения материала — одноосного сжатия и растяжения. В общепринятой практике трактовки процессов неупругого поведения материалов (с позиций классических теорий пластичности и ползучести) таких различий не должно быть. На самом деле эти различия принципиальны и неопровержимо доказывают отсутствие подобия даже между рассматриваемыми простейшими случаями нагружения твердого тела.

Опираясь на вышеприведенные примеры, можно описать с помощью подобных неравенств и другие случаи НДС тела для любых вариаций параметра Лодэ. Попутно обратим внимание на то, что невозможно создать такое НДС, при котором возникает лишь один тип микродефекта: м-разрыв или м-сдвиг, т. е. микродефекты проявляют свойство коллективного появления. Отсюда следует важный вывод из разработанной теории микродефектов: не существует «чистого» сдвига, растяжения или сжатия. Этот вывод заставляет пересмотреть на новой основе существующие методики определения механических свойств материалов и в первую очередь — показателей их прочности.

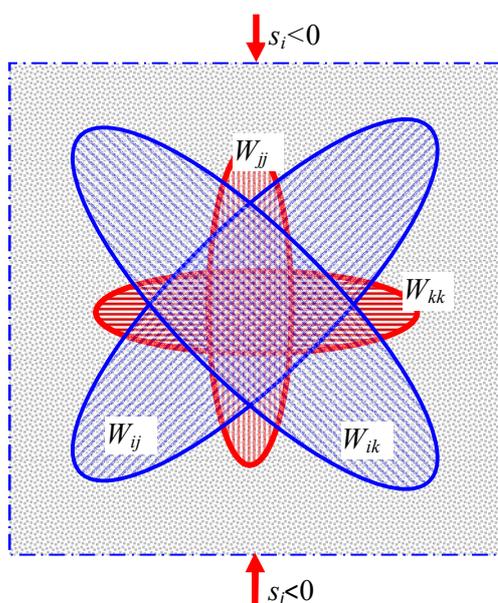


Рисунок 9 Взаимодействие м-сдвигов  $W_{ij}$ ,  $W_{ik}$  с м-разрывами  $W_{jj}$ ,  $W_{kk}$  при одноосном сжатии тела по направлению  $i$

Особенности структур микродефектов как основы представления внутреннего строения материала и их изменение во времени открывают возможность для более адекватного и достоверного описания механического состояния подверженного внешним термомеханическим воздействиям тела. Однако в силу особых свойств реономных процессов рождения, рекомбинации и залечивания микродефектов и их ансамблей во времени в дальнейшем придется с целью определения трансформации НДС тела и его свойств еще более усложнить описания механического состояния материала. Именно эти направления и будут темой дальнейших публикаций.

#### Выводы:

1. Проблема описания механических свойств и поведения твердого тела с повреждениями получила глубокое, но далеко не полное развитие. Попытки оперировать не вполне оформленными понятиями поврежденности и сплошности стали препятствовать развитию исследований в этом направлении.

2. Показано, что вместо отвлеченного параметра «поврежденность» введены Z-ансамбли микродефектов в виде сочетания микросдвигов и микроразрывов, для описания которых предложена несимметричная матрица второго ранга.

3. Исследованы типы, ориентация и ансамбли микродефектов в зависимости от НДС, показаны принципиальные различия их структур при растяжении и сжатии материала.

4. Впервые введены фоновые (первичные) уровни плотности м-сдвигов и м-разрывов, дан анализ их анизотропных изменений при нагружении тела растяжением или сжатием. Доказана невозможность существования одиночных микродефектов.

5. Изучены основные закономерности взаимодействия микродефектов и основные структурные области их возможного пересечения на основании присущих для микродефектов вероятностных свойств.

6. Полученные результаты могут служить базой для разработки новой теории напряженно-деформированного состояния микродефектного тела и описания процессов его разрушения при произвольной нагрузке.

### Библиографический список

1. Panin, V. E. Overview on mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids [Text] / V. E. Panin // *Theor. Appl. Fracture Mech.* — 1998. — Vol. 30. — No. 1. — P. 1–11.
2. Сосновский, Л. Концепции поврежденности материалов [Текст] / Л. Сосновский, С. Щербаков // *Обзор: Вестник ТНТУ.* — 2011. — Спецвыпуск. — Ч. 1. — С. 14–23.
3. Качанов, Л. М. Основы механики разрушения [Текст] / Л. М. Качанов. — М.: Наука, 1974. — 312 с.
4. Работнов, Ю. Н. Введение в механику разрушения [Текст] / Ю. Н. Работнов. — М.: Наука, 1987. — 388 с.
5. Ильюшин, А. А. Об одной теории длительной прочности [Текст] / А. А. Ильюшин // *Инж. журн. МТТ.* — 1967. — № 3. — С. 21–35.
6. Работнов, Ю. Н. О разрушении твердых тел [Текст] / Ю. Н. Работнов // *Проблемы механики твердого деформируемого тела.* — Л., 1970. — С. 353–357.
7. Коллинз, Дж. Повреждение материалов в конструкциях. Анализ. Предсказание. Предотвращение [Текст]: пер. с англ. / Дж. Коллинз; под ред. Э. И. Григолюка. — М., 1984. — 624 с.
8. Биргер, И. А. Детерминирование и статистические модели суммирования повреждений [Текст] / И. А. Биргер // *Проблемы прочности.* — 1978. — № 11. — С. 3–11.
9. Протосеня, А. Г. Механика деформирования и разрушения горных пород [Текст] / А. Г. Протосеня, А. Н. Ставрогин. — М.: Недра, 1992. — 224 с.
10. Ставрогин, А. Н. Прочность и деформация горных пород в допредельной и запредельной областях [Текст] / А. Н. Ставрогин, Б. Г. Тарасов, О. А. Ширкес, Е. Д. Певзнер // *ФТПРПИ.* — 1981. — № 6. — С. 2–11.
11. Boudifa, M. A micromechanical model for inelastic ductile damage prediction in polycrystalline metals for metal forming [Text] / M. Boudifa, K. Saanouni, J.-L. Snavosne // *Int. J. Mech. Sci.* — 2009. — Vol. 51. — P. 453–464.
12. Литвинский, Г. Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов [Текст] / Г. Г. Литвинский. — Донецк: Норд-Пресс, 2008. — 207 с.
13. Регель, В. Р. Кинетическая природа прочности твердых тел [Текст] / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. — М.: Наука, 1974. — 560 с.

© Литвинский Г. Г.

Рекомендована к печати зам. директора института  
РАНИМИ АН ДНР д.т.н., проф. Дрибаном В. А.,  
к.т.н., доц. каф. СГ ДонГТИ Шульгиным П. Н.

Статья поступила в редакцию 25.02.2022.

**Doctor of Technical Sciences, Professor Litvinsky G. G. (DonSTI, Alchevsk, LPR)**

### ENSEMBLES AND STRUCTURES OF MICRODEFECTS IN A SOLID (ROCK)

The paper considers the problem of accounting its damage and continuity, which is relevant for the development of solid mechanics. In contrast to the fixed simplified interpretations of scalar measures of damage, the concept of its description has been proposed using an asymmetric second-rank matrix, whose elements are micro-fractures and micro-shifts. It is shown that they arise in the material in the form of a structural ensemble of a Z-defect, differently oriented in the space of main sites of the stress-strain state. The existence of primary (background) microdefects is proved for the first time. The types, ensembles and structures of microdefects depending on the stress-strain state are investigated; the fundamental differences of their structures during stretching and compression of the material are shown.

**Key words:** damage, continuity, microdefects, micro-shift, micro-fracture, Z-ensemble, matrix of microdefects, background levels of microdefects, structures of microdefects.

УДК 69.059.32

*д.т.н. Полозов Ю. А.,  
к.т.н., д.э.н. Бизянов Е. Е.  
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, uarolozov@mail.ru),  
Лазебник А. Ю.  
(АФГТ ЛНУ им. В. Даля, г. Антрацит, ЛНР)*

## **ЗАКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ МЕТОДОМ НАПОРНОЙ ИНЪЕКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ НАПРАВЛЕННОГО ГИДРОРАЗРЫВА**

*В статье приведены результаты аналитических исследований механизма образования искусственных трещин при гидравлическом разрыве грунтов с целью создания в них армокаркаса для повышения несущей способности. Научно обоснована необходимость регулирования и управления процессом образования искусственных трещин в закрепляемых грунтах. Рассмотрены технологические способы процесса образования трещин и обоснована технология беспакерного крепления скважины при нагнетании тампонажного раствора для выполнения гидроразрыва путем использования «тампонажного пакера» в виде стабилизированного тампонажного раствора в зазоре между стенками скважины и колонной буровых труб. Установлены зависимости размеров трещин гидроразрыва от параметров инъекционной скважины, типов грунтов и давления гидроразрыва.*

***Ключевые слова:** грунты, инъектирование, гидроразрыв, «тампонажный пакер», цементные растворы.*

Для повышения несущей способности грунтов в основаниях фундаментов строящихся зданий и сооружений признанным является напорный метод инъекции раствора [1, 2]. Напорный метод инъекции изменяет структуру грунтов и свойства вмещающего массива, воздействуя на него путем пропитки его раствором, уплотнительного нагнетания или разрывной технологией. Различие схем воздействия инъекционного раствора на грунты является условным, поэтому данные схемы обычно взаимосвязаны. На практике данные схемы реализуются принудительно посредством применения различных технологических приемов нагнетания тампонажных растворов.

Грунт в основаниях фундаментов зданий и инженерных сооружений, как объект инъекционного закрепления, вызывает необходимость более глубокого изучения факторов, обуславливающих механизм распространения в нем тампонажного раствора. Так, в случае закрепления дисперсных слабопроницаемых грунтов инъекционный раствор не получает какого-либо

значительного радиального распространения от скважины из-за быстрой кольматации пор. При последующем повышении давления в грунте образуются разрывные нарушения. Дальнейшее распространение раствора идет по трещинам гидроразрыва, армируя грунт [3–5]. Трещина создается путем закачки фильтрующих или нефилтрующих жидкостей в укрепляемую зону со скоростью, превышающей ее поглощающую способность. Давление жидкости возрастает, пока не будут превзойдены внутренние напряжения в грунте с образованием плоскостей минимальной прочности. При использовании нефилтрующей жидкости механизм разрыва пласта становится сходным с разрывом толстостенных сосудов. Образующиеся при этом трещины имеют, как правило, вертикальное или наклонное направление. При разрыве фильтрующей жидкостью давление разрыва обычно бывает значительно меньше, чем при разрыве нефилтрующимися жидкостями. Вертикальные трещины могут образоваться также при

нагнетании фильтрующихся жидкостей разрыва с быстрым повышением интенсивности подачи жидкости и давления [6].

Распространение инъекционного раствора при давлениях выше давления гидроразрыва обрабатываемых грунтов происходит значительно эффективнее при условии направленной ориентации трещин гидроразрыва.

При проектировании трещин гидроразрыва в грунте и заполнении их укрепляющим раствором необходимо планировать специальные мероприятия, направленные на удержание раскрытия устья трещины.

Поэтому исследование процессов формирования системы искусственных трещин в укрепляемых грунтах для повышения их несущей способности имеет большое научное и практическое значение.

Укрепление грунтов в основаниях фундаментов зданий и сооружений выполняется с применением горизонтальных, вертикальных или наклонных скважин. Необходимость в использовании различных технологических схем высоконапорной инъекции связана с многообразием горно-геологических и горнотехнических условий.

Исследованиям по гидравлическому разрыву грунтов при высоконапорной инъекции посвящены работы ученых Максимова А. П., Сергеева В. И., Адамовича А. А., Камбефора А., Головки С. И., Кугушевой И. В., Ермолаева В. А., Ибрагимова Ю. Г., Ржаницына А. Р., Маага Е., Каранфилова Т. С., Богомолова Ю. А., Ибрагимова М. Н. и др.

Вышеуказанными авторами обоснованы теоретические основы напорной инъекции для различных условий, разработаны методики расчета ее технологических параметров и проведено значительное количество опытно-промышленных испытаний и внедрений. Следует отметить, что авторами работ [7–9] сделан акцент на то, что направленный гидравлический разрыв грунта является основным способом повышения эффективности инъекционных укрепительных работ.

Для эффективного выполнения направленного гидравлического разрыва необходимо использование технических средств в инъекционных скважинах, позволяющих гарантированно формировать область закрепленного грунта с заданными параметрами.

**Объектом исследования** является напорное закрепление грунта с использованием гидравлического разрыва.

**Предмет исследования** — герметизирующие устройства в инъекционных скважинах и закрепляемый массив.

Существует много способов выполнения направленного разрыва грунтов в массиве. Применяемые на практике технологические схемы для напорной инъекции с различными запорными устройствами в скважине приведены на рисунке 1.

Наиболее технологичными способами направленного гидроразрыва являются технологии с использованием обсадной колонны со скользящим слоем и гидроразрывная инъекция.

Способ направленного разрыва грунтов с использованием обсадной колонны со скользящим слоем производится в следующем порядке. Осуществляется бурение скважины, в которую опускается иньектор — обсадная труба с щелевой перфорацией на нижнем конце. На наружный контур трубы наносится тонкий слой солидола. Зазор между трубой и стенками скважины заполняется глиноцементным раствором. После выдержки для стабилизации раствора в зазоре производят нагнетание для осуществления гидроразрыва грунта.

Гидроразрывную инъекцию применяют в слабопроницаемом грунте, нагнетая вязкий раствор или раствор грубодисперсного состава. При этом режиме, независимо от скорости инъекции раствора, давление первоначально резко повышается. В грунте образуются разрывы, которые увеличиваются. Толщина трещин разрывов, заполненных твердеющим раствором, зависит от состава раствора, а плотность затвердевшего раствора — от водоотдачи раствора и от давления нагнетания.

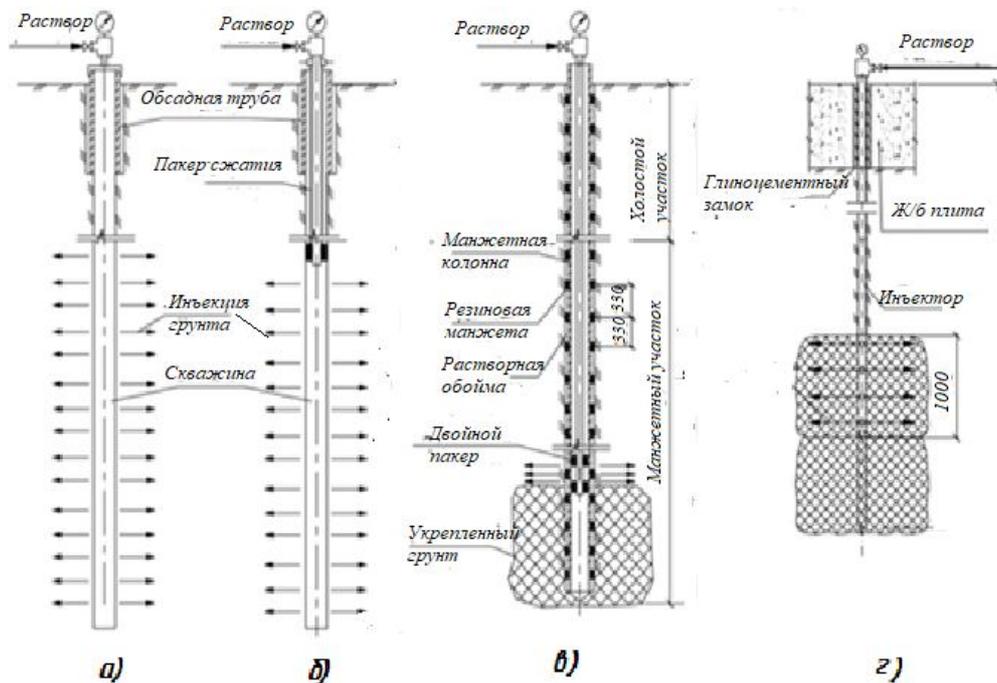


Рисунок 1 Технологические схемы для напорной инъекции с различными запорными устройствами: а) инъекция через кондуктор; б) инъекция через пакер; в) инъекция через манжетную колонну; г) инъекция через перфорированный иньектор

При последующих попытках инъекции в обрабатываемую заходку закачиваемый раствор, как правило, распространяется по ранее образованной полости разрыва. Трещины разрыва формируются из нескольких слоев, в зависимости от вида и состава закачиваемых последовательно видов раствора.

Процесс нагнетания при напорной инъекции можно условно разделить на следующие этапы:

– Начальный этап. На этом этапе изменение давления связано с пульсирующим развитием процессов пропитки грунта раствором и удлинением каналов разрыва.

– Этап начала формирования объемного армоцементного каркаса. Формирование армокаркаса происходит при резком спаде давления, что связано с прорывом инъекционного раствора вдоль обоймы обрабатываемой скважины или с выходом в массив.

– Этап формирования зоны укрепленного грунта. Давление нагнетания резко возрастает, расход раствора сокращается до нуля. Сопротивление дальнейшему

движению инъекционного раствора в грунте достаточно велико, увеличение протяженности и числа разрывных каналов не происходит.

Определяющую роль на технологический процесс напорной инъекции влияют как применяемое тампонажное оборудование, так и соответствующие герметизирующие устройства в скважине для обеспечения инъекции в заданный интервал.

В зависимости от принципа действия и конструктивных схем разделяют следующие типы герметизирующих устройств и пакеров [10]:

- пакеры сжатия;
- самоуплотняющиеся пакеры;
- пневматические и гидравлические пакеры;
- намывные пакеры;
- твердеющие пакеры.

Применение вышеуказанных герметизирующих устройств является строго индивидуальным для определенных горно-геологических условий, а сам процесс трудоемким и требующим значительных за-

трат времени на монтажно-демонтажные операции.

Наиболее эффективной и технологичной является технология инъектирования тампонажных растворов с использованием гладкоствольной бурильной колонны и «тампонажного пакера», заключающаяся в следующем (рис. 2):

– механические и гидравлические герметизирующие устройства заменяются «тампонажным пакером»;

– «тампонажный пакер» формируется за счет подъема тампонажного раствора в зазоре «стенка скважины — гладкоствольная бурильная колонна» на расчетную высоту,

определяемую давлением нагнетания и реологическими характеристиками раствора;

– в момент, когда давление нагнетания достигает критической величины, для преодоления гидравлических сопротивлений при движении раствора в зазоре между стенками скважины и бурильными трубами тампонажный раствор стабилизируется, образует в кольцевом зазоре пробку, работающую как пакерующее устройство;

– после набора раствором начальной прочности происходит герметизация затрубного пространства, чем обеспечивается при нагнетании в дальнейшем проникновение раствора в заданный интервал.

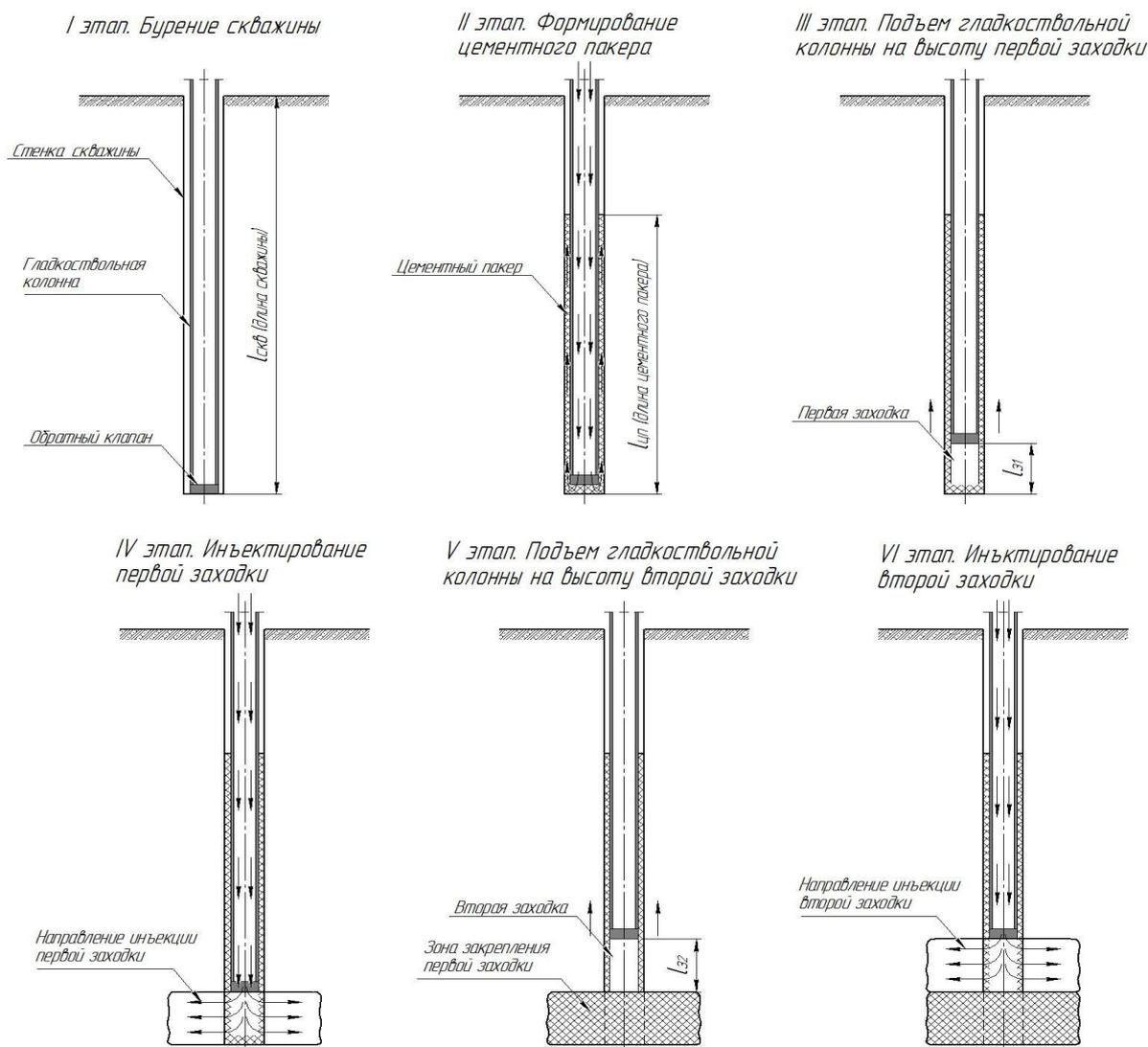


Рисунок 2 Технология напорной инъекции с запорным устройством в виде «тампонажного пакера»

С целью установления закономерностей формирования трещин гидроразрыва в грунтовом массиве проведен анализ результатов выполненных укрепительных работ для различных типов грунтов, тампонажных растворов и применяемых герметизирующих устройств.

Данные фактических режимов и параметров гидроразрыва с целью формирования армокаркаса в укрепляемом массиве с применением рассмотренных выше герметизирующих средств, согласно литературным источникам [1, 2, 4, 5, 8], приведены в таблице 1.

Анализ данных, приведенных в таблице 1, и результатов обработки керновых проб контрольного бурения, а также отобранных образцов грунтов при шурфовке на объектах закрепления грунтов показал, что в начальной стадии инъецирования песков разрывы имеют вертикальное распространение. Вертикальность сохраняется и в том случае, когда плоскость разрыва пересекает толщу с различными типами грунтов. В ходе напорной инъециции, в результате образования разрывных нарушений и переуплотнения грунта, происходит перераспределение напряжений. В этом случае плоскость разрыва, развиваясь по линии наименьшего сопротивления, может принять горизонтальное направление. Развитие горизонтальных полостей в слоистой толще идет в основном по границе раздела слоев различного гранулометрического состава.

Вертикальные разрывы могут распространяться до поверхности грунта с выходами или без выходов раствора на земную поверхность. Эти разрывы не опасны, направление вертикальных разрывов хаотично. Горизонтальные разрывы обнаружить сложнее. Они могут быть опасными для сооружения вследствие того, что, работая как домкрат, способны приподнять поверхность. Считается, что поднятие поверхности грунта связано с образованием горизонтальных разрывов.

При последующих инъецициях в укрепляемую зону нагнетаемый раствор имеет

тенденцию распространяться по уже существующим разрывам. Чаще всего он наплачивается на ранее введенный и уже стабилизировавшийся тампонажный раствор.

Как вертикальные, так и горизонтальные разрывы сжимают грунт, переводя его в напряженное состояние, что благоприятно сказывается на его свойствах. Снижается проницаемость обжатога грунта. Пористость изменяется, по данным лабораторных испытаний [11], от 0,4 до 0,35, а коэффициент фильтрации уменьшается. Также увеличивается угол внутреннего трения. Так, при пористости 0,30 угол внутреннего трения равен  $35^\circ$ , а при пористости 0,25 он увеличивается до  $42^\circ$  [1].

По мнению проф. Камбефора А. [2], представляется проблемным классифицировать разрывы как благоприятные (вертикальные) и неблагоприятные (горизонтальные).

При анализе эффективности инъециционных работ вскрытием котлованов отмечается, что такая классификация не всегда подтверждается: в некоторых случаях разрывы просто ближе к вертикали, в других — к горизонтали. Это происходит в связи с неоднородностью грунта.

При образовании разрывных нарушений происходит армирование грунта. Размеры сечения разрывов зависят от состава и реологических характеристик раствора, а плотность затвердевшего раствора — от его водоотдачи и давления инъециции. С уменьшением пористости грунта возрастает величина разрывных нарушений, а также увеличивается плотность раствора в сечении разрыва.

Давление, при котором происходит гидравлический разрыв грунта, зависит от свойств грунта и глубины залегания и не зависит от вязкости раствора, диаметра скважины и радиуса инъециции.

Исследования керновых проб укрепленного грунта показывают, что при нагнетании растворов одинакового состава величина каналов разрыва и конечная плотность растворов имеют определенные закономерности.

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Анализ фактических данных укрепительных работ при напорной инъекции с гидравлическим разрывом массива подтверждает эффективность данной технологии. Перечень объектов по стабилизации грунтов с описанием укрепительных работ приведен в таблице 2.

Накопленный научный и практический опыт при выполнении силами НПО «Спецтампоажгеология» работ по закреплению неустойчивых грунтов под целым рядом объектов [8, 11–13], приведенных в таблице 2, позволил установить, что существует и имеется определенная закономерность образования систем трещин в грунте вокруг инъекционной сква-

жины. Установлено, что величины искусственных трещин гидроразрыва в грунте в основном зависят от давления гидроразрыва.

Данные изменения параметров гидравлического разрыва — протяженности и раскрытия искусственных трещин, а также плотности затвердевшего материала при одинаковых условиях для песчаных грунтов и состава инъекционного раствора приведены в таблице 3 [9]. Зависимости плоскостей разрывных нарушений для различных типов грунтов и глубин их залегания в интервалах закрепления, по данным НПО «Спецтампоажгеология» [5, 8, 12, 13], приведены на графике (рис. 3).

Таблица 1

Технологические параметры гидроразрыва  
при формировании армоцементного каркаса в массиве

№ п.п.	Тип грунтов	Глубина скважин, м	Давление гидроразрыва, МПа	Длина полости разрыва, м	Толщина полости разрыва, м	Тип раствора	Тип инжектора
1	Песок, плотность 2640 кг/м <sup>3</sup>	1,3–1,5	1,25	0,61	0,03–0,04	Глиноцементный, ρ = 1380 кг/м <sup>3</sup>	Обсадная колонна со скользящим слоем
			1,0	0,49			
			0,82	0,42			
2	Лессовый грунт, плотность 1520 кг/м <sup>3</sup>	2–3	1,5	0,75–1,1	0,03–0,04	Силикат натрия, ρ = 1130 кг/м <sup>3</sup> +CO <sub>2</sub>	Забивной инжектор с перфорированным наконечником
		3–3,3	3,0	0,85			
3	Суглинок тяжелый твердый	13,0	1,5–2,5	0,2–0,55	0,02	Цементный, ρ = 1500 кг/м <sup>3</sup>	Перфорированная манжетная колонна (ПМК)
4	Суглинок твердый	10,0	1,0–2,0	0,45–0,55	0,02–0,03	Цементный, ρ = 1520 кг/м <sup>3</sup>	Тампоажный пакер
5	Пески, суглинки	11,0	1,2–1,8	0,5–0,6	0,01–0,02	Цементный, ρ = 1520 кг/м <sup>3</sup>	ПМК
6	Супесь лессовая	12–14	1,1–1,2	0,55–0,75	0,01	Цементный, ρ = 1520 кг/м <sup>3</sup>	ПМК
7	Супеси	29–37	2,0–6,0	0,9–1,1	0,01–0,015	Цементный, ρ = 1520 кг/м <sup>3</sup>	ПМК
8	Суглинок лессовый	17–24	0,25–1,3	0,9–1,1	0,012–0,017	Цементный, 1520 кг/м <sup>3</sup>	ПМК
9	Лессовые суглинки	3,0–7,0	0,6–1,4	0,55–0,6	0,01	Цементный, 1520 кг/м <sup>3</sup>	ПМК
10	Глина желтовато-коричневая	2,0–3,0	0,8	0,4	0,1	Цементный, 1520 кг/м <sup>3</sup>	ПМК

Таблица 2

Объекты закрепления грунтов с использованием напорной инъекции  
(выполнено НПО «Спецтампажгеология»)

Наименование объекта	Параметры напорной инъекции			
	Тип грунта	Интервал закрепления, м	Объем закачанного раствора, м <sup>3</sup>	Количество скважин, скв
Укрепительная цементация грунтового массива в районе наклонного ствола № 7 Днепропетровского метрополитена	Суглинок лессовидный	8–25	750	25
Стабилизация грунтов под вспомогательным и инженерным зданиями Днепропетровского метрополитена	Пески, суглинки	6–30	550	47
Упрочнение и стабилизация грунтов под ленточными фундаментами жилого здания по ул. Петровского г. Днепропетровска	Суглинки и пески	2,0–30,0	380	19
Стабилизация грунтов под 5-этажным зданием № 109 на пр. К. Маркса г. Днепропетровска	Супесь лессовидная	8,0–45,0	240	16
Укрепление лессовых грунтов под терапевтическим зданием больницы им. Мечникова г. Днепропетровска	Супесь лессовая, суглинок лессовый	2,0–11,0	1880	70
Укрепление и стабилизация водопроводящих зон в теле дамбы Елизаветинского водохранилища	Суглинки	4,0–16,0	82,5	11
Закрепление грунтов в основании фундаментов трансформаторов Старобешевской ТЭС	Супесь, суглинок	4,0–12,0	114,6	18

Величины распространения укрепляющего раствора вокруг скважины в зависимости от давления гидроразрыва для супесей, суглинков и песков приведены на рисунке 4.

Определяющим фактором при укреплении грунтов с помощью гидравлического разрыва является глубина их залегания. Условно по глубине можно выделить следующие интервалы закрепления грунтов:

I. Интервал 2,0–3,0 м: давление гидроразрыва не позволяет создать радиус распространения укрепляющего раствора более 0,2 м; требуется дополнительно сооружение пригруза; преобладают вертикальные трещины гидроразрыва.

II. Интервал 3,0–7,0 м: радиус распространения тампонажного раствора не бо-

лее 0,3–0,4 м; рекомендуется использование пригруза на поверхности.

III. Интервал 7,0–15,0 м: радиус распространения раствора до 0,7 м.

IV. Интервал свыше 15,0 м: радиус распространения раствора может быть свыше 0,7 м.

Для I и II интервалов закрепления преобладающими являются вертикальные трещины гидроразрыва, которые образуют с помощью таких герметизирующих устройств, как: обсадные колонны, забивные инъекторы, перфорированные манжетные трубы, шелевые инъекторы. Для III и IV интервалов образование направленных трещин гидроразрыва зависит от типа применяемого герметизирующего устройства. Для создания вертикальных трещин используются перфорированные манжетные колонны, а для создания

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

горизонтальных трещин — гладкоствольные колонны по беспакерной технологии.

Анализ выполненных ранее работ по напорной технологии с гидроразрывом

грунта позволяет рассчитать количество трещин гидроразрыва, их распределение по глубинам закрепления при использовании беспакерной технологии.

Таблица 3

Данные параметров гидроразрыва

№ п.п.	Тип раствора	Плотность раствора, кг/м <sup>3</sup>	Интервал закрепления, м	Давление, МПа		Минимальные параметры трещин гидроразрыва, заполненных раствором	
				гидроразрыва	нагнетания	длина, м	толщина, см
1	Песок, супесь						
2	Цементный	1800	2,0–30,0	0,2–4,0	0,5–3,0	0,15–1,8	1,5–3,0
3	Цементный	1500	6,0–30,0	0,3–6,0	0,3–3,0	0,2–1,6	1,0–2,5
4	Цементно-силикатный	1850	6,0–30,0	0,3–5,0	0,1–2,5	0,2–1,5	1,0–2,5
5	Цементно-силикатный	1520	2,0–11,0	0,2–2,0	0,1–1,0	0,2–0,8	0,8–2,0
7	Суглинок						
8	Цементный	1500	6,0–30,0	0,5–6,0	0,3–3,0	0,1–1,0	0,5–1,8
9	Цементно-силикатный	1520	6,0–30,0	0,5–6,0	0,2–5,5	0,3–0,85	0,5–1,7
10	Глиноцементный	1310	4,0–16,0	0,5–0,5	0,2–5,0	0,5–1,2	0,3–2,0
11	Суглинок лессовидный						
12	Цементный	1500	8,0–25,0	0,5–4,0	0,2–0,5	0,1–1,1	0,5–2,5
13	Цементно-силикатный	1520	8,0–25,0	0,5–4,0	0,25–0,5	0,05–1,1	0,5–2,3

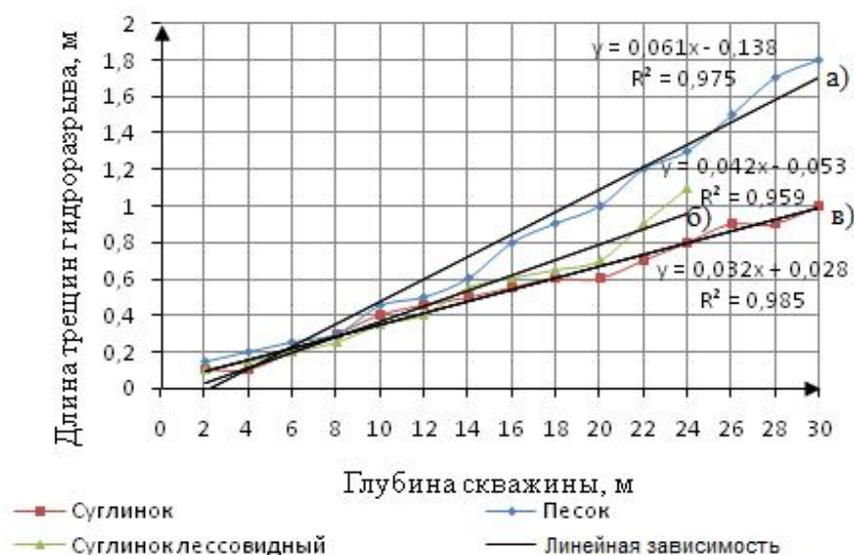


Рисунок 3 Характер распространения искусственных трещин при гидроразрыве для различных типов грунтов: а) песок; б) суглинок; в) суглинок лессовидный

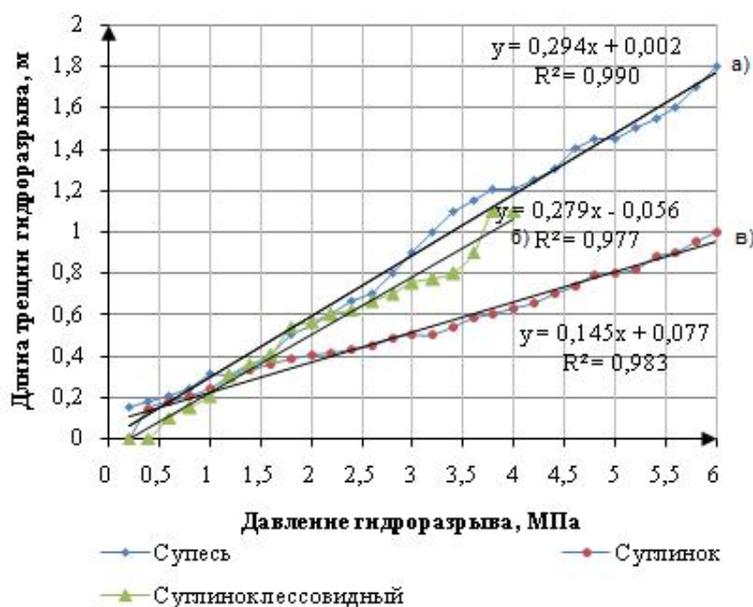


Рисунок 4 Величины зависимостей распространения инъекционного раствора вокруг скважины в зависимости от давления гидроразрыва для грунтов: а) супесь; б) суглинок лессовидный; в) суглинок

Усредненное снижение коэффициентов пористости грунта в процессе укрепления массива составит от 1 до 8 %, что соответствует равномерному распределению в массиве трещин с раскрытием 0,01 м в количестве не менее 6–8 штук на 1 пог. м закрепляемого грунта.

Применение гладкоствольной колонны в беспакерной технологии инъектирования позволяет при оборудовании забойной колонки дополнительной насадкой (или насадками) прорезать направленные вертикальные щели для создания искусственных трещин. При подъеме колонны на заданную высоту (0,1–0,2 м) происходит процесс резки вертикальных щелей (рис. 5).

В зависимости от мощности залегания различных слоев, можно гарантированно производить гидроразрыв буферной жидкостью (промывочная жидкость или вода) направленных трещин в массиве с их последующим заполнением укрепляющим раствором [14, 15].

Для создания горизонтальных направленных трещин необходимо выполнить вращение гладкоствольной колонны для образования щели (рис. 6).

Учитывая горнотехнические и горно-геологические факторы, влияющие на образование вертикальных, наклонных и горизонтальных трещин, при проведении работ целесообразно использовать комбинации герметизирующих устройств для напорной инъекции различных типов грунтов с целью создания в них эффективных армоцементных каркасов.

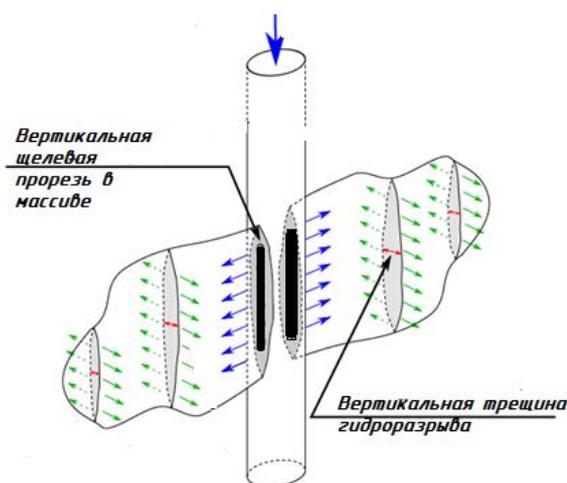


Рисунок 5 Схема резки вертикальных щелей для развития трещин гидроразрыва

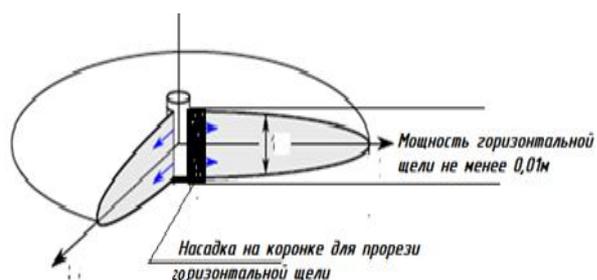


Рисунок 6 Схема формирования горизонтальных трещин разрыва

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Анализ параметров закрепления неустойчивых грунтов показал, что для определенных глубинных зон существует прямая зависимость величин давления гидроразрыва грунтов и величины распространения раствора от глубины залегания закрепляемого грунта, типа грунта и технологической схемы нагнетания.

#### Библиографический список

1. Сергеев, В. И. Инженерно-геологические основы оптимизации инъекционного закрепления грунтов : дисс. ... д-ра геол.-минер. наук : 04.00.07 / Сергеев Валерий Иванович. — М., 1986. — 398 с.
2. Камбефор, А. Инъекция грунтов. Принципы и методы [Текст] / А. Камбефор. — М. : Энергия, 1970. — 323 с.
3. Максимов, А. П. Тампонаж горных пород [Текст] / А. П. Максимов, В. В. Евтушенко. — М. : Недра, 1978. — 160 с.
4. Лазебник, А. Ю. Обоснование оптимальных технологических параметров тампонажного пакера при высоконапорной инъекции грунтов [Текст] / А. Ю. Лазебник // Проблемы горного давления : международный научный журнал / Институт горного дела и геологии ДонНТУ. — Донецк, 2021. — № 1–2. — С. 180–195.
5. Головки, С. И. Теория и практика усиления грунтовых оснований методом высоконапорной цементации [Текст] / С. И. Головки. — Днепрпетровск : Пороги, 2010. — 247 с.
6. Константинов, С. В. Техника и технология проведения гидравлического разрыва пласта за рубежом [Текст] / С. В. Константинов, В. И. Гусев // Обзорная информация. Сер. : Нефтепромысловое дело. — М. : ВНИИОЭНГ. — 1985. — 60 с.
7. Кугушева, И. В. Обоснование метода и технологии укрепления оснований исторических сооружений (на примере сооружений Свято-Троицкой Сергиевой Лавры) : дисс. ... канд. геол.-минер. наук : 25.00.08 / Кугушева Инна Викторовна. — М., 2016. — 168 с.
8. Полозов, Ю. А. Гидроизоляция и укрепление несвязных грунтов гидротехнических сооружений методом тампонажа [Текст] / Ю. А. Полозов, А. Ю. Лазебник // Сборник научных трудов ДонГТУ. — 2018. — № 11 (54). — С. 22–27.
9. Ибрагимов, М. Н. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов [Текст] / М. Н. Ибрагимов, В. В. Семкин. — М. : Издательство АСВ, 2012. — 256 с.
10. Разработка оборудования для ликвидации негерметичности эксплуатационных колонн нефтяных и газовых скважин. Выбор направлений исследований, теоретические исследования :

2. Наиболее эффективным с точки зрения беспакерной технологии является использование предложенной авторами гладкоствольной колонны с элементами дополнительных насадок на буровом снаряде для зарезки искусственных щелей и стабилизированного раствора в зазоре между гладкоствольной колонной и стенками скважины.

3. На практике целесообразно использование комбинации технологических схем и приемов создания как вертикальных, так и горизонтальных трещин гидроразрыва для создания в массиве армоцементного каркаса.

Направление дальнейших исследований заключается в моделировании процесса взаимодействия тампонажного пакера с массивом при выполнении напорной инъекции в режиме гидроразрыва грунта.

отчет о патентных исследованиях. Этап 1 / Министерство образования и науки РФ ; ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». — Красноярск, 2017. — 73 с.

11. Заключение о контрольном лабораторном исследовании грунтов оснований фундаментов индивидуального жилого дома по ул. Ереванская, 51–53 в г. Днепропетровске после их закрепления. — Днепропетровск : ДнепроГИИИИТИЗ, 2003.

12. Полозов, Ю. А. Укрепление и стабилизация несвязных грунтов под фундаментами зданий и сооружений, находящихся в аварийном состоянии [Текст] / Ю. А. Полозов, А. Ю. Лазебник // Технология и проектирование подземного строительства: вестник ДонНТУ. — Донецк : Норд-Пресс, 2003. — Вып. 3 — С. 53–62.

13. Тампонаж обводненных горных пород [Текст] : справочное пособие / Э. Я. Кипко, О. Ю. Лушникова, Ю. А. Полозов и др. — М. : Недра, 1989. — 318 с.

14. Байкин, А. Н. Динамика трещины гидроразрыва пласта в неоднородной пороупругой среде : дисс. ... канд. физ.-мат. наук : 01.02.05 / Байкин Алексей Николаевич. — Н., 2016. — 94 с.

15. Меликбеков, А. С. Теория и практика гидравлического разрыва пласта [Текст] / А. С. Меликбеков. — М. : Недра, 1967. — 141 с.

© Полозов Ю. А.

© Бизянов Е. Е.

© Лазебник А. Ю.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТИ Литвинским Г. Г., к.т.н., доц., зав. каф. СиГ АФГТ ЛГУ им. В. Даля Савченко И. В.*

*Статья поступила в редакцию 10.01.2022.*

**Doctor of Technical Sciences Polozov Yu. A., PhD in Engineering, Doctor of Economics Bizianov E. E. (DonSTI, Alchevsk, LPR, uapolozov@mail.ru), Lazebnik A. Yu. (ADMT of LNU named after V. Dahl, Antracite, LPR)**

### **SOIL STABILIZATION BY FORCING INJECTION USING THE DIRECTIONAL HYDRAULIC FRACTURING TECHNOLOGY**

*The article contains the results of analytical studies of the building mechanism of mining-induced fractures during the hydraulic fracturing of soils in order to create a reinforcement cage in it to increase the load-bearing capacity. The necessity of regulation and management the process of formation of mining-induced fractures in stabilized soils is scientifically justified. The technological methods of the fracture formation process are studied and the technology of packer-free well fastening is justified at pumping grouting mortar to perform hydraulic fracturing, by using a “grouting packer” as a stabilized grouting mortar in the gap between the well walls and the drill pipe column. The dependences of hydraulic fracturing crack sizes on injection well parameters, soil types and hydraulic fracturing pressure are determined.*

**Key words:** soils, injection, hydraulic fracturing, “grouting packer”, cement mixture.

**МЕТАЛЛУРГИЯ  
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

---

**METALLURGY  
AND MATERIAL SCIENCES**



УДК 621.771.011

д.т.н. Яковченко А. В.,  
к.т.н. Денищенко П. Н.,  
Кравцова С. И.  
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, [kravtsosveta@gmail.com](mailto:kravtsosveta@gmail.com)),  
Ивлева Н. И.  
(ДонНИИЧерМет, г. Донецк, ДНР)

## МЕТОД УТОЧНЕНИЯ КОНСТАНТ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ В ФОРМУЛЕ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА

Показано, что константы, определяющие термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла с учётом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации, не обеспечивают приемлемую точность расчетов во всем заявленном диапазоне изменения химических элементов. Разработаны математическая модель, метод и компьютерная программа расчёта уточненных констант. На примере углеродистой стали 0,06C—0,12Si—0,42Mn показано, что их использование позволило значительно повысить точность расчёта напряжения течения металла. Среднее относительное отклонение расчетных значений по отношению к экспериментальным составило 8,4 %.

**Ключевые слова:** напряжение течения металла при горячей пластической деформации; константы, определяющие термокинетические параметры; компьютерная база цифровой информации об экспериментальных кривых напряжения течения металла; сплайн-интерполяция кривых течения.

Формула для расчета напряжения течения металла, разработанная на базе теории [1, 2], учитывает химический состав углеродистых сталей, температуру, скорость деформации, накопленную деформацию в рассматриваемой точке очага деформации, а также процессы динамического преобразования структуры металла при его горячей пластической деформации. При этом химический состав сталей может находиться в следующем диапазоне [1]: C(0,05÷1,1); Si(0÷1,65); Mn(0,03÷1,55); Cr(0÷0,3); Ni(0÷0,3); P(0÷0,05); S(0÷0,05); V(0÷0,26); Cu(0÷0,28). Авторы предложенной модели установили, что погрешность расчета, выраженная среднеквадратичным отклонением, составляет 6,1 %. Вместе с тем заявлен достаточно широкий диапазон изменения ряда химических элементов, соответственно, вопрос точности формулы [1] требует более подробного рассмотрения.

Анализ точности формулы (1) расчета напряжения течения металла выполнен по отношению к экспериментальным кривым течения [3] для стали 0,06C—0,12Si—0,42Mn. Установлено (будет показано ниже), что среднее относительное отклонение расчётных значений по отношению к экспериментальным составило 27,9 %. Причём следует отметить, что химический состав указанной стали полностью соответствует допустимым значениям, приведенным в работе [1].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что константы, которые определяют термокинетические параметры (2), входящие в формулу (1), не обеспечивают указанную авторами точность расчетов напряжения течения металла во всем заявленном диапазоне изменения химических элементов.

В работе поставлена задача разработки метода уточнения указанных выше констант и, соответственно, ряда параметров формулы (1).

Формула [1] для расчета напряжения течения металла  $\sigma$  имеет вид

$$\sigma = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \cdot \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_x} + 1 \right) \times \exp\left( \frac{\varepsilon_p - \varepsilon}{\varepsilon_x} \right), \quad (1)$$

где  $\sigma_y$ ,  $\sigma_p$ ,  $\varepsilon_p$  и  $\varepsilon_x$  — термокинетические параметры:  $\sigma_p$  — пиковое значение напряжения  $\sigma$  на кривой течения, соответствует пиковой деформации  $\varepsilon_p$ ;  $\sigma_y$  — установившееся напряжение, при котором наступает равновесие процессов упрочнения и динамической рекристаллизации при достижении деформации  $\varepsilon_x$ .

Термокинетические параметры, определяющие кривые течения сталей, выражаются следующими зависимостями:

$$\sigma_p = n_1 \cdot \left( \frac{Z}{A} \right)^{m_1}; \quad \sigma_y = n_2 \cdot \left( \frac{Z}{A} \right)^{m_2}; \quad (2)$$

$$\varepsilon_x = n_3 \cdot \left( \frac{Z}{A} \right)^{m_3}; \quad \varepsilon_p = n_4 \cdot \left( \frac{Z}{A} \right)^{m_4},$$

а входящие в них константы, найденные в работе [1], равны

$$n_1 = 72,06; m_1 = 0,131; n_2 = 51,66; m_2 = 0,149;$$

$$n_3 = 0,193; m_3 = 0,112; n_4 = 0,268; m_4 = 0,107.$$

Влияние химического состава стали отражается величиной энергии активации деформации  $Q$  (кДж · моль<sup>-1</sup>), которая входит в комплексный температурно-скоростной параметр процесса деформации (параметр Zener-Hollomon ( $Z$ )),  $A$  — скоростная константа деформируемого материала [1]:

$$Z = U \cdot \exp\left[ \frac{Q}{R \cdot T} \right];$$

$$A = 0,146 \cdot \exp\left( 9,1 \cdot 10^{-5} \cdot Q \right),$$

где  $R = 8,318$  Дж · моль<sup>-1</sup> · К<sup>-1</sup> — газовая постоянная,  $T$  — абсолютная температура.

$$Q = 308700 + 37100 \cdot \ln(C\%) +$$

$$+ 10900 \cdot \ln(C\%)^2 + 27000 \cdot (Si\%) +$$

$$+ 8100 \cdot (Mn\%) + 337100 \cdot (Cr\%) + \quad (3)$$

$$+ 249900 \cdot (Ni\%) - 119000 \cdot (Cu\%) +$$

$$+ 181000 \cdot (V\%) - 288000 \cdot (P\%) -$$

$$- 855000 \cdot (S\%)[1].$$

С целью повышения точности расчета формулы (1) на первом этапе необходимо разработать математическую модель уточнения констант, входящих в зависимость (2) для определения термокинетических параметров, на базе экспериментальных кривых течения.

Пусть имеется совокупность значений  $\sigma_j(\varepsilon_j, U_j, T_j)$ , ( $j = 1, 2, \dots, n$ ), полученных на основе экспериментальных кривых течения. Будем использовать эмпирическую формулу (1) для записи системы  $n$  уравнений, которую в общем виде запишем как

$$\sigma_j = \tilde{f}(\varepsilon_j, U_j, T_j, n_1, m_1, n_2, m_2, n_3, m_3, n_4, m_4); \quad (4)$$

$$(j = 1, 2, \dots, n).$$

Определим константы  $n_1, m_1, n_2, m_2, n_3, m_3, n_4, m_4$  так, чтобы невязки

$$\delta_j = \tilde{f}(\varepsilon_j, U_j, T_j, n_1, m_1, n_2, m_2, n_3, m_3, n_4, m_4) - \sigma_j;$$

$$(j = 1, 2, \dots, n)$$

были как можно меньше по абсолютной величине.

Пусть

$$n_1 = n_1^0 + \Delta n_1; m_1 = m_1^0 + \Delta m_1;$$

$$n_2 = n_2^0 + \Delta n_2; m_2 = m_2^0 + \Delta m_2;$$

$$n_3 = n_3^0 + \Delta n_3; m_3 = m_3^0 + \Delta m_3;$$

$$n_4 = n_4^0 + \Delta n_4; m_4 = m_4^0 + \Delta m_4, \quad (5)$$

где  $n_1^0, m_1^0, n_2^0, m_2^0, n_3^0, m_3^0, n_4^0, m_4^0$  равны значениям констант в формулах (2), цифровые значения которых указаны выше, а  $\Delta n_1, \Delta m_1, \Delta n_2, \Delta m_2, \Delta n_3, \Delta m_3, \Delta n_4, \Delta m_4$  — поправки, которые считаются малыми.

Подставляя значения (5) в систему уравнений (4) и разлагая правые части полученных уравнений по степеням поправок, учитывая лишь члены первого порядка относительно этих поправок, будем иметь

$$\begin{aligned} \sigma_j = & \tilde{f} \left( \varepsilon_j, U_j, T_j, n_1^0, m_1^0, n_2^0, \right. \\ & \left. m_2^0, n_3^0, m_3^0, n_4^0, m_4^0 \right) + \\ & + \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_1} \left( \varepsilon_j, U_j, T_j, n_1^0, m_1^0, n_2^0, \right. \\ & \left. m_2^0, n_3^0, m_3^0, n_4^0, m_4^0 \right) \cdot \Delta n_1 + \\ & + \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_1} \left( \varepsilon_j, U_j, T_j, n_1^0, m_1^0, n_2^0, \right. \\ & \left. m_2^0, n_3^0, m_3^0, n_4^0, m_4^0 \right) \cdot \Delta m_1 + \\ & + \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_1} \left( \varepsilon_j, U_j, T_j, n_1^0, m_1^0, n_2^0, \right. \\ & \left. m_2^0, n_3^0, m_3^0, n_4^0, m_4^0 \right) \cdot \Delta n_1 + \\ & + \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_2} \left( \varepsilon_j, U_j, T_j, n_1^0, m_1^0, n_2^0, \right. \\ & \left. m_2^0, n_3^0, m_3^0, n_4^0, m_4^0 \right) \cdot \Delta n_2 + \\ & + \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_2} \left( \varepsilon_j, U_j, T_j, n_1^0, m_1^0, n_2^0, \right. \\ & \left. m_2^0, n_3^0, m_3^0, n_4^0, m_4^0 \right) \cdot \Delta m_2 + \\ & + \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_3} \left( \varepsilon_j, U_j, T_j, n_1^0, m_1^0, n_2^0, \right. \\ & \left. m_2^0, n_3^0, m_3^0, n_4^0, m_4^0 \right) \cdot \Delta n_3 + \\ & + \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_3} \left( \varepsilon_j, U_j, T_j, n_1^0, m_1^0, n_2^0, \right. \\ & \left. m_2^0, n_3^0, m_3^0, n_4^0, m_4^0 \right) \cdot \Delta m_3 + \\ & + \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_4} \left( \varepsilon_j, U_j, T_j, n_1^0, m_1^0, n_2^0, \right. \\ & \left. m_2^0, n_3^0, m_3^0, n_4^0, m_4^0 \right) \cdot \Delta n_4 + \\ & + \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_4} \left( \varepsilon_j, U_j, T_j, n_1^0, m_1^0, n_2^0, \right. \\ & \left. m_2^0, n_3^0, m_3^0, n_4^0, m_4^0 \right) \cdot \Delta m_4; \end{aligned} \quad (6)$$

( $j = 1, 2 \dots n$ ).

Система (6) линейна относительно неизвестных поправок,  $\Delta n_1, \Delta m_1, \Delta n_2, \Delta m_2, \Delta n_3, \Delta m_3, \Delta n_4, \Delta m_4$ , но число уравнений больше числа неизвестных. Поэтому для нахождения поправок применим метод наименьших квадратов.

Согласно методу наименьших квадратов, наилучшими значениями для них считаются те, для которых сумма квадратов отклонений  $\Psi$  будет минимальной:

$$\Psi = \sum_{j=1}^n \left[ F \left( \varepsilon_j, U_j, T_j, \Delta n_1, \Delta m_1, \Delta n_2, \right. \right. \\ \left. \left. \Delta m_2, \Delta n_3, \Delta m_3, \Delta n_4, \Delta m_4 \right) - \sigma_j \right]^2, \quad (7)$$

где функция  $F$  представляет собой правую часть выражения (6).

Используя необходимые условия экстремума функции нескольких переменных, получим систему для определения поправок

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi}{\partial (\Delta n_1)} = 0; \quad \frac{\partial \Psi}{\partial (\Delta m_1)} = 0; \\ \frac{\partial \Psi}{\partial (\Delta n_2)} = 0; \quad \frac{\partial \Psi}{\partial (\Delta m_2)} = 0; \\ \frac{\partial \Psi}{\partial (\Delta n_3)} = 0; \quad \frac{\partial \Psi}{\partial (\Delta m_3)} = 0; \\ \frac{\partial \Psi}{\partial (\Delta n_4)} = 0; \quad \frac{\partial \Psi}{\partial (\Delta m_4)} = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Запишем систему (8) в матричном виде:

$$C \cdot X = B, \quad (9)$$

где

$$X = \begin{pmatrix} \Delta n_1 \\ \Delta m_1 \\ \Delta n_2 \\ \Delta m_2 \\ \Delta n_3 \\ \Delta m_3 \\ \Delta n_4 \\ \Delta m_4 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Коэффициенты матрицы  $C$  и вектора  $B$  вычисляются при значениях  $n_1^0, m_1^0, n_2^0, m_2^0, n_3^0, m_3^0, n_4^0, m_4^0$  и имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
C(1,1) &= \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \right]^2; \quad C(1,2) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \\
C(1,3) &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_2}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad C(1,4) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_2}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \\
C(1,5) &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_3}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad C(1,6) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_3}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \\
C(1,7) &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad C(1,8) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \\
C(2,1) &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad C(2,2) = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \right]^2; \\
C(2,3) &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_2}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad C(2,4) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_2}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \\
C(2,5) &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_3}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad C(2,6) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_3}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \\
C(2,7) &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad (11) \\
C(2,8) &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad C(8,1) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \\
C(8,2) &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad C(8,3) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_2}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \\
C(8,4) &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_2}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad C(8,5) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_3}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \\
C(8,6) &= \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_3}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad C(8,7) = \sum_{j=1}^n \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \\
C(8,8) &= \sum_{j=1}^n \left[ \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \right]^2. \\
B(1) &= \sum_{j=1}^n \left[ \sigma_j - \tilde{f}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \right] \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad B(2) = \sum_{j=1}^n \left[ \sigma_j - \tilde{f}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \right] \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_1}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \\
B(3) &= \sum_{j=1}^n \left[ \sigma_j - \tilde{f}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \right] \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_2}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad B(4) = \sum_{j=1}^n \left[ \sigma_j - \tilde{f}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \right] \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_2}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \\
B(5) &= \sum_{j=1}^n \left[ \sigma_j - \tilde{f}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \right] \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_3}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad B(6) = \sum_{j=1}^n \left[ \sigma_j - \tilde{f}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \right] \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_3}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \\
B(7) &= \sum_{j=1}^n \left[ \sigma_j - \tilde{f}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \right] \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial n_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j); \quad B(8) = \sum_{j=1}^n \left[ \sigma_j - \tilde{f}(\varepsilon_j, U_j, T_j) \right] \cdot \frac{\partial \tilde{f}}{\partial m_4}(\varepsilon_j, U_j, T_j).
\end{aligned}$$

Вектор  $X$  найдем из соотношения  $X = C^{-1} \cdot B$ , где  $C^{-1}$  — обратная матрица.

Подставив найденные поправки в систему (5), можно определить новые невязки.

Для расчета коэффициентов матрицы  $C$  и вектора  $B$  потребуются формулы для входящих в них производных от функции  $\tilde{f}$  (см. (11)), а также самой функции  $\tilde{f}$  (см. (4)). Перейдем от общего вида эмпирической формулы (4) непосредственно к формуле (1).

Запишем выражения (2) в тождественном виде (12):

$$\begin{aligned} \sigma_p &= n_1 \cdot \exp\left(m_1 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right); \\ \sigma_y &= n_2 \cdot \exp\left(m_2 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right); \\ \varepsilon_x &= n_3 \cdot \exp\left(m_3 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right); \\ \varepsilon_p &= n_4 \cdot \exp\left(m_4 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right). \end{aligned} \quad (12)$$

Подставив выражения (12) в уравнение (1) и обозначив

$$\begin{aligned} S &= n_2 \cdot \exp\left(m_2 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right); \\ S0 &= n_1 \cdot \exp\left(m_1 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right) - n_2 \cdot \exp\left(m_2 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right); \\ S1 &= \left( \frac{\varepsilon - n_4 \cdot \exp\left(m_4 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right)}{n_3 \cdot \exp\left(m_3 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right)} + 1 \right); \\ S2 &= \left( \frac{n_4 \cdot \exp\left(m_4 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right) - \varepsilon}{n_3 \cdot \exp\left(m_3 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right)} \right), \end{aligned}$$

получим

$$\sigma = S + S0 \cdot S1 \cdot \exp(S2). \quad (13)$$

Используя уравнение (13) и входящие в него выражения для  $S$ ,  $S0$ ,  $S1$  и  $S2$ , найдем следующие производные:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial n_1} = \exp\left(m_1 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right) \cdot S1 \cdot \exp(S2); \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial m_1} &= n_1 \cdot \exp\left(m_1 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right) \times \\ &\times \ln\left(\frac{Z}{A}\right) \cdot S1 \cdot \exp(S2); \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial n_2} &= \exp\left(m_2 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right) \times \\ &\times (1 - S1 \cdot \exp(S2)); \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial m_2} &= n_2 \cdot \exp\left(m_2 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right) \times \\ &\times \ln\left(\frac{Z}{A}\right) \cdot (1 - S1 \cdot \exp(S2)); \end{aligned} \quad (17)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial n_3} = S0 \cdot \left( \frac{\frac{\partial S1}{\partial n_3} \cdot \exp(S2) + S1 \cdot \exp(S2) \cdot \frac{\partial S2}{\partial n_3}}{\right), \quad (18)$$

$$\text{где } \frac{\partial S1}{\partial n_3} = - \frac{\varepsilon - n_4 \cdot \exp\left(m_4 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right)}{n_3^2 \cdot \exp\left(m_3 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right)};$$

$$\frac{\partial S2}{\partial n_3} = - \frac{n_4 \cdot \exp\left(m_4 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right) - \varepsilon}{n_3^2 \cdot \exp\left(m_3 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right)};$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial m_3} = S0 \cdot \left( \frac{\frac{\partial S1}{\partial m_3} \cdot \exp(S2) + S1 \cdot \exp(S2) \cdot \frac{\partial S2}{\partial m_3}}{\right), \quad (19)$$

$$\text{где } \frac{\partial S1}{\partial m_3} = \frac{\varepsilon - n_4 \cdot \exp\left(m_4 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right)}{n_3} \times$$

$$\times \exp\left(-m_3 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right) \cdot \left(-\ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right);$$

$$\frac{\partial S2}{\partial m_3} = \frac{n_4 \cdot \exp\left(m_4 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right) - \varepsilon\right)}{n_3} \times \exp\left(-m_3 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right) \cdot \left(-\ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right);$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial n_4} = S0 \cdot \left( \begin{array}{l} \frac{\partial S1}{\partial n_4} \cdot \exp(S2) + \\ + S1 \cdot \exp(S2) \cdot \frac{\partial S2}{\partial n_4} \end{array} \right), \quad (20)$$

где

$$\frac{\partial S1}{\partial n_4} = -\frac{\exp\left(m_4 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right)}{n_3 \cdot \exp\left(m_3 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right)};$$

$$\frac{\partial S2}{\partial n_4} = -\frac{\partial S1}{\partial n_4};$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial m_4} = S0 \cdot \left( \begin{array}{l} \frac{\partial S1}{\partial m_4} \cdot \exp(S2) + \\ + S1 \cdot \exp(S2) \cdot \frac{\partial S2}{\partial m_4} \end{array} \right), \quad (21)$$

где

$$\frac{\partial S1}{\partial m_4} = -\frac{n_4 \cdot \exp\left(m_4 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right) \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)}{n_3 \cdot \exp\left(m_3 \cdot \ln\left(\frac{Z}{A}\right)\right)};$$

$$\frac{\partial S2}{\partial m_4} = -\frac{\partial S1}{\partial m_4}.$$

Для реализации математической модели необходимо создать компьютерную базу экспериментальных данных по напряжению течения стали 0,06C—0,12Si—0,42Mn. Для этого в работе [4] предложен соответствующий метод. Здесь представлены полученные результаты. Так, на рисунке 1 показана база цифровой экспериментальной информации о напряжении течения стали 0,06C—0,12Si—0,42Mn. На рисунке 2 видно, что имеет место полное совпадение исходных экспериментальных кривых, показанных черным цветом, и сплайн-интерполированных кривых, показанных бирюзовым цветом, которые построены с использованием созданной ком-

пьютерной базы. В процессе сплайн-интерполяции используется метод, разработанный в [4], по определению значений напряжения течения металла, причём не только для точек, лежащих на кривых, но и для любых других сочетаний значений степени деформации  $\varepsilon$ , скорости деформации  $U$  и температуры  $T$  в диапазоне их изменения на исходных экспериментальных кривых.

По всем экспериментальным кривым [3] при определенных значениях  $\varepsilon$  имеет место разупрочнение металла. Соответственно, при больших значениях  $\varepsilon$  напряжение течения  $\sigma = \text{const}$ . Это позволило выполнить экстраполяцию экспериментальных данных в диапазоне от  $\varepsilon = 0,7$  до большей величины. Так, интервал по степени деформации был увеличен от 0,7 до 1,5, что нашло отражение в компьютерной базе цифровой информации, представленной на рисунке 1. В свою очередь, в дальнейшем это позволит выполнить сравнительный анализ расчетных кривых по отношению к экспериментальным в более широком диапазоне изменения степени деформации.

На основе разработанной математической модели (4–21) создана компьютерная программа расчёта уточненных констант  $n_1, m_1, n_2, m_2, n_3, m_3, n_4, m_4$ , определяющих термокинетические параметры (2) в формуле расчета напряжения течения металла (1).

Окно программы показано на рисунке 3. В верхнюю часть окна передана информация о пределах изменения факторов  $\varepsilon, U, T$  в соответствии с разработанной базой цифровой экспериментальной информации о напряжении течения стали 0,06C—0,12Si—0,42Mn (рис. 1).

Ниже задается химический состав стали, который используется при расчёте величины энергии активации деформации  $Q$  по формуле (3).

Слева от него задаются цифровые значения факторов, например  $\varepsilon = 500, T = 20, U = 20$ , которые означают следующее. Так, при каждом из 20 значений температуры (в пределах изменения фактора  $T$ ) выполняет-

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ся построение 20 кривых  $\sigma=f(\varepsilon)$  напряжения течения стали 0,06C—0,12Si—0,42Mn по экспериментальным данным при фиксированных значениях скорости деформации (в пределах изменения фактора U). Затем по каждой кривой течения стали при 500 фиксированных значениях степени

деформации (в пределах изменения фактора  $\varepsilon$ ) выполняется определение соответствующих значений  $\sigma$ . При этом используется компьютерная база цифровой информации о напряжении течения стали 0,06C—0,12Si—0,42Mn (рис. 1).

Таблица экспериментальных значений напряжения течения металла  $\sigma$  (МПа) в зависимости от факторов:  $\varepsilon$ , U (1/c), T(град.С)

Степень деформации	0.001	0.025	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
T = 900, U = 0.01	1.053	47.368	61.053	75.789	86.667	92.222	94.444	91.111	84.444	82.222	82.222	81.111
T = 900, U = 0.03	1.053	37.778	68.421	86.667	100.000	107.368	112.632	112.632	107.368	103.158	101.053	100.000
T = 900, U = 0.1	1.053	50.526	72.632	96.667	111.579	121.111	130.000	133.333	135.556	131.111	127.778	123.333
T = 1000, U = 0.01	0.714	29.677	46.000	58.000	64.000	60.000	59.333	61.333	60.667	60.000	60.000	60.000
T = 1000, U = 0.03	0.714	27.097	46.000	61.333	70.667	74.667	66.667	66.667	68.000	67.333	66.000	65.333
T = 1000, U = 0.1	0.714	43.333	64.000	78.000	88.000	94.000	92.000	86.667	85.333	84.667	85.333	85.333
T = 1100, U = 0.01	0.455	30.909	39.091	48.182	42.273	45.909	46.818	45.000	45.000	44.545	44.091	43.636
T = 1100, U = 0.03	0.455	30.000	40.909	52.727	57.727	51.364	54.545	54.091	53.636	52.727	52.273	52.273
T = 1100, U = 0.1	0.455	36.818	47.273	57.273	64.091	57.273	56.818	57.727	57.273	56.818	56.364	56.818
Степень деформации	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	1.5
T = 900, U = 0.01	92.222	94.444	91.111	84.444	82.222	82.222	81.111	81.111	78.947	78.947	77.895	77.895
T = 900, U = 0.03	107.368	112.632	112.632	107.368	103.158	101.053	100.000	101.053	100.000	98.889	98.889	98.889
T = 900, U = 0.1	121.111	130.000	133.333	135.556	131.111	127.778	123.333	122.222	120.000	121.111	118.947	118.947
T = 1000, U = 0.01	60.000	59.333	61.333	60.667	60.000	60.000	60.000	60.667	60.667	61.333	62.000	62.000
T = 1000, U = 0.03	74.667	66.667	66.667	68.000	67.333	66.000	65.333	66.000	65.333	65.333	66.000	66.000
T = 1000, U = 0.1	94.000	92.000	86.667	85.333	84.667	85.333	85.333	85.333	86.000	87.333	87.333	87.333
T = 1100, U = 0.01	45.909	46.818	45.000	45.000	44.545	44.091	43.636	43.636	42.727	44.091	42.727	42.727
T = 1100, U = 0.03	51.364	54.545	54.091	53.636	52.727	52.273	52.273	52.273	51.818	52.727	51.818	51.818
T = 1100, U = 0.1	57.273	56.818	57.727	57.273	56.818	56.364	56.818	55.909	56.364	55.909	56.364	56.364

Рисунок 1 База цифровой экспериментальной информации о напряжении течения стали 0,06C—0,12Si—0,42Mn

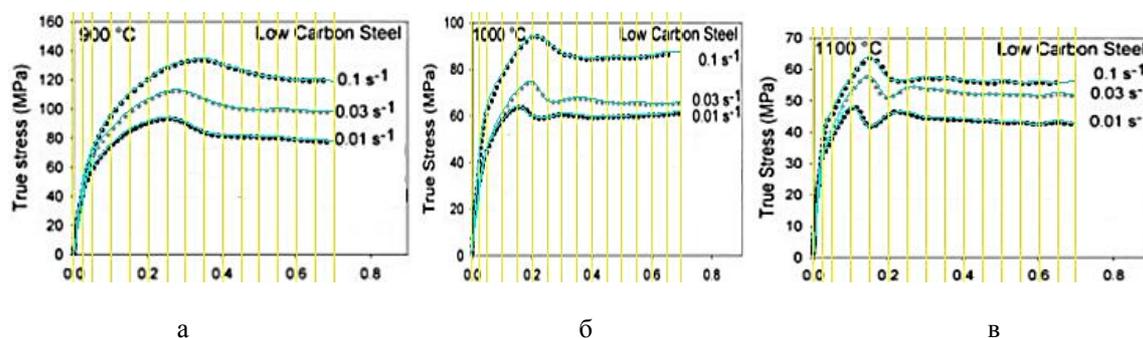


Рисунок 2 Фрагмент окна контрольного построения сплайн-кривых  $\sigma$

## МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

**Метод уточняющий параметры формулы Солода В.С. и др.**

**Пределы изменения факторов**

$\epsilon_{min}$	$\epsilon_{max}$	U min (1/c)	U max (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.01	1.5	0.01	0.1	900	1100

Имя файла:  
КАТАЛОГ\Сталь  
0.06C-0.12Si-0.42Mn

**Расчет напряжения течения металла**

**по экспериментальным кривым упрочнения**

Количество  $\epsilon$

Количество T

Количество U

**Выполнить**

**Химический состав (%)**

C (0.05 - 1.1)	0.06
Si (0 - 1.65)	0.12
Mn (0.03 - 1.55)	0.42
Cr (0 - 0.3)	
Ni (0 - 0.3)	
P (0 - 0.05)	0.002
S (0 - 0.05)	0.005
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	0.13

**по формулам Солода В.С. и др.**

**Выполнить**

n1	72.06	m1	0.131
n2	51.66	m2	0.149
n3	0.193	m3	0.112
n4	0.268	m4	0.107
Q 129311.108783			

n	s <sub>расч.</sub> (МПа)	D (%)
162321	40.420	27.030
162322	40.406	27.055
162323	40.393	27.080
162324	40.379	27.104
162325	40.366	27.128
162326	40.353	27.151
162327	40.340	27.174
162328	40.328	27.197
162329	40.315	27.221
162330	40.303	27.243
162331	40.291	27.265
D <sub>ср</sub> (%) 27.939		

**по уточненным параметрам формулы Солода В.С. и др.**

**Выполнить**

n1	72.00	m1	0.140
n2	51.69	m2	0.150
n3	0.190	m3	0.170
n4	0.267	m4	0.110
Q 129311.108783			

n	s <sub>расч.</sub> (МПа)	D (%)
162321	50.663	8.540
162322	50.662	8.540
162323	50.662	8.540
162324	50.662	8.541
162325	50.662	8.541
162326	50.662	8.541
162327	50.661	8.542
162328	50.661	8.542
162329	50.661	8.544
162330	50.661	8.544
162331	50.661	8.545
D <sub>ср</sub> (%) 8.441		

Рисунок 3 Окно компьютерной программы расчёта уточненных констант, определяющих термокинетические параметры (2) в формуле расчета напряжения течения металла (1)

Массив значений  $\epsilon$ , U, T,  $\sigma$  отображается в левой нижней части окна программы. Так, например, при заданных значениях ( $\epsilon=500$ , T=20, U=20) массив включает 200 тыс. значений  $\sigma$  при соответствующих значениях степени, скорости деформации и температуры. Указанные выше цифровые значения, определяющие указанный массив, в процессе расчета можно изменять, добиваясь наилучшей точности расчёта.

В работе [5] разработана функция компьютерной программы расчета напряжения течения металла по формуле (1), учитывающей процессы динамического преобразования структуры металла при его горячей пластической деформации. В средней части окна выполняется расчет соответствующих значений  $\sigma$  по этой

формуле, то есть с учётом исходных констант, приведенных под формулой (2). При этом определяется среднее относительное отклонение расчетных значений по отношению к экспериментальным. Указанное отклонение, найденное по 200 тыс. точек, равно 27,9 %.

В правой части окна выполняется расчет соответствующих значений  $\sigma$  на базе уточненных констант, определяющих термокинетические параметры (2) в формуле расчета напряжения течения металла (1). Сами уточненные константы даются под окошком «выполнить» в правой части окна программы (рис. 4). При этом среднее относительное отклонение расчетных значений по отношению к экспериментальным, найденное по 200 тыс. точек, равно 8,4 %.

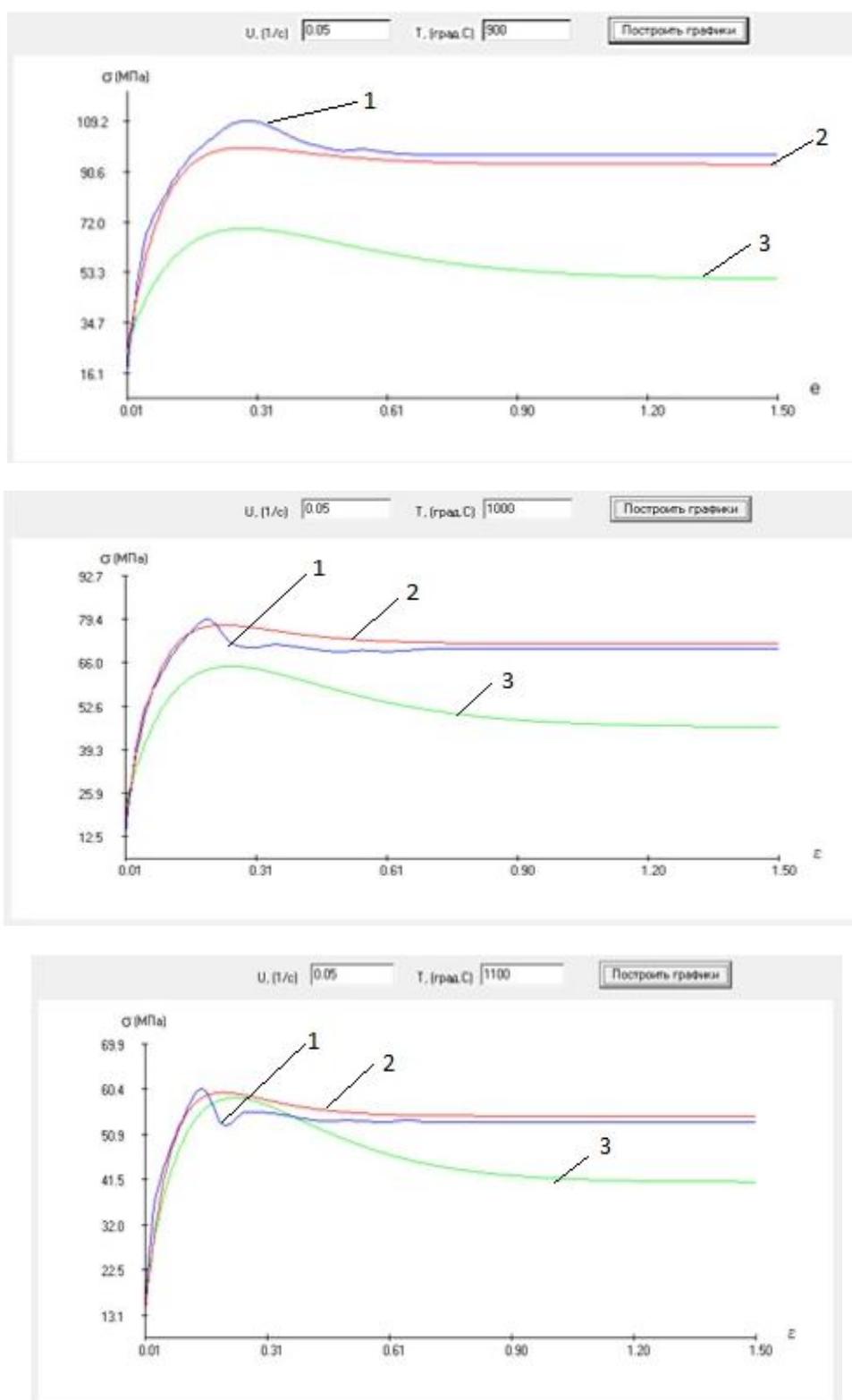


Рисунок 4 Экспериментальные и расчётные кривые напряжения течения стали 0,06C—0,12Si—0,42Mn  $\sigma=f(\epsilon)$  при фиксированных значениях U, T

На рисунке 3 в правом верхнем углу окна на первом этапе в автоматическом режиме задаются и используются константы, найденные в работе [1]. На следующем этапе расчёта исходные константы можно корректировать для получения лучшего результата. Также в процессе расчёта уточненных констант можно организовать итерационный процесс, при котором найденные на предыдущем шаге значения задаются в качестве исходных на следующем шаге. На рисунке 4 приведены соответствующие экспериментальные и расчётные кривые: линия 1 — экспериментальные кривые; линия 2 — расчётные кривые, полученные на базе уточненных констант, определяющих термокинетические параметры (2) в формуле расчета напряжения течения металла (1) [1]; линия 3 — расчётные кривые, полученные по формуле (1).

Разработаны математическая модель, метод и компьютерная программа расчёта

уточненных констант, определяющих термокинетические параметры в формуле расчета напряжения течения металла с учётом процессов динамического преобразования его структуры при горячей пластической деформации.

На примере углеродистой стали 0,06C—0,12Si—0,42Mn показано, что использование уточненных констант позволило значительно повысить точность расчёта напряжения течения металла. Установлено, что качественный ход расчетных кривых напряжения течения металла соответствует экспериментальным. Среднее относительное отклонение расчетных значений по отношению к экспериментальным составило 8,4 %.

Разработанные математическую модель и предложенный метод в перспективе можно также использовать для различных групп марок сталей при расчёте общих для них уточненных констант.

### Библиографический список

1. Солод, В. С. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей [Текст] / В. С. Солод, Я. Е. Бейгельзимер, Р. Ю. Кулагин // *Металл и литье Украины*. — 2006. — № 7–8. — С. 52–56.
2. Medina, S. F. General Expression of the Zener—Hollomon Parameter as a Function of the Chemical Composition of Low Alloy and Microalloyed Steels [Text] / S. F. Medina, C. A. Hernandez // *Acta Mater.* — 1996. — Vol. 44. — No. 1. — P. 137–148.
3. Saadatkia, S. Hot deformation behavior, dynamic recrystallization, and physically-based constitutive modeling of plain carbon steels [Text] / Sepideh Saadatkia, Hamed Mirzadeha, Jose-Maria Cabrera // *Materials Science and Engineering*. — 2015. — Vol. 636. — P. 196–202.
4. Яковченко, А. В. Методы компьютерного моделирования напряжения течения металла в процессах горячей пластической деформации [Текст] : учеб. пособ. / А. В. Яковченко, С. А. Снитко, Н. И. Ивлева. — Донецк : ДонНТУ, 2018. — 197 с.
5. Зависимость напряжения течения стали 0,19C—0,20Si—0,40Mn, учитывающая при горячей прокатке процессы динамического преобразования структуры [Текст] / А. В. Яковченко, С. А. Снитко, В. В. Пилипенко, Н. И. Ивлева // *Вестник Донецкого национального технического университета*. — 2020. — Т. 19. — № 1. — С. 45–52.

© Яковченко А. В.  
 © Денищенко П. Н.  
 © Кравцова С. И.  
 © Ивлева Н. И.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В.,  
 д.т.н., доц., зав. каф. ОМД ДонНТУ Снитко С. А.

Статья поступила в редакцию 01.03.2022.

**Doctor of Technical Sciences Yakovchenko A. V., PhD in Engineering Denishchenko P. N., Kravtsova S. I. (DonSTI, Alchevsk, LPR, kravtsovet@gmail.com), Ivleva N. I. (DonNICherMet, Donetsk, DPR)**

**A METHOD FOR SPECIFYING THE CONSTANTS THAT DETERMINE THE THERMOKINETIC PARAMETERS IN THE FORMULA FOR CALCULATING THE METAL FLOW STRESS**

*It is shown that the constants that determine the thermokinetic parameters in the formula for calculating the metal flow stress, accounting the processes of dynamic transformation of its structure during hot plastic deformation, do not provide an acceptable accuracy of calculations in the entire declared range of changes in chemical elements. A mathematical model, a method and a computer program for calculating the refined constants have been developed. Using the example of carbon steel 0,06C—0,12Si—0,42Mn, it is shown that their use has significantly improved the accuracy of calculating the metal flow stress. The average relative deviation of the calculated values with respect to the experimental ones was 8,4 %.*

**Key words:** metal flow stress during hot plastic deformation, constants that determine the thermokinetic parameters, computer base of digital information about experimental stress curves of metal flow, spline interpolation of flow curves.



**СТРОИТЕЛЬСТВО  
И АРХИТЕКТУРА**

---

**CIVIL ENGINEERING  
AND ARCHITECTURE**



УДК69:624.012.45

к.т.н. Емец Е. В.,  
к.т.н. Каранетян С. Х.  
(ЛГУ им. В. Даля, г. Алчевск, ЛНР)

## ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВИНТОВЫХ СВАЙ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ

*Работа посвящена анализу несущей способности винтовых свай различной конструкции в глинистых грунтах для фундаментов различных зданий.*

**Ключевые слова:** винтовые одно- и двухлопастные сваи, напряженно-деформированное состояние, несущая способность, метод конечных элементов.

В последние годы все более приоритетным направлением в строительстве становится возведение быстровозводимых зданий, сооружений для объектов агропромышленного и промышленного назначения (логистические центры, склады, тепличные комплексы, летние павильоны и др.).

Такие быстровозводимые здания классифицируются как временные, так как имеют небольшой срок службы (10–20 лет). Рассматриваемые здания легко и быстро монтируются благодаря особенностям конструктивных решений. Быстровозводимые здания, выполненные с использованием новых технологий, характеризуются низким удельным весом строительных конструкций, позволяющим значительно уменьшить нагрузки на основание.

В практике проектирования данного типа зданий и сооружений применение традиционных фундаментов, например ленточных или столбчатых, приводит к нерациональному вложению материальных средств.

В настоящее время известны десятки видов свай, которые различаются по форме, материалу и принципу работы [1, 2]. Практика показала, что для быстровозводимых временных зданий в глинистых грунтах наиболее приемлемыми являются фундаменты из винтовых свай [3, 4]. Применяют, как правило, винтовые металлические сваи длиной до 3 м и диаметром лопастей до 0,4 м.

Преимуществами фундаментов из винтовых свай являются отсутствие земляных работ и минимальное нарушение структу-

ры грунта при их ввинчивании, что позволяет выполнять работы по устройству свай в условиях плотной застройки. В глинистых грунтах эффективность винтовых свай возрастает, если в их конструктивном решении используются не одна, а две лопасти (винтовые двухлопастные сваи) [4]. Такое решение позволяет достичь требуемой несущей способности, уменьшив их материалоемкость. Однако до настоящего времени исследований работы винтовых двухлопастных свай выполнено ограниченное количество. Поэтому тема работы является актуальной.

Данная статья посвящена оценке несущей способности винтовых свай различной конструкции в глинистых грунтах.

**Цель исследования** — оценить несущую способность винтовых свай различной конструкции в глинистых грунтах для фундаментов различных зданий.

**Объект исследования** — винтовые одно- и двухлопастные сваи в различных инженерно-геологических условиях.

**Предмет исследования** — несущая способность винтовых свай различной конструкции.

Конструкция винтовых свай в общем случае состоит из тела сваи и наконечника (рис. 1). В качестве тела сваи, как правило, выступает металлическая труба, наконечники же имеют несколько разновидностей. Основное различие свай состоит в форме наконечника и элемента, благодаря которому происходит завинчивание сваи в

грунт (это может быть винт на конце трубы либо лопасть).

По конструкции лопастей сваи классифицируют как широколопастные и узколопастные или резьбовые (рис. 2).

Широколопастные сваи наиболее распространены в строительстве на большинстве грунтов. Узколопастные применяются обычно в тяжелых и каменистых грунтах, а также в районах вечной мерзлоты.

Несущая способность широколопастных свай существенно выше, чем узколопастных, во-первых, из-за увеличения площади давления опоры на грунт, во-вторых, из-за повышенной устойчивости на выдергивание свай. Это играет большую роль при значительных боковых нагрузках на сваю, например, в случае установки высоких опор освещения.

Кроме того, винтовые сваи различаются по количеству лопастей:

- однолопастные;
- двухлопастные;
- многолопастные.

Самым распространенным типом являются однолопастные сваи, когда лопасть наварена на конце труб. Такие сваи используются большинством производителей и застройщиков.

Однако в некоторых случаях усилия одной лопасти для достаточной устойчивости сваи может быть недостаточно. Поэтому сваи оснащены дополнительной лопастью, а то и двумя. Обычно их приваривают в центральной части винтовой сваи.

Конструкция винтовых свай многофункциональна: лопасти преобразуют крутящий момент в продольное перемещение при погружении, компенсируют горизонтальные усилия, обеспечивая стабильность геометрии.

Здания максимально разрешенной этажности (3 уровня с мансардой) в малоэтажном строительстве можно строить исключительно на многолопастных винтовых сваях. Для легких построек достаточно однолопастных модификаций с широким винтом либо узкой спиралью наконечника в зависимости от типа грунта.

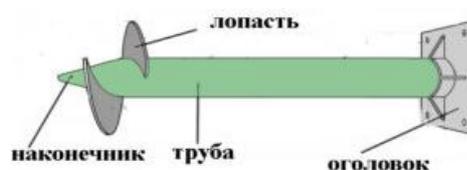
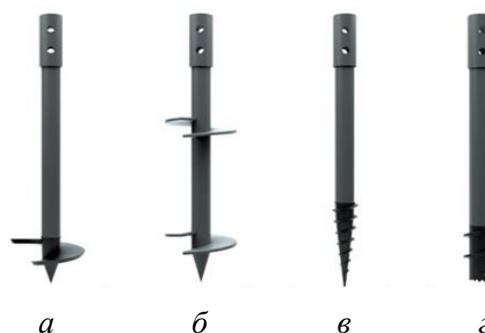


Рисунок 1 Конструкция винтовой сваи



а — широколопастная свая; б — многолопастная свая; в, г — узколопастные сваи

Рисунок 2 Разновидности винтовых свай

Несущую способность винтовой однолопастной сваи диаметром лопасти 1,2 м и длиной 10 м, работающей на вдавливающую или выдергивающую нагрузку, следует определять по формуле

$$F_d = \gamma_c (F_{d0} + F_{df}), \quad (1)$$

где  $\gamma_c$  — коэффициент условий работы сваи, зависящий от вида нагрузки, действующей на сваю, и грунтовых условий;  $F_{d0}$  — несущая способность лопасти, кН;  $F_{df}$  — несущая способность ствола, кН.

При других параметрах, в частности при двух и более лопастях, диаметре лопасти более 1,2 м и длине сваи более 10 м, действии горизонтальной силы или момента несущая способность сваи определяется только по данным испытаний сваи статической нагрузкой и результатам численных расчетов в нелинейной постановке с использованием апробированных моделей грунта.

Опираясь на требования норм к расчету винтовых однолопастных свай, ее несущая способность представляется как сумма сопротивлений грунта под лопастью и по боковой поверхности (рис. 3).

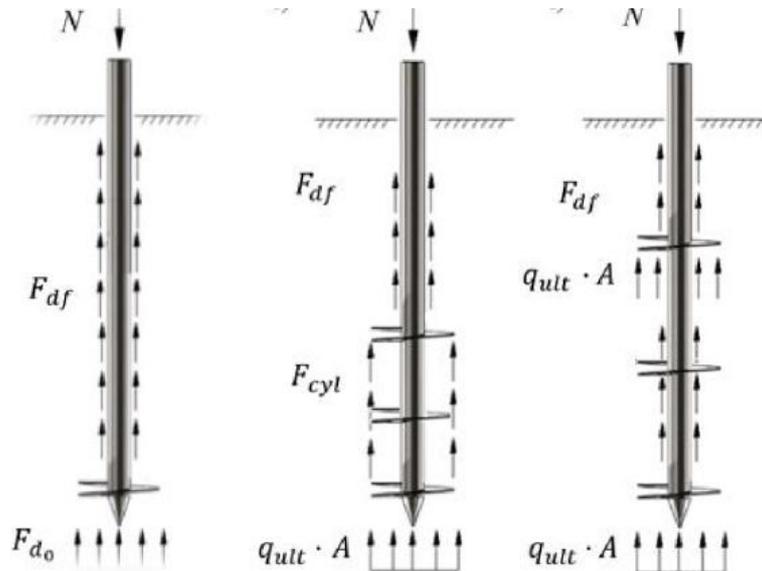


Рисунок 3 Расчетные схемы к определению несущей способности винтовых свай

Несущая способность лопасти винтовой сваи определяется по формуле

$$F_d = (\alpha_1 \cdot c_1 + \alpha_2 \cdot \gamma_1 \cdot h_1) \cdot A, \quad (2)$$

где  $\alpha_1, \alpha_2$  — безразмерные коэффициенты, принимаемые в зависимости от расчетного значения угла внутреннего трения грунта в рабочей зоне  $\varphi_1$  (под рабочей зоной понимается прилегающий к лопасти слой грунта толщиной, равной  $d$ );  $c_1$  — расчетное значение удельного сцепления грунта в рабочей зоне, кПа;  $\gamma_1$  — осредненное расчетное значение удельного веса грунтов, залегающих выше лопасти сваи (при водонасыщенных грунтах с учетом взвешивающего действия воды), кН/м<sup>3</sup>;  $h_1$  — глубина залегания лопасти сваи от природного рельефа, а при планировке территории срезкой — от уровня планировки, м;  $A$  — проекция площади лопасти, считая по наружному диаметру, при работе винтовой сваи на сжимающую нагрузку, м<sup>2</sup>.

Несущая способность ствола винтовой сваи определяется по формуле

$$F_{df} = \gamma_c \cdot u \cdot f_i \cdot (h - d), \quad (3)$$

где  $\gamma_c$  — коэффициент условий работы сваи, зависящий от вида нагрузки, действующей на сваю, и грунтовых условий и определяе-

мый по таблице 7.9 СП 24.13330.2011;  $u$  — периметр поперечного сечения ствола сваи, м;  $f_i$  — расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности ствола винтовой сваи, принимаемое по таблице 7.3 СП 24.13330.2011, кПа;  $h$  — длина ствола сваи, погруженной в грунт, м;  $d$  — диаметр лопасти сваи, м.

На основе исследований [3, 5] по изучению работы ствола винтовых свай установлено, что при вдавливающих нагрузках, действующих на сваю, сопротивление по ее стволу не может быть достигнуто по всей длине сваи из-за эффекта «разуплотнения» грунта над верхней лопастью. Поэтому для расчета принимается, что длина ствола сваи, которая участвует в работе, составляет величину  $(h - d)$ , где  $d$  — диаметр лопасти сваи, м.

Расчет несущей способности по грунту на вдавливающие и выдергивающие нагрузки ведется, по сути, по одной и той же формуле, отличающейся значением коэффициентов условий работы, предложенной на основе проведенных испытаний винтовых свай на вдавливающую и выдергивающую нагрузки. По результатам исследований соотношение между несущей способностью на вдавливание и выдергивание составляет  $F_d = 1,3F_u$ . Несущая спо-

способность винтовых однолопастных свай складывается из несущей способности грунта вдоль ствола  $F_{df}$  и несущей способности грунта в основании нижней лопасти сваи  $F_{d0}$  (рис. 3).

На основе исследований работы многолопастных свай и анкеров установлено, что расстояние между лопастями является важным параметром, характеризующим их работу. По результатам исследований работы винтовых свай-анкеров в слабых глинистых грунтах [6] были предложены две схемы для описания поведения свай в зависимости от расстояния между лопастями. При изучении работы винтовых анкеров длиной от 5 м и более установлено, что при близком расстоянии между лопастями (менее двух диаметров лопасти) грунт, заключенный между лопастями, начинает работать совместно со стволом сваи, мобилизуя силы трения по боковой поверхности образованного таким образом «грунтового цилиндра» (рис. 3).

Для численного исследования работы винтовых свай использован программный комплекс ЛИРА.

В качестве модели материала сваи принималась упругая модель. Моделирование выполнялось в трехмерной постановке в ПК ЛИРА для двухлопастных и однолопастных свай. Для моделирования массива грунта была составлена геометрическая модель размерами  $3 \times 3 \times 6$ , которая разбивалась на трех- и четырехмерные конечные элементы. На рисунке 4 представлена расчетная схема с разбиением на конечные элементы.

Модель сваи заглублена в полутвердую глину на 1,9 м.

В местах максимальной концентрации напряжений и значительных перемещений сетка конечных элементов имела более мелкое разбиение для повышения точности расчета (рис. 4).

Моделировались следующие виды воздействий:

– формирование природных напряжений (формирование начального напряженного состояния);

– пошаговое приложение к винтовой свае вертикального перемещения.

По результатам численных исследований несущей способности винтовых свай в различных инженерно-геологических условиях построены графики зависимости несущей способности винтовых свай от глубины погружения сваи в грунт (рис. 5–7). Расчетom установлено, что на увеличение несущей способности оказывают влияние как характеристики физического состояния грунта, так и глубина погружения сваи в грунт. При погружении сваи в песчаный грунт несущая способность сваи увеличивается в 2,3 раза при увеличении глубины погружения на 1 м (с 2 м до 3 м). Минимальная несущая способность сваи составляет 49 кН при погружении сваи в песок пылеватый. Максимальная несущая способность сваи составляет 110 кН при погружении сваи в песок средней крупности.

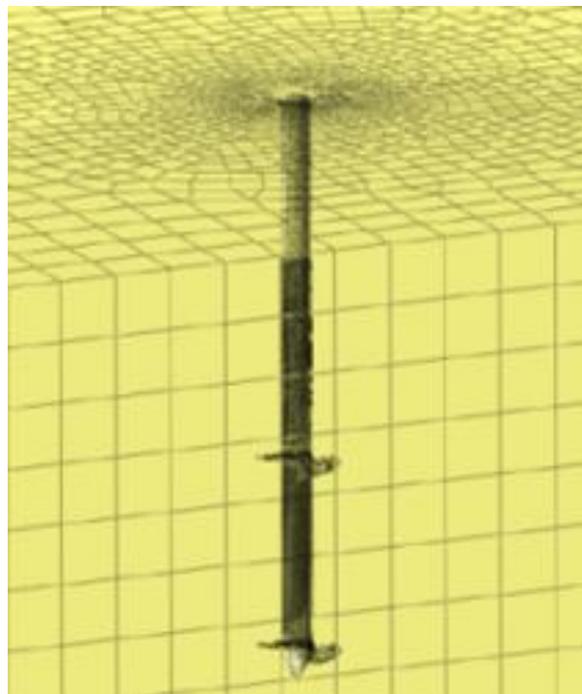


Рисунок 4 Расчетная схема винтовой двухлопастной сваи

На рисунках 5–7 приведен характер изменения несущей способности винтовых свай в зависимости от диаметра свай, глубины погружения сваи в грунт и типа грунта.

Численно установлено, что на увеличение несущей способности винтовой сваи оказывает существенное влияние глубина заделки сваи в грунт. Максимальная несущая способность у сваи диаметром 76 мм при заделке на глубину до 5 м в песок средней крупности составляет 133 кН. В случае погружения сваи в супесь пластичную несущая способность сваи снижается в 2 раза при той же глубине погружения (рис. 7).

Максимальная несущая способность сваи 110 кН наблюдается при погружении ее в песок средней крупности, а минималь-

ная 43 кН — при погружении в лессовые грунты (рис. 8). Однако с увеличением глубины погружения сваи в 2 раза (с 1,5 м до 3 м) несущая способность ее увеличивается в 2 раза в слабых лессовых грунтах и в 1,2 раза — в песках средней крупности.

Кроме того, установлено, что несущая способность винтовых двухлопастных свай длиной 3,0 м и диаметром лопасти 0,3 м в глинистых грунтах превышает несущую способность винтовых однолопастных свай на 28 %.

Таким образом, можно утверждать, что на несущую способность винтовых свай существенное влияние оказывают как геометрические параметры сваи (диаметр сваи, расстояние между лопастями), так и инженерно-геологические условия территории строительства.

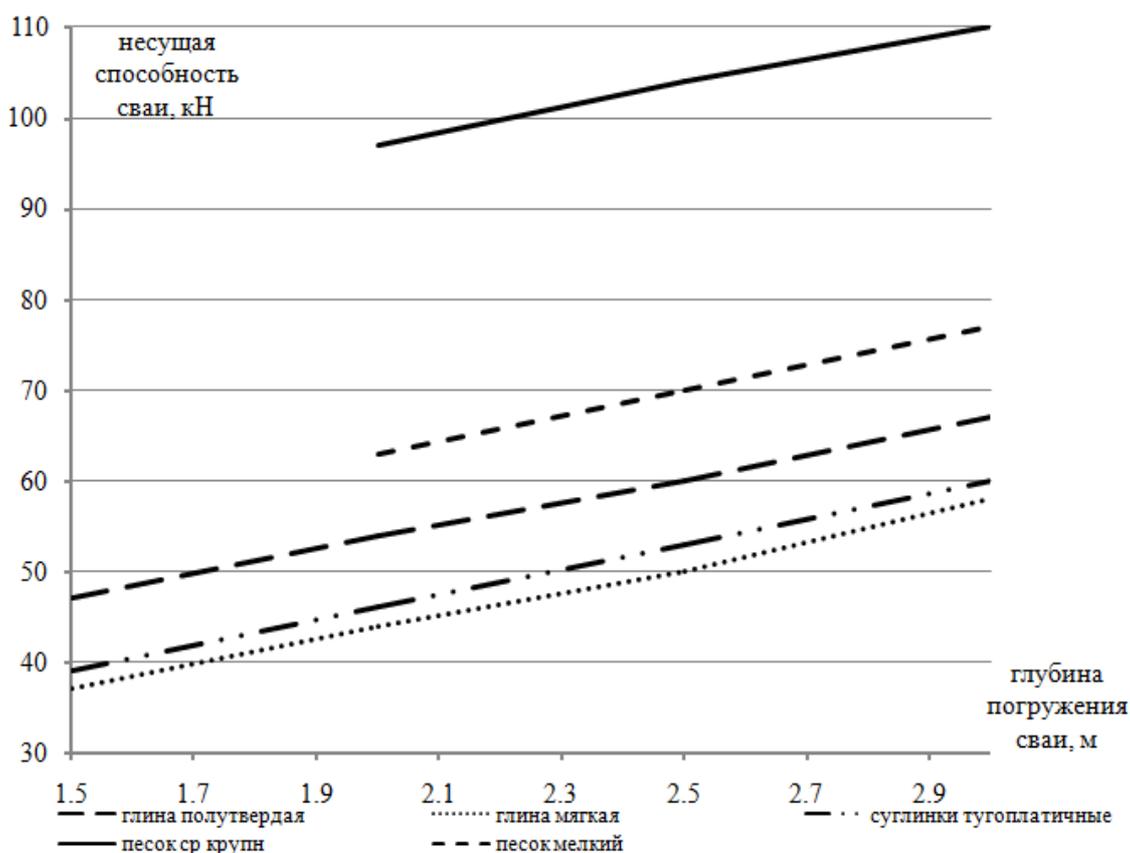


Рисунок 5 Изменение несущей способности винтовой сваи в различных инженерно-геологических условиях

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

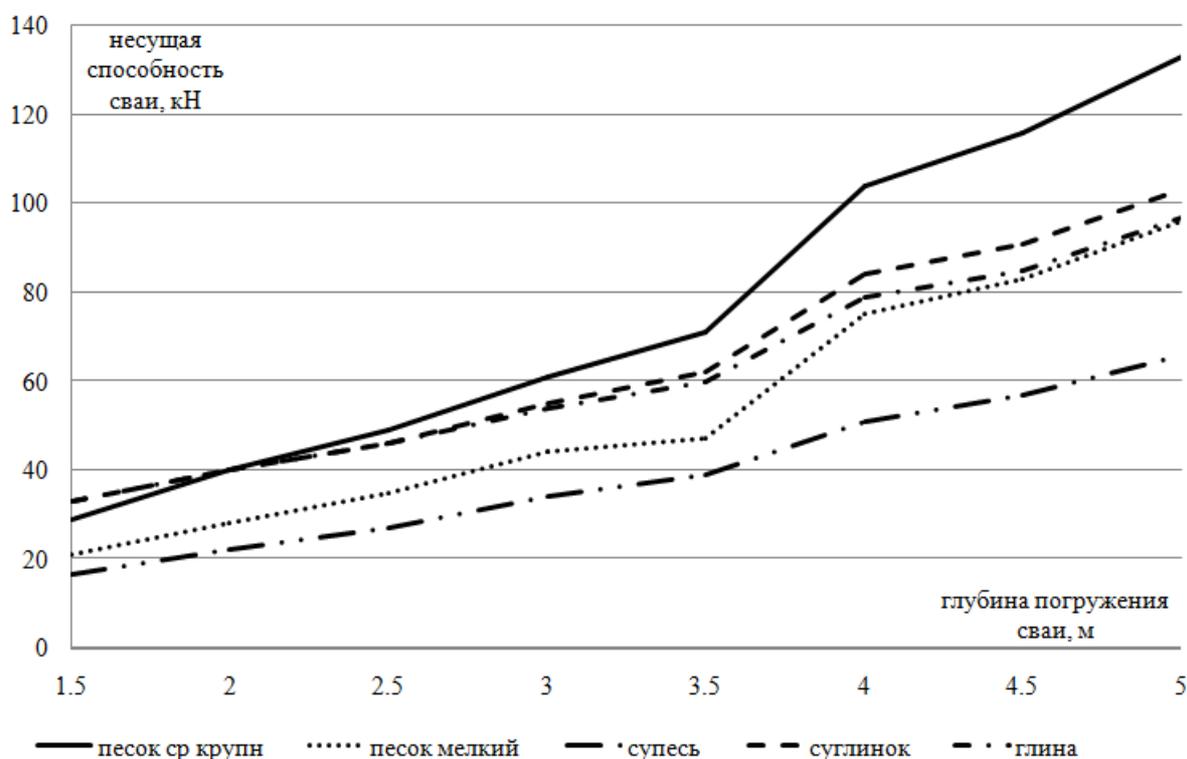


Рисунок 6 Изменение несущей способности винтовой сваи диаметром 89 мм в различных инженерно-геологических условиях

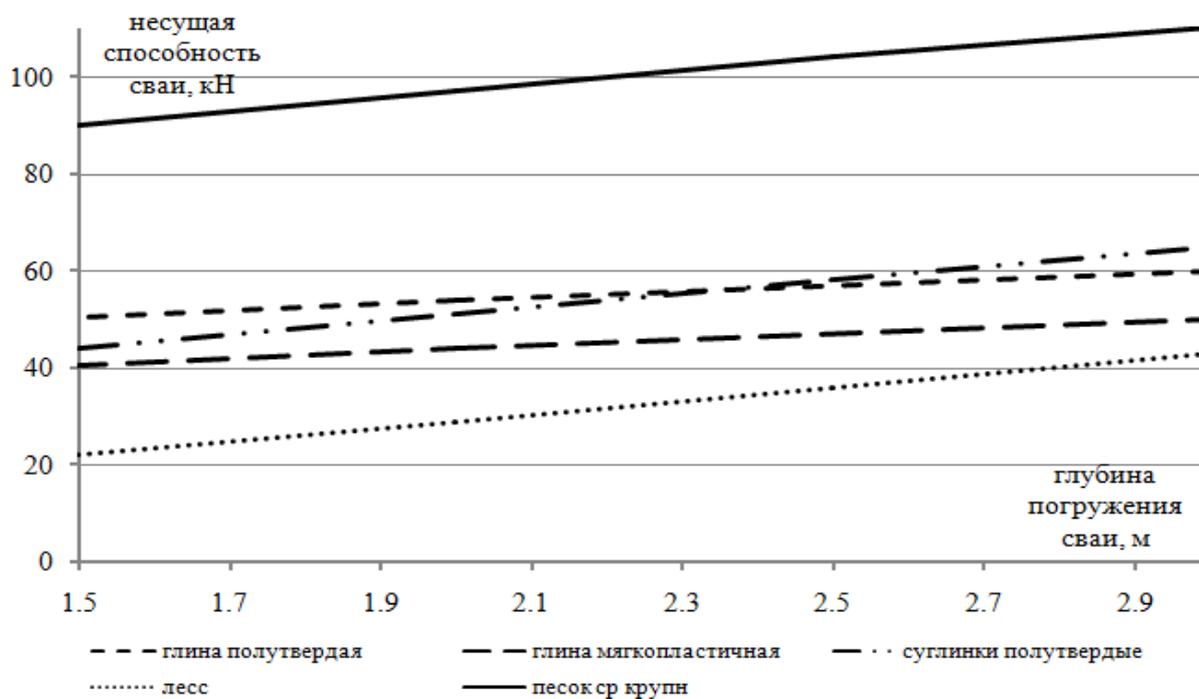


Рисунок 7 Изменение несущей способности винтовой сваи диаметром 76 мм в различных инженерно-геологических условиях

**Выводы:**

1. Несущая способность винтовой сваи зависит от трех основных параметров: диаметра трубы, ширины лопасти и глубины погружения в грунт.

2. При увеличении глубины погружения сваи в прочный грунт с 1,5 м до 5 м ее несущая способность увеличивается почти в 4,5 раза.

3. Численно установлено, что при длине винтовых свай до 3,0 м и диаметре ло-

пасти 0,3 м рациональное расстояние между лопастями в глинистых грунтах составляет 2,0...2,5 диаметра лопасти.

В статье приведены результаты исследования несущей способности только одно- и двухлопастных винтовых свай. Дальнейшие исследования будут направлены на исследование несущей способности винтовых свай с резьбовыми наконечниками.

**Библиографический список**

1. СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 [Текст]. — Введ. 2011-05-20. — М. : АО НИЦ «Строительство», 2011. — 162 с.
2. Корниенко, М. В. Расчет несущей способности вдавливаемых свай с одним и двумя уширениями [Текст] / М. В. Корниенко, О. Б. Пресняков, О. И. Балакишин. — М. : ГНИИСК, 2012. — С. 146–153.
3. Хрянина, О. В. Факторы, влияющие на несущую способность свай в пробитых скважинах [Текст] / О. В. Хрянина // Современные научные исследования и инновации. — 2015. — № 6. — Ч. 1. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues>.
4. Максимов, Ф. А. Исследования совместной работы двухлопастной винтовой сваи с грунтом в лабораторных условиях [Текст] / Ф. А. Максимов, Е. Н. Серебренникова, М. М. Скоморохов // Геотехника: теория и практика : сборник научных статей конференции. — Краснодар : Изд-во СПБГАСУ, 2013. — С. 52–55.
5. Максимов, Ф. А. Оценка работы боковой поверхности ствола винтовой металлической сваи в глинистом грунте [Текст] / Ф. А. Максимов // Вестник ЮургУ. Серия : Строительство и архитектура. — 2017. — Т. 17. — № 3. — С. 5–11.
6. Максимов, Ф. А. Совершенствование конструкции и методов расчета винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.02 / Максимов Федор Александрович. — Краснодар : ФГБОУ ВО «Кубанский ГАУ», 2018. — 23 с.

© Емец Е. В.© Карапетян С. Х.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. АДиСК ДонГТИ Бондарчуком В. В., к.т.н., доц., зав. каф. СА ф-та экономики и бизнеса ЛГУ им. В. Даля Псюком В. В.*

*Статья поступила в редакцию 25.02.2022.*

**PhD in Engineering Emets E. V., Karapetyan S. Kh. (LSU named after V. Dahl, Alchevsk, LPR)**  
**ASSESSMENT OF THE BEARING CAPACITY OF SCREW PILES OF VARIOUS DESIGNS IN LOAM SOILS**

*The work is devoted to the assessment of the bearing capacity of screw piles of various designs and the selection of an optimally acceptable pile design in specific engineering and geological conditions.*

**Key words:** *single- and double-bladed screw piles, stress-strain state, bearing capacity, finite element method.*

УДК 688.77:692.432:727.3

к.т.н. Николаева Е. К.,  
к.т.н. Псюк В. В.,  
Коняшкина О. А.

(ЛГУ им. В. Даля, г. Алчевск, ЛНР, ledilenanik@gmail.com)

## УСТРОЙСТВО ПЛОЩАДКИ ОТДЫХА НА КРЫШЕ ЛАБОРАТОРНОГО КОРПУСА ДонГТИ

*Предложен вариант реорганизации неэксплуатируемого совмещённого покрытия лабораторного корпуса ДонГТИ в площадку отдыха. Приведены результаты теоретических исследований, в ходе которых получены фактическое значение сопротивления теплопередаче существующего совмещённого покрытия и значение сопротивления теплопередаче эксплуатируемого покрытия с устройством площадки отдыха.*

**Ключевые слова:** совмещённое покрытие, эксплуатируемое покрытие, экстенсивное озеленение, теплотехнический расчёт.

Плоская крыша представляет собой значительную по площади часть здания, которая может выполнять не только защитные, но и рекреационные функции, выступив в роли искусственного основания для озеленённых эксплуатируемых объектов. В зависимости от площади крыши на ней можно расположить игровые площадки, зоны для отдыха и релаксации, растения и деревья, дороги и парковки, спортивные тренажёры, зимний сад или оранжерею. При этом устройство озеленённых и эксплуатируемых покрытий даёт следующие преимущества:

- увеличение полезной площади при сохранении исторической застройки;
- улучшение микроклимата;
- создание условий для отдыха горожан в природном окружении;
- обогащение архитектурно-художественного облика города;
- экономия энергии на отопление и кондиционирование за счёт улучшения теплотехнических характеристик совмещённого покрытия.

Такой способ облагораживания и улучшения эстетики зданий был известен ещё с древних времен. История зелёных садов на крышах домов началась несколько тысяч лет назад. Первые из них были построены в Вавилоне. Самым известным садовым ком-

плексом можно считать сады Семирамиды — одно из семи чудес света. Далее эту технологию продолжили зодчие Греции, Рима, а потом и всей Западной Европы.

Современные технологии озеленения крыш появились в Германии в 1960-е и в последующие десятилетия распространились по разным странам. По сегодняшним оценкам, около 10 % всех крыш в Германии озеленены. В ряде европейских стран, включая Германию, Швейцарию, Нидерланды, Норвегию, Италию, Австрию, Венгрию, Швецию, Великобританию и Грецию, существуют ассоциации, активно продвигающие идею озеленения крыш. В городе Линц в Австрии работы девелоперов по озеленению крыш с 1983 года оплачиваются муниципалитетом, а в Швейцарии федеральный закон о «зелёных крышах» введён в действие с конца 1990-х. В Великобритании тенденция набирает официальные обороты медленнее. Тем не менее в ряде городов, включая Лондон и Шеффилд, были разработаны законы, поощряющие озеленение крыш [1].

В Российской Федерации зелёные крыши были узаконены только в 2017 году, когда Минстрой России издал Приказ № 711/пр [2], который разрешил использовать сады на крышах в качестве благоустроенной территории, хотя документы реко-

мендательного характера публиковались гораздо ранее [3, 4]. А с 1 июня 2020 года в России вступил в силу первый комплексный нормативный документ, регламентирующий строительство зелёных крыш — Национальный стандарт ГОСТ Р 58875–2020 «Озеленяемые и эксплуатируемые крыши зданий и сооружений. Технические и экологические требования» [5]. Все положения нового документа объединены общей идеей — создать безопасную и здоровую среду обитания человека. ГОСТ Р 58875 распространяется на проектирование, строительство озеленяемых крыш, ремонт, реконструкцию и эксплуатацию озеленённых и эксплуатируемых конструкций на крышах зданий и сооружений различного функционального назначения во всех климатических зонах РФ. Выполнение требований ГОСТ Р 58875–2020 позволит полнее использовать преимущества зелёных крыш, в том числе и энергосберегающие. В экологическом отчёте ООН утверждается, что «зелёные» кровли могут значительно сократить расход энергии на кондиционирование и отопление в новых и существующих зданиях. Например, плоская крыша калифорнийской Академии наук в Сан-Франциско превращена в сплошную зелёную зону площадью 2,5 акра. Академики гордятся своим пристанищем и хвастаются, что на обогрев здания, благодаря «зелёной» верхушке, уходит на 35 % меньше энергии [6].

Учитывая вышеизложенный материал, авторы предлагают руководству ДонГТИ внедрить мировую практику озеленения и эксплуатации плоских крыш. А в качестве объекта эксперимента рекомендуется выбрать крышу входной части лабораторного корпуса (рис. 1), что объясняется её небольшой высотой (4 м) и доступностью (выход на неё расположен в торце коридора второго этажа лабораторного корпуса).

Немаловажную роль в выборе объекта эксперимента играет непрезентабельный вид, открывающийся из окон главного корпуса на асфальтово-чёрную плоскость покрытия входной зоны лабораторного корпуса.

Создание эксплуатируемых покрытий связано с расчётом несущих конструкций на статическую нагрузку и получением разрешения в строительных и архитектурных органах местного самоуправления. В идеале решение об организации эксплуатируемой кровли необходимо принимать ещё на этапе планирования всего здания. В этом случае возможно проведение всех расчётов возможных нагрузок на фундамент и элементы несущей конструкции. Но вполне реален монтаж зелёной эксплуатируемой кровли на этапе функционирования здания. В этом случае порядок работ при устройстве площадки отдыха на крыше эксплуатируемого здания будет следующий:

- статическое обследование инженером-расчётчиком плоской крыши;
- разработка проектного решения и получение разрешения на его строительство;
- теплотехнический расчёт покрытия;
- усиление несущей конструкции крыши (при необходимости);
- устройство конструктивных слоёв эксплуатируемой крыши;
- устройство вегетационных слоёв крыши;
- обустройство площадки.

Авторами была поставлена задача оценить преимущества устройства площадки отдыха на крыше входной зоны лабораторного корпуса ДонГТИ.

Для решения поставленной задачи необходимо провести следующие исследования:

- разработать проектные предложения по планировке площадки отдыха на крыше лабораторного корпуса с указанием основного состава оборудования;
- выбрать оптимальный материал для утепления эксплуатируемого покрытия лабораторного корпуса;
- выполнить расчёты по определению фактического значения сопротивления теплопередаче существующего покрытия и теоретического значения приведенного сопротивления теплопередаче покрытия с утеплителем.



Рисунок 1 Входная зона лабораторного корпуса ДонГТИ

Проектное предложение благоустройства крыши представлено на рисунке 2. Предлагаемое композиционное решение основано на асимметричной композиции, состоящей из двух взаимодополняющих частей: зелёные насаждения и мощение.

В качестве малых архитектурных форм предлагаются деревянные лавочки со спинками, перголы для защиты от солнца и создания уютной атмосферы, кадки с растениями (рис. 3) [7].

Взамен традиционного конструктивного решения существующей кровли предлагается применить инверсионную кровлю, при устройстве которой утеплитель располагают поверх гидроизоляции. Такая технология лучше всего обеспечивает долговечность и надежность гидроизоляции.

Конструктивные слои инверсионной кровли следующие:

- бетонное покрытие;
- цементная стяжка с уклоном 1,5–5 % в сторону водостока;
- гидроизоляция (ПВХ-мембраны, еврорубероид, мастики);
- утеплитель из водонепроницаемых плит повышенной жёсткости, которые укладывают поверх гидроизоляции свободно, без закрепления;
- разделительный слой из полипропиленового геотекстильного материала препятствует прорастанию корней в нижележащие слои.

Состав вегетационных слоёв кровли зависит от степени эксплуатации объекта: экстенсивная кровля или интенсивная кровля-сад.

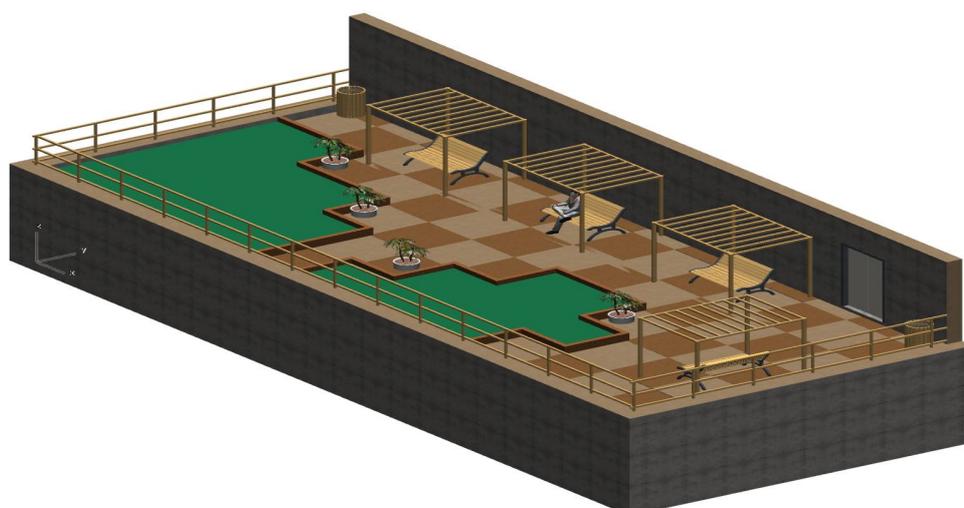


Рисунок 2 Проектное предложение благоустройства крыши



Рисунок 3 МАФ для площадки отдыха сотрудников ДонГТИ

Экстенсивный и полукстенсивный способы используются на крышах уже эксплуатируемых зданий и подразумевают наложение небольшого по толщине слоя из различных видов изоляций, дренажа, субстрата почвы. Созданный таким образом сад обычно представляет собой или невысокий газон, или же многолетники с луковичной корневой системой. В экстенсивном озеленении используются мхи, суккуленты, другие растения, не требующие особого ухода и устойчивые к заморозкам, ветрам, жаре (рис. 4). При расчё-

тах нагрузки за усредненный вес принимается показатель в  $170 \text{ кг/м}^2$ , при этом существуют варианты и с меньшим весом.

Пример экстенсивного озеленения — кровля на здании ОВД «Дорогомилово»: эксплуатируемая кровля отделения полиции имеет небольшой участок газона с высаженным мелким кустарником (рис. 5).

Таким же экономным способом озеленил небольшую крышу одноэтажной пристройки Научно-исследовательский институт интроскопии МНПО «Спектр», который находится на улице Усачева (рис. 6).



Рисунок 4 Экстенсивное озеленение площадки отдыха



Рисунок 5 Эксплуатируемая кровля отделения полиции (г. Москва)



Рисунок 6 Крыша одноэтажной пристройки Научно-исследовательского института интроскопии МНПО «Спектр» (г. Москва)

При интенсивном способе оформления сады выглядят гораздо разнообразнее: кустарники, цветы, карликовые деревья и даже водоёмы. Эти ландшафтные объекты позволяют создать полноценное пространство для развлечений и отдыха. Такой метод предполагает произведение всех необходимых расчётов ещё на этапе проектирования или строительства здания, так как предполагается, что средняя нагрузка на  $1 \text{ м}^2$  составит 350 килограммов [8]. Кроме того, такое озеленение нуждается в постоянном профессиональном техническом обслуживании.

Учитывая современные экономические особенности учреждений высшего образования ЛНР, предлагается на первоначальном этапе озеленения крыш ДонГТИ выбрать экстенсивный способ с отдельным дренажным слоем.

Для проверки несущей способности плиты покрытия необходимы значения

толщин слоёв кровли. Для определения толщины утеплителя авторами проведён теплотехнический расчёт существующего совмещенного покрытия двух видов: традиционное решение 50-х гг. прошлого века и современное решение при устройстве эксплуатируемой кровли.

Базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче наружной ограждающей конструкции определялось в зависимости от градусо-суток отопительного периода района строительства (ГОСП) и назначения здания. Величина градусо-суток отопительного периода для г. Алчевска составляет:

$$ГОСП = (t_g - t_{om}) \cdot z_{om}, \quad (1)$$

где  $t_{om}$ ,  $z_{om}$  — средняя температура наружного воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ ) и продолжительность (сут/год) отопительного периода для периода со среднесуточной температурой наружного воздуха не более  $8^{\circ}\text{C}$ ;

$t_g$  — расчётная температура внутреннего воздуха здания ( $^{\circ}\text{C}$ ), принятая как минимальное значение оптимальной температуры для помещений категории 3а [9, 10];

$$ГОСП = (20 - (-0,8)) \cdot 172 = 3578.$$

Тогда базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче совмещённого покрытия составит:

$$R_o^{mp} = ГОСП \cdot a + b, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$  — переводные коэффициенты, для совмещённых покрытий общественных зданий соответственно равны 0,0004 и 1,6 [9];

$$R_o^{mp} = 3578 \cdot 0,0004 + 1,6 = 3,03 \frac{\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{Вт}}.$$

Расчётные теплотехнические показатели строительных материалов существующего совмещённого покрытия входной зоны лабораторного корпуса ДонГТИ (покрытие № 1) приняты в зависимости от условий эксплуатации по приложению Т [9]:

1) железобетонная многпустотная плита толщиной 220 мм: плотность  $2500 \text{ кг/м}^3$ , приведенное сопротивление теплопередаче по предварительному расчёту составляет  $0,162 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ ;

2) утепление — граншлак: толщина слоя 150 мм, плотность  $800 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $0,21 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;

3) цементно-песчаный раствор: толщина слоя 20 мм, плотность  $1800 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $0,76 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;

4) трехслойный рубероидный ковер: толщина слоя 12 мм, плотность  $600 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $0,17 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ .

Тогда термическое сопротивление конструкции покрытия с последовательно расположенными слоями:

$$R_k = R_{nl} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4}, \quad (3)$$

где  $R_{nl}$  — приведенное сопротивление теплопередаче многпустотной железобетонной плиты покрытия,  $\text{м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ ;

$\delta_i$  — толщина слоя, м;

$\lambda_i$  — коэффициент теплопроводности материала слоя,  $\text{Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;

$$R_k = 0,162 + \frac{0,15}{0,21} + \frac{0,02}{0,76} + \frac{0,012}{0,17} = 0,973 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

Приведенное сопротивление теплопередаче совмещенного покрытия  $R_o$  с учётом коэффициентов теплоотдачи наружной и внутренней поверхностей составит:

$$R_o = \frac{1}{\alpha_g} + R_k + \frac{1}{\alpha_n}, \quad (4)$$

где  $\alpha_g$ ,  $\alpha_n$  — коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхности покрытий зданий [9];

$$R_o = \frac{1}{8,7} + 0,973 + \frac{1}{23} = 1,131 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

Таким образом, существующее конструктивное решение покрытия лабораторного корпуса ДонГТИ категорически не удовлетворяет требованиям энергосбережения, поскольку  $R_o$  меньше  $R_o^{mp}$  более чем в 2,5 раза:

$$R_o = 1,131 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}} < R_o^{mp} = 3,03 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

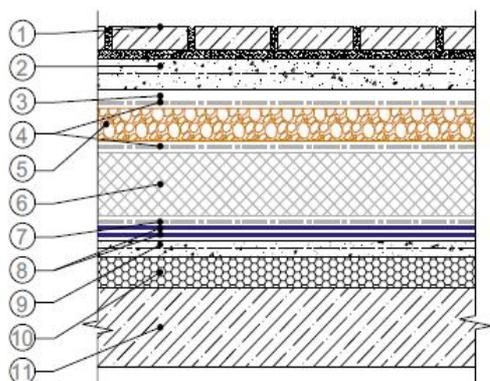
Устройство утепленной эксплуатируемой крыши может стать одним из путей решения этой проблемы.

Для конструктивного решения крыши под пешеходную нагрузку (покрытие № 2) принята система ТН-КРОВЛЯ Тротуар [4], которая включает следующие слои (в порядке их укладки): плита покрытия, уклонообразующий слой с уклоном 1,5 %, армированная цементно-песчаная стяжка, гидроизоляция — Техноэласт ЭПП в два слоя, разделительный слой — иглопробивной геотекстиль ТехноНИКОЛЬ развесом  $300 \text{ г/м}^2$ , утеплитель — экструзивный пенополистирол XPS CARBON 35-300 СТАНДАРТ, разделительный слой — термоскрепленный геотекстиль ТехноНИКОЛЬ развесом  $150 \text{ г/м}^2$ , дренажный слой из гравия минимальной толщиной 40 мм, два разделительных слоя для защиты гравия от цементного молочка — термоскрепленный геотекстиль ТехноНИКОЛЬ развесом  $150 \text{ г/м}^2$  и пергамин, затем армированная цементно-песчаная стяжка толщиной не менее 30 мм и тротуарная плитка толщиной не менее 40 мм (рис. 7).

Для безопасности в проекте будут предусмотрены защитные ограждения, парапеты и прочие элементы, призванные защитить здоровье и жизнь сотрудников ДонГТИ.

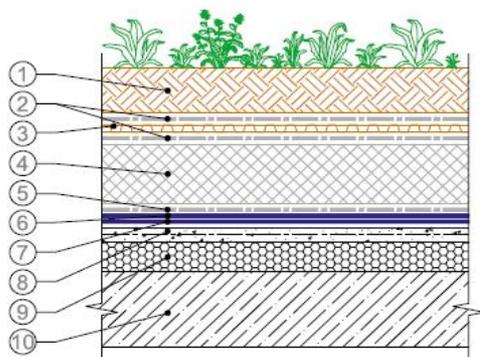
Конструктивное решение зелёной части крыши с применением лёгкого озеленения (покрытие № 3) в соответствии с [4] следующее: плита покрытия, уклонообразующий слой с уклоном 1,5 %, армированная цементно-песчаная стяжка, Техноэласт ЭПП, Техноэласт ГРИН, иглопробивной геотекстиль ТехноНИКОЛЬ развесом  $300 \text{ г/м}^2$ , утеплитель — экструзивный пенополистирол

XPS CARBON 30-280 СТАНДАРТ, дренажная мембрана PLANTER life, термоскрепленный геотекстиль ТехноНИКОЛЬ развесом  $150 \text{ г/м}^2$ , растительный субстрат с зелеными насаждениями (рис. 8).



1 — тротуарная плитка; 2 — армированная цементно-песчаная стяжка; 3 — кровельный картон (пергамин); 4 — термоскрепленный геотекстиль ТехноНИКОЛЬ развесом  $150 \text{ г/м}^2$ ; 5 — дренажный слой из гравия; 6 — экструзивный пенополистирол ТехноНИКОЛЬ; 7 — иглопробивной геотекстиль ТехноНИКОЛЬ развесом  $300 \text{ г/м}^2$ ; 8 — Техноэласт ЭПП; 9 — армированная цементно-песчаная стяжка; 10 — уклонообразующий слой; 11 — плита покрытия

Рисунок 7 Система ТН-КРОВЛЯ Тротуар



1 — растительный субстрат с зелеными насаждениями; 2 — термоскрепленный геотекстиль ТехноНИКОЛЬ развесом  $150 \text{ г/м}^2$ ; 3 — дренажная мембрана PLANTER life; 4 — экструзивный пенополистирол ТехноНИКОЛЬ; 5 — иглопробивной геотекстиль ТехноНИКОЛЬ развесом  $300 \text{ г/м}^2$ ; 6 — Техноэласт ГРИН; 7 — Техноэласт ЭПП; 8 — армированная цементно-песчаная стяжка; 9 — уклонообразующий слой; 10 — плита покрытия

Рисунок 8 Система ТН-КРОВЛЯ Грин

Расчётные теплотехнические показатели строительных материалов крыши под пешеходную нагрузку приняты в соответствии с нормативными документами [9] и с учётом характеристик материалов, заявленных производителем [11]:

1) железобетонная многпустотная плита толщиной 220 мм, плотность  $2500 \text{ кг/м}^3$ , приведенное термическое сопротивление  $0,162 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$ ;

2) керамзитовый гравий: минимальная толщина слоя 20 мм, плотность  $400 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $0,130 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;

3) цементно-песчаный раствор: толщина слоя 40 мм, плотность  $1800 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $0,76 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;

4) Техноэласт ЭПП: общая толщина двух слоёв 8 мм, масса  $4,95 \text{ кг/м}^2$  [11], коэффициент теплопроводности производителями не заявлен;

5) иглопробивной геотекстиль ТехноНИКОЛЬ  $300 \text{ кг/м}^2$ : толщина слоя 0,8 мм, коэффициент теплопроводности не заявлен;

6) экструзивный пенополистирол XPS CARBON 35-300 СТАНДАРТ: толщина слоя определяется теплотехническим расчётом, плотность  $35\text{--}45 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $0,031 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;

7) термоскрепленный геотекстиль ТехноНИКОЛЬ  $150 \text{ кг/м}^2$ : толщина слоя 0,8 мм, коэффициент теплопроводности не заявлен;

8) керамзитовый гравий фракцией 10–20 мм: толщина слоя 40 мм, плотность  $400 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $0,130 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;

9) термоскрепленный геотекстиль ТехноНИКОЛЬ  $150 \text{ кг/м}^2$ : толщина слоя 0,8 мм, коэффициент теплопроводности не заявлен;

10) пергамин: толщина слоя 1,5 мм, плотность  $600 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $0,17 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;

11) цементно-песчаный раствор: толщина слоя 30 мм, плотность  $1800 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент теплопроводности  $0,76 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;

12) плитка клинкерная: толщина слоя 40 мм, удельный вес  $27 \text{ кг/м}^2$ , коэффициент теплопроводности  $1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ .

Для определения необходимой толщины экструзивного пенополистирола найдём требуемое термическое сопротивление утеплителя в составе эксплуатируемой кровли под пешеходную нагрузку:

$$R_{ym}^{mp} = R_o^{mp} - (R_e + R_n + R_{k\delta y}) =$$

$$= R_o^{mp} - \left( \frac{1}{\alpha_e} + \frac{1}{\alpha_n} + R_{k\delta y} \right), \quad (5)$$

где  $R_e$  — сопротивление теплообмену на внутренней поверхности;

$R_n$  — сопротивление теплообмену на наружной поверхности;

$R_{k\delta y}$  — сумма термических сопротивлений всех слоёв эксплуатируемой кровли под пешеходную нагрузку без слоя утеплителя;

$$R_{ym}^{mp} = 3,03 - \left( \frac{1}{8,7} + \frac{1}{23} + 0,162 + \frac{0,02}{0,13} + \frac{0,04}{0,76} + \frac{0,04}{0,13} + \frac{0,0015}{0,17} + \frac{0,03}{0,76} + \frac{0,04}{1} \right) =$$

$$= 2,107 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

Тогда необходимая расчётная толщина экструзивного пенополистирола составит:

$$\delta_{ym}^{mp} = \lambda_{ym} \cdot R_{ym}^{mp}, \quad (6)$$

$$\delta_{ym}^{mp} = 0,032 \cdot 2,107 = 0,067 \text{ м}.$$

С учётом промышленных размеров экструзивного пенополистирола принимаем общую толщину утеплителя 80 мм, а с учётом требуемой технологии укладки утеплителя — два слоя по 40 мм.

Тогда приведенное сопротивление теплопередаче эксплуатируемой кровли под пешеходную нагрузку составит:

$$R_o = R_e + R_n + R_k, \quad (7)$$

$$R_o = \frac{1}{8,7} + \frac{1}{23} + 0,16 + \frac{0,02}{0,13} + \frac{0,04}{0,76} +$$

$$+ \frac{0,04}{0,13} + \frac{0,0015}{0,17} + \frac{0,03}{0,76} + \frac{0,04}{1} + \frac{0,08}{0,031} =$$

$$= 3,504 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

$$R_o = 3,504 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}} > R_o^{Tp} = 3,03 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

Таким образом, при устройстве над входом лабораторного корпуса эксплуатируемой кровли под пешеходную нагрузку достаточно двух слоёв экструзивного пенополистирола по 40 мм. Общая толщина кровельных слоёв эксплуатируемого покрытия составит 262 мм.

Расчётные показатели строительных материалов зелёной части крыши с применением лёгкого озеленения (покрытие № 3) [9, 11]:

1) железобетонная многоспустотная плита толщиной 220 мм, плотность 2500 кг/м<sup>3</sup>;

2) керамзитовый гравий: минимальная толщина слоя 20 мм, плотность 400 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности 0,130 Вт/(м·°C);

3) цементно-песчаный раствор: толщина слоя 40 мм, плотность 1800 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности 0,76 Вт/(м·°C);

4) Техноэласт ЭПП: толщина слоя 4 мм, коэффициент теплопроводности не заявлен;

5) Техноэласт ГРИН: толщина слоя 4 мм, коэффициент теплопроводности не заявлен;

6) иглопробивной геотекстиль ТехноНИКОЛЬ 300 кг/м<sup>2</sup>: толщина слоя 0,8 мм, коэффициент теплопроводности не заявлен;

7) экструзивный пенополистирол XPS CARBON 35-300 СТАНДАРТ: толщина слоя определена теплотехническим расчётом для покрытия под пешеходную нагрузку — 80 мм, плотность 35–45 кг/м<sup>3</sup>, коэффициент теплопроводности 0,031 Вт/(м·°C);

8) термоскрепленный геотекстиль ТехноНИКОЛЬ 150 кг/м<sup>2</sup>: толщина слоя 0,8 мм, коэффициент теплопроводности не заявлен;

9) дренажная мембрана PLANTER life: толщина выступов 8 мм;

10) термоскрепленный геотекстиль ТехноНИКОЛЬ 150 кг/м<sup>2</sup>: толщина слоя 0,8 мм, коэффициент теплопроводности не заявлен;

11) растительный субстрат: толщина слоя для сохранения одинаковой толщины покрытий № 2 и № 3 — 104 мм.

Толщина растительного субстрата в 104 мм достаточна для высадки и нормальной жизнедеятельности почвопокровных трав (очиток, молодило) [3], создающих сплошное зелёное покрытие.

Наличие разграничительных бортиков между покрытиями № 2 и № 3 позволяет при необходимости увеличить толщину растительного субстрата.

#### Выводы:

1. Сегодня озеленение крыш становится всё более и более актуальным, так как позволяет рационально использовать горизонтальную поверхность зданий, вносит весомый вклад в улучшение экологии города, обеспечивает экономию энергии на отопление и кондиционирование за счёт улучшения теплотехнических характеристик совмещённого покрытия.

2. Существующее конструктивное решение совмещённого покрытия лабораторного корпуса ДонГТИ категорически не удовлетворяет требованиям энергосбережения, поскольку  $R_o$  меньше  $R_o^{mp}$  более чем в 2,5 раза:

$$R_o = 1,131 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}} < R_o^{mp} = 3,03 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}{\text{Вт}}.$$

#### Библиографический список

1. Озеленение крыш [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki>.
2. Об утверждении методических рекомендаций для подготовки правил благоустройства территорий поселений, городских округов, внутригородских районов [Текст] : Приказ от 13 апреля 2017 г. № 711/пр. — М. : Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2017. — 48 с.
3. Рекомендации по проектированию озеленения и благоустройства крыш жилых и общественных зданий и других искусственных оснований [Текст]. — Введ. 2021-01-01. — М. : Москомархитектура, 2021. — 64 с.
4. Руководство по проектированию и устройству эксплуатируемых и зеленых кровель из битумно-полимерных материалов компании «ТехноНИКОЛЬ». — Корпорация ТехноНИКОЛЬ, 2012. — 136 с.

А в совокупности с теплотехнически неэффективными стенами [12] в холодное время года это создает крайне негативную микроклиматическую ситуацию.

3. Исходя из результатов сравнительного теплотехнического расчёта неэксплуатируемого покрытия лабораторного корпуса ДонГТИ (покрытие № 1) и того же покрытия, реорганизованного в эксплуатируемую кровлю (покрытие № 2), видно, что приведенное сопротивление теплопередаче покрытия № 2 (3,504 м<sup>2</sup>·°C/Вт) значительно больше, чем в покрытии № 1 (1,131 м<sup>2</sup>·°C/Вт), т. е. увеличение приведенного сопротивления теплопередаче покрытия составляет 2,373 м<sup>2</sup>·°C/Вт, что соответствует 210 % от первоначального значения. Это говорит о высокой эффективности применения предлагаемого варианта обустройства крыши лабораторного корпуса.

4. На основе полученных результатов исследования установлено, что устройство эксплуатируемой площадки отдыха на крыше лабораторного корпуса ДонГТИ возможно и целесообразно.

Однако имеется необходимость проведения дополнительных исследований:

- по оценке несущей способности строительных конструкций существующей кровли для устройства эксплуатируемого покрытия;
- по оценке теплотехнических характеристик элементов покрытия эксплуатируемой кровли.

5. ГОСТ Р 58875-2020. Зеленые стандарты. Озеленяемые и эксплуатируемые крыши зданий и сооружений. Технические и экологические требования. — Введ. 2020-06-01. — М. : Стандартинформ, 2020. — 49 с.

6. Зеленые кровли [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [http://www.topclimat.ru/publications/zelenye\\_kryshi](http://www.topclimat.ru/publications/zelenye_kryshi).

7. Озеленение крыш [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://kryshadoma.com/vidy-krovli-kryshi/ozelenenie-krysh-osobennosti-konstruktsii>.

8. Зеленые крыши [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://gidproekt.com/ustrojstvo-zelenoj-krovli-konstrukciya-vidy-dostoinstva-i-nedostatki-ozeleneniya-kryshi>.

9. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий [Текст]. — Введ. 2012-01-01. — М. : ОАО «Аналитик», 2012. — 96 с.

10. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях [Текст]. — Введ. 2013-01-01. — М. : Стандартинформ, 2013. — 11 с.

11. Каталог. Гидроизоляция [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.tn.ru/catalogue/gidroizolyatsionnye-materialy>.

12. Николаева, Е. К. Термомодернизация наружных стен лабораторного корпуса ДонГТУ [Текст] / Е. К. Николаева, Е. В. Гречишкина // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — Вып. 16 (59). — С. 61–66.

© Николаева Е. К.

© Псюк В. В.

© Коняшкина О. А.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. СиА ЛГУ им. В. Даля Емец Е. В., к.т.н., доц., зав. каф. АДиСК ДонГТИ Бондарчук В. В.*

*Статья поступила в редакцию 24.02.2022.*

**PhD in Engineering Nikolaeva E. K., PhD in Engineering Psiuk V. V., Koniashkina O. A.**

*(LSU named after V. Dahl, Alchevsk, LPR, ledilenanik@gmail)*

#### **SETTING UP A RECREATION AREA ON THE ROOF OF THE DonSTI LABORATORY BUILDING**

*A variant for reorganizing the unexploited combined coating of the DonSTI laboratory building into a recreation area is proposed. The results of theoretical studies are presented, during which the actual value of the heat transfer resistance of the existing combined coating and the value of the heat transfer resistance of the operated coating with the device of the recreation area are obtained.*

**Key words:** *combined coating, exploited coating, extensive landscaping, thermal engineering calculation.*



**МАШИНОСТРОЕНИЕ  
И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

---

**MECHANICAL ENGINEERING  
AND MACHINE SCIENCE**



УДК 536.46+662.611/612

*д.т.н. Харламов Ю. А.,  
к.т.н. Петров П. А.,  
к.т.н. Козачишен В. А.,  
к.т.н. Изюмов Ю. В.  
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)*

## **ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И УСТРОЙСТВА: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ. СООБЩЕНИЕ 2. ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В ДОБЫВАЮЩИХ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

*Во втором сообщении кратко описано применение детонационно-газовых технологий и устройств в геологии, нефтедобывающей и горно-металлургической отраслях промышленности. Детонационно-газовые источники сейсмических колебаний используются при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых, в инженерно-геологических и гидроакустических исследованиях. Газовая детонация может использоваться для увеличения конечной нефтеотдачи пластов и дебита скважин, взрывоимпульсного разрушения горных пород, газо-взрывного измельчения, создания энергосберегающих горелочных устройств и др.*

***Ключевые слова:** бульдозеры, газовые горелки, защитные покрытия, измельчение, очистка поверхностей нагрева, сейсморазведка, скважины.*

**Применение ГД в геологии и при разведке недр.** В сейсморазведке установки газовой детонации используют для возбуждения упругих колебаний с поверхности земли за счет взрыва газовой смеси в замкнутых, способных к расширению объемах взрывных устройств. Газовзрывная смесь заполняет цилиндр с подвижной нижней стенкой — поршнем или диафрагмой. Такой цилиндр прижимают к поверхности автомашиной, на которой смонтирован источник. В заданный момент времени по команде с сейсмостанции газ поджигают, и происходит его взрывообразное сгорание, при котором объем газа резко возрастает. Газ под большим давлением резко давит на поршень или мембрану и, поскольку движение цилиндра вверх затруднено инертной массой автомобиля, давление передается на грунт, в место его контакта с рабочим органом газовзрывного источника. Известны также установки газовой детонации, в которых продукты детонации выбрасываются в воду, возбуждая в ней упругую волну. Источники сейсмических колебаний используются при поис-

ках и разведке месторождений полезных ископаемых, инженерно-геологических и гидроакустических исследованиях [1].

Разработано достаточно много детонационно-газовых устройств для сейсмической разведки и воздействия на коллекторы для создания многократно повторяющихся импульсных сейсмических сигналов в плотных горных породах с возможностью многократного повторения через заданные промежутки времени. Обычно эти устройства содержат скважину, пакер, установленный в скважине, через который проходят дренажная труба, топливная магистраль и линия передачи детонации. Скважина бурится в плотных, горных породах ниже зоны малых скоростей, где установлен пакер. Он ограничивает рабочий объем скважины между ним и концом дренажной трубы [1].

Для подводной сейсморазведки в подлёдных акваториях также могут применяться газовзрывные источники, использующие контролируемую детонацию газовой смеси в эластичных оболочках и взрывных камерах (например, смеси кислорода с пропаном, ацетиленом или водородом) [2].

Для решения целого ряда задач требуется генерация мощных импульсов в жидкой среде при высоком давлении, например, для зондирования поверхности дна мирового океана с целью обнаружения залежей полезных ископаемых. Мощные импульсы давления создаются в нефтяных скважинах для очистки отверстий, через которые поступает нефть. В большинстве этих задач генератор импульсов должен находиться на большой глубине и функционировать при давлениях окружающей среды в несколько сотен атмосфер. В качестве источников таких импульсов применяются небольшие заряды взрывчатых веществ, что требует специального лицензирования на хранение и применение, либо используется эффект взрывающихся проволочек, испаряющихся при пропускании через них тока от конденсаторных накопителей. При этом для получения значимых энергий разряда нужны конденсаторы емкостью порядка сотен микрофарад и напряжения в несколько тысяч вольт, что создает серьезную опасность при использовании их во влажной среде. Энергия импульса в этом случае имеет порядок 1000 Дж. Разработан способ генерации импульсов давления, основанных на запасах химической энергии стехиометрической смеси водорода и кислорода, получаемых электролизом на глубине при высоком давлении [1]. Относительно небольшое увеличение энтальпии смеси даже при давлении  $10^8$  Па приводит к увеличению напряжения разложения воды на 0,16 В, что практически не сказывается на характеристиках электролизера. Изменяя объем камеры детонации от  $0,5 \text{ см}^3$  до  $500 \text{ см}^3$ , можно получить энергию импульса на глубине 2 км в диапазоне от 800 Дж до  $8 \times 10^5$  Дж.

**Применение ГД в нефтегазовой промышленности.** Нефтяные компании проявляют все возрастающий интерес к воздействию на нефтяные пласты с помощью знакопеременных давлений различной частоты и интенсивности. Объектом воздей-

ствия могут быть как пласт в целом, так и призабойная зона пласта. В случае снижения дебита газоконденсатной скважины объектом воздействия, очевидно, должна быть зона, расположенная в первых метрах от забоя, поскольку именно здесь происходит накопление ретроградного конденсата. Одним из перспективных методов технологического воздействия на призабойную зону газоконденсатного пласта является использование для разрушения конденсатных пробок детонационных и ударных волн [3]. Падение давления от внутрипластового до давления на коллекторе происходит в достаточно узкой области (порядка нескольких метров). При снижении дебита для разрушения конденсатной пробки в зоне продуктивной скважины можно осуществлять кратковременное воздействие на углеводородную внутрипластовую систему детонационными волнами, которые генерируются химическим путем в устье скважины. Оценки показывают, что давление, создаваемое ударной волной, убывает обратно пропорционально расстоянию. При начальном десятикратном перепаде давления (80 МПа на фронте ударной волны) падение давления до 16 МПа происходит на расстояниях нескольких десятков метров, что позволяет использовать воздействие пакетов импульсов детонационных волн на углеводородную систему с целью разрушения конденсатной пробки и возвращения системы в исходное однофазное состояние. Характерное время воздействия на несколько порядков меньше, чем время образования конденсатной пробки.

Источником импульсного воздействия на газоконденсатный слой может служить детонационная камера сгорания, генерирующая ударные волны различной интенсивности. Возможно использовать в качестве горючего углеводороды, которые могут добываться непосредственно в процессе эксплуатации скважины, а окислитель — кислород или воздух. В зависимости от интенсивности ударной волны заметное

воздействие на газоконденсатную пробку оказывается на расстоянии  $5 \div 20$  м от устья скважины, при этом температура пористой среды может повышаться на  $15 \div 30$  градусов. Воздействие последующих ударных волн усиливается, поэтому разрушение газоконденсатной пробки может достигаться как за счет интенсивности, так и количества генерируемых ударных волн.

Увеличение конечной нефтеотдачи пластов и дебита скважин обеспечивается повышением проницаемости (созданием разветвленной сети трещин) зоны продуктивного нефтяного пласта, нефтеотдача которого затруднена или полностью прекратилась из-за высокой вязкости нефти (патент РФ № 2200833). Для этого в скважину устанавливают пакер и дренажную трубу. Образующийся рабочий объем от пакера до нижнего конца дренажной трубы заполняют смесью воздуха и горючего газа. При распространении детонационной волны вдоль участка скважины, заполненного воздушно-газовой смесью, в массив горной породы излучаются в основном поперечные сейсмические волны высокой интенсивности, которые воздействуют на коллекторы углеводородов. После окончания детонации производят продувку рабочего объема воздухом, после чего цикл повторяют. Минимальная длительность полного цикла составляет около 10 с. Таким способом осуществляют длительную серию интенсивных воздействий на трещиноватый пласт-коллектор углеводородов.

Для сжигания сбросных газов и многофазных систем промышленных стоков на газовых и нефтяных месторождениях и на предприятиях нефтяной, химической и нефтехимической отраслей промышленности эксплуатируются факельные установки высотного и наземного типа. Для повышения надежности розжига газовых горелок факельных устройств и снижения энергозатрат при термической утилизации токсичных продуктов производства разработан способ газодинамического розжига газовых горелок факельных устройств,

включающий приготовление стехиометрической газовой смеси и инициирование детонационного горения (патенты РФ № 2294485 и 2324111).

Широкую область применения в нефтегазовой промышленности могут найти защитные и функциональные покрытия, получаемые методом детонационно-газового напыления. Высокие механические и эксплуатационные свойства покрытий показали их эффективность для упрочнения шарошек трехшарошечных и алмазных буровых долот [4]. Достижимый эффект (при толщине покрытия 200 мкм) — существенное повышение абразивной стойкости бурового инструмента, практически полное исключение выпадения породоразрушающего вооружения при работе на забое, снижение отказов по причине растрескивания шарошек. Выявленная при испытаниях высокая фрикционная совместимость пары трения «твердосплавное детонационное покрытие — серебряное покрытие» нашла применение при изготовлении дисков разгрузки центробежных насосов. При этом на рабочую поверхность одного диска наносится твердосплавное покрытие, а на рабочую поверхность другого — антифрикционное серебряно-алмазное покрытие. На предприятиях нефтегазового комплекса детонационные покрытия можно широко использовать для быстрого и качественного восстановления дорогостоящих элементов технологического оборудования и оснастки. Наблюдается расширение объемов применения детонационно-газового упрочнения для других видов деталей.

Энергия взрыва широко применяется для перфорации нефте- и газодобывающих скважин. Для этих целей в подавляющем большинстве случаев применяются кумулятивные заряды (КЗ). Для повышения пробивной способности КЗ в СамГТУ предложен принципиально новый способ изготовления многослойных кумулятивных облицовок (КО), основанный на нанесении покрытия из высокоплотного порошкового материала детонационным способом на ме-

таллическую заготовку (облицовку) [5]. Экспериментально подтверждено, что такие заряды кумулятивных перфораторов обладают повышенной пробивной способностью. Дальнейшее повышение пробивной способности КЗ может быть связано с применением для КО ряда перспективных материалов, например, молибдена. В этом случае потенциал увеличения глубины пробития преград достигает 35 %.

**Применение ГД в горной промышленности. Взрывоимпульсное разрушение горных пород.** Газодинамические импульсы, возникающие при детонации топливовоздушных смесей, используются в прямоточных устройствах для разрушения и выброса тяжелых грунтов. На бульдозерном отвале устанавливают камеру сгорания и нож с выхлопными отверстиями. Через патрубков в камеру подается топливовоздушная смесь, которая воспламеняется свечой при срабатывании датчика [6, 7]. Перспективным для глубокого рыхления почвогрунтов является применение интенсификаторов газодинамического действия. Рыхлитель присоединен к трактору с помощью навески. Зуб рыхлителя в верхней части снабжен камерой сгорания с центральным каналом, который заканчивается в наконечнике зуба. Камера сгорания и канал имеют форму, обеспечивающую создание детонационной ударной волны, распространяющейся вдоль по каналу после воспламенения горючей смеси [6, 7]. Ударная волна и следующий за ней из прямоточной трубы газодинамический поток способны разрушать горные породы и тяжелые грунты.

Бульдозер с поворотно-взрывным устройством отличается от обычного наличием камеры сгорания, которая размещается внизу с тыльной стороны отвальной поверхности. На базовом тракторе дополнительно устанавливается компрессор, топливная и регулирующая аппаратура, обеспечивающая подачу топлива и сжатого воздуха в камеру сгорания, а также воспламенение образующейся горючей смеси бензина (или дизельного топлива) и воздуха с

определенной повторяемостью [6, 7]. Смесь воспламеняется запальной свечой. Процесс, происходящий после воспламенения, подобен работе двигателя внутреннего сгорания. Грунт при этом выполняет функции поршня. Под действием газов высокого давления, проходящих после воспламенения смеси через отверстия в нижней части отвала, грунт отбрасывается от отвальной поверхности вверх и вперед и в меньшей степени — в стороны. Экспериментальная модель бульдозера с однокамерным взрывным устройством, созданная в США, испытывалась на разработке траншеи шириной 3,05 м и глубиной 1,52 м в грунтах средней крепости и обеспечила производительность 1500 м<sup>3</sup>/ч при скорости движения около 3,22 км/ч. При этом производительность обычного тяжелого бульдозера — 500 м<sup>3</sup>/ч.

Бульдозеры с газоимпульсным рабочим органом могут выполнять следующие работы [7]: отвалообразование при железнодорожном и автомобильном транспорте, эффективность перемещения разрыхленной горной массы подтверждена экспериментально; профилировка внутренних и внешних отвалов при их рекультивации, когда наиболее эффективно используются технические возможности газоимпульсного бульдозера; рыхление плотных грунтов (глин), плохо поддающихся непосредственному размыву гидроспособом (использование газоимпульсного бульдозера позволяет заменить малопродуктивное горное оборудование, применяемое в настоящее время для этих целей, повысить эффективность и расширить область применения гидравлического способа, повысить производительность гидравлических установок более чем в 2 раза по сравнению с обычными приемами гидромеханизации, а расход электроэнергии снизить в 2,5 раза); проходка нагорных канав и траншей; устройство съездов; концентрация горной массы на горизонте. При отработке породного массива высокими уступами можно высвободить дорогостоящее экскаватор-

ное оборудование, более высокая мобильность газоимпульсного бульдозера не требует устройства специальной трассы для его перемещения.

Разработаны рыхлители взрывоимпульсного действия (а. с. СССР № 1304465), в которых энергия детонации в виде выхлопных газов передается по каналам основной и дополнительной рыхлительных стоек с зубьями газодинамического действия. Взрывные потоки направлены под углом внутреннего трения к горизонтальной и вертикальной продольной плоскостям. Такое направление выхлопных газов создает минимальное усилие скола грунтовых элементов, а пересечение двух взрывных потоков обеспечивает не только минимальную энергоемкость процесса, но также снижает поперечные и продольные динамические нагрузки, передаваемые на базовую машину. Кроме того, выдвижные клинья снижают отдачу выхлопных газов на базовую машину.

**Термодетонационное разрушение горных пород.** Существенный прогресс в технологии добычи и обработки крепких горных пород из гранитов был достигнут после появления огнеструйного (термического) способа разрушения горных пород. Внедрение терморезаков для отрезных и врубных щелей в гранитных карьерах коренным образом изменило технологию добычи гранитов, что позволило увеличить в 2÷2,5 раза выход блочного камня и значительно повысить его качество [8]. С увеличением ударного импульса струи (механической составляющей) разрушение горных пород протекает интенсивнее, и вероятность оплавления забоя уменьшается. Величина ударного импульса струи пропорциональна квадрату его скорости, а значительное увеличение динамической составляющей скорости струи можно получить, используя явление детонации. Разработан термодинамический бур [8], в котором детонационный эффект достигается за счет возбуждения стационарного скачка уплотнения (ударной волны) в начале ос-

новного участка сверхзвуковой, обогащенной горючим компонентом газовой струи горелки путем ее трения о шероховатости внутренней поверхности насадка и контакта с холодным эжектируемым воздухом и введения в него с целью интенсивного (детонационного) горения недостающего эжектируемого обогащенной горючим струей через перфорационные каналы насадка окислителя. Обогащение горючим сверхзвуковой струи производится через форсуночный аппарат горелки в пределах 15÷20 % от основного расхода при работе горелки без насадки. Газовый поток горелки подогревает избыточное горючее (до 1500÷1800 °С), которое, реагируя с окислителем, поступающим через перфорацию насадка из атмосферного воздуха, и за счет сверхзвуковых химических реакций и мгновенного тепловыделения в скачке уплотнения, снова разгоняется в цилиндрическом насадке до сверхзвуковой скорости, образуя мощный поток раскаленных газов повышенной интенсивности, скорости и массового расхода.

Таким мощным термодинамическим рабочим органом снабжена конструкция машины для проведения щелевых выработок при добыче гранитных блоков [9].

**Газовзрывное измельчение.** Ведутся работы по созданию газодинамических мельниц (ГДМ), принцип действия которых заключается в ускорении порции кусков измельчаемого материала продуктами взрыва смеси газов (горючее и окислитель) и последующем их измельчении при ударном торможении [10]. Ранее были разработаны способы дробления сверхтвердых трещиноватых материалов, преимущественно природных алмазов (а. с. СССР № 669531 и 913638). Отличительной особенностью ГДМ является полный отказ от использования электроэнергии для процесса измельчения; энергоносителем является горючий газ, например, природный. Стоимость энергии, выделяющейся при сгорании природного газа, существенно меньше стоимости электроэнергии.

В импульсной взрывоструйной мельнице генераторы энергоносителя выполнены в виде газодетонационных камер [11]. Установка по патенту РФ № 2154533 состоит из помольной камеры, соосно расположенных и направленных навстречу друг другу детонационных цилиндрических камер, снабженных пневматическими питателями, свечами поджига с блоком высокого напряжения и узлами подачи горючей газовой смеси, регулируемые в синхронном режиме блоком управления посредством электроклапанов. Эффект измельчения, получаемый при детонации горючей газовой смеси, обеспечивается высоким давлением и температурой продуктов детонации. Продукты детонации, образовавшиеся в двух полузамкнутых камерах и направленные навстречу друг другу, дают возможность повысить скорость измельчаемых порошкообразных материалов во встречных потоках. При детонации горючей газовой смеси в детонационной камере частицы материала на некоторое время оказываются в области высокого давления, где под его действием сжимаются, затем происходит резкое уменьшение импульсного давления, и частицы, ранее сжатые, под действием внутренних напряжений самоизмельчаются.

**Применение ГД в металлургической промышленности.** *Импульсно-детонационные газовые горелки для промышленных печей и теплоэнергетических установок (ГИДС).* По сравнению с традиционными горелочными устройствами ГИДС обладают следующими преимуществами [7]:

- возможность полного отсутствия кислорода в выходном факеле, что крайне важно для некоторых технологических процессов (например, при выплавке вторичного алюминия);

- сжигание смеси с высокой полнотой реакции внутри горелочного тракта в режиме детонации формирует высокоскоростную и дальнобойную струю горячих и плотных продуктов детонации, что обес-

печивает не только термическое, но и механическое воздействие на нагреваемый объект;

- концентрация оксидов азота в продуктах сгорания в 2–3 раза меньше;

- в качестве окислительного газа допускается использование чистого кислорода или воздуха, обогащенного кислородом, что позволяет повысить температуру и скорость продуктов сгорания на выходе, а также использовать сильно обедненные горючим кислородные смеси для эффективного использования в операциях кислородного дутья;

- возможность подачи кислорода в нагреваемый продукт в нужный момент (в виде скоростной высокотемпературной струи), а на другом технологическом этапе — полностью исключить попадание кислорода в зону нагрева, вплоть до создания инертной среды;

- регулируемое избыточное давление продуктов горения в выходном сечении позволяет отказаться в различных технологических процессах от оборудования, обеспечивающего перемешивание нагреваемых продуктов;

- экономический эффект, обеспечиваемый снижением удельного расхода природного газа не менее чем на 8÷10 % (до 185 м<sup>3</sup>/час при мощности 2÷2,5 МВт), увеличением скорости и, соответственно, снижением времени процесса нагрева, уменьшением потерь на окисление, оптимизацией использования производственных площадей, увеличением срока службы горелки, уменьшением затрат на экологические мероприятия и пр.

ГИДС перспективны для промышленного применения:

- в сталеплавильной отрасли (производство стали в электродуговых печах). ГИДС при использовании кислорода позволяют существенно снизить объем потребляемого природного газа и сократить выбросы оксидов азота;

- при вторичной обработке алюминия можно избежать попадания кислорода и

фактически избежать образования окалины, что позволит увеличить объем и рентабельность производства в несколько раз;

– *утилизация отходов*, принципиальная возможность создания установок, реализующих механизм ликвидации диоксинов и решающих проблему выпуска шлака;

– *обжиг извести, кирпича и т. д.* Применение ГИДС обеспечивает обдув садки кирпичей скоростной струей продуктов сгорания, мощная конвективная составляющая струи позволит избежать застойных зон и обеспечить быстрый равномерный нагрев садки. Сокращение времени нагрева позволит значительно увеличить производительность и уменьшить расход газа до 10 %.

**Высокоскоростные энергосберегающие горелочные устройства.** Разработаны конструкции горелочных устройств на базе сопла с центральным телом типа ГГТ (горелка газовая турбулентная) и ГЦТ (горелка с центральным телом), использующие кроме «нормального» горения элементы детонационного горения. Это достигается за счет образования пересекающихся скачков уплотнения с созданием мощной волны (ударной адиабаты или адиабаты Гюгонио), приводящей к уско-

ренному нагреву смеси. Многолетняя эксплуатация горелочных устройств в производстве металлургической извести во вращающихся печах доказала их значительную экономическую эффективность [12].

*Прочие применения:* очистка поверхностей нагрева котлов-утилизаторов [13, 14]; детонационно-газовое напыление защитных и восстановительных покрытий на инструменты и детали оборудования; импульсная резка горячего и холодного металла, применяемая для разделения на части сортовых горячих стальных заготовок на машинах непрерывного литья, в прокатном производстве.

#### **Выводы:**

1. Газовая детонация является эффективным технологическим источником энергии для реализации импульсных термомеханических воздействий при выполнении основных и вспомогательных операций в добывающих и перерабатывающих отраслях промышленности.

2. Следует считать целесообразным расширение НИОКР по детонационно-газовым технологиям и устройствам, обобщение накопленного опыта их внедрения в различных областях науки и техники и координацию этих работ.

#### **Библиографический список**

1. Свинцов, И. С. *Разработка метода возбуждения сейсмических волн в массиве горных пород газовым взрывом в скважине [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 25.00.10 / И. С. Свинцов. — Москва, 2006. — 133 с.*
2. *Концепция роботизированной подводной сейсморазведки в подлёдных акваториях [Текст] / Б. А. Гайкович, В. Ю. Занин, В. С. Тарадонов и др. ; АО «НПП ПТ „Океанос“» // Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа. — М. : Министерство энергетики Российской Федерации, ООО «Технологии развития», 2018. — С. 64–86.*
3. *Разработка физических методов повышения продуктивности газоконденсатных месторождений : отчет о НИР (закл.). — М. : Объединенный институт высоких температур РАН, 2007. — 55 с. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: [https://jiht.ru/science/scientific\\_programs/ftsp/reports%20FCP-2013/Отчет%202007-02.515.11.5039%20текст.pdf](https://jiht.ru/science/scientific_programs/ftsp/reports%20FCP-2013/Отчет%202007-02.515.11.5039%20текст.pdf).*
4. *Разработка перспективных детонационных технологий для нефтегазовой промышленности [Текст] / В. В. Калашников, Д. А. Деморецкий, Д. А. Ненашев, О. В. Трохин // Нефтегазовое дело : электронный научный журнал. — 2012. — № 4. — С. 335–347.*
5. *Детонационный способ и технология изготовления многослойных облицовок зарядов кумулятивных перфораторов [Текст] / В. В. Калашников, Д. А. Деморецкий, М. В. Ненашев и др. //*

Вестник Самарского государственного технического университета. Серия : Технические науки. — 2011. — № 3 (31). — С. 213–218.

6. Павлюк, А. С. Методы снижения тягового сопротивления почвообрабатывающих машин / А. С. Павлюк, Д. В. Сотников // Ползуновский вестник. — 2014. — Т. 1. — № 4. — С. 8–13.

7. Взрывоимпульсное разрушение горных пород. — М. : Наука, 1979. — 230 с.

8. Поветкин, В. В. Разработка термодинамического бура для разрушения крепких горных пород [Текст] / В. В. Поветкин, М. Ф. Керимжанова, А. З. Букаева // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. — 2017. — № 4 (59). — С. 56–63.

9. Поветкин, В. В. Термодинамический рабочий орган для проведения щелевых выработок при добыче гранитных блоков [Текст] / В. В. Поветкин, М. Ф. Керимжанова, А. В. Поветкин // Горный журнал Казахстана. — 2014. — № 12. — С. 30–32.

10. Войтенко, А. Е. Экспериментальные исследования газодетонационного измельчения [Текст] / А. Е. Войтенко, В. Ф. Ганкевич, В. П. Мелихов // Обогащение полезных ископаемых : научно-технический сборник. — Днепрпетровск : НГАУ, 1998. — Вып. 1 (42). — С. 147–158.

11. Уваров, В. А. Возможности газодетонационного способа измельчения материалов [Текст] / В. А. Уваров, А. Н. Потапенко // Изв. вузов. Строительство. — 2000. — № 9. — С. 42–44.

12. Коццев, В. В. Высокоскоростные энергосберегающие горелочные устройства известняковообжигающих вращающихся печей [Текст] / В. В. Коццев // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова, 2013. — № 3. — С. 95–97.

13. Методы наружной очистки котлов-утилизаторов [Текст] / Я. М. Щелоков, Э. М. Телегин, В. Н. Подымов, В. И. Гасников. — Казань : Изд-во КГУ, 1974. — 213 с.

14. Щелоков, Я. М. Очистка поверхностей нагрева котлов-утилизаторов [Текст] / Я. М. Щелоков, А. М. Аввакумов, Ю. К. Сазыкин. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 160 с.

© Харламов Ю. А.

© Петров П. А.

© Козачишен В. А.

© Изюмов Ю. В.

Рекомендована к печати д.т.н., доц., зав. каф. ММК ДонГТИ Вишневским Д. А., д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Ерньюко С. П.

Статья поступила в редакцию 25.02.2022.

**Doctor of Technical Sciences Kharlamov Yu. A., PhD in Engineering Petrov P. A., PhD in Engineering Kozachishen V. A., PhD in Engineering Izumov Yu. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR)**  
**DETONATION-GAS TECHNOLOGIES AND DEVICES: STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT. REPORT 2. APPLICATION OF GAS DETONATION IN EXTRACTIVE AND METALLURGICAL INDUSTRIES**

*The second report briefly describes the use of detonation-gas technologies and devices in geology, oil production and mining and metallurgical industries. Detonation-gas sources of seismic vibrations are used in the search and exploration of mineral deposits, in engineering-geological and hydroacoustic studies. Gas detonation can be used to increase the final oil recovery and flow rate of drill holes, explosive-pulse destruction of rocks, gas-explosive grinding, creation of energy-saving burner devices, etc.*

**Key words:** bulldozers, gas burners, protective coating, chopping, cleaning of heating surface, seismic exploring, drill holes.

УДК 622.232.32

д.т.н. Корнеев С. В.,  
д.т.н. Вишневский Д. А.,  
Мулов Д. В.

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, [mulovd@yandex.ru](mailto:mulovd@yandex.ru))

## ИМИТАЦИЯ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОТБОЙНЫХ МОЛОТКОВ ПО ГОСТ Р 55162–2012

*Разработана математическая модель стандартного испытательного стенда, изготавливаемого согласно ГОСТ Р 55162–2012, и установленного на нем отбойного пневматического молотка серии МО, позволяющая имитировать испытания молотка с целью исследования процессов в системе «испытательный стенд — отбойный молоток» и выбора рациональных параметров оборудования.*

**Ключевые слова:** молоток отбойный пневматический, испытательный стенд, математическая модель, индикаторная диаграмма, параметры стенда, виброускорение, виброскорость.

Условия эксплуатации пневматических отбойных молотков (МО) отличаются большим разнообразием, что затрудняет оценку их показателей, определяемых в производственных условиях и особенно на этапе проектирования. Поэтому вполне естественным выглядит стремление производить испытания МО в некоторых стандартных условиях и на стандартном стендовом оборудовании. В отечественном ГОСТ Р 55162–2012 [1] предлагается схема испытательного стенда, которая содержит механический имитатор системы «кисть — рука» 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  $\mu_1$  и  $\mu_2$ ) (рис. 1, а). Малая масса  $m_2$ , высокая жесткость  $c_2$  и большой коэффициент демпфирования  $\mu_2$  соответствуют динамическим свойствам мягких тканей кисти руки (ладони и пальцев), для имитации которых могут быть использованы кусок резины или другой упруго-вязкий материал.

Объект обработки представляется в виде скалки, зажатой с определенным усилием гидравлическими тисками и способной перемещаться в тисках, преодолевая силы трения, под воздействием инструмента.

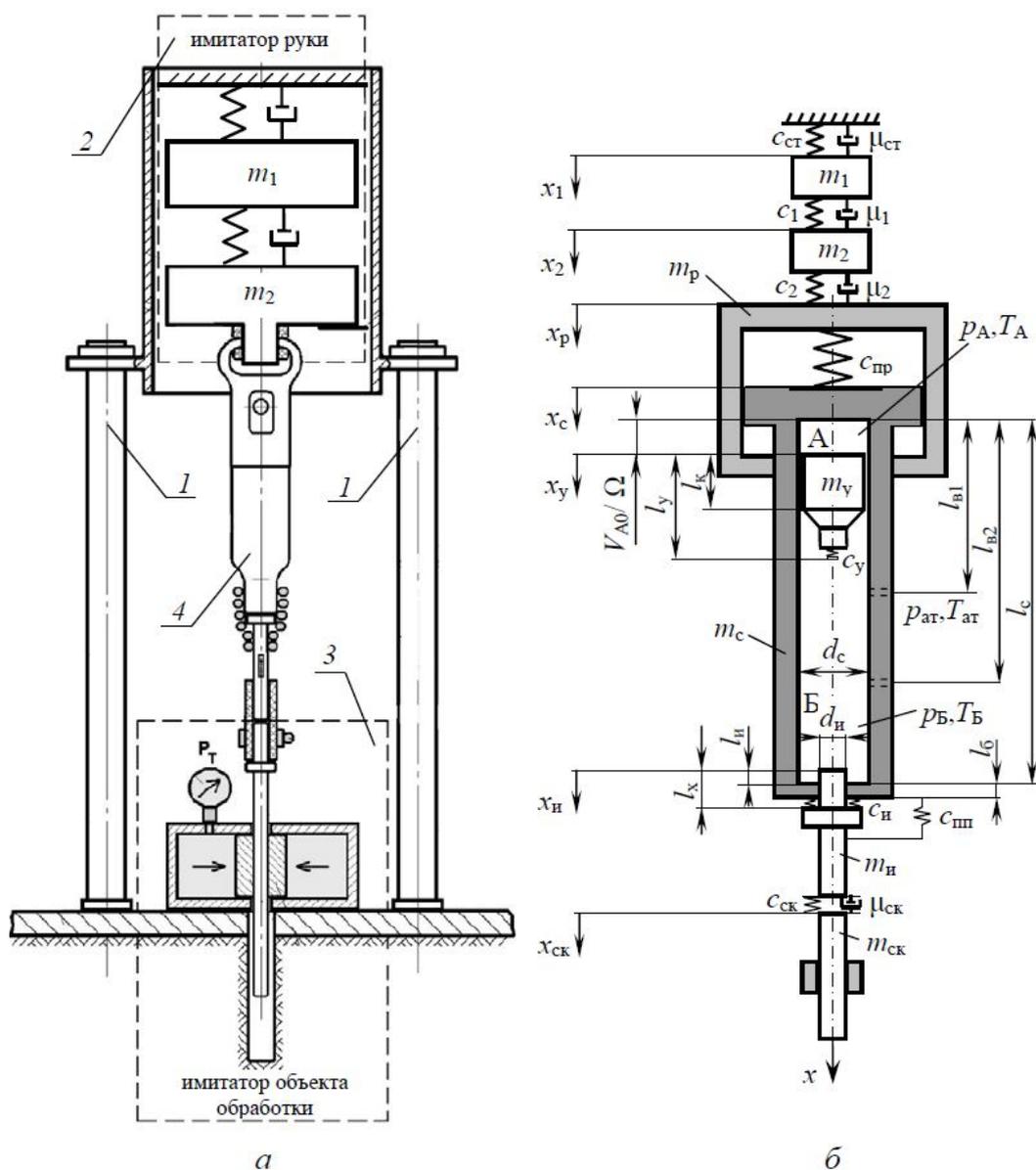
Данный стандарт допускает возможность изменения ряда параметров стенда,

например, большей массы  $m_1$ , имитирующей руку оператора, — от 10 до 40 кг. Приведенные в [2] предварительные результаты теоретических исследований динамики МО показывают, что даже, на первый взгляд, незначительные изменения конструктивных или эксплуатационных параметров системы «рука — отбойный молоток — обрабатываемый объект», которая сложилась в процессе ее длительной эволюции, могут приводить к существенным изменениям характеристик молотка, в том числе вибрационных. Тем более не вызывает сомнений, что соотношение динамических характеристик колебательной системы «испытательный стенд — пневматический отбойный молоток», имеющей большее число колеблющихся масс, также отразится на уровне вибраций поверхности рукоятки молотка. При сравнительно небольших значениях массы  $m_2$  (от 10 кг) и максимальном давлении ( $5 \cdot 10^5$  Па), очевидно вследствие неуравновешенности действующих на молоток сил, наблюдается непрерывное при каждом цикле работы смещение ствола и рукоятки молотка в направлении, противоположном воздействию руки (отдача молотка). Возможно, для предотвращения этого смещения в аналогичной модели механического имитатора системы «кисть — рука» с двумя степенями

свободы, представленной в стандарте [3], и в ряде других известных моделей масса  $m_1$  опирается на неподвижную стенку, имитирующую верхнюю часть туловища.

Таким образом, для объективизации результатов испытаний молотков система «испытательный стенд — пневматический отбойный молоток» нуждается в дальнейшем исследовании, например путем моделирования, и совершенствовании.

Цель работы — разработка математической модели стандартного испытательного стенда, изготавливаемого согласно ГОСТ Р 55162–2012, с установленным на нем отбойным пневматическим молотком серии МО, позволяющей имитировать испытания молотка для выбора рациональных параметров оборудования.



1 — рама стенда, 2 — имитатор руки, 3 — имитатор объекта обработки, 4 — отбойный молоток

Рисунок 1 Схема стендовой установки для испытания пневматических отбойных молотков (а) и расчетная схема молотка, установленного на стенде (б)

Расчетная схема системы «испытательный стенд — пневматический отбойный молоток» представлена на рисунке 1, б. Здесь, в дополнение к стандартному набору конструктивных элементов стенда [1], предусматривается упор для массы  $m_1$  в виде стенки.

На схеме приняты следующие обозначения: А — верхняя камера; Б — нижняя камера; индексы: 1 и 2 — номера элементов стенда, имитирующих руку человека-оператора, ст — стенка, р — рукоятка, с — ствол, у — ударник, и — инструмент, ск — скалка, п — пружина амортизирующая, пп — пружина, удерживающая инструмент;  $m_1, m_2, m_p, m_c, m_y, m_{и}, m_{ск}, x_1, x_2, x_p, x_c, x_y, x_{и}, x_{ск}$  — массы ( $m$ ) и перемещения ( $x$ ) элементов системы;  $c_{ст}, c_1, c_2, c_{п}, c_y, c_{и}, c_{пп}, c_{ск}$  — коэффициенты жесткости, соответственно, стенки; упругой связи между 1-й и 2-й массами, имитирующими руку оператора; упругих связей между второй массой, имитирующей руку оператора, и рукоятку молотка сверху или снизу; амортизирующей пружины, установленной в рукоятке; связи, имитирующей упругие свойства ударника и инструмента; связи инструмента со стволом; пружины, удерживающей инструмент; скалки;  $\mu_{ст}, \mu_1, \mu_2, \mu_{ск}$  — коэффициенты вязкости стенки; связи между массами  $m_1$  и  $m_2$  руки человека; между  $m_2$  руки и ручкой молотка сверху или снизу; скалки;  $p_m$  — давление в магистрали;  $p_{ат}$  — атмосферное давление;  $p_A$  — давление в камере А;  $p_B$  — давление в камере Б;  $V_A, V_B$  — объемы воздуха в верхней (А) и нижней (Б) камерах;  $T_A, T_B, T_m$  и  $T_{ат}$  — абсолютная температура воздуха в камерах А, Б, в магистрали и в атмосфере;  $F_{тр}$  — сила трения, возникающая между скалкой и гидравлическими тисками;  $l_c$  — длина внутренней поверхности ствола;  $l_{в1}$  и  $l_{в2}$  — расстояния от верхнего основания ствола до первого и второго яруса выхлопных отверстий;  $l_y$  — длина ударника;  $l_k$  — длина образующей цилиндрической поверхности ударника, контактирующей со стволом;  $d_c$  и  $d_y$  — внутренний диаметр ствола и диаметр ударника;  $d_{и}$  — диаметр хвостовика

инструмента;  $l_x$  — длина хвостовика инструмента;  $l_6$  — длина буксы в стволе.

При составлении модели системы «испытательный стенд — пневматический отбойный молоток» принимаются следующие допущения:

1) силами трения между элементами отбойного молотка, переходными процессами при подключении воздухопровода, а также потерями давления в системе и воздухораспределительном устройстве пренебрегаем;

2) в начальный момент времени инструмент упирается в скалку, причем все силовые элементы молотка находятся под нагрузкой, создаваемой силами тяжести элементов молотка и стенда;

3) рассматривается только продольная динамика системы, т. е. все ее элементы, представляющие собой твердые тела (волновыми процессами пренебрегаем), движутся поступательно;

4) материальные элементы системы взаимодействуют между собой через упругие или упруго-вязкие связи;

5) клапан в воздухораспределительном устройстве перебрасывается в течение некоторого времени  $\tau$  при достижении в запираемой камере ствола некоторого определенного расчетным путем давления и резком падении давления в другой камере при выхлопе воздуха. При этом условная площадь отверстий воздухораспределительного устройства запираемой камеры изменяется в течение времени  $\tau$  по линейному закону от нуля до значения конструктивной площади отверстий, соответствующего данной камере, а для опорожняемой камеры, наоборот, — от значения конструктивной площади соответствующего отверстия до нуля;

б) площадь открытой части выхлопных отверстий верхнего яруса в верхней камере А изменяется по линейному закону в зависимости от изменяющейся в пределах от  $l_{в1}$  до  $l_{в1} + \Delta l_1$  координаты  $u_A$  положения верхней поверхности ударника относительно верхнего дна ствола,  $u_A = x_y - x_c$ . Площадь открытой части выхлопных от-

верстей верхнего яруса в нижней камере Б также изменяется по линейному закону в зависимости от изменяющейся в пределах от  $l_{в1}$  до  $l_{в1} + \Delta l_1$  или, наоборот, координаты  $u$  положения нижней поверхности ударника относительно верхнего днища ствола,  $u = x_y + l_k - x_c$ . Площадь открытой части выхлопных отверстий нижнего яруса изменяется аналогично — при изменении  $u$  в пределах от  $l_{в2}$  до  $l_{в2} + \Delta l_2$ . Здесь  $\Delta l_1$  и  $\Delta l_2$  — длина участка ствола, на котором

при перемещении ударника над отверстиями соответственно 1-го и 2-го ярусов осуществляется выхлоп воздуха;

7) процессы истечения воздуха из камер в атмосферу и, наоборот, из сети в камеры являются адиабатическими. Для описания термо- и газодинамических процессов в молотке принимаются зависимости, полученные в работе [4]. При этом расход воздуха из полости 1 в полость 2 через отверстие площадью  $f$  описывается уравнением Сен-Венана:

$$G = \begin{cases} \sqrt{f} p_1 \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_1} (Y^{\frac{2}{k}} - Y^{\frac{1+k}{k}})}, & \text{если } Y > Y_{\max} \text{ и } p_1 > p_2; \\ \sqrt{f} p_1 \sqrt{\frac{2k}{(k-1)RT_1} (Y_{\max}^{\frac{2}{k}} - Y_{\max}^{\frac{1+k}{k}})}, & \text{если } Y \leq Y_{\max} \text{ и } p_1 > p_2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $v$ ,  $p_1$ ,  $T_1$  — коэффициент расхода воздуха через отверстие, соединяющее полости, давление и температура в полости 1;  $p_2$  — давление в полости 2;  $k$  — показатель адиабаты;  $R$  — газовая постоянная воздуха;  $Y = p_2/p_1$ ;  $Y_{\max}$  — значение отношения давлений, при котором достигается наибольший

расход воздуха,  $Y_{\max} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$ .

Математическая модель механических, термо- и газодинамических процессов в молотке системы «испытательный стенд — молоток отбойный пневматический серии МО» представляется следующей системой дифференциальных уравнений второго порядка:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = F_{ст} - F_1 + m_1 g \cos \beta; \\ m_2 \ddot{x}_2 = F_1 + F_{р.н} - F_{р.в} + m_2 g \cos \beta; \end{cases}$$

$$\begin{cases} m_p \ddot{x}_p = F_{р.в} - F_{р.н} - R_{п} + m_p g \cos \beta; \\ m_c \ddot{x}_c = R_{п} - F_{pA} + P_c - F_{и} + F_{пп} + m_c g \cos \beta; \\ m_y \ddot{x}_y = F_{pA} - F_{pB} - F_y + m_y g \cos \beta; \\ m_{и} \ddot{x}_{и} = F_y + P_{п} - F_{ск} + F_{и} - F_{пп} + m_{и} g \cos \beta; \\ m_{ск} \ddot{x}_{ск} = F_{ск} - F_{тр} + m_{ск} g \cos \beta; \\ \frac{dp_A}{dt} = \frac{k}{V_A} [(RT_M G_{AM} - RT_A G_{Ai} - p_A \Omega (\frac{dx_y}{dt} - \frac{dx_c}{dt}))]; \\ \frac{dp_B}{dt} = \frac{k}{V_B} [RT_M G_{BM} - RT_B G_{Bi} + p_B \Omega (\frac{dx_y}{dt} - \frac{dx_c}{dt}) - p_B \Omega_{и} (\frac{dx_{и}}{dt} - \frac{dx_c}{dt})]; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \text{если } G_{AM} > 0, \text{ то} \\ \frac{dT_A}{dt} = \frac{T_A}{p_A V_A} \left[ (k - \frac{T_A}{T_M}) RT_M G_{AM} - (k-1) R k_{GAи} G_{Ai} - (k-1) p_A \Omega (\frac{dx_y}{dt} - \frac{dx_c}{dt}) \right]; \\ \text{если } G_{AM} \leq 0, \text{ то} \\ \frac{dT_A}{dt} = \frac{T_A}{p_A V_A} \left[ (k - \frac{T_M}{T_A}) RT_A G_{AM} - (k-1) R k_{GAи} G_{Ai} - (k-1) p_A \Omega (\frac{dx_y}{dt} - \frac{dx_c}{dt}) \right]; \end{cases}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{если } G_{\text{БМ}} > 0, \text{ то} \\ \frac{dT_{\text{Б}}}{dt} = \frac{T_{\text{Б}}}{p_{\text{Б}}V_{\text{Б}}} \left[ \begin{array}{l} (k - \frac{T_{\text{М}}}{T_{\text{Б}}})RT_{\text{М}}G_{\text{БМ}} - (k-1)Rk_{\text{ГБи}}G_{\text{Би}} + (k-1)p_{\text{Б}}\Omega \left( \frac{dx_{\text{y}}}{dt} - \frac{dx_{\text{c}}}{dt} \right) - \\ - p_{\text{Б}}\Omega_{\text{и}} \left( \frac{dx_{\text{и}}}{dt} - \frac{dx_{\text{c}}}{dt} \right) \end{array} \right]; \\ \text{если } G_{\text{БМ}} \leq 0, \text{ то} \\ \frac{dT_{\text{Б}}}{dt} = \frac{T_{\text{Б}}}{p_{\text{Б}}V_{\text{Б}}} \left[ \begin{array}{l} (k - \frac{T_{\text{Б}}}{T_{\text{М}}})RT_{\text{Б}}G_{\text{БМ}} - (k-1)Rk_{\text{ГБи}}G_{\text{Би}} + (k-1)p_{\text{Б}}\Omega \left( \frac{dx_{\text{y}}}{dt} - \frac{dx_{\text{c}}}{dt} \right) - \\ - p_{\text{Б}}\Omega_{\text{и}} \left( \frac{dx_{\text{и}}}{dt} - \frac{dx_{\text{c}}}{dt} \right) \end{array} \right], \end{array} \right.$$

где  $t$  — время;  $\beta$  — угол отклонения продольной оси молотка от вертикали;  $F_{\text{ст}}$  — реакция стенки на воздействие оператора;  $F_1$  — сила взаимодействия масс  $m_1$  и  $m_2$ ;  $F_{\text{р.в}}$  и  $F_{\text{р.н}}$  — реакции верхней и нижней частей рукоятки на воздействие оператора;  $R_{\text{п}}$  — сила сжатия амортизирующей пружины, установленной в рукоятке управления;  $g$  — ускорение свободного падения;  $F_{\text{рА}}$  и  $F_{\text{рБ}}$  — силы давления воздуха на ударник в камерах А и Б ствола;  $P_{\text{с}}$  и  $P_{\text{и}}$  — силы давления воздуха на днище ствола (с) в камере Б и на инструмент (и);  $F_{\text{y}}$  — сила соударения ударника с инструментом;  $F_{\text{и}}$  — сила взаимодействия инструмента со стволом;  $F_{\text{пн}}$  — сила растяжения пружины, удерживающей инструмент;  $F_{\text{ск}}$  — реакция скалки на воздействие инструмента;  $G_{\text{Ам}}$ ,  $G_{\text{БМ}}$  — расход воздуха, поступающего из магистрали в камеру А и в камеру Б соответственно;  $G_{\text{Аи}}$ ,  $G_{\text{Би}}$  — расход воздуха, истекающего в атмосферу из камер А и Б соответственно;  $k_{\text{ГБи}}$  и  $k_{\text{СБи}}$  — логические коэффициенты, принимающие значения температуры в камере или в атмосфере в зависимости от направления миграции воздуха через выхлопные отверстия,

$$k_{G_{\text{Аи}}} = \begin{cases} T_{\text{А}}, & \text{если } G_{\text{Аи}} \geq 0; \\ T_{\text{ат}}, & \text{если } G_{\text{Аи}} < 0; \end{cases}$$

$$k_{G_{\text{Би}}} = \begin{cases} T_{\text{Б}}, & \text{если } G_{\text{Би}} \geq 0; \\ T_{\text{ат}}, & \text{если } G_{\text{Би}} < 0; \end{cases}$$

$\Omega$  — площадь поперечного сечения внутренней полости ствола;  $\Omega_{\text{и}}$  — площадь торца хвостовика инструмента.

Реакция стенки:  $F_{\text{ст}} = c_{\text{ст}}x_1 - \mu_{\text{ст}}\dot{x}_1$ .

Сила взаимодействия масс  $m_1$  и  $m_2$ :

$$F_1 = c_1(x_1 - x_2) + \mu_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2).$$

Реакция рукоятки на воздействие оператора сверху:

$$F_{\text{р.в}} = \begin{cases} F_{\text{р.п}}, & \text{если } (x_2 - x_{\text{п}}) < l_{\text{р.п}} \text{ и } F_{\text{р.в}} \geq 0; \\ F_{\text{р.п}} + c_{2\text{max}}(x_2 - x_{\text{п}} - l_{\text{р.п}}), & \\ \text{если } (x_2 - x_{\text{п}}) \geq l_{\text{р.п}} \text{ и } F_{\text{р.в}} \geq 0; \\ 0, & \text{если } F_{\text{р.в}} < 0, \end{cases}$$

где

$$F_{\text{р.п}} = c_2(x_2 - x_{\text{п}}) + \mu_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_{\text{п}}) + (m_1 + m_2)g \cdot \cos \beta;$$

$l_{\text{р.п}}$  — осадка пружины, имитирующей связь массы  $m_2$  с рукояткой;  $F_{\text{р.п}}$  — реакция рукоятки на воздействие оператора в момент посадки пружины, имитирующей связь массы  $m_2$  с рукояткой, жестко;  $c_{2\text{max}}$  — коэффициент жесткости осаженой пружины.

Реакция рукоятки на воздействие оператора снизу:

$$F_{\text{р.н}} = \begin{cases} F_{\text{р.п}}, & \text{если } (x_{\text{п}} - x_2) < l_{\text{р.п}} \text{ и } F_{\text{р.н}} \geq 0; \\ F_{\text{р.п}} + c_{2\text{max}}(x_{\text{п}} - x_2 - l_{\text{р.п}}), & \\ \text{если } (x_{\text{п}} - x_2) \geq l_{\text{р.п}} \text{ и } F_{\text{р.н}} \geq 0; \\ 0, & \text{если } F_{\text{р.н}} < 0, \end{cases}$$

где  $F_{p,p} = c_2(x_p - x_2) + \mu_2(\dot{x}_p - \dot{x}_2)$ .

Сила сжатия амортизирующей пружины в рукоятке управления:

$$R_{II} = \begin{cases} c_{II}(x_p - x_c) + (m_1 + m_2 + m_p)g \cdot \cos \beta, \\ \text{если } R_{II} \geq 0; \\ 0, \text{ если } R_{II} < 0. \end{cases}$$

Здесь, поскольку рука оператора и амортизирующая пружина работают только на сжатие, при  $F_p < 0$  принимается  $F_p = 0$ , а при  $R_{II} < 0$  принимается  $R_{II} = 0$ .

Силы давления воздуха на ударник в камерах А и Б ствола:

$$F_{pA} = p_A \pi \frac{d_y^2}{4} = p_A \Omega_y;$$

$$F_{pB} = p_B \pi \frac{d_y^2}{4} = p_B \Omega_y,$$

где  $\Omega_y$  — площадь поперечного сечения ударника.

Силы давления воздуха на основание ствола (с) в камере Б и на инструмент (и):

$$P_c = p_B \pi \frac{(d_c^2 - d_{II}^2)}{4} = p_B \Omega_c;$$

$$P_{II} = p_B \pi \frac{d_{II}^2}{4} = p_B \Omega_{II},$$

где  $\Omega_c$  — площадь поверхности нижнего основания ствола.

Сила соударения ударника с инструментом:

$$F_y = \begin{cases} c_y(-z), \text{ если } z < 0; \\ 0, \text{ если } z \geq 0, \end{cases}$$

где  $z$  — расстояние между ударником и инструментом,

$$z = l_c - x_y - l_y - [l_x - l_6 + ((m_1 + m_2 + m_p + m_c)g \cos \beta) / c_{II} + x_c - x_{II}].$$

Сила взаимодействия инструмента со стволом:

$$F_{II} = \begin{cases} c_{II}(x_c - x_{II}) + (m_1 + m_2 + m_p + m_c)g \times \cos \beta, \\ \text{если } F_{II} > 0; \\ 0, \text{ если } F_{II} < 0. \end{cases}$$

Реакция пружины, удерживающей инструмент, на воздействие инструмента:

$$F_{III} = c_{III}(x_{II} - x_c).$$

Реакция скалки на воздействие инструмента:

$$F_{СК} = \begin{cases} c_{СК}(x_{II} - x_{СК}) + \mu_{СК}(\dot{x}_{II} - \dot{x}_{СК}) + (m_1 + m_2 + m_p + m_c + m_{II})g \cdot \cos \beta, \\ \text{если } F_{СК} > 0; \\ 0, \text{ если } F_{СК} \leq 0. \end{cases}$$

Сила трения, действующая на скалку:

$$F_{Тр} = \begin{cases} F_{СК} + m_{СК}g \cos \beta, \text{ если } \dot{x}_{СК} = 0; \\ F_T, \text{ если } \dot{x}_{СК} > 0, \end{cases}$$

где  $F_T$  — заданная сила трения движения скалки относительно гидравлических тисков.

Скорость скалки  $\dot{x}_{СК}$  принимается равной нулю при  $\dot{x}_{СК} \leq 0$ .

Сила растяжения пружины, удерживающей инструмент:

$$F_{III} = \begin{cases} c_{III}(x_{II} - x_c - l_{СК}), \text{ если } F_{III} \geq 0; \\ 0, \text{ если } F_{III} < 0, \end{cases}$$

где  $l_{СК}$  — свободный ход инструмента в стволе.

В уравнениях (2)  $V_A = \Omega(x_y - x_c)$ ,  $V_B = V_c - V_y - V_{II} - V_A$ , где  $V_c$ ,  $V_y$ ,  $V_{II}$  — соответственно объемы полости ствола, ударника и хвостовика инструмента, находящегося в стволе в текущий момент времени  $t$ ,  $V_{II} = l_{II}\Omega_{II}$ ;  $l_{II}$  — длина участка хвостовика инструмента, находящегося в камере Б,

$$l_{II} = l_x - l_6 + ((m_1 + m_2 + m_p + m_c) \times g \cos \beta) / c_{II} - x_{II} + x_c.$$

Логика миграции воздуха через отверстия из магистрали в камеры определяется соотношением давлений в камерах и в магистрали, а также при начавшемся движении воздуха продолжительностью времени  $\tau$  переключивания клапана в воздухо-распределительном устройстве.

Расход воздуха  $G_{AM}$  при его истечении из магистрали в камеру А (при  $p_A < p_M$ ) принимается равным расходу  $G$ , определяемому по формуле (1), если в ней положить  $v = v_{AM}$ ,  $p_1 = p_M$ ,  $T_1 = T_M$ ,  $f = f_A$ ,  $Y = p_A/p_M$ . При истечении воздуха из камеры А в магистраль (при  $p_A > p_M$ ) следует полагать  $G_{AM} = -G$  при  $v = v_{AM}$ ,  $p_1 = p_A$ ,  $T_1 = T_A$ ,  $f = f_A$ ,  $Y = p_M/p_A$ .

Аналогично расход воздуха  $G_{BM}$  при истечении воздуха из магистрали в камеру Б (при  $p_B < p_M$ ) принимается равным расходу  $G$ , определяемому по формуле (1), если в ней положить  $v = v_{BM}$ ,  $p_1 = p_M$ ,  $T_1 = T_M$ ,  $f = f_B$ ,  $Y = p_B/p_M$ . При истечении воздуха из камеры Б в магистраль, т. е. при  $p_B > p_M$ , следует полагать  $G_{BM} = -G$  при  $v = v_{BM}$ ,  $p_1 = p_B$ ,  $T_1 = T_B$ ,  $f = f_B$ ,  $Y = p_M/p_B$ .

Здесь  $v_{AM}$  и  $v_{BM}$  — коэффициенты расхода воздуха через отверстия, соединяющие камеры А и Б с магистралью;  $f_A$  и  $f_B$  — текущие значения условной площади открытых участков отверстий, соединяющих магистраль с камерами А и Б,

$$f_A = \begin{cases} f_{AM}(t - t_{p,x}) / \tau, & \text{если } p_A > p_B \text{ и} \\ t_{p,x} < t < (t_{p,x} + \tau); \\ f_{AM}, & \text{если } p_A > p_B \text{ и } t \geq (t_{p,x} + \tau); \\ f_{AM}[1 - (t - t_{p,x}) / \tau], & \text{если } p_A \leq p_B \text{ и} \\ t_{x,x} < t < (t_{x,x} + \tau); \\ 0, & \text{если } p_A \leq p_B \text{ и } t \geq (t_{x,x} + \tau); \end{cases}$$

$$f_B = \begin{cases} f_{BM}[1 - (t - t_{p,x}) / \tau], & \text{если } p_A > p_B \text{ и} \\ t_{p,x} < t < (t_{p,x} + \tau); \\ 0, & \text{если } p_A > p_B \text{ и } t \geq (t_{p,x} + \tau); \\ f_{BM}(t - t_{x,x}) / \tau, & \text{если } p_A \leq p_B \text{ и} \\ t_{x,x} < t < (t_{x,x} + \tau); \\ f_{BM}, & \text{если } p_A \leq p_B \text{ и } t \geq (t_{x,x} + \tau); \end{cases}$$

$f_{AM}$  и  $f_{BM}$  — конструктивные площади отверстий из магистрали в камеры А и Б;  $t_{p,x}$  и  $t_{x,x}$  — моменты времени, в которые клапан переключается в режим рабочего хода и в режим холостого хода.

Логика миграции воздуха через выхлопные отверстия определяется только положением ударника относительно ствола.

Расход воздуха через выхлопные отверстия в камере А также определяется по формуле (1), в которой при  $p_A \geq p_{ат}$  (истечение воздуха из камеры А в атмосферу) полагаем:  $v = v_{AB}$ ,  $p_1 = p_A$ ,  $T_1 = T_A$ ,  $f = f_{AB}$ ,  $Y = p_{ат}/p_A$ . Возможна кратковременная ситуация, при которой  $p_A < p_{ат}$ . Тогда следует полагать  $G_{Ai} = -G$  при  $v = v_{AB}$ ,  $p_1 = p_{ат}$ ,  $T_1 = T_{ат}$ ,  $f = f_{AB}$ ,  $Y = p_A/p_{ат}$ .

Расход воздуха через выхлопные отверстия в камере Б также определяется по формуле (1), в которой при  $p_B \geq p_{ат}$  ( $p_A \geq p_{ат}$ ) (истечение воздуха из камеры Б в атмосферу) полагаем  $G_{Bi} = G$  при  $v = v_{BB}$ ,  $p_1 = p_B$ ,  $T_1 = T_B$ ,  $f = f_{BB}$ ,  $Y = p_{ат}/p_B$ . При  $p_B < p_{ат}$  (приток воздуха из атмосферы в камеру) следует полагать  $G_{Bi} = -G$  при  $v = v_{BB}$ ,  $p_1 = p_{ат}$ ,  $T_1 = T_{ат}$ ,  $f = f_{BB}$ ,  $Y = p_B/p_{ат}$ .

Здесь  $v_{AB}$  и  $v_{BB}$  — коэффициенты расхода воздуха через отверстия, соединяющие камеры А и Б с атмосферой;  $f_{AB}$  и  $f_{BB}$  — текущие значения площади открытых участков выхлопных отверстий, соединяющих камеры А и Б с атмосферой,

$$f_{AB} = \begin{cases} 0, & \text{если } u_a \leq l_{B1}; \\ f_{B1}(u_a - l_{B1}) / \Delta l_1, & \\ \text{если } (l_{B1} + \Delta l_1) > u_a > l_{B1}; \\ f_{B1}, & \text{если } u_a > (l_{B1} + \Delta l_1); \end{cases}$$

$$f_{BB} = \begin{cases} f_{B1} + f_{B2}, & \text{если } u \leq l_{B1}; \\ f_{B1}[1 - (u - l_{B1}) / \Delta l_1] + f_{B2}, & \\ \text{если } l_{B1} < u \leq (l_{B1} + \Delta l_1); \\ f_{B2}, & \text{если } (l_{B1} + \Delta l_1) < u \leq l_{B2}; \\ f_{B2}[1 - (u - l_{B2}) / \Delta l_2], & \\ \text{если } l_{B2} < u \leq (l_{B2} + \Delta l_2); \\ 0, & \text{если } u > (l_{B2} + \Delta l_2), \end{cases}$$

где  $f_{B1}$  и  $f_{B2}$  — конструктивные площади выхлопных отверстий из камер А и Б в атмосферу.

Введение участков  $[l_{B1}, l_{B1} + \Delta l_1]$ ,  $[l_{B2}, l_{B2} + \Delta l_2]$ , на которых открытые площади

выхлопных отверстий непрерывно изменяются, и времени  $\tau$  переключения клапана отвечает физике протекающих в молотке процессов. В результате выбора величин  $\Delta l_1$ ,  $\Delta l_2$  и  $\tau$  корректируется вид индикаторных диаграмм, т. е. производится их «подгонка» под эксперимент (общепризнанный метод «обратного моделирования»). Также введение  $\Delta l$  и  $\tau$  позволяет избежать при проведении расчетов трудностей математического характера, возникающих при появлении в формулах (2) производных  $dp/dt$  и  $dT/dt$ , стремящихся к бесконечности при скачкообразном изменении давления в камерах и расходов воздуха.

В качестве примера проводится моделирование системы с получившим широкое распространение молотком МО-2Б. Принимаются следующие исходные данные. Геометрические параметры:  $\Delta l = 0,026$  м;  $\Delta l_1 = 0,008$  м;  $l_c = 0,270$  м;  $l_{в1} = 0,146$  м;  $l_{в2} = 0,220$  м;  $l_v = 0,08$  м;  $l_k = 0,043$  м;  $l_x = 0,07$  м;  $l_6 = 0,063$  м;  $l_{сх} = 0,02$  м;  $l_{рп} = 0,005$  м;  $d_c = d_v = 0,032$  м;  $d_{и} = 0,024$  м;  $f_{\Delta M} = 2,69 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;  $f_{БМ} = 1,77 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;  $f_{в1} = 5,5 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;  $f_{в2} = 10^{-4}$  м<sup>2</sup>;  $V_{уд} = 5,9 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>;  $\beta = 0$  град.

Динамические параметры:  $m_2 = 3,6$  кг;  $m_p = 1,595$  кг;  $m_c = 5,548$  кг;  $m_v = 0,404$  кг;  $m_{и} = 1,2$  кг;  $m_{сх} = 1,8$  кг;  $c_{ст} = 5000$  Н/м;

$c_1 = 2500$  Н/м;  $c_2 = 2,7 \cdot 10^5$  Н/м;  $c_{п} = 2500$  Н/м;  $c_y = 4 \cdot 10^6$  Н/м;  $c_{и} = 6 \cdot 10^5$  Н/м;  $c_{пп} = 10^4$  Н/м;  $c_{сх} = 2 \cdot 10^6$  Н/м;  $c_{max} = 5 \cdot 10^5$  Н/м;  $c_{ср,max} = 5 \cdot 10^5$  Н/м;  $c_c = 5 \cdot 10^5$  Н/м;  $\mu_{ст} = 150$  Н·с/м;  $\mu_1 = 350$  Н·с/м;  $\mu_2 = 350$  Н·с/м;  $\mu_{сх} = 500$  Н·с/м;  $F_T = 8000$  Н. Газотермодинамические параметры:  $p_M = 5 \cdot 10^5$  Па;  $p_{ат} = 10^5$  Па;  $p_{х,х} = 2,6 \cdot 10^5$  Па;  $p_{р,х} = 2,6 \cdot 10^5$  Па;  $\tau = 3 \cdot 10^{-4}$  с;  $v_{\Delta M} = 0,7$ ;  $v_{БМ} = 0,7$ ;  $v_{\Delta B} = v_{БB} = 0,4$ ;  $T_M = 303$  К;  $T_{ат} = 293$  К.

Варируется  $m_1$  от 10 до 40 кг.

В начальный момент времени перемещения и скорости всех масс полагаются равными нулю,  $p_A = p_M$ ,  $p_A = p_{ат}$ ,  $T_A = T_M$ ,  $T_B = T_{ат}$ .

На рисунке 2 представлены перемещения масс системы при  $m_1 = 20$  кг, причем рассматриваются два варианта стенда: с упором и без упора.

В случае системы без упора вследствие отдачи, как и ожидалось, наблюдается непрерывное смещение ствола, рукоятки и масс имитатора руки: например, рукоятки в течение 0,3 с на 9 см. В случае введения в модель стенки массы рукоятки и имитатора руки совершают колебательные движения с частотой в среднем 2,5 Гц, причем максимальное смещение рукоятки составляет 4,5 см. Таким образом, применение упора является необходимым действием для фиксации имитатора руки в определенных пределах.

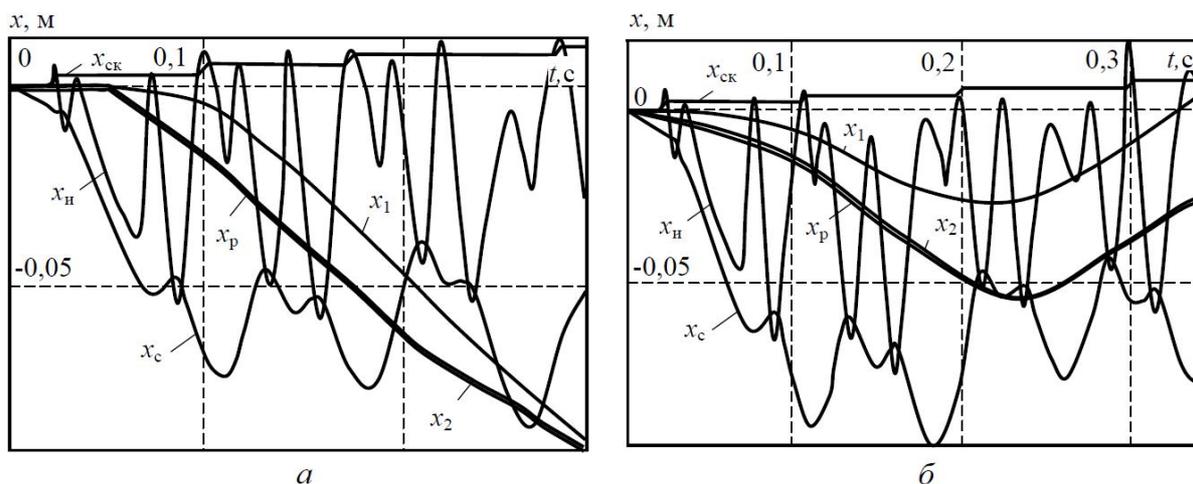


Рисунок 2 Перемещения масс системы без стенки (а) и со стенкой (б)

На рисунках 3–8 отражены результаты моделирования при  $m_1 = 30$  кг. На диаграммах процессов нанесены точки  $A$  и  $B$ , соответствующие началу подачи воздуха в камеры  $A$  (при  $p_A = p_{р.х}$ ) и  $B$  (при  $p_B = p_{х.х}$ ), т. е. началу процесса переключивания клапана. Точка  $B$  соответствует моменту достижения ударником верхнего положения, а точка  $\Gamma$  — его соударения с инструментом в нижнем положении. Точки  $\Delta$ ,  $E$  и  $\mathcal{Ж}$  отвечают началу или прекращению выхлопа соответственно из камеры  $A$  в атмосферу, из камеры  $B$  в атмосферу через отверстия первого и второго ярусов. На диаграммах наблюдается ожидаемая периодичность (в среднем с частотой 22,5 Гц) движения ударника. Вместе с тем вследствие сложных колебательных процессов в механической системе с семью массами продолжительность рабочего цикла колебаний ударника и, соответственно, газотермодинамических процессов в молотке не остается постоянной.

Скорость ударника на участке  $B\mathcal{Ж}$  рабочего хода (см. рис. 3) при практическом отсутствии противодействующего давления интенсивно возрастает. На участках  $\mathcal{Ж}B$  и  $B\Gamma$  происходит достаточно интенсивное снижение скорости (вследствие возрастания в запираемой камере  $B$  противодействия и подключения ее к магистрали), в точке  $\Gamma$  скорость резко, вследствие соударения с инструментом, изменяет направление, а на участке холостого хода  $\Gamma\Delta$  — и величину. Торможение наступает после запираания камеры  $A$  в точке  $\Delta$  и подключения ее к магистрали (точка  $A$ ) до полной остановки в точке  $B$ .

Давление в каждой камере (см. рис. 4) резко увеличивается при ее запираании и последующем в процессе переключивания клапана поступлении в нее воздуха из магистрали. Давление в камере падает при открывании ударником выхлопных отверстий, после чего при поступлении воздуха из магистрали поддерживается на некотором уровне или становится равным атмосферному давлению при прекращении по-

ступления воздуха из магистрали. В камере  $B$  на участке  $AB$  и в начале участка  $B\Delta$  образуется вакуум ( $p_B < p_{ат}$ ).

За ударом поршня-ударника по инструменту (см. рис. 5) следует удар инструмента по скалке, а после его отскока от скалки, в ряде случаев, — удар по стволу. По мере увеличения силы прижатия инструмента к скалке (при увеличении варьируемого значения  $m_1$ ) число ударов инструмента по стволу в течение рабочего цикла возрастает.

Инструмент при соударении со скалкой обгоняет ее на величину взаимной деформации. Скалка кратковременно подвигается, преодолевая силы трения в тисках (см. рис. 6). Суммарное перемещение скалки за секунду в среднем составляет 2 см, что отвечает требованиям стандарта [1].

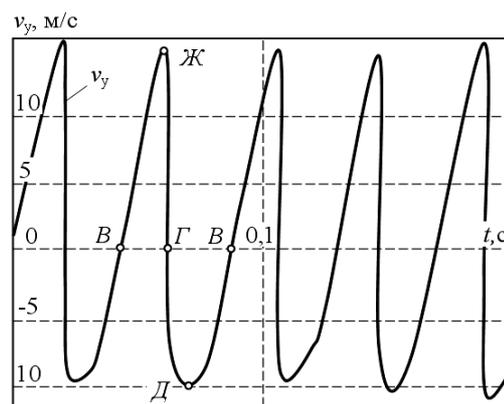


Рисунок 3 Диаграммы скорости ( $v_y$ ) ударника

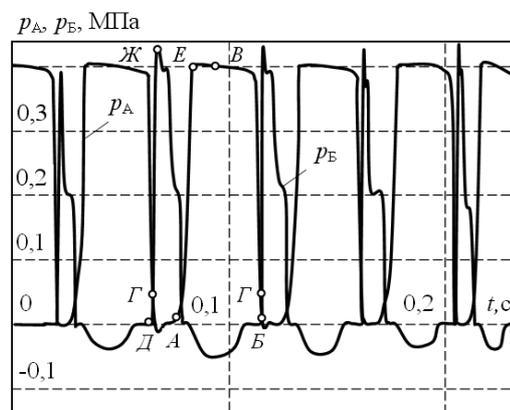


Рисунок 4 Индикаторные диаграммы отбойного молотка МО-2Б

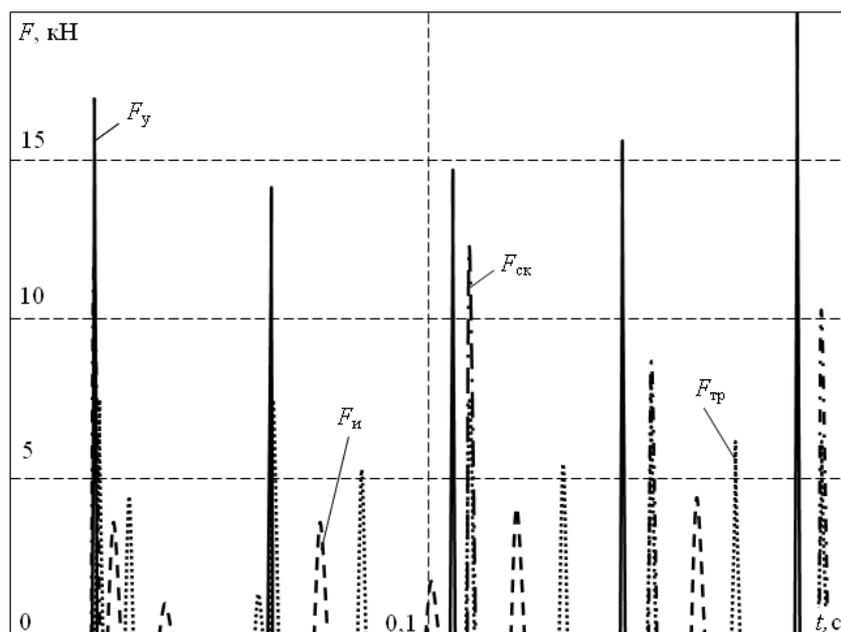


Рисунок 5 Диаграммы сил взаимодействия инструмента с ударником ( $F_y$ ), стволom ( $F_{и}$ ) и скалкой ( $F_{ск}$ ) и силы трения скалки ( $F_{тр}$ )

Графики изменения температуры в камерах (рис. 7) отвечают графикам давления: при сжатии воздуха температура увеличивается, при разрежении — снижается. Резкое увеличение температуры в виде кратковременных выбросов наблюдается при запирации камер, особенно камеры Б.

Особенностью диаграмм расходов воздуха (см. рис. 8) является значительный непроизводительный расход воздуха из магистрали при открытых выхлопных отверстиях. Особенно это заметно для расходов в камере Б. На участке  $AB$  при холостом ходе ударника после подключения к магистрали камеры А (достижении давлением  $p_A$  значения  $p_{р.х}$ ), а затем при  $p_A > p_m$  воздух выталкивается из камеры в магистраль. Аналогичная картина, в ряде случаев, наблюдается и при запирации камеры Б. В моменты открывания выхлопных отверстий в камерах А и Б имеет место резкое кратковременное увеличение расхода воздуха в атмосферу, причем в камере А из-за резкого падения давления  $p_A$  это сопровождается практически одновременным увеличением расхода воздуха из магистрали.

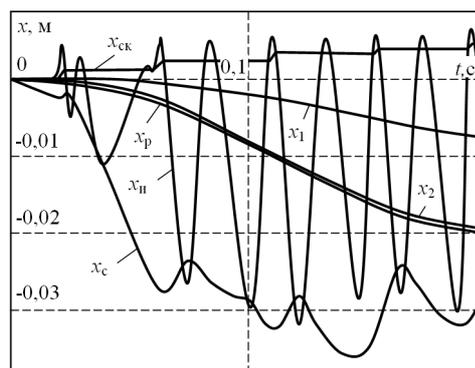


Рисунок 6 Диаграммы перемещений элементов системы

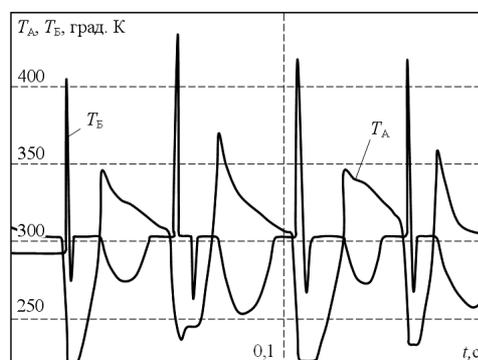
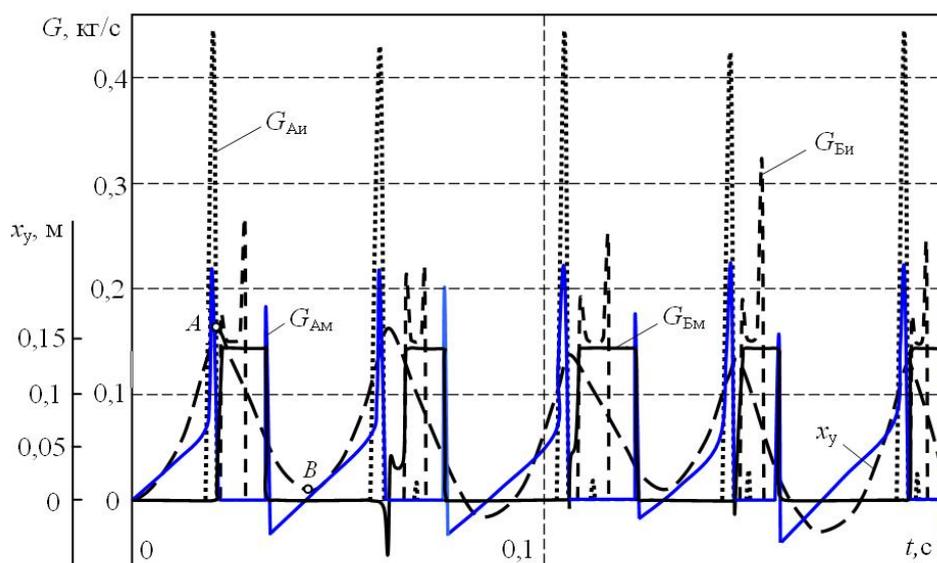


Рисунок 7 Диаграммы температуры в камерах МО-2Б



$G_{AM}, G_{BM}$  — расход воздуха, поступающего из магистрали в камеру А и в камеру В соответственно;  
 $G_{Ai}, G_{Bi}$  — расход воздуха, истекающего в атмосферу из камер А и В соответственно

Рисунок 8 Диаграммы перемещения ударника ( $x_y$ ), расходов воздуха через впускные и выхлопные отверстия

Действующие (среднеквадратические) значения ускорения  $a$  и скорости  $v$  рукоятки определяются по формулам

$$\bar{a}_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_{pi}^2 \Delta t}{T - t_{\Pi}}}; \quad \bar{v}_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_{pi}^2 \Delta t}{T - t_{\Pi}}},$$

где  $T$  — продолжительность измерений;  
 $t_{\Pi}$  — продолжительность переходных процессов в системе при включении молотка;  
 $a_{pi}, v_{pi}$  — текущие  $i$ -е значения ускорения и скорости рукоятки.

Корректированные по частоте рукоятки уровни локальной вибрации:

$$a_{\text{кор}} = \sum_j^N k_{a \text{ кор} j} \bar{a}_{pj}; \quad v_{\text{кор}} = \sum_j^N k_{v \text{ кор} j} \bar{v}_{pj},$$

где  $k_{a \text{ кор} j}$  и  $k_{v \text{ кор} j}$  — весовые коэффициенты,  $j$  и  $N$  — номера октавных полос частот.

Частота вибраций рукоятки, определяемая путем моделирования, приходится на первую октаву. Одночисловые показатели

уровня вибраций, приведенные в таблице, заметно зависят от массы  $m_1$  и превышают соответствующие санитарные нормы показателей локальной вибрационной нагрузки для длительности смены 8 ч:  $a=2,0 \text{ м/с}^2$  и  $v=0,02 \text{ м/с}$  [5]. В этой связи, очевидно, необходимо определиться с некоторым значением  $m_1$ .

Таблица

Одночисловые показатели уровня вибрации

$m_1$ , кг	10	20	30	40
$\bar{a}_p$ , $\text{м/с}^2$	6,2	4,86	3,8	2,1
$\bar{v}_p$ , $\text{м/с}$	0,53	0,2046	0,146	0,114

При наличии в составе стенда (и в составе модели) упора для имитатора руки можно рекомендовать  $m_1$ , равное 20 кг, что соответствует предельно допустимому для ручных машин значению усилия нажатия на рукоятку 200 Н [1].

**Выводы.** В результате моделирования установлено, что во избежание чрезмерных при отдаче ударника смещениях элементов

системы необходимо в испытательном стенде устанавливать упор, имитирующий верхнюю часть туловища, а в модели, соответственно, предусматривать стенку. При существенной зависимости вибрационных характеристик от большей массы имитато-

ра руки оператора для однозначности целесообразно применять вполне определенную массу, например, 20 кг. В серийном молотке, установленном на стандартном испытательном стенде, уровни вибраций превышают санитарные нормы.

### Библиографический список

1. 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.
2. Корнеев, С. В. Моделирование работы пневматических отбойных молотков для исследования вибраций [Текст] / С. В. Корнеев, Д. А. Вишневский, Д. В. Мулов // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — СПб. : НИЦ МС, 2021. — № 13. — С. 7–12.
3. ГОСТ Р ИСО 10068–2015. Вибрация и удар. Данные о входном механическом импедансе системы «кисть — рука» (ISO 10068:2012, IDT) [Текст]. — Введ. 2016-12-01. — М. : Стандартинформ, 2016. — 30 с.
4. Герц, Е. В. Динамика пневматических приводов автоматов [Текст] / Е. В. Герц, Г. В. Крейнин. — М. : Машиностроение, 1964. — 234 с.
5. СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий [Текст]. — Введ. 1996-10-31. — М. : Инф.-изд. центр Минздрава России, 1996. — 30 с.

© Корнеев С. В.  
 © Вишневский Д. А.  
 © Мулов Д. В.

*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 25.02.2022.*

**Doctor of Technical Sciences Korneev S. V., Doctor of Technical Sciences Vishnevskiy D. A., Mulov D. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR, mulovd@yandex.ru)**

### **SIMULATION OF BENCH TESTS OF PNEUMATIC JACKHAMMERS ACCORDING TO GOST R 55162–2012**

*The mathematical model of a standard test bench manufactured in accordance with GOST R 55162–2012 and a pneumatic jackhammer of the MO series installed on it has been developed, which allows simulating hammer tests in order to study the processes in the “test bench — jackhammer” system and select rational equipment parameters.*

**Key words:** *pneumatic jackhammer, test bench, mathematical model, indicator diagram, stand parameters, vibration acceleration, vibration velocity.*

УДК 621.184.85, 622.445, 622.446, 629.048.4, 697.92

к.т.н. Ткачев М. Ю.

(АДИ ДонНТУ, г. Горловка, ДНР, mishel-tkachev@ya.ru)

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ НОВЫХ УСТАНОВОК ВЕНТИЛЯЦИИ КАРЬЕРОВ

*На основании многолетних исследований и освещения уровня техники, реализующей активное пылегазоподавление с известными недостатками (наличие застойных «мертвых» зон), рассмотрена концепция построения новых установок вентиляции глубоких карьеров, осуществляющих свою работу в сложных климатических и неблагоприятных синоптических условиях. Отличительной особенностью предлагаемых решений является использование в конструкции агрегатов защищенного патентом РФ на изобретение модернизированного узла безопасного вентилятора, принцип действия которого основывается на аэродинамических эффектах Коанда и торнадо.*

**Ключевые слова:** установка местного проветривания, установка вентиляции карьеров, предельно допустимые концентрации, безопасный вентилятор, эффект Коанда, теория вихревого движения.

Технологические процессы открытой разработки месторождений полезных ископаемых сопровождаются образованием большого количества газов, пыли, аэрозолей, которые смешиваются и при отсутствии системы вентиляции попадают в окружающую среду, в результате чего резко ухудшаются санитарно-гигиенические условия труда [1–3]. Для предотвращения загрязнения воздуха в районах размещения крупных предприятий необходимы разработка и внедрение в производство передовых методов эвакуации, локализации и очистки образующихся пыли и газов, которые бы обеспечили с большой энергетической эффективностью достижение требуемого результата [4]. Наряду с традиционными системами газоотсоса и газоочистки, основанными на применении мощных дымососов и вентиляторов, в настоящее время находят промышленное использование установки, в которых направленная циркуляция газовой среды обеспечивается путем создания зон пониженного давления за счет огибания движущимися потоками воздуха специальных аэродинамических профильных поверхностей. При этом снижается энергопотребление для выполнения транспортирующей функции

во время эвакуации газопылевых выбросов, образующихся при работе технологических агрегатов тяжелого промышленного производства (горнодобывающая и сырьевые отрасли), в том числе в области автомобилестроения, транспортных средств и т. д., где сосредоточено более трех четвертей большегрузного автотранспорта.

Разработка высокоэффективного с энергетической точки зрения оборудования является актуальной задачей в условиях рыночной экономики, а также реализации программ импортозамещения. В части потребления инженерными системами установок и устройств электрической и других видов энергии установлено, что ее доля составляет около 90 % по отношению к используемому в мире объему. Ввиду значительного удельного веса данного показателя актуальной представляется задача повышения технико-экономических показателей работы систем вентиляции месторождений полезных ископаемых, разрабатываемых открытым способом [5].

**Целью** данной работы является повышение технико-экономических показателей работы создаваемых конструкций установок вентиляции карьеров за счет применения в основе их принципа действия эффек-

тов Коанда и торнадо, реализующихся высокоэффективным безлопастным вентилятором в соответствии с положениями теории вихревого движения с учетом влияния скорости генерируемого потока, индуцированного замкнутым вихревым кольцом. Для повышения показателей эффективности функционирования таких отраслей промышленности, как химическая, машиностроительная, металлургическая, улучшения показателей работы комплекса очистки воздушной среды над транспортной магистралью, в тоннелях, создания благоприятного микроклимата рабочего пространства при открытой разработке мест полезных ископаемых должны быть использованы нижеприведенные результаты теоретических и экспериментальных исследований рациональных конструктивных параметров составных элементов установок вентиляции, в том числе их рабочих органов, создающих направленный воздушный поток в горизонтальной и вертикальной плоскостях выработок, с целью осуществления энергоэффективного активного подавления и удаления пылегазовых образований, аэрозолей от источников.

**Задачей** данной работы является разработка на основании достаточного объема эмпирических исследований конструкции новых установок вентиляции карьеров с минимальными временными и технико-экономическими затратами для обеспечения качественной эвакуации газопылевых выбросов от источников их образования в рабочем пространстве при проведении открытых горных работ.

**Объект исследования** — высокоэффективное технологическое оборудование, предназначенное для эвакуации, а также подавления пылегазовых образований от источника их происхождения.

**Предмет исследования** — схемотехнические решения и конструктивные параметры установок и устройств местного проветривания и вентиляции.

По данным исследователей, до 80 % полезных ископаемых в настоящее время до-

бывается открытым способом в карьерах, глубина которых достигает 500–700 м и более. При этом около 50 % годового времени работу в таких карьерах проводят в условиях нарушения воздухообмена с окружающей средой и накопления вредных примесей в образующихся застойных зонах, что в конечном счете является причиной простоя оборудования из-за невозможности нахождения обслуживающего персонала в местах с предельно допустимой концентрацией опасных веществ [1].

Для поддержания требуемого ритма функционирования карьеров и надлежащих условий работы технического персонала необходимы специальные аэрационные установки, реализующие различные способы вентиляции.

Поиск технических решений, обеспечивающих соответствующие требования охраны труда, в области местного проветривания карьеров [6] проводился по следующим классам МПК: А62В 29/00 — устройства, например установки для обезвреживания или защиты от химических отравляющих веществ; В08В 15/00 — предотвращение распространения дыма, паров, пыли и прочих продуктов загрязнения из мест, где они образуются; сбор или удаление продуктов загрязнения из мест их скопления; E21F 1/00 — вентиляция рудников или туннелей; распределение вентиляционных потоков; F24F 7/00 — вентиляция; F24F 7/04 — вентиляция с системами трубопроводов; F24F 9/00 — применение воздушных потоков для экранирования, например воздушные завесы.

При поиске были выделены следующие наиболее перспективные устройства, системы и способы, нашедшие свою техническую реализацию.

Установка для проветривания карьеров (рис. 1) [1] смонтирована на транспортном средстве 1 и состоит из пропеллерного ротора 2 с приводом 3, спрямляющего аппарата-турбулизатора 4, механизма поворота ротора 5, оросительной системы 6. Спрямляющий аппарат-турбулизатор

состоит из внутреннего кольца 7, внешнего кольца 8, лопаток 9 и механизма одновременного поворота лопаток 10.

Предприятием «НИПИГОРМАШ» (РФ, г. Екатеринбург) выпускаются [7] установки местного проветривания УМП-1Б (рис. 2), которые представляют собой самоходный вентилятор-ороситель, предназначенный для использования в карьерах, имеющих автомобильные дороги. На раме, соединенной с рамой автомобиля, установлена приводная колонка с винтом. Привод осуществляется от двигателя через карданные валы, редуктор, промежуточный карданный вал и повышающую передачу автомобиля. Поворот винта в горизонтальной и вертикальной плоскостях обеспечивается гидравлическими цилиндрами.

Водяная система с помощью насоса и вентиля обеспечивает подачу воды из цистерны в гидромонитор, поливочное устройство и форсунки, а при необходимости — и забор воды из любого водоема.

Подача воды в воздушную струю осуществляется форсунками, расположенными на верхнем ограждении. Орошение горной массы производится с помощью гидромонитора, автомобильных дорог — с помощью поливочного устройства.

Привод насоса производится через карданную передачу, коробку отбора мощности от повышающей передачи автомобиля.

Сотрудниками кафедры МОЗЧМ ГОУВПО «ДонНТУ» совместно с Старооскольским технологическим институтом им. А. А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“» разработана с использованием узла безлопастного вентилятора [8] новая система проветривания карьеров (рис. 3) [1], содержащая ходовую часть 1 на базе трехосного грузового автомобиля, на раме которого смонтирована поворотная горизонтальная платформа 2 с жестко закрепленными на ней основанием 3 плоского трехзвенного рычажного механизма и воздушным компрессором 11 для подачи по гибким тру-

бопроводам 4 и 5 сжатого воздуха к системе возбуждения и формирования газозвукового потока, выполненной в виде горизонтально расположенного безлопастного вентилятора 6. Данный вентилятор шарнирно связан с конечным звеном 7 рычажного механизма, несущая балка 15 которого с возможностью поворота в вертикальной плоскости одним концом соединена с основанием 3. Относительное перемещение в пространстве балки 15 и звена 7 обеспечивается силовыми гидроцилиндрами 8 и 14. Компрессор 11 и маслосос 13, обеспечивающий работу гидроцилиндров, приводятся в действие двигателем внутреннего сгорания 12. Вентили 9 и 10 служат для регулирования расхода воздуха, поступающего к элементам безлопастного вентилятора 6.

Вентиляторные установки, представленные на рисунках 4–7, являются специальным оборудованием. Установленная мощность представленных крупных вентиляторных установок достигает 5000 кВт. Вентилятор-ороситель НК-12КВ с газывыводящим соплом на гусеничном шасси (рис. 4, а) или на базе автомобиля (рис. 4, б) предназначен для подачи в застойные зоны карьеров свежего воздуха, выноса за карьерное пространство, а также активного подавления вредных примесей воздушно-водяными струями.

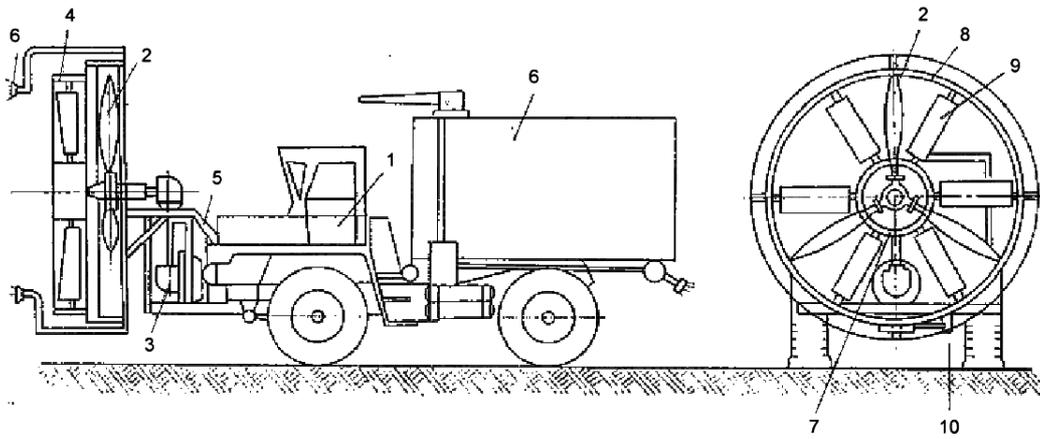
Карьерная оросительно-вентиляционная установка (рис. 8) содержит ходовую часть 1 автомобиля, формирователь потока 2, обечайку 3 с днищами 4 и 5, емкость 6 для воды, турбовинтовой двигатель 7, поворотную платформу 8, патрубок 9 скоростного воздушного напора, форсунки 10 с трубопроводом 11 для подачи воды в воздушный поток.

Вентиляционные установки (рис. 1, 2, 4) относятся к устройствам с изотермическими и неизотермическими струями, вследствие чего оборудованы оросительными системами, с помощью которых вода или активные растворы вводятся непосредственно в вентиляционный поток. При этом

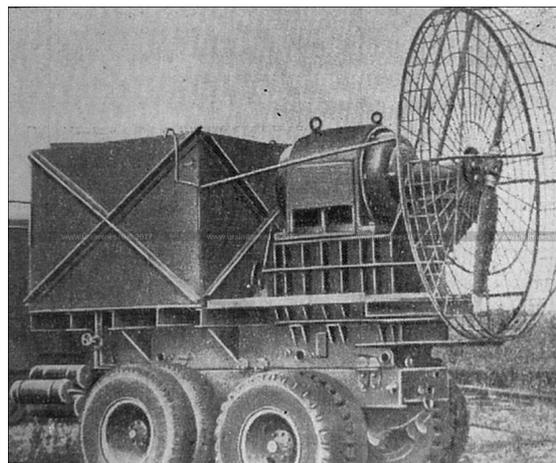
**МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

следует отметить, что наиболее предпочтительными в эксплуатации с точки зрения удельных энергетических затрат являются вентиляторные установки с изотермиче-

скими струями, рациональность конструкций которых реализуется за счет применения максимально большого диаметра начального сечения (ротора).



а



б

Рисунок 1 Конструкция установки для проветривания карьеров (а) и общий вид ее модифицированной модели (б)



а



б

Рисунок 2 Общий вид УМП-1Б на марше (а) и в карьере (б)

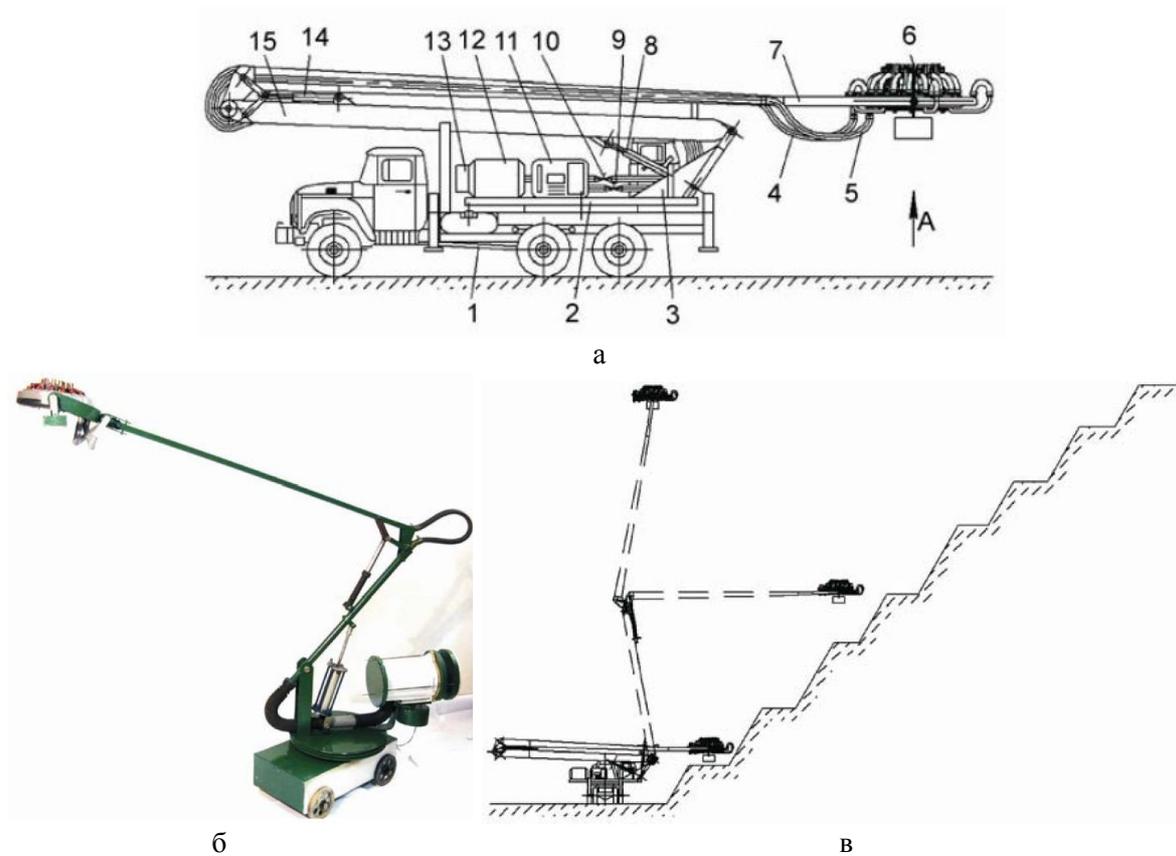


Рисунок 3 Конструкция (а), общий вид разработанной вентиляторной установки (б) и относительное положение ее элементов в рабочем положении (в)

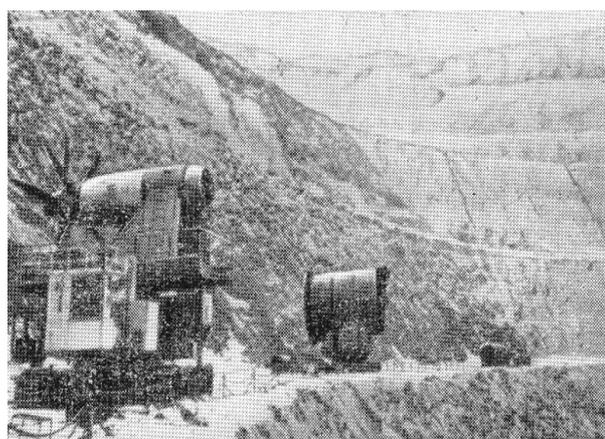


Рисунок 4 Карьерная вентиляторная установка НК-12КВ с газывыводящим соплом

Также на базе автомобиля монтируются вентиляторные установки с турбореактивным двигателем (рис. 7).

Вентиляторная установка «Метеотрон УТ-ЛФИ-2» (рис. 9) является тепловой. Ее устройство создает конвективные струи за счет сжигания в горелках, размещенных на пустотелой поворотной ферме, жидкого или газообразного топлива.

Также к тепловой установке относится газотурбинная установка УПК 60/300 (рис. 10), отличающаяся высоким (0,98) КПД.

Известные вентиляторные устройства имеют следующие характеристики: расход

воздуха —  $125...3770 \text{ м}^3/\text{с}$ ; мощность —  $220...80000 \text{ кВт}$ ; дальность струи  $\approx 1300 \text{ м}$ ; расход воздуха в конце активного участка струи  $\leq 80000 \text{ м}^3/\text{с}$ ; часовой расход топлива  $\leq 7900 \text{ кг}$ ; электрическая мощность  $\leq 1000...1200 \text{ кВт}$ .

Эффективное проветривание рабочих зон крупных карьеров (рис. 11) возможно при использовании систем вентиляции, состоящих из нескольких мощных вентиляторов, расположенных в карьерном пространстве с учетом конфигурации карьера и рельефа окружающей местности (рис. 12–15).

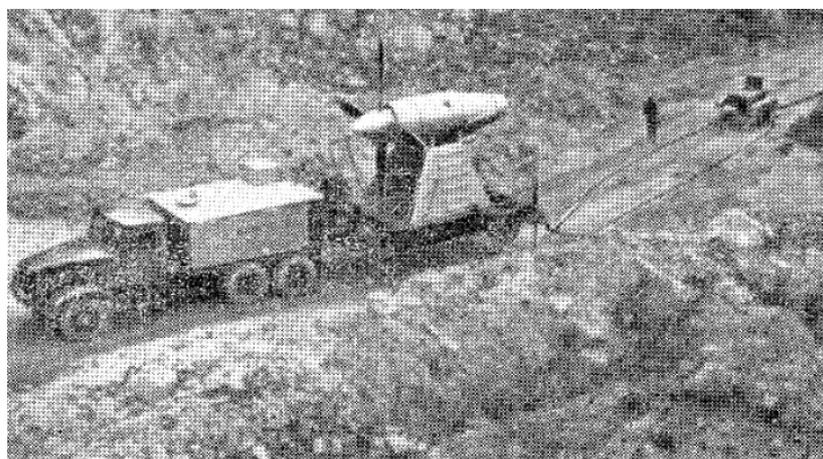
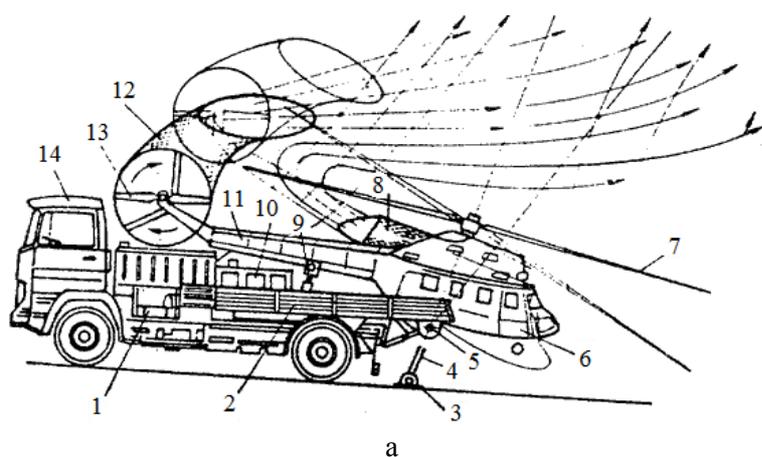
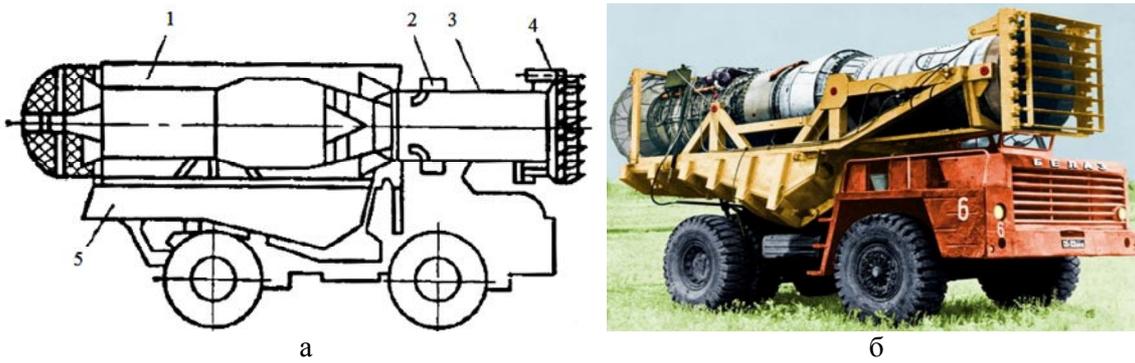


Рисунок 5 Карьерная вентиляторная установка АИ-20КВ



1 — баки; 2 — силовая рама; 3 — опора; 4 — аутригеры; 5 — шарнир; 6 — вертолет; 7 — воздушный винт; 8 — выхлопные патрубки; 9 — гидроцилиндры; 10 — баки; 11 — хвостовая балка; 12 — вентиляционный патрубков; 13 — дополнительный винт; 14 — кабина

Рисунок 6 Конструкция (а) и общий вид вентиляторного агрегата (б) с несущими винтами вертолета



1 — двигатель; 2 — форсунка; 3 — эжекторная насадка; 4 — отклоняющее устройство;  
5 — цистерна с топливом

Рисунок 7 Вентиляционная установка УВУ-1 с турбореактивным двигателем  
на базе автомобиля БелАЗ-540

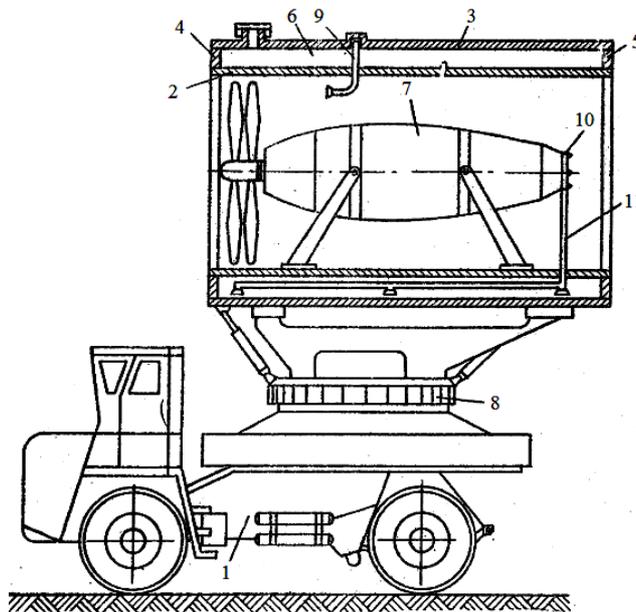


Рисунок 8 Карьерная оросительно-вентиляционная установка

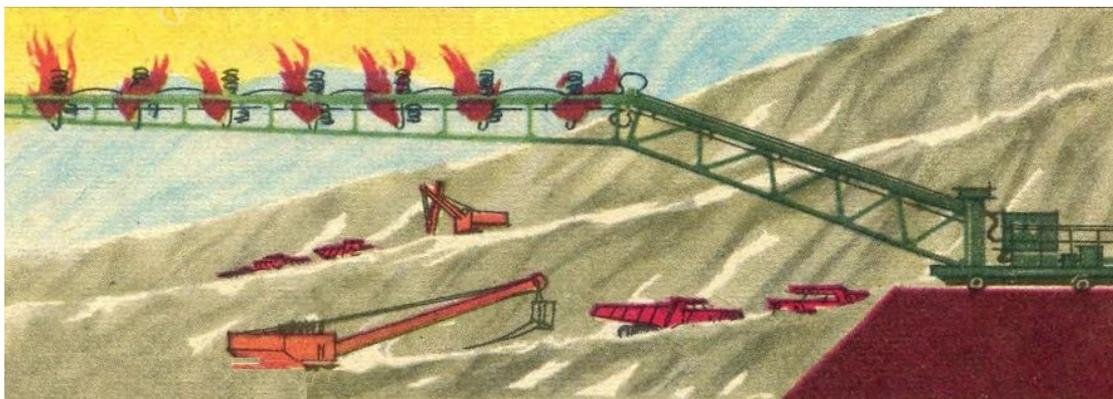


Рисунок 9 Вентиляторная установка «Метеотрон УТ-ЛФИ-2»

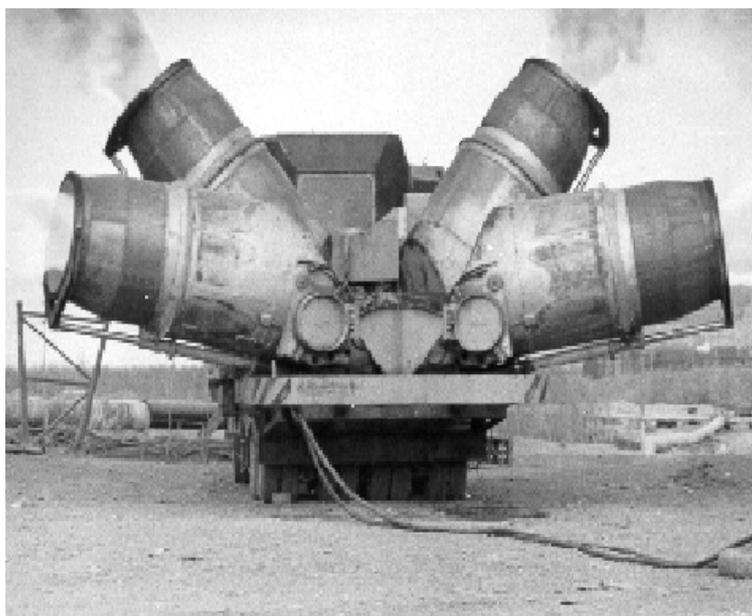


Рисунок 10 Газотурбинная установка УПК 60/300



а



б

Рисунок 11 Рабочий уступ рудника «Узельгинский» Учалинского ГОКа (а) и карьер Башкирского медно-серного комбината (б)

Ведущий замысел построения платформы рекомендуемой к разработке УВК-1 (рис. 16) должен соответствовать концепции прицепного автопоезда для размещения на раме компрессора и цистерны.

В воронкообразных карьерах с целью повышения эффективности проветривания за счет обеспечения проветривания всего карьерного пространства вентиляционные установки УВК-1 устанавливаются в объеме карьера по восходящей конической винтовой линии с углом наклона осей струй,

создаваемых вентиляционными установками, в пределах  $10\text{--}25^\circ$  к горизонту, при этом расстояние между вентиляционными установками составляет  $0,5\text{--}0,9$  величины предельной дальности, а расстояние последней вентиляционной установки от поверхности — не менее  $0,9$  ее предельной дальности.

Также получение вихревого восходящего потока может быть достигнуто за счет применения УВК-2 по способу проветривания карьеров, представленному на рисунке 17.

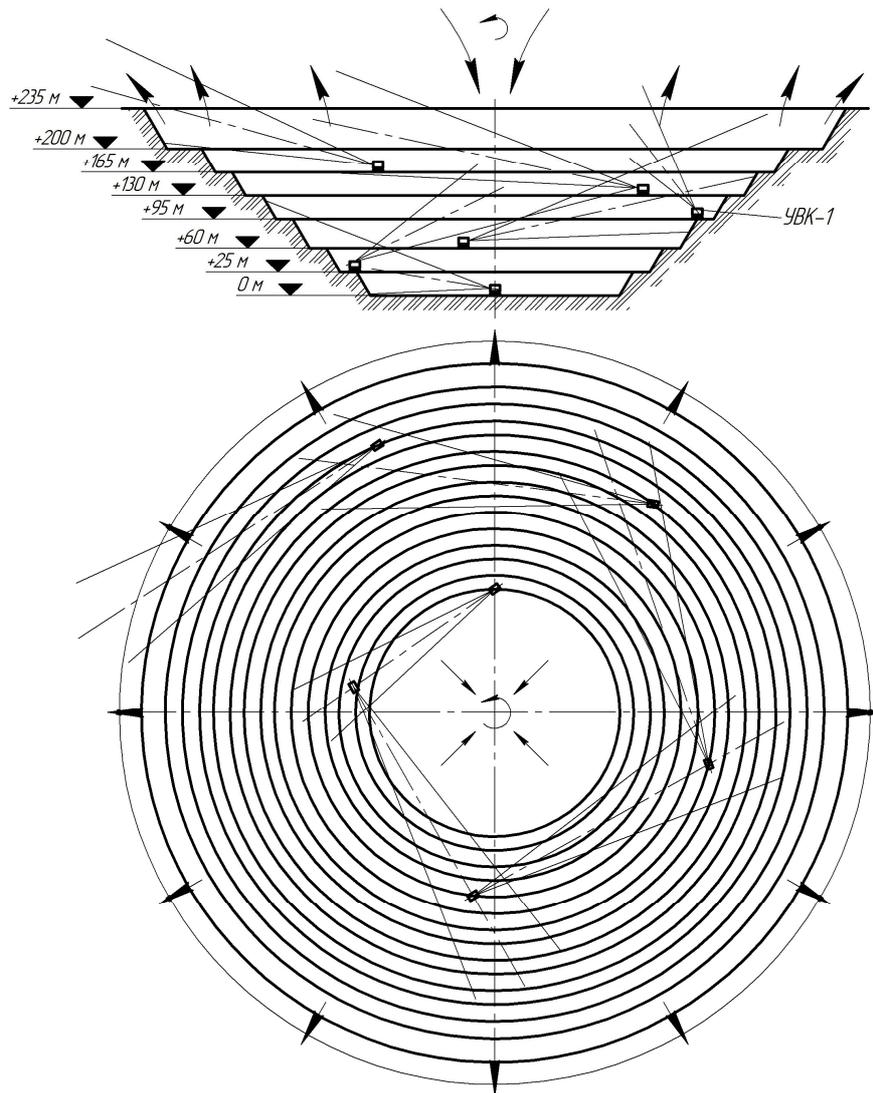


Рисунок 12 Схема вентиляции и пылегазоподавления в атмосфере карьеров с применением установки вентиляции УВК-1

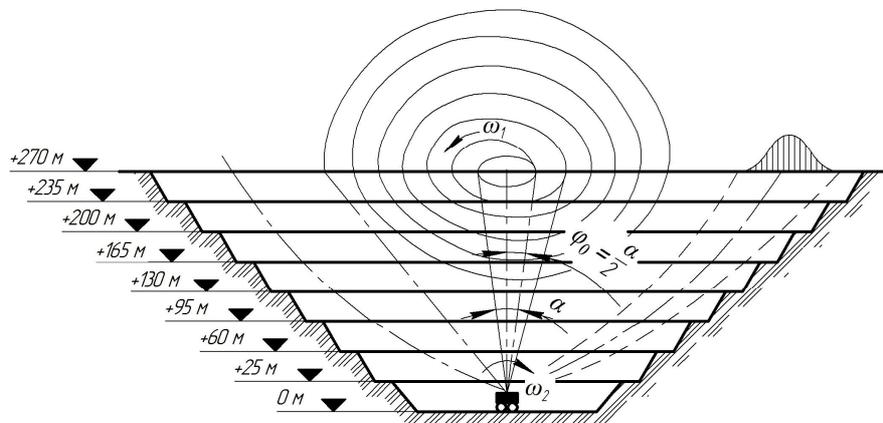


Рисунок 13 Схема вентиляции и пылегазоподавления в атмосфере воронкообразных карьеров с применением установки вентиляции УВК-2

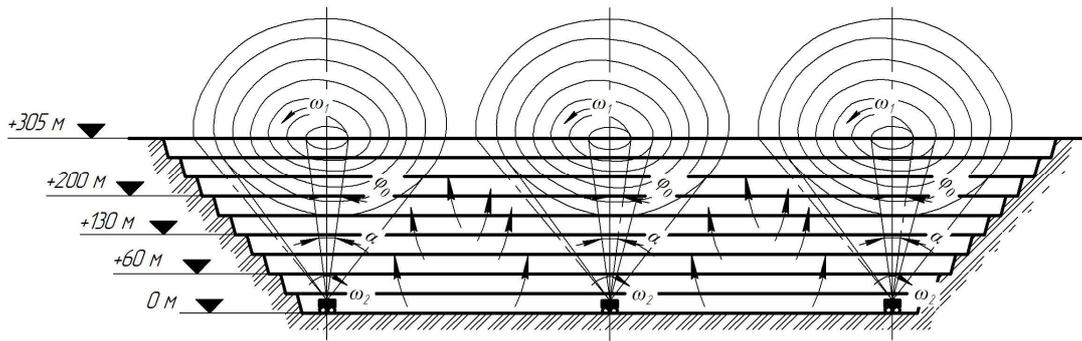


Рисунок 14 Схема вентиляции и пылегазоподавления в атмосфере вытянутых карьеров с применением установки вентиляции УВК-2

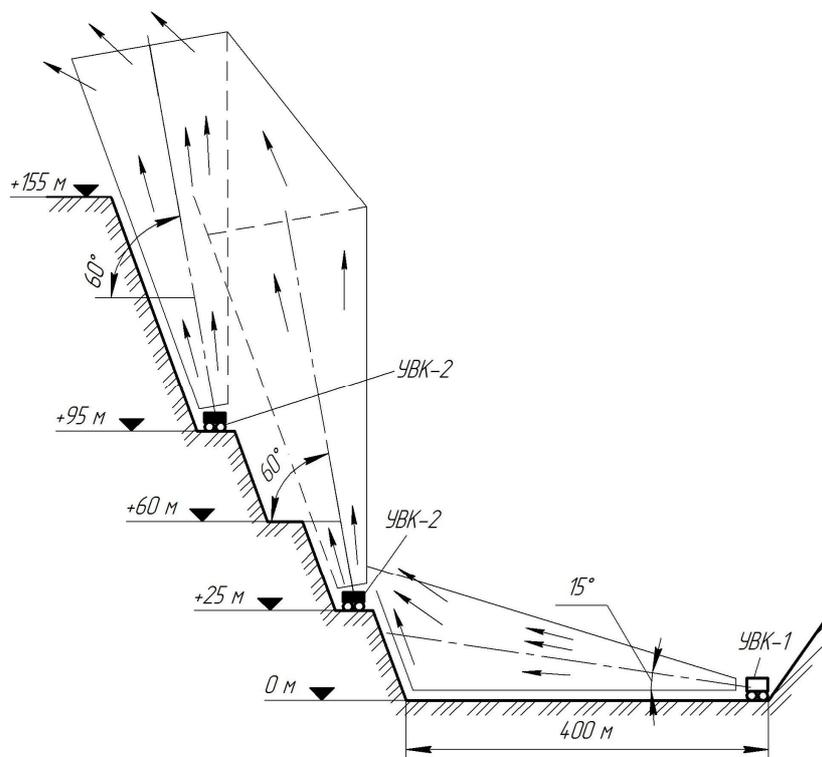
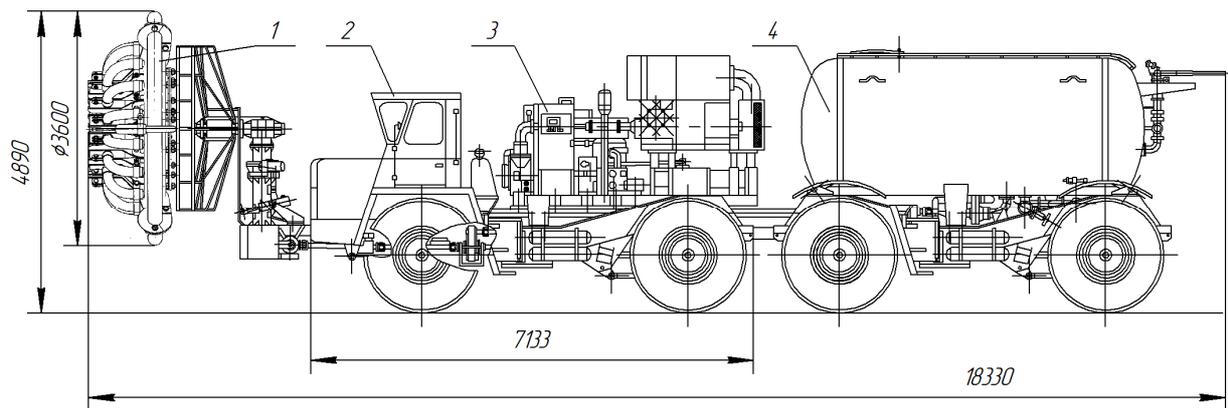


Рисунок 15 Схема вентиляции и пылегазоподавления в атмосфере карьеров с применением установок вентиляции УВК-1 и УВК-2 с объемом проветривания застойных зон размером  $20 \cdot 10^6 \text{ м}^3$

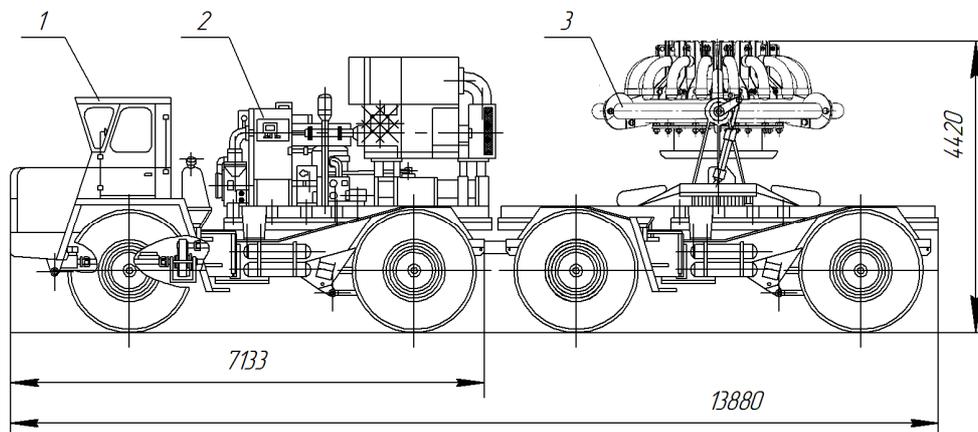
Повышение эффективности проветривания вытянутых в плане карьеров (рис. 14) может быть достигнуто следующим образом. Вихревой конус вращения образуют с углом наклона траектории оси струи  $\varphi_0$  к вертикали, равным половине полного угла раскрытия струи ( $\alpha/2$ ), затем непрерывно перемещают вентиляционную струю в вертикальной и горизонтальной плоскостях, причем по мере увеличения угла от-

клонения вентиляционной струи от вертикали к борту карьера скорость вращения струи в горизонтальной  $\omega_1$  и вертикальной  $\omega_2$  плоскостях уменьшают, а при уменьшении угла — увеличивают. При этом за один оборот струи в горизонтальной плоскости ее траекторию перемещают в вертикальной плоскости на величину полного угла раскрытия струи.



1 — узел безлопастного вентилятора; 2 — база БелАЗа 75401;  
3 — турбокомпрессор TRX180; 4 — цистерна для воды

Рисунок 16 Конструкция УВК-1 и ее основные узлы



1 — база БелАЗа 75401; 2 — турбокомпрессор TRX180; 3 — узел безлопастного вентилятора

Рисунок 17 Конструкция УВК-2

В карьерном пространстве устанавливают несколько вентиляторных установок УВК-2, струи которых перемещают в вертикальной и горизонтальной плоскостях синхронно.

Комбинированное применение установок вентиляции УВК-1 и УВК-2 для создания приточно-вытяжной вентиляции показано на рисунке 15.

Таким образом, создание высокоэффективных с энергетической точки зрения систем для локализации, удаления пылегазовых образований от источников их происхождения является актуальной задачей, которая достигается за счет огибания движущимися потоками воздуха профилей специальных конструкций. Из уровня тех-

ники известен ряд систем, реализующих активное воздействие на газовые потоки с целью обеспечения нужной траектории их движения для проведения их последующей очистки. Наибольшую эффективность имеют системы, в основе принципа действия которых лежат эффекты Коанда и торнадо, за счет чего формируются потоки воздуха особой формы с большим транспортировочным эффектом. Известными недостатками существующих систем являются нерациональность воздушных потоков, обратный ток струй, а также образование зон с их отсутствием.

За счет нового ведущего замысла построения (концепции) УВК и компоновки

их структурных элементов формируется устойчивый вихрь, позволяющий качественно локализовать распространение пылегазовых образований от источников происхождения, а также осуществить их активное подавление. Представленные результаты являются достоверными, поскольку основываются на физическом моделировании процесса эвакуации пылегазовых образований системой новой конструкции, что позволило сделать вывод о соответствии параметров полученного вихреподобного столба газов основным положениям теоретического описания вихря. Аналитические исследования в работе основывались на по-

ложениях функционально-стоимостного анализа и управления техническими системами, фундаментальных положениях механики сплошных сред, теории решения изобретательских задач.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на адаптацию конструктивной компоновки установки вентиляции карьеров к условиям работы комплексов очистки воздушной среды над транспортными магистралями и системами, снижающими в тоннелях концентрацию сильнодействующих ядовитых и отравляющих веществ до необходимого в соответствии с санитарными требованиями минимума.

### Библиографический список

1. Разработка конструкции и модельные исследования новой вентиляторной системы проветривания карьеров [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев, Е. Н. Смирнов и др. // *Черная металлургия : бюллетень научно-технической и экономической информации*. — 2018. — № 1. — С. 26–32.
2. Ткачев, М. Ю. Обоснование энергосиловых параметров системы эвакуации газопылевых выбросов [Текст] / М. Ю. Ткачев // *Сборник научных трудов ДонГТИ*. — 2021. — № 23 (66). — С. 75–85.
3. Ткачев, М. Ю. Использование энергии вихря для повышения эффективности работы вентиляционных устройств и систем [Текст] / М. Ю. Ткачев, Е. В. Ошовская // *Донбасс будущего глазами молодых ученых : материалы научно-технической конференции*. — Донецк : ДонНТУ, 2017. — С. 94–98.
4. Мартьянов, В. Л. Аэрология карьеров [Текст] / В. Л. Мартьянов. — Кемерово : КузГТУ, 2012. — 103 с.
5. Битколов, Н. З. Улучшение условий труда на карьерах [Текст] / Н. З. Битколов. — М. : Недра, 1972. — 104 с.
6. Рудники Урала [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://uralmines.ru/> (по состоянию на 17.02.2022).
7. Установка местного проветривания УМП-1Б [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.nipigormash.ru/> (по состоянию на 17.02.2022).
8. Пат. 2630443 Российская Федерация, МПК F24F7/00, F04D25/00, F04D29/00. Узел безопасного вентилятора для эвакуации газопылевых выбросов из промышленных агрегатов / Е. Н. Смирнов, С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев, В. А. Скляр, А. В. Сазонов, Б. И. Стародубцев, А. С. Сосонкин, О. И. Малахова : заявитель и патентообладатель Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». — № 2016119782 ; заявл. 23.05.16 ; опубл. 07.09.17, Бюл. № 25. — 9 с. : ил.

© 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 17.02.2022.

**PhD in Engineering Tkachev M. Yu.** (*ARI of DonNTU, Gorlovka, DPR, mishel-tkachev@ya.ru*)

**DESIGN OF NEW VENTILATION TECHNOLOGIES FOR QUARRIES**

*The research is devoted to the development of a number of quarries ventilation technologies that implement the alignment of harmful and hazardous content of substances and impurities formed during blasting and loading operations to the staff health in the atmosphere of work. There has been determined a ventilation scheme in horizontal and vertical planes for dust and gas suppression in funneled and elongated quarries under unfavorable meteorological conditions.*

**Key words:** *auxiliary fan, installing of open cast ventilation, maximum concentration limit, bladeless air machine, Coanda effect, whirling theory.*

УДК 621.774.3

к.т.н. Ошовская Е. В.,  
Ковалева О. А.  
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛЫ ПОПЕРЕЧНОЙ РЕЗКИ ТРУБЫ КЛИНОВЫМ НОЖОМ

*Приведен аналитический метод уточненного расчета силы поперечной резки трубы клиновым ножом, учитывающий установленную закономерность изменения площади сдвигаемого поперечного сечения полого профиля в зависимости от внедрения в его тело рабочей кромки режущего инструмента, а также геометрические параметры и прочность материала разделяемого на части трубного проката.*

**Ключевые слова:** труба, поперечное сечение, клиновой нож, сдвигаемый слой, сила резки.

Выполнение расчета энергосиловых параметров привода ножниц, предназначенных для поперечной резки труб, предполагает наличие точных методов определения действующих на него технологических нагрузок с учетом геометрических размеров и прочности материала разделяемого на части полого профиля [1].

В соответствии с классической формулой [2], сила поперечной резки любого прокатного изделия равна

$$P = K_1 K_2 K_3 \sigma_B F_{mp},$$

где  $K_1$  — коэффициент, учитывающий отношение допускаемого напряжения при срезе к пределу прочности материала трубы;

$K_2$  — коэффициент, учитывающий увеличение усилия реза при затуплении ножа;

$K_3$  — коэффициент, учитывающий увеличение усилия реза при наличии зазора между рабочими кромками ножей;

$\sigma_B$  — предел прочности материала разрезаемого проката, МПа;

$F_{mp}$  — суммарная площадь сдвигаемого слоя материала, мм<sup>2</sup>.

Точность расчетных данных при использовании указанной формулы в первую очередь зависит от корректности подставляемых в нее значений площади сдвигаемого слоя материала прокатного изделия, что требует учета закономерности изменения данного геометрического параметра во

время движения ножа относительно поперечного сечения разрезаемого профиля. В результате проводившихся за последние 10 лет исследований в данной области были предложены теоретические зависимости для расчета текущих значений площадей сдвигаемых слоев материала с учетом относительного перемещения ножа при поперечной резке на части проката, имеющего прямоугольную, квадратную или круглую формы поперечных сечений [3], а также более сложных сортовых профилей (уголок, швеллер, двутавр) [4, 5]. Следует отметить, что опубликованные ранее рекомендации не могут быть использованы для расчета параметров процесса резки труб, имеющего свою специфику в случае применения ножей с фигурной режущей кромкой [6, 7].

Целью настоящей работы было получение аналитическим методом информации, необходимой для вывода зависимости, позволяющей с учетом геометрических параметров трубы и прочности ее материала рассчитать силу, которая требуется при разделении на части полого профиля круглой формы.

Для определения площади поперечного сечения трубы, подвергаемого сдвигу в процессе ее поперечной резки, использовали расчетную схему, показанную на рисунке 1. В соответствии с ней, сечение трубы и ножа располагается в плоскости  $XOY$ , а центр сечения трубы совпадает

с началом координат — т.  $O$ . Ход ножа  $h_n$  определяет его текущее положение.

Внешнюю радиусом  $R$  и внутреннюю радиусом  $r$  окружности, формирующие поперечное сечение трубы, и линию кромки ножа можно представить в виде функциональных зависимостей:

– внешняя окружность:

$$y = \pm\sqrt{R^2 - x^2} = f_1(x); \quad (1)$$

– внутренняя окружность:

$$y = \pm\sqrt{r^2 - x^2} = f_2(x); \quad (2)$$

– кромка ножа:

$$y = a + x = f_3(x), \quad (3)$$

где  $a$  — коэффициент, зависящий от хода ножа,  $a = R - h_n$ .

Площадь сечения, подверженного сдвигу,  $F_{mpi}$  в момент времени  $t_i$ , представляет собой разницу площадей сечений  $F$ , пройденных ножом на моменты времени  $t_i$  и  $t_{i-1}$ :

$$F_{mpi} = F_i - F_{i-1}. \quad (4)$$

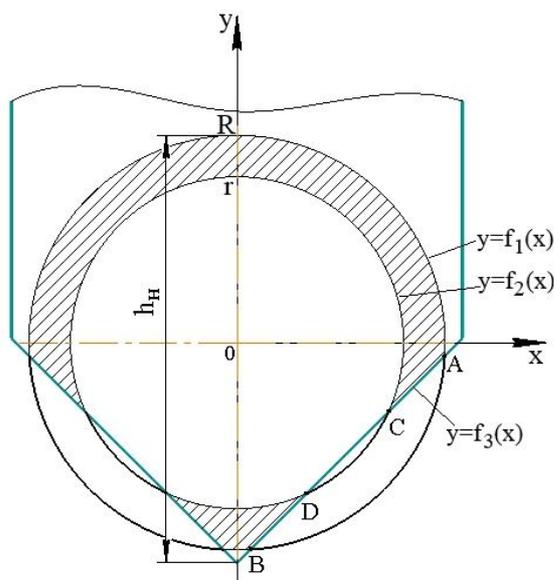


Рисунок 1 Обобщающая расчетная схема к определению площади поперечного сечения трубы, подверженного сдвигу

Так как рассматриваемые объекты (труба и нож) имеют плоскость симметрии, совпадающую с плоскостью  $YOZ$ , то для вывода расчётных зависимостей рассмотрена часть, расположенная в положительном направлении оси  $X$ .

Вычисление значения текущей площади  $F_i$  основано на нахождении значений определенных интегралов от функций (1–3). Пределами интегрирования выступают абсциссы точек пересечения линии кромки ножа с внешней и внутренней окружностями, формирующих поперечное сечение трубы. В разных положениях ножа количество точек пересечения различно — от 1 до 4.

В общем случае точки пересечения окружности радиусом  $\rho$  и прямой определяются из системы

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = \rho^2; \\ y = a + x, \end{cases} \quad (5)$$

которая после подстановки второго выражения в первое преобразуется в квадратное уравнение

$$2x^2 + 2ax + (a^2 - \rho^2) = 0. \quad (6)$$

Дискриминант уравнения (6):

$$D = 4a^2 - 8(a^2 - \rho^2) = 4(2\rho^2 - a^2).$$

Корни уравнения, соответствующие абсциссам точек пересечения окружности и прямой, вычисляются по выражению

$$x_{кор1,2} = \frac{-a \pm \sqrt{2\rho^2 - a^2}}{2}. \quad (7)$$

В выражениях (7)

$$\rho = \begin{cases} r & \text{— для внутренней окружности;} \\ R & \text{— для внешней окружности.} \end{cases} \quad (8)$$

Площадь фигуры, ограниченной линией ножа на интервале  $[x_n, x_k]$ , может быть найдена как определенный интеграл функции (3):

$$F_{\text{нжс}} = \int_{x_n}^{x_k} f_3(x) dx = \int_{x_n}^{x_k} (a+x) dx = \quad (9)$$

$$= a(x_k - x_n) + \frac{1}{2}(x_k^2 - x_n^2).$$

Площадь фигуры, ограниченной участком окружности на интервале  $[x_n, x_k]$ , может быть найдена как определенный интеграл функции  $y = \sqrt{\rho^2 - x^2}$ :

$$F_{\text{окр}} = \int_{x_n}^{x_k} f(x) dx = \int_{x_n}^{x_k} \sqrt{\rho^2 - x^2} dx = \quad (10)$$

$$= \frac{\rho^2}{2} \left( (\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{\sin 2\varphi_2 - \sin 2\varphi_1}{2} \right),$$

где

$$\varphi_1 = \arcsin(x_n/\rho); \quad \varphi_2 = \arcsin(x_k/\rho). \quad (11)$$

В выражениях (10) и (11) параметр  $\rho$  соответствует (8).

Рассмотрение положения ножа в разные моменты процесса резки позволило выделить несколько расчетных вариантов для вычисления площадей сечений  $F$ , пройденных ножом (рис. 2).

Вариант 1 (рис. 2, а).

Ход ножа  $h_n = 0 \dots \delta$ , где  $\delta$  — толщина стенки трубы  $\delta = R - r$ .

Площадь пройденного сечения соответствует разнице площадей фигуры, ограниченной дугой внешней окружности, и фигуры, ограниченной линией кромки ножа:

$$F = F_{\text{окр1}} - F_{\text{нжс}} = \int_0^{x_{p11}} f_1(x) dx - \int_0^{x_{p11}} f_3(x) dx. \quad (12)$$

Вариант 2 (рис. 2, б).

Ход ножа  $h_n = \delta \dots (R+r)$ .

Площадь пройденного сечения соответствует разнице площадей фигуры, ограниченной дугой внешней окружности, и фигуры, ограниченной линией кромки ножа, и фигуры, ограниченной дугой внутренней окружности:

$$F = F_{\text{окр1}} - F_{\text{окр2}} - F_{\text{нжс}} =$$

$$= \int_0^{x_{p11}} f_1(x) dx - \int_0^{x_{p21}} f_2(x) dx - \int_{x_{p21}}^{x_{p11}} f_3(x) dx. \quad (13)$$

При движении ножа после отметки  $h_n = R+r$  расчетные схемы имеют отличия в зависимости от соотношения  $R$  и  $r\sqrt{2}$ . Рассмотрим схемы при  $R > r\sqrt{2}$ .

Вариант 3 (рис. 2, в).

Ход ножа  $h_n = (R+r) \dots (R+r\sqrt{2})$ .

Площадь пройденного ножом сечения

$$F = F_{\text{окр1}} - F_{\text{нжс}} - F_{\text{окр2}} =$$

$$= \left[ \int_0^{x_{p11}} f_1(x) dx - \int_0^r f_2(x) dx - \int_{-a}^{x_{p11}} f_3(x) dx \right] +$$

$$+ \left[ \int_{x_{p21}}^{-a} f_3(x) dx - \int_{x_{p21}}^r f_2(x) dx \right] + \quad (14)$$

$$+ \left[ \int_0^{x_{p22}} f_3(x) dx - \int_0^{x_{p22}} f_2(x) dx \right].$$

Вариант 4 (рис. 2, г).

Ход ножа  $h_n = (R+r\sqrt{2}) \dots 2R$ .

Площадь пройденного ножом сечения

$$F = F_{\text{окр1}} - F_{\text{нжс}} - \frac{\pi r^2}{2} =$$

$$= \left[ \int_0^{x_{p11}} f_1(x) dx - \int_{-a}^{x_{p11}} f_3(x) dx \right] + \quad (15)$$

$$+ \left[ \int_0^{-a} f_3(x) dx - \frac{\pi r^2}{2} \right].$$

Вариант 5 (рис. 2, д).

Ход ножа  $h_n = 2R \dots R(1+r\sqrt{2})$ .

Площадь пройденного ножом сечения

$$F = F_{\text{окр1}} - F_{\text{нжс}} - \frac{\pi r^2}{2} =$$

$$= \frac{\pi R^2}{4} + \int_0^{x_{p12}} f_1(x) dx + \quad (16)$$

$$+ \int_{x_{p11}}^R f_1(x) dx + \left[ \int_{x_{p12}}^{x_{p11}} f_3(x) dx - \frac{\pi r^2}{2} \right].$$

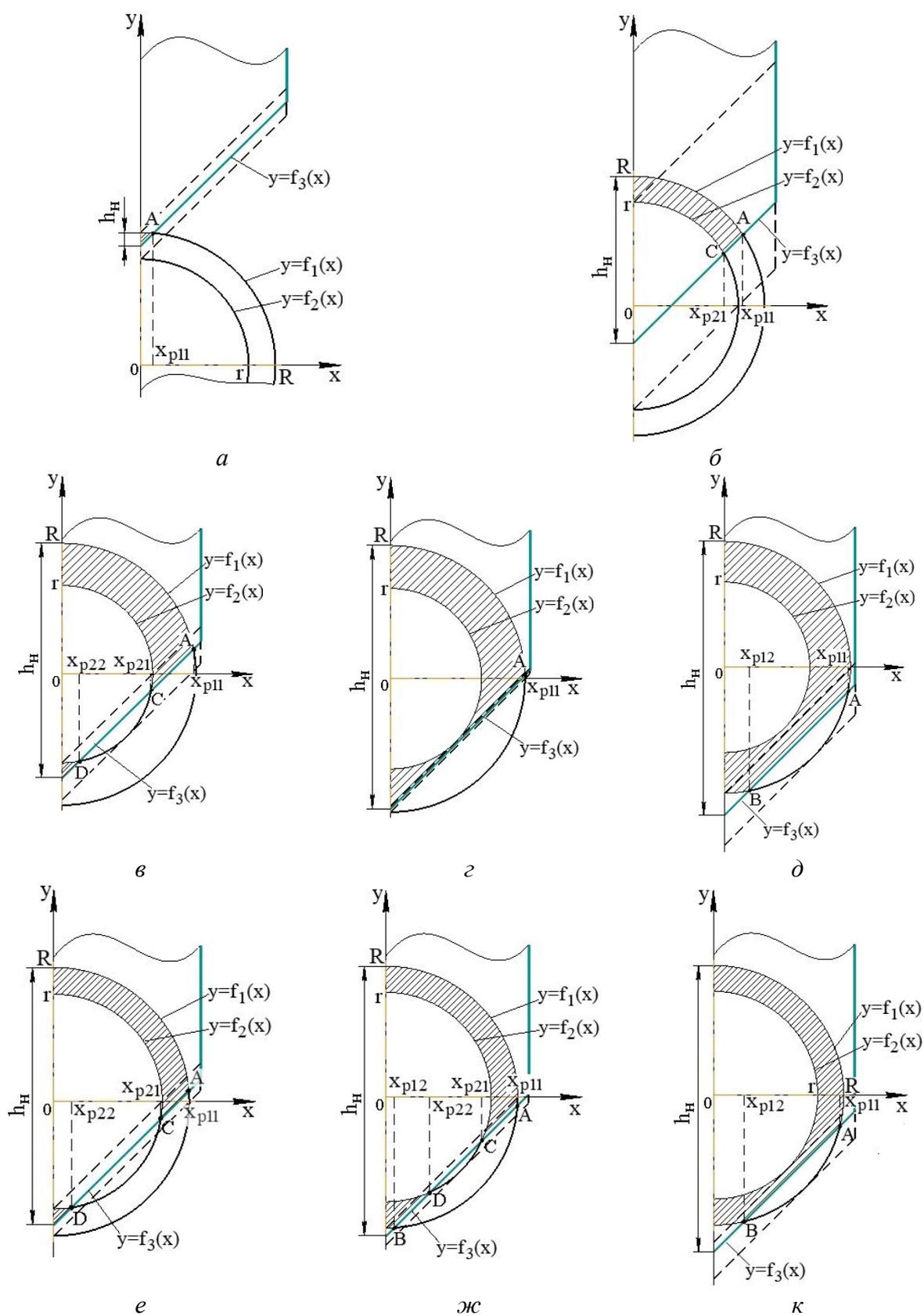


Рисунок 2 Расчетные схемы при определении площади сечения, срезаемого ножом

Рассмотрим схемы при  $R \leq r\sqrt{2}$ .

Вариант 6 (рис. 2, е).

Ход ножа  $h_n = (R + r) \dots 2R$ .

Площадь пройденного ножом сечения

$$F = F_{окр1} - F_{нжс} - F_{окр2} = \left[ \int_0^{x_{p11}} f_1(x) dx - \int_0^r f_2(x) dx - \int_{-a}^{x_{p11}} f_3(x) dx \right] + \left[ \int_{x_{p21}}^{-a} f_3(x) dx - \int_{x_{p21}}^r f_2(x) dx \right] + \left[ \int_0^{x_{p21}} f_3(x) dx - \int_0^{x_{p21}} f_2(x) dx \right]. \quad (17)$$

Вариант 7 (рис. 2, ж).

Ход ножа  $h_n = 2R \dots (R + r\sqrt{2})$ .

Площадь пройденного ножом сечения

$$F = F_{окр1} - F_{нжс} - F_{окр2} = \frac{\pi(R^2 - r^2)}{4} + \left[ \int_0^{x_{p12}} f_1(x) dx + \left| \int_{x_{p12}}^{x_{p22}} f_3(x) dx \right| - \int_0^{x_{p22}} f_2(x) dx \right] + \left[ \int_{x_{p12}}^R f_1(x) dx + \left| \int_{x_{p21}}^{x_{p11}} f_3(x) dx \right| - \int_{x_{p21}}^r f_2(x) dx \right]. \quad (18)$$

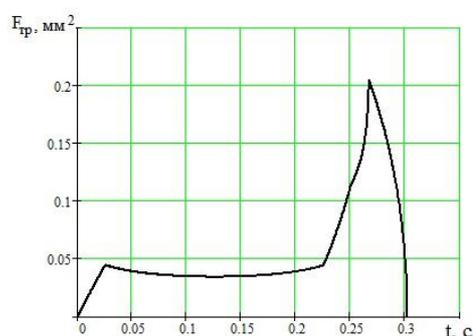
Вариант 8 (рис. 2, к).

Ход ножа  $h_n = (R + r\sqrt{2}) \dots R(1 + \sqrt{2})$ .

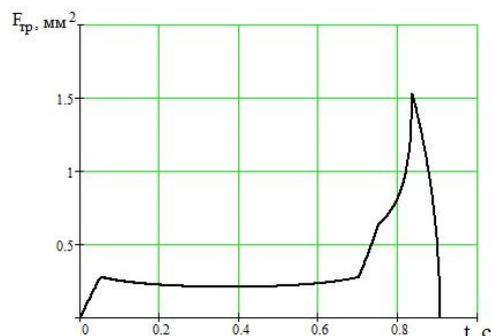
Площадь пройденного ножом сечения

$$F = F_{окр1} - F_{нжс} - \frac{\pi r^2}{2} = \frac{\pi R^2}{4} + \int_0^{x_{p12}} f_1(x) dx + \int_{x_{p11}}^R f_1(x) dx + \left| \int_{x_{p21}}^{x_{p11}} f_3(x) dx \right| - \frac{\pi r^2}{2}. \quad (19)$$

С использованием полученных аналитических зависимостей (1–19) в пакете MathCad составлена программа для расчета площади поперечного сечения трубы, подверженной сдвигу, в зависимости от хода ножа  $h_n$ . На рисунке 3 в качестве примера показаны графики изменения площади сдвигаемого поперечного сечения для двух типоразмеров труб, отличающихся наружным диаметром и толщиной стенки.



а



б

а) диаметр 10 мм, толщина стенки 1 мм; б) диаметр 30 мм, толщина стенки 2 мм

Рисунок 3 Графики изменения площади сдвигаемого поперечного сечения для труб различных геометрических размеров при скорости движения ножа 40 мм/с

Сила воздействия клинового ножа на трубу может быть представлена как функция трех факторов — диаметра трубы  $D_{тр}$ , толщины стенки трубы  $\delta$ , предела прочности ее материала  $\sigma_{мт}$ :

$$P = f(D_{тр}, \delta, \sigma_{мт}).$$

Для оценки степени влияния указанных факторов на функцию отклика и вывода эмпирической зависимости, позволяющей с меньшей трудоемкостью рассчитать максимальное значение силы реза  $P_{max}$  клиновым ножом, выполнили планированный математический эксперимент по плану первого порядка.

Уровни варьирования факторов при проведении эксперимента приведены в таблице 1. Общий вид зависимости представлен уравнением:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3.$$

На основании положений метода планирования эксперимента была составлена матрица (табл. 2), в соответствии с которой выполнены 11 математических опытов по определению максимального значения силы реза  $P_{max}$  с использованием разработанной программы для расчета площади срезаемого сечения.

Рассчитанные значения коэффициентов регрессии для уравнения в кодированном виде приведены в таблице 3, в которой также дана оценка их уровня значимости по критерию Стьюдента. Табличное значение критерия  $t_m = 4,3$  при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ .

Таблица 1

Факторы математического эксперимента

Наименование фактора	Обозначение в кодированном виде	Обозначение в натуральном виде	Единицы измерения	Уровни варьирования			Шаг варьирования
				-1	0	+1	
Наружный диаметр трубы	$x_1$	$D_{тр}$	мм	10	20	30	10
Толщина стенки трубы	$x_2$	$\delta$	мм	1	2	3	1
Предел прочности материала трубы	$x_3$	$\sigma_{мт}$	МПа	440	465	490	25

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	План-матрица				$P_{max}$ , Н
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	
1	+1	-1	-1	-1	6950
2	+1	+1	-1	-1	33862
3	+1	-1	+1	-1	12290
4	+1	+1	+1	-1	62545
5	+1	-1	-1	+1	7740
6	+1	+1	-1	+1	37710
7	+1	-1	+1	+1	13687
8	+1	+1	+1	+1	69653
9		0	0	0	29377
10		0	0	0	28745
11		0	0	0	30009

Таблица 3

Коэффициенты уравнения регрессии и оценка их уровня значимости для плоского ножа

Коэффициент при факторах и их взаимодействиях	Обозначение коэффициента регрессии	Значение	Проверка значимости коэффициентов по условию $t_p > t_m^*$
–	$b_0$	30554,8	+
$x_1$	$b_1$	20387,8	+
$x_2$	$b_2$	8989,2	+
$x_3$	$b_3$	1642,7	+
$x_1x_2$	$b_{12}$	6167,4	+
$x_1x_3$	$b_{13}$	1096,1	+
$x_2x_3$	$b_{23}$	483,3	–

\*Знак «+» — коэффициент значимый, знак «–» — коэффициент незначимый.

На основании данных таблицы 3 можно отметить разную степень влияния принятых для эксперимента факторов на параметр — максимальное значение силы реза. Наиболее значимым фактором является диаметр трубы  $D_{mp}$ , степень влияния толщины стенки  $\delta$  в 2,3 раза меньше, а предела прочности материала  $\sigma_{mt}$  — в 12,4 раза.

Уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 30554,8 + 20387,8x_1 + 8989,2x_2 + 1642,7x_3 + 6167,4x_1x_2 + 1096,1x_1x_3.$$

Выполнив перевод уравнения из кодированного вида в натуральный, получили зависимость для определения максимального значения силы реза клиновым ножом:

$$P_{\max} = 6691,1 - 1233,5D_{mp} - 3345,6\delta - 22\sigma_{mt} + 616,7D_{mp}\delta + 4,4D_{mp}\sigma_{mt}.$$

### Библиографический список

1. Расчет силы резания тонкостенных труб клиновидными ножами [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : международный сб. научных трудов. — Донецк : ДонНТУ, 2003. — Вып. 24. — С. 61–66.
2. Машины и агрегаты металлургических заводов. В 3-х т. Т. 3. Машины и агрегаты для производства и отделки проката [Текст] / А. И. Целиков [и др.]. — М. : Металлургия, 1988. — 680 с.
3. Сатонин, А. В. Имитационное математическое моделирование спектра рабочей загрузки процесса поперечной резки сортовых профилей на ножницах [Текст] / А. В. Сатонин, П. В. Боровик, П. А. Петров // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. — Краматорск : ДГМА, 2014. — № 2 (39). — С. 54–59.
4. Боровик, П. В. Теоретическое определение силы резки ножницами фасонных профилей [Текст] / П. В. Боровик, П. А. Петров // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2013. — № 5. — С. 41–44.

5. Ульяницкий, В. Н. Влияние формы и расположения профиля на энергосиловые параметры резки фасонного металлопроката сортовыми ножницами [Текст] / В. Н. Ульяницкий, П. А. Петров // Сб. научн. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ. — 2016. — Вып. 3. — С. 149–156.

6. Лыжников, Е. И. Технологические и силовые параметры резки труб плоским ножом [Текст] / Е. И. Лыжников, Е. К. Дунда // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. — 2013. — № 1. — С. 137–140.

7. Лыжников, Е. И. Особенности технологического процесса резки труб плоским ножом [Текст] / Е. И. Лыжников, Е. К. Давыденко // Обработка материалов давлением. — 2013. — № 2 (35). — С. 142–146.

8. Болтян, А. В. Теория инженерных исследований [Текст] : учебное пособие / А. В. Болтян, И. А. Горобец. — Севастополь : Вебер, 2001. — 139 с.

© Ошовская Е. В.

© Ковалева О. А.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТИ Харламовым Ю. А.,  
д.т.н., доц., зав. каф. УК ДонНТУ Ченцовым Н. А.*

**PhD in Engineering Oshovskaya E. V., Kovaleva O. A. (DonNTU, Donetsk, DPR)**

#### **ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING THE FORCE OF TRANSVERSAL PIPE CUTTING WITH A WEDGE-SHAPED BLADE**

*There has been given the analytical method for the refined calculation of the force of transversal pipe cutting with a wedge-shaped blade, that considers the determined regularity of area changing of the sheared cross-section of hollow profile depending on introduction the working edge of cutting tool into its body, as well as the geometric parameters and strength of material of rolled tubular products divided into parts.*

**Key words:** pipe, transversal cutting, wedge-shaped blade, shear layer, cutting force.

УДК 658.58

*Шамрай Ю. А.,  
к.т.н. Ошовская Е. В.,  
д.т.н. Сидоров В. А.  
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, joukserin@gmail.com)*

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ХОЛОДИЛЬНИКА МНЛЗ

*В работе приведен комплекс математических моделей, необходимых при разработке моделей развития повреждений как информационной основы риск-ориентированной стратегии технического обслуживания. Для холодильника с шагающими балками сортовой машины непрерывного литья заготовок разработаны модели силового и теплового воздействия на элементы механизма, рассмотрена кинематика движения подвижных реек и кантуемого слитка.*

**Ключевые слова:** математическая модель, риск-ориентированная стратегия, холодильник МНЛЗ, траектория движения, температурное поле, деформации, напряжения.

Снижение количества ремонтного персонала, увеличение количества оборудования, участвующего в технологическом процессе, повышение потерь при нарушениях его функционирования могут компенсироваться за счёт использования информационных технологий обслуживания оборудования. На металлургических предприятиях при реализации технического обслуживания и ремонтов (ТО и Р) оборудования сейчас отмечается переход к риск-ориентированным стратегиям [1–3], в которых планирование и принятие решений о техническом обслуживании и ремонтах машин и агрегатов основывается на оценке возможного ущерба из-за нарушения или потери работоспособности.

Менеджмент риска опирается на стандарты [4–10], в которых предлагается рассматривать промышленный объект в аспектах качественного и количественного анализа возможности возникновения отказов, используя статистическую информацию о надёжности отдельных элементов. Исходная информация в данном случае представляется в виде известных значений вероятности безотказной работы элементов или интенсивности ранее произошедших отказов и позволяет определить приоритетность ТО и Р оборудования. Однако получение

достоверной информации о безотказности элементов металлургического оборудования остается нерешенной задачей. При отсутствии или малых объемах информации о нежелательных событиях (неисправностях, поломках, отказах) дополнительным источником могут выступать результаты математического моделирования.

В статье представлен комплекс математических моделей элементов холодильника МНЛЗ, которые выступают источниками информации для реализации риск-ориентированного технического обслуживания.

Холодильник МНЛЗ представляет собой сложную техническую систему, включающую электрическую, механическую, гидравлическую подсистемы и систему управления, взаимодействующие между собой и находящиеся под влиянием внешних и внутренних факторов. Элементы механизмов холодильника испытывают циклические силовые и температурные воздействия, характерные для условий эксплуатации металлургических машин.

С позиций теории надежности холодильник МНЛЗ, как и всякая металлургическая машина, является восстанавливаемой системой. Поддержание и восстановление работоспособного состояния осуще-

ствляется при проведении ТО и Р в ограниченные временные интервалы.

Для получения информации о функциональных параметрах холодильника МНЛЗ разработан комплекс математических моделей. Ключевые положения и результаты основных из них приведены далее.

Модель траектории движения подвижных балок холодильника [11, 12] основана на том, что в конструкции холодильника выделена *структурная группа* (рис. 1), представляющая собой рычажный механизм, включающий два контура ABCD и FECD, которые можно представить в виде системы уравнений в векторной форме

$$\begin{cases} \vec{l}_{AD} + \vec{l}_{DC} + \vec{l}_{CB} = \vec{l}_{AB}, \\ \vec{l}_{FD} + \vec{l}_{DC} + \vec{l}_{CE} = \vec{l}_{FE} \end{cases}$$

и координатной форме

$$\begin{cases} l_{AD} \cos \varphi_4 + l_{DC} \cos \varphi_3 + l_{CB} \cos \varphi_2 = \\ = l_{AB} \cos \varphi_1, \\ l_{AD} \sin \varphi_4 + l_{DC} \sin \varphi_3 + l_{CB} \sin \varphi_2 = \\ = l_{AB} \sin \varphi_1, \\ l_{FD} \cos \varphi_6 + l_{DC} \cos \varphi_3 + l_{CE} \cos \varphi_5 = \\ = l_{FE} \cos \varphi_1, \\ l_{FD} \sin \varphi_6 + l_{DC} \sin \varphi_3 + l_{CE} \sin \varphi_5 = \\ = l_{FE} \sin \varphi_1. \end{cases}$$

Цикл движения холодильника включает следующие этапы: 1) подъем подвижных балок вместе с заготовками (прямой ход — выдвижение штоков гидроцилиндров вертикального перемещения); 2) горизонтальное перемещение подвижных балок (прямой ход — выдвижение штоков гидроцилиндров горизонтального перемещения); 3) опускание подвижных балок в исходное положение (обратный ход — втягивание штоков гидроцилиндров вертикального перемещения); 4) горизонтальное перемещение подвижных балок в исходное положение (обратный ход — втягивание штоков гидроцилиндров горизонтального перемещения).

На разных этапах движения обобщенной координатой выступают длины звень-

ев  $l_{AB}$ ,  $l_{FE}$ ,  $l_{DC}$ , которые зависят от хода гидроцилиндров. Для определения координат шарниров  $B$ ,  $C$ ,  $E$  получены выражения для расчёта углов  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ ,  $\varphi_4$ ,  $\varphi_5$ ,  $\varphi_6$ , определяющих положения звеньев согласно зависимостям:

$$x_B = l_{AB} \cos \varphi_1; y_B = l_{AB} \sin \varphi_1;$$

$$x_E = x_{E0} + l_{EF} \cos \varphi_4; y_E = y_{E0} + l_{EF} \sin \varphi_4;$$

$$x_C = x_D + l_{DC} \cos \varphi_3; y_C = y_D + l_{DC} \sin \varphi_3.$$

Результатом моделирования являются графики рассчитанных траекторий перемещения шарниров  $B$  и  $C$  (рис. 2), соответствующих точкам крепления гидроцилиндров вертикального и горизонтального перемещения.

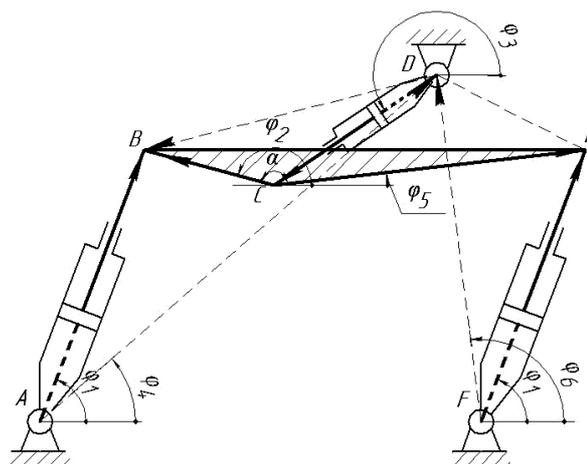


Рисунок 1 Расчётная схема рычажного механизма шагающего холодильника

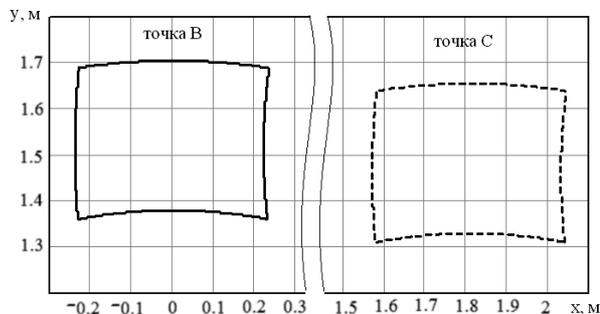


Рисунок 2 Эталонные траектории движения точек крепления гидроцилиндров вертикального (B) и горизонтального (C) перемещения балок холодильника МНЛЗ

Проверка адекватности математической модели выполнена путём качественного сравнения с траекторией, полученной при оцифровке видеоизображения работающего холодильника, и в системе автоматизированного проектирования КОМПАС-3D. Расхождение между расчётными и измеренными значениями составило менее 1 %.

Анализ перемещения подвижных балок по установленной расчётной траектории, на основании составленных графических схем (рис. 3), позволил установить, что за один цикл движения, в ходе которого заготовка кантуется на 90 градусов, она выступает как источник 4-х ударных воздействий — по два при подъёме и опускании подвижных балок.

*Математическая модель кинематических параметров движения холодильника* позволяет рассчитать скорости и ускорения звеньев механизма на основе решения систем уравнений (контур ABCD, рис. 1):

$$\begin{cases} l_{AB} \sin \varphi_1 \cdot \omega_1 + l_{DC} \sin \varphi_3 \cdot \omega_3 = -v_{AB} \cos \varphi_1, \\ l_{AB} \cos \varphi_1 \cdot \omega_1 + l_{DC} \cos \varphi_3 \cdot \omega_3 = v_{AB} \sin \varphi_1 \end{cases}$$

и

$$\begin{cases} v_{AB} \cdot \omega_1 \cdot \sin \varphi_1 - l_{AB} (\varepsilon_1 \sin \varphi_1 - \omega_1^2 \cos \varphi_1) + \\ + l_{DC} (\varepsilon_3 \sin \varphi_3 - \omega_3^2 \cos \varphi_3) = \\ = -a_{AB} \cos \varphi_1 - v_{AB} \cdot \omega_1 \cdot \sin \varphi_1, \\ v_{AB} \cdot \omega_1 \cdot \cos \varphi_1 - l_{AB} (\varepsilon_1 \cos \varphi_1 + \omega_1^2 \sin \varphi_1) + \\ + l_{DC} (\varepsilon_3 \cos \varphi_3 + \omega_3^2 \sin \varphi_3) = \\ = a_{AB} \sin \varphi_1 - v_{AB} \cdot \omega_1 \cdot \cos \varphi_1. \end{cases}$$

Результат модели — графики изменения хода, линейного ускорения штоков гидроцилиндров, угловой скорости и углового ускорения гидроцилиндров (звенья AB и DC) во времени при заданных графиках скоростей штоков (рис. 4).

На основании полученных графиков ускорений можно отметить, что максимальные значения углового ускорения для звена 1 (AB) отмечаются в начале этапа 4 при разгоне штока, а для звена 3 — в начале этапа 1. Это означает, что в данные мо-

менты времени на звенья действуют максимальные динамические нагрузки.

Силовое воздействие заготовки вызывает деформацию реек. Для получения первичной информации о деформациях, отвечающих работоспособному состоянию конструкции, разработана *математическая модель статических прогибов реек подвижных балок* от веса заготовок в процессе заполнения холодильника.

Рейка подвижной балки представлена как двухопорная балка с переменным поперечным сечением (рис. 5). Правая опора B — жёсткая, левая опора A — подвижная. Нагрузка на рейку изменяется при заполнении рейки заготовками. Модель основана на уравнении прогибов

$$EIy(x) = EIy_0 + EI\theta_0 x + \sum_{u=1}^{nz+2} F_{u,iz} \frac{(x - xk_u)^3}{3!},$$

где  $E$  — модуль упругости материала балки;  $I$  — момент инерции поперечного сечения балки;  $y$  — прогиб балки в текущем сечении;  $x$  — координата, определяющая положение рассматриваемого сечения балки;  $y_0, \theta_0$  — прогиб и угол поворота сечения балки в начальном сечении ( $x=0$ );  $u$  — номер участка;  $nz$  — общее количество заготовок;  $iz$  — текущее количество заготовок;  $F_{u,iz}$  — сила, действующая на участке  $u$  при количестве заготовок  $iz$ , которая может принимать значения

$$F_{u,iz} = \begin{cases} 0; \\ R_A \vee R_B; \\ G_1; \end{cases}$$

$xk_u$  — координата по оси X, характеризующая точку приложения силы.

Опорные реакции  $R_A, R_B$  в зависимости от количества заготовок  $iz$ , расположенных на рейке, определяются по формулам:

$$R_{A,iz} = \frac{G_1}{b} \cdot \sum_{i=1}^{iz} [c - (k + (i-1) \cdot h)],$$

$$R_{B,iz} = \frac{G_1}{b} \cdot \sum_{i=1}^{iz} [b + c - (k + (i-1) \cdot h)],$$

где  $G_1$  — сила тяжести одной заготовки, приходящаяся на одну рейку;  $k$  — расстояние до 1-й впадины;  $h$  — расстояние между впадинами.

Для определения начальных параметров  $y_0$ ,  $\theta_0$  при количестве заготовок, равном  $iz$ , получены зависимости [13]:

$$EI\theta_{0,iz} = \frac{1}{b} \left[ \sum_{u=1}^{na+nb+2} F_{u,iz} \cdot \frac{(a+b-xk_u)^3}{6} - \sum_{u=1}^{na+2} F_{u,iz} \cdot \frac{(a-xk_u)^3}{6} \right],$$

$$EIy_{0,iz} = -EI\theta_{0,iz} \cdot a - \sum_{u=1}^{na+2} F_{u,iz} \cdot \frac{(a-xk_u)^3}{6},$$

где  $na$ ,  $nb$  — количество заготовок, размещаемых на консольном  $a$  и центральном  $b$  участках рейки.

В результате моделирования получено изменение опорных реакций рейки подвижной балки при постепенной загрузке холодильника заготовками и графики прогибов рейки при различном количестве заготовок (рис. 6).

Максимальные прогибы рейки наблюдаются при загрузке 5-ю и 15-ю заготов-

ками. При полной загрузке 20-ю заготовками прогибы находятся в пределах 0...0,4 мм. При нарушении равномерного распределения массы заготовки между рейками прогибы возрастают. Так, если масса заготовки воспринимается только двумя рейками, прогибы увеличиваются и их значения достигают 2...7 мм, что является критичным для прочности рейки.

Для учёта реальной формы рейки (наличие впадин и выступов) проведено моделирование статических прогибов в пакете ANSYS с использованием метода конечных элементов [13]. Результаты моделирования при нагружении рейки 1-й и 20-ю заготовками и распределении массы на две рейки в виде картин суммарных эквивалентных напряжений представлены на рисунке 7.

Максимальные значения эквивалентных напряжений составляют 140...170 МПа, что соответствует запасу прочности на уровне 2,5...3,0. Однако ступенчато изменяющийся знакопеременный характер напряжений в местах креплений рейки указывает на возможность возникновения усталостных повреждений, включая малоцикловые, с учётом дополнительных ударов, возникающих при кантовке заготовки.

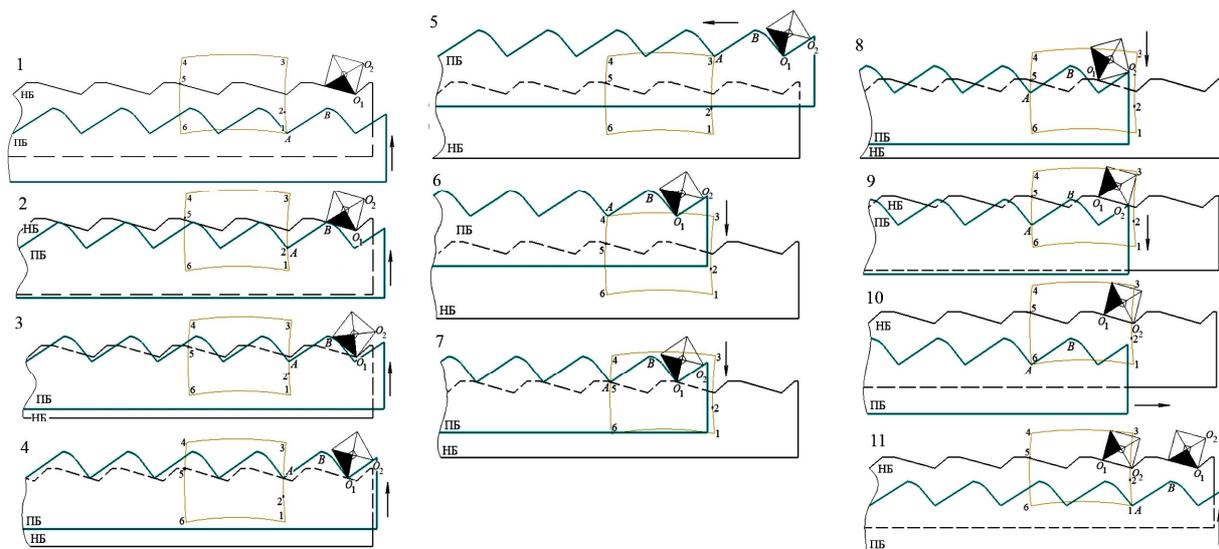


Рисунок 3 Схемы кантовки заготовки

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

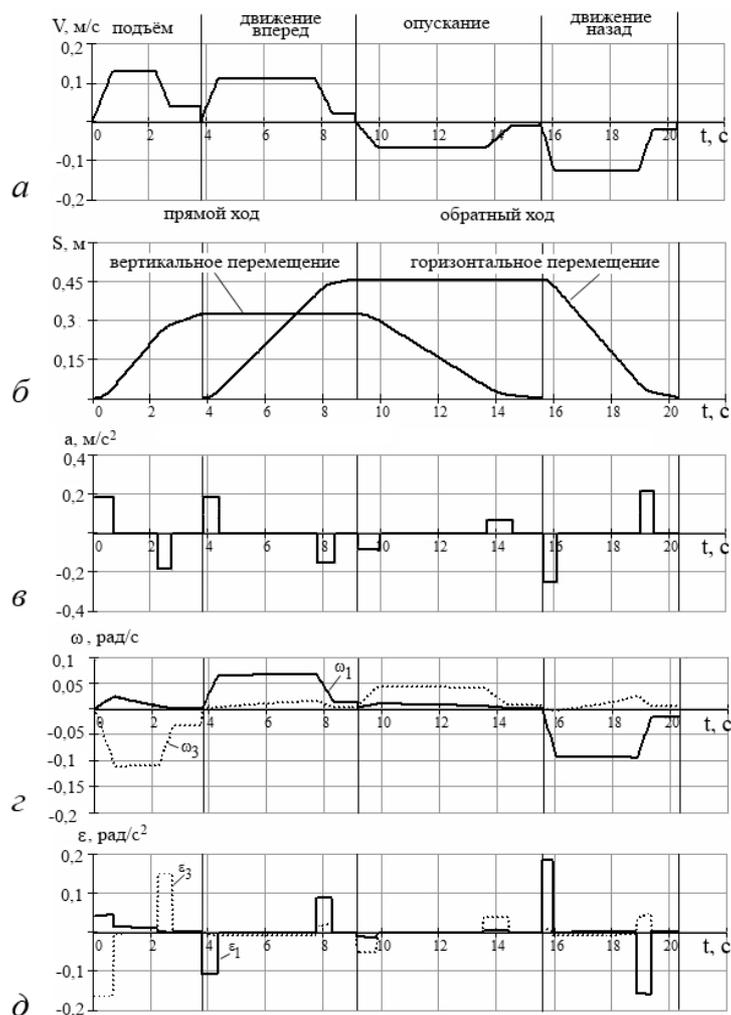


Рисунок 4 Графики изменения хода (б), линейного ускорения (в) штоков гидроцилиндров, угловой скорости (г) и углового ускорения (д) гидроцилиндров во времени при заданных графиках скоростей (а) штоков

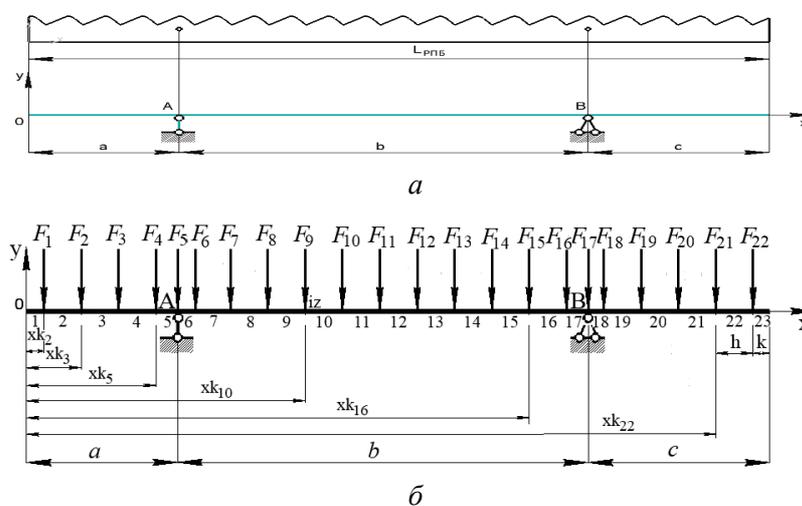
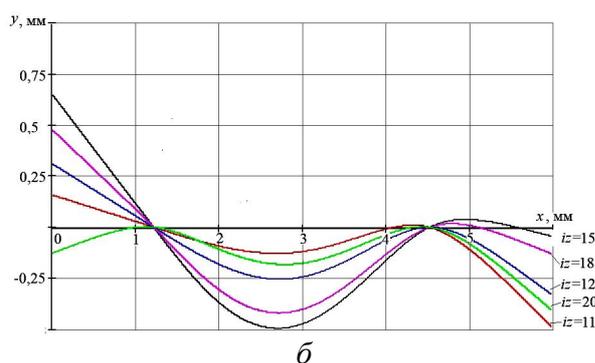
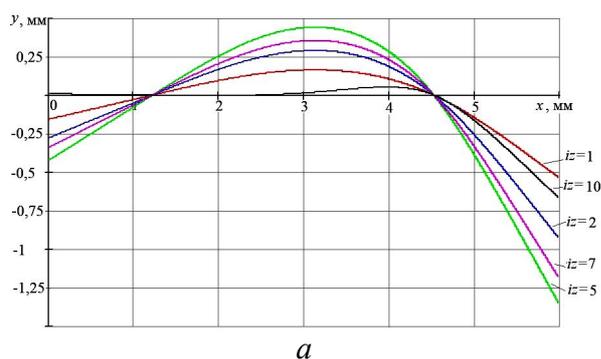


Рисунок 5 Конструкция рейки подвижной балки (а) и расчётная схема (б)



а) 1...10 заготовок; б) 11...20 заготовок

Рисунок 6 Графики прогибов рейки при различном количестве заготовок

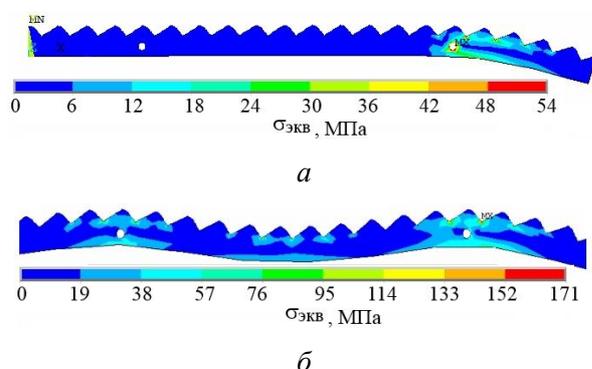


Рисунок 7 Результаты моделирования при нагружении рейки 1-й (а) и 20-ю (б) заготовками

Модель силового статического нагружения гидроцилиндров за цикл движения при полной загрузке холодильника заготовками базируется на системе из трёх уравнений статики, составленной для рычажного механизма (рис. 1) и учитывающей траекторию движения и переменный характер дейст-

вующих нагрузок — силы тяжести  $G$  подвижной части и силы инерции  $F_{ин}$ :

$$G = \begin{cases} m_{\delta} g, & t = 0 \dots t_1; \\ (m_{\delta} + m_3) g, & t = t_4 \dots T_{ц}; \end{cases} \quad F_{ин} = \frac{G}{g} a_S,$$

где  $m_{\delta}$ ,  $m_3$  — масса подвижных балок и суммарная масса заготовок;  $a_S$  — линейное ускорение подвижной части холодильника.

Результат модели — силы сопротивления, действующие в процессе движения на штоках гидроцилиндров вертикального ( $P_1$ ,  $P_3$ ) и горизонтального ( $P_4$ ) перемещения гидроцилиндров (рис. 8).

Можно отметить, что нагрузка на гидроцилиндр вертикального перемещения балок, установленный по ходу движения заготовок с левой стороны секции, в 2...3 раза выше, чем на гидроцилиндр, установленный справа. Нагрузка на гидроцилиндры горизонтального перемещения балок носит знакопеременный характер и в 2...5 раз меньше, чем на гидроцилиндры вертикального перемещения. Установленные закономерности следует учитывать при формировании приоритетов ТО и Р данных элементов холодильника.

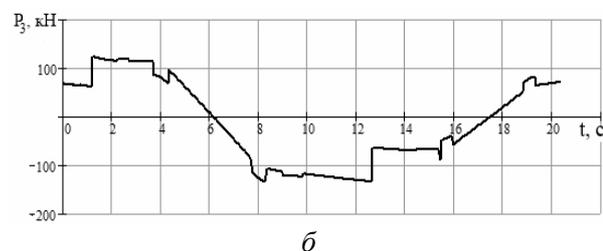
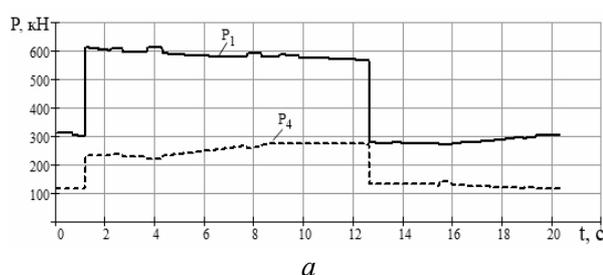


Рисунок 8 Изменение сил сопротивления на штоках гидроцилиндров вертикального (а) и горизонтального (б) перемещения за цикл движения холодильника

Заготовки, перемещаемые холодильником, оказывают не только силовое, но и тепловое воздействие на элементы конструкции холодильника. Для изучения этого воздействия разработаны *математические модели температурных полей* элементов холодильника — рейки подвижной балки, гидроцилиндра вертикального перемещения и гидроцилиндра горизонтального перемещения (рис. 9).

Математическое описание температурного поля каждого из указанных элементов конструкции представлено в виде уравнения теплопроводности:

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = -\left(\frac{\partial}{\partial x}\left(-\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(-\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(-\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)\right),$$

где  $T=f(x, y, z, t)$  — температура произвольной точки  $(x, y, z)$  конструкции;  $t$  — время;  $\lambda$  — теплопроводность материала объекта;  $c$  — теплоёмкость материала объекта;  $\rho$  — плотность материала объекта, которое определяет значение температуры в любой точке конструкции в произвольный момент времени.

Теплофизические свойства (теплопроводность, теплоёмкость, плотность) материала элементов конструкции холодильника (сталь) рассматривались переменными в зависимости от температуры объекта:

$$\lambda = f(T), c = f(T), \rho = f(T).$$

Начальные условия в модели заданы в виде начальной температуры в каждой точке рассматриваемого объекта

$$T|_{t=0} = T_0(x, y, z).$$

Граничные условия заданы условиями II и III рода, которые представлены плотностью теплового потока на поверхностях элементов конструкций как функции координат точек поверхности и времени

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}\Big|_S = q_S = \psi(x, y, z, t), \quad x, y, z \in S$$

по закону Стефана — Больцмана

$$q_n = \varphi_{1-2}\varepsilon_{np}C_0\left[\left(\frac{T_{заг}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_S}{100}\right)^4\right],$$

где  $n$  — внутренняя нормаль к поверхности  $S$ ;  $\varphi_{1-2}$  — угловой коэффициент излучения;  $\varepsilon_{np}$  — приведенная степень черноты между поверхностями заготовки и тела;  $C_0$  — коэффициент излучения абсолютно чёрного тела,  $C_0=5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $T_{заг}$  — температура поверхности заготовки;  $T_S$  — температура поверхности объекта, и по закону Ньютона

$$q_S = \pm\alpha(T_S - T_c),$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи;  $T_S$  — температура поверхности;  $T_c$  — температура среды.

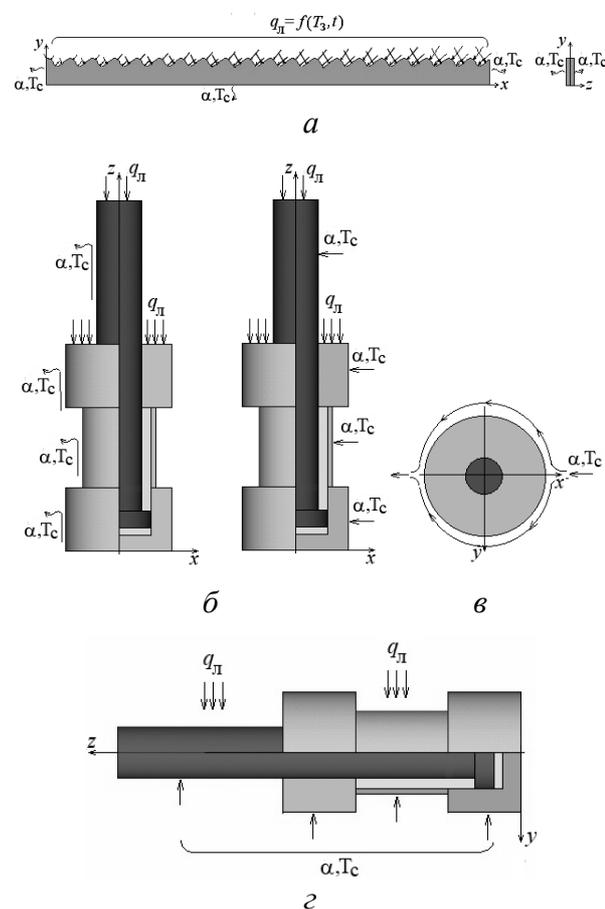


Рисунок 9 Расчётные схемы для математической модели температурных полей рейки подвижной балки (а), гидроцилиндра вертикального перемещения, установленного на «холодной» (б) и «горячей» (в) стороне холодильника, гидроцилиндра горизонтального перемещения (з)

Здесь коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  также является переменным. Его значения определяются по критериальным соотношениям Нуссельта с учётом режима движения воздушной среды.

Результаты математического моделирования представлены картинками распределения температуры в исследуемом элементе конструкции в различные моменты времени (рис. 10).

Установлено, что температурные поля в конструкции имеют неравномерное распределение. Однотипные элементы, расположенные в разных частях холодильника, имеют как количественные, так и качественные температурные различия, что обуславливает разный уровень риска и приоритетности при планировании их технического обслуживания и ремонтов.

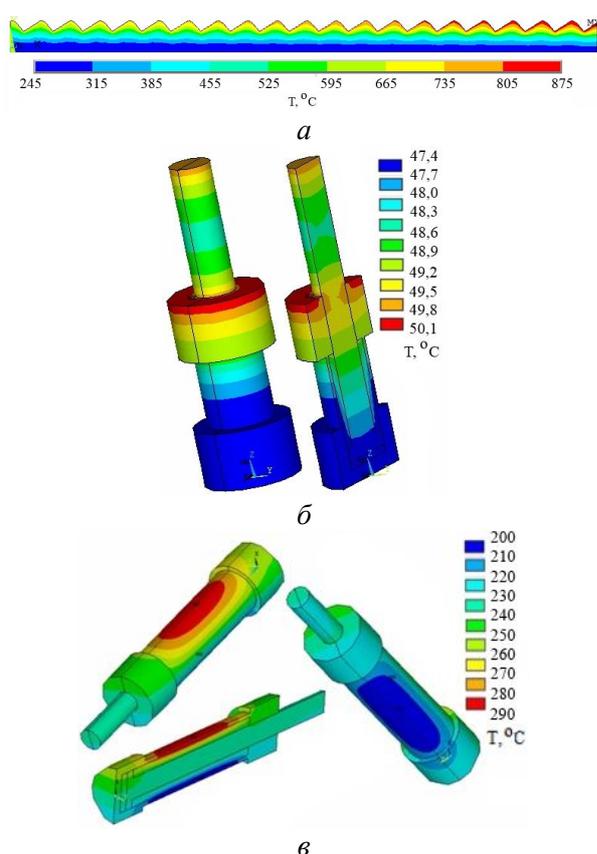


Рисунок 10 Распределение температуры в подвижных рейках первой секции (а), гидроцилиндрах вертикального (б) и горизонтального (в) перемещения через 24 ч работы

Нагрев элементов конструкции холодильника приводит к дополнительным деформациям и связанным с ними напряжениям, определение которых выполняется с помощью *математической модели температурных деформаций  $\Delta X_T$  и напряжений  $\sigma_T$*

$$\sigma_T = E\alpha_l\Delta T\frac{\Delta X}{X},$$

где  $E$  — модуль упругости материала конструкции;  $\alpha_l$  — коэффициент линейного расширения материала конструкции;  $\Delta T$  — перепад температуры;  $\Delta X$  — абсолютная деформация конструкции;  $X$  — исходный размер.

Использование этой модели позволило установить, что после 800 с работы рейки подвижных балок удлиняются относительно неподвижной опоры на 7 мм и на 21 мм относительно подвижной и увеличиваются по высоте на 1 мм с прогибом в средней части, что создает в местах контакта с заготовками эквивалентные напряжения 100...225 МПа (рис. 11). Дальнейший нагрев реек может привести к потере их продольной устойчивости и вызвать нарушение траектории движения и кантовки заготовок.

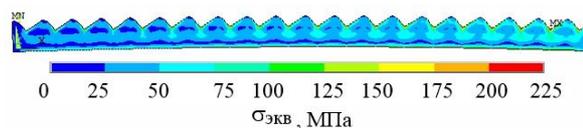


Рисунок 11 Эквивалентные напряжения в рейке последней секции

Полученная с помощью математических моделей кинематики движения, силового и теплового нагружения, прочностного анализа информация используется в *моделях развития неисправностей* элементов холодильника в качестве граничных критериев работоспособного состояния.

Модель развития неисправности представляет собой логическую последовательность условий и событий, реализация которых приводит к возникновению ана-

лизируемого нежелательного события. Например, развитие повреждений, связанных с ослаблением резьбовых соединений гидроцилиндров горизонтального перемещения, разрушением подвижных реек, износом плит трения и др.

Таким образом, разработанный комплекс математических моделей позволяет

представить поведение объекта холодильника МНЛЗ в проектных условиях функционирования, при развитии повреждений и потере работоспособности и обеспечивает получение информации, необходимой для реализации риск-ориентированного технического обслуживания и ремонта.

### Библиографический список

1. Белодеденко, С. В. Методы количественного риск-анализа и безопасность механических систем [Текст] / С. В. Белодеденко, Г. Н. Биличенко // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. — 2015. — № 7. — С. 2–9.
2. Вишневский, Д. А. Компьютерная программа для расчета надёжности оборудования и производственного риска в металлургической отрасли [Текст] / Д. А. Вишневский // *Инновационные перспективы Донбасса. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов*. — Донецк : ДонНТУ, 2018. — С. 114–119.
3. Савельев, А. Н. Оценка режима восстановления оборудования технологической линии «машина непрерывного литья заготовок» [Текст] / А. Н. Савельев, С. С. Северьянов, М. И. Тарасов // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. — 2016. — № 4 (18). — С. 36–40.
4. ГОСТ Р 51901–2002. Управление надёжностью. Анализ риска технологических систем [Текст]. — Введ. 2003–01–03. — М. : Стандартинформ, 2003. — 24 с.
5. ГОСТ Р 51901.1–2002 (МЭК 60300-3-9:1995). Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем [Текст]. — Введ. 2009–01–04. — М. : Стандартинформ, 2003. — 36 с.
6. ГОСТ Р 51901.5–2005 (МЭК 60300-3-1:2003). Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надёжности [Текст]. — Введ. 2005–01–02. — М. : Стандартинформ, 2005. — 45 с.
7. ГОСТ Р 51901.11–2005 (МЭК 61882:2001). Менеджмент риска. Исследование опасности и работоспособности. Прикладное руководство [Текст]. — Введ. 2005–01–06. — М. : Стандартинформ, 2005. — 42 с.
8. ГОСТ Р 51901.13–2005 (МЭК 61025:1990). Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей [Текст]. — Введ. 2005–01–06. — М. : Стандартинформ, 2005. — 12 с.
9. ГОСТ Р 51901.14–2005 (МЭК 61078:1991). Менеджмент риска. Метод структурной схемы надёжности [Текст]. — Введ. 2005–01–07. — М. : Стандартинформ, 2005. — 18 с.
10. ГОСТ Р 51901.15–2005 (МЭК 61165:1995). Менеджмент риска. Применение марковских процессов [Текст]. — Введ. 2005–01–06. — М. : Стандартинформ, 2005. — 18 с.
11. Сидоров, В. А. Разработка математического описания для расчета траектории движения подвижных балок холодильника МНЛЗ [Текст] / В. А. Сидоров, Е. В. Ошовская, Ю. А. Шамрай // *Донбасс будущего глазами молодых ученых*. — Донецк : ДонНТУ, 2017. — С. 82–88.
12. Сидоров, В. А. Математическая модель для определения траекторий движения контрольных точек холодильника МНЛЗ [Текст] / В. А. Сидоров, Е. В. Ошовская, Ю. А. Шамрай // *Технологические машины и оборудование : материалы XVI Республиканской научно-технической студенческой конференции*. — Донецк : ДонНТУ, 2017. — С. 28–37.
13. Дятлов, А. Ю. Зависимости силового нагружения в работе механизма с шагающими балками сортовой МНЛЗ [Текст] / А. Ю. Дятлов, Е. В. Ошовская, В. А. Сидоров // *Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : сб. тезисов докл. VI междунар. науч.-тех. конф. ; под общ. ред. В. А. Козачишена*. — Алчевск : ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», 2021. — С. 20–22.

© Шамрай Ю. А.

© Ошовская Е. В.

© Сидоров В. А.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ММК ДонГТИ Вишневским Д. А.,  
д.т.н., доц., зав. каф. управления качеством ДонНТУ Ченцовым Н. А.*

*Статья поступила в редакцию 24.01.2022.*

**Shamray Yu. A., PhD in Engineering Oshovskaya E. V., Doctor of Technical Sciences**

**Sidorov V. A.** (*DonNTU, Donetsk, DPR, joukserin@gmail.com*)

**MATHEMATICAL MODELS AS A SOURCE OF INFORMATION FOR A RISK-ORIENTED  
MAINTENANCE OF THE CCM COOLER**

*The paper presents a set of mathematical models required to the development of damage models as an information basis for a risk-oriented maintenance strategy. The models of power and thermal effects on the elements of mechanism have been developed for a cooler with walking beams of a billet continuous casting machine, the kinematics of movable racks motion and a canted ingot have been considered.*

**Key words:** *mathematical modeling, risk-oriented strategy, the CCM cooler, motion path, temperature field, deformations, stresses.*

**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](mailto: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 вверх или вниз). Текст в таблице оформляется размером шрифта 11 пт или 12 пт без абзацного отступа. **Не допускается** заливка ячеек таблицы цветом. **Запрещается** располагать таблицу в альбомной ориентации. После таблицы отступается один интервал.

**СОДЕРЖАНИЕ****НАУКИ О ЗЕМЛЕ***Литвинский Г. Г.*

АНСАМБЛИ И СТРУКТУРЫ МИКРОДЕФЕКТОВ В ТВЕРДОМ ТЕЛЕ (ГОРНОЙ ПОРОДЕ) ..... 5

*Полозов Ю. А., Бизянов Е. Е., Лазебник А. Ю.*ЗАКРЕПЛЕНИЕ ГРУНТОВ МЕТОДОМ НАПОРНОЙ ИНЪЕКЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ТЕХНОЛОГИИ НАПРАВЛЕННОГО ГИДРОРАЗРЫВА ..... 16**МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ***Яковченко А. В., Денищенко П. Н., Кравцова С. И., Ивлева Н. И.*МЕТОД УТОЧНЕНИЯ КОНСТАНТ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКИЕ  
ПАРАМЕТРЫ В ФОРМУЛЕ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА ..... 29**СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА***Емец Е. В., Каранетян С. Х.*ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВИНТОВЫХ СВАЙ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ  
В ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ ..... 43*Николаева Е. К., Псюк В. В., Коняшкіна О. А.*

УСТРОЙСТВО ПЛОЩАДКИ ОТДЫХА НА КРЫШЕ ЛАБОРАТОРНОГО КОРПУСА ДонГТИ .. 50

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ***Харламов Ю. А., Петров П. А., Козачишен В. А., Изюмов Ю. В.*ДЕТОНАЦИОННО-ГАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И УСТРОЙСТВА: СОСТОЯНИЕ  
И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ. СООБЩЕНИЕ 2. ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ  
В ДОБЫВАЮЩИХ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ..... 63*Корнеев С. В., Вишневикий Д. А., Мулов Д. В.*ИМИТАЦИЯ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ ОТБОЙНЫХ МОЛОТКОВ  
ПО ГОСТ Р 55162–2012 ..... 71*Ткачев М. Ю.*

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ НОВЫХ УСТАНОВОК ВЕНТИЛЯЦИИ КАРЬЕРОВ ..... 83

*Ошовская Е. В., Ковалёва О. А.*АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СИЛЫ ПОПЕРЕЧНОЙ РЕЗКИ ТРУБЫ  
КЛИНОВЫМ НОЖОМ ..... 96*Шамрай Ю. А., Ошовская Е. В., Сидоров В. А.*МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАК ИСТОЧНИК ИНФОРМАЦИИ  
ДЛЯ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ  
ХОЛОДИЛЬНИКА МНЛЗ ..... 104

**CONTENT****GEOSCIENCES**

<i>Litvinsky G. G.</i> ENSEMBLES AND STRUCTURES OF MICRODEFECTS IN A SOLID (ROCK) .....	5
<i>Polozov Yu. A., Bizianov E. E., Lazebnik A. Yu.</i> SOIL STABILIZATION BY FORCING INJECTION USING THE DIRECTIONAL HYDRAULIC FRACTURING TECHNOLOGY .....	16

**METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES**

<i>Yakovchenko A. V., Denishchenko P. N., Kravtsova S. I., Ivleva N. I.</i> A METHOD FOR SPECIFYING THE CONSTANTS THAT DETERMINE THE THERMOKINETIC PARAMETERS IN THE FORMULA FOR CALCULATING THE METAL FLOW STRESS .....	29
--	----

**CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE**

<i>Emets E. V., Karapetyan S. Kh.</i> ASSESSMENT OF THE BEARING CAPACITY OF SCREW PILES OF VARIOUS DESIGNS IN LOAM SOILS .....	43
<i>Nikolaeva E. K., Psiuk V. V., Koniashkina O. A.</i> SETTING UP A RECREATION AREA ON THE ROOF OF THE DONSTI LABORATORY BUILDING .....	50

**MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE**

<i>Kharlamov Yu. A., Petrov P. A., Kozachishen V. A., Izumov Yu. V.</i> DETONATION-GAS TECHNOLOGIES AND DEVICES: STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT. REPORT 2. APPLICATION OF GAS DETONATION IN EXTRACTIVE AND METALLURGICAL INDUSTRIES .....	63
<i>Korneev S. V., Vishnevskiy D. A., Mulov D. V.</i> SIMULATION OF BENCH TESTS OF PNEUMATIC JACKHAMMERS ACCORDING TO GOST R 55162–2012 .....	71
<i>Tkachev M. Yu.</i> DESIGN OF NEW VENTILATION TECHNOLOGIES FOR QUARRIES .....	83
<i>Oshovskaya E. V., Kovaleva O. A.</i> ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING THE FORCE OF TRANSVERSAL PIPE CUTTING WITH A WEDGE-SHAPED BLADE .....	96
<i>Shamray Yu. A., Oshovskaya E. V., Sidorov V. A.</i> MATHEMATICAL MODELS AS A SOURCE OF INFORMATION FOR A RISK-ORIENTED MAINTENANCE OF THE CCM COOLER .....	104

## СОДЕРЖАНИЕ СБОРНИКА НАУЧНЫХ ТРУДОВ ДонГТИ ЗА 2021 г.

Раздел, название, автор	Номер	Стр.
<b>НАУКИ О ЗЕМЛЕ</b>		
<i>Аверин Г. А., Доценко О. Г., Корецкая Е. Г.</i> Учет влияния песчаников и известняков на максимальное оседание земной поверхности, вызванное горными работами	22 (65)	21
<i>Бабюк Г. В., Смекалин Е. С., Пунтус В. Ф.</i> Усовершенствование датчика, зонда и методики электроемкостной интроскопии горных пород	22 (65)	5
<i>Иванов Л. А., Туманов В. В., Савченко А. В.</i> Оценка газоносности углевмещающих пород по свободному газу в условиях дефицита геофизических параметров	23 (66)	13
<i>Капустин Д. А., Куценко А. В.</i> Исследование реологических характеристик водоугольных суспензий на основе каменных углей	24 (67)	33
<i>Кизияров О. Л., Доценко О. Г., Аверин Г. А., Гришко Н. В.</i> Установление времени стабилизации горного давления на почву извлеченного пласта	24 (67)	25
<i>Князьков О. В., Рябичев В. Д., Спичак Ю. Н., Палейчук Н. Н.</i> О влиянии ширины выработанного пространства лавы на конвергенцию пород в подготовительной выработке	22 (65)	16
<i>Ларченко В. Г., Коваленко Е. В., Маталкина Ю. А.</i> Прогноз вероятных оседаний земной поверхности при ее подработке на больших глубинах	24 (67)	40
<i>Ларченко В. Г., Маталкина Ю. А., Коваленко Е. В.</i> Оперативный способ определения ожидаемых оседаний земной поверхности при добыче угля на больших глубинах	22 (65)	29
<i>Ларченко В. Г., Шпакова А. О.</i> Зависимость скорости оседаний горных пород от влияющих факторов	25 (68)	5
<i>Литвинский Г. Г.</i> Выбор и обоснование параметров исполнительного органа буро-проходческих машин и агрегатов	24 (67)	5
<i>Новиков А. О., Шестопалов И. Н., Дрипан П. С.</i> Результаты шахтных исследований способа установки анкера в направляющий шпур меньшего диаметра под действием динамической нагрузки	24 (67)	18
<i>Полозов Ю. А., Бизянов Е. Е., Лазебник А. Ю.</i> Ликвидация последствий техногенной катастрофы в районе провала земной поверхности на калийном руднике	23 (66)	5
<i>Шульгин П. Н.</i> 300-летие освоения Донецкого каменноугольного бассейна (история возникновения и развития горного дела в Донбассе)	25 (68)	11
<b>МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ</b>		
<i>Бабанин А. Я., Чухаркин А. В.</i> Упрочняющая и восстановительная наплавка клапанов газораспределительного механизма двигателей внутреннего сгорания	25 (68)	26
<i>Горецкий Ю. В., Денищенко П. Н.</i> Разработка технологии производства заготовок в условиях крупносортовых станков с использованием бескалибровой прокатки	24 (67)	61
<i>Диментьев А. О., Власенко Д. А., Антишин А. С., Карпов А. В.</i> Влияние неравномерности вязкости шлака, накопленного в горне доменной печи объемом 3000 м <sup>3</sup> , на выпуск продуктов плавки	22 (65)	46
<i>Диментьев А. О., Должиков В. В., Михайлюк Г. Д., Карпов А. В.</i> Исследования связей основных показателей плавки с интенсивностью хода доменных печей различного объема	25 (68)	46
<i>Куберский С. В., Великоцкий Р. Е.</i> Влияние химического состава и микроструктуры трубной стали класса прочности К60 на ее хладостойкость	24 (67)	54

<b>Раздел, название, автор</b>	<b>Номер</b>	<b>Стр.</b>
<i>Куберский С. В., Романчук Я. А., Саратовский Р. Н.</i> Физическое моделирование пульсационного перемешивания металла в сталеразливочном ковше	23 (66)	47
<i>Митичкина Н. Г., Токарев А. В.</i> Совершенствование способа получения трубной заготовки методом холодной штамповки	22 (65)	52
<i>Проценко М. Ю., Воронько М. И., Проценко В. И., Ангелов В. Ю.</i> Анализ состава отходов ферросплавного производства	23 (66)	56
<i>Русанов И. Ф., Куберский С. В., Проценко М. Ю.</i> Перспективы использования полукокса при агломерации железорудного сырья	24 (67)	47
<i>Русанов И. Ф., Куберский С. В., Проценко М. Ю., Завгородний С. Р.</i> Оценка возможности производства железоблинка на основе техногенных отходов	22 (65)	37
<i>Русанова Н. И., Русанов И. Ф.</i> Расчет поверхности полифракционных агломерата и кокса	23 (66)	40
<i>Рябичева Л. А., Коробко Т. Б., Дядичев А. В.</i> Экспериментальное исследование противодавления при выдавливании полых деталей из порошковой пористой заготовки	25 (68)	21
<i>Снитко С. А., Денищенко Н. П., Пилипенко В. В.</i> Адаптация метода конечно-элементного моделирования процесса прокатки овального раската в круглом калибре	23 (66)	32
<i>Снитко С. А., Денищенко Н. П., Яковченко А. В., Денищенко П. Н.</i> Развитие теории и технологии прокатки круглых профилей	25 (68)	32
<i>Яковченко А. В., Денищенко П. Н., Кравцова С. И., Ивлева Н. И.</i> Автоматизированное моделирование напряжения течения низколегированных и микрелегированных сталей при горячей деформации	23 (66)	21
<b>СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА</b>		
<i>Будзило Е. Е., Горвая Н. А.</i> К вопросу качественного проведения отделочных работ на примере обследования окраски металлических конструкций копра шахты им. С. Тюленина ГУП ЛНР «Углереструктуризация»	25 (68)	65
<i>Гречишкина Е. В., Псюк В. В.</i> Выявление основных факторов, влияющих на монтажно-демонтажные процессы при замене покрытий промышленных зданий	25 (68)	71
<i>Емец Е. В., Карапетян С. Х.</i> Исследование зависимости несущей способности свай от показателей физического состояния грунта	22 (65)	61
<i>Збицкая В. В., Псюк В. В.</i> Анализ показателей несущей способности буронабивных свай, полученных различными методами	22 (65)	66
<i>Псюк В. В., Антошина Т. В., Псюк М. Ю., Никишина И. А.</i> оценка напряженно-деформированного состояния конструкций покрытия производственного здания сортопрокатного цеха филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис»	25 (68)	55
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ</b>		
<i>Артюх В. Г., Корихин Н. В., Чернышева Н. В., Чигарева И. Н.</i> Концепция активной детали в механическом оборудовании	24 (67)	81
<i>Вишневский Д. А., Петров П. А., Харламов Ю. А., Подгорный В. Ю.</i> Классификация деталей машин по условиям изнашивания	23 (66)	65
<i>Власенко Д. А.</i> Аналитический способ определения мощности привода зубчатой роторной дробилки	22 (65)	90
<i>Еронько С. П., Цыхмистро Е. С., Вишневский Д. А., Иваненко А. С.</i> Совершенствование конструкции и модельные исследования стопорной разливочной системы промежуточного ковша МНЛЗ	24 (67)	71

<b>Раздел, название, автор</b>	<b>Номер</b>	<b>Стр.</b>
<i>Еронько С. П., Цыхмистро Е. С., Петров П. А., Зозуля Ф. С.</i> Расчет и конструирование системы механизированной подачи шлакообразующих смесей в кристаллизатор блюмовой МНЛЗ	24 (67)	91
<i>Зубков В. Е., Кизияров О. Л., Полев А. Ю.</i> Определение рациональных параметров воздухораспределительной системы сепаратора сыпучих зернистых материалов	22 (65)	84
<i>Корнеев С. В., Доброногова В. Ю., Долгих В. П.</i> Распределение весовой нагрузки в роликоопорах ленточных конвейеров	22 (65)	77
<i>Левченко Э. П., Вишневецкий Д. А., Зинченко А. М., Левченко О. А., Мороз В. В.</i> Особенности модернизации конструкций одновалковых зубчатых дробилок горячего железорудного агломерата	25 (68)	93
<i>Левченко Э. П., Павлиненко О. И., Чебан В. Г., Левченко О. А., Куценко Е. В.</i> Обоснование основных параметров роторно-ударного измельчителя, реализующего условия стесненного удара	22 (65)	100
<i>Левченко Э. П., Петренко А. В., Чернышев Е. А., Иванова Е. О.</i> Практическое применение способов и средств механической прочистки водопроводных и канализационных сетей	22 (65)	114
<i>Рубежанский В. И.</i> Течение микроструктурной жидкости с внутренними источниками тепла в вертикальном слое	22 (65)	106
<i>Ткачёв М. Ю.</i> Обоснование энергосиловых параметров системы эвакуации газопылевых выбросов	23 (66)	75
<i>Харламов Ю. А., Петров П. А., Козачишен В. А., Изюмов Ю. В.</i> Детонационно-газовые технологии и устройства: состояние и перспективы развития. Сообщение 1. Газовая детонация и ее применение в двигателях и энергетике	25 (68)	81

---



---

**THE CONTENTS OF THE COLLECTION OF SCIENTIFIC PAPERS OF DonSTI IN 2021**


---

Section, title, author	No.	P.
<b>GEOSCIENCES</b>		
<i>Averin G. A., Dotsenko O. G., Koretskaia E. G.</i> Accounting for the effect of sandstone and limestone on the maximum subsidence of the earth's crust caused by mining	22 (65)	21
<i>Babiuk G. V., Smekalin E. S., Puntus V. F.</i> Improvement of strainmeter, probe and method of electrocapacity introscopy of rocks	22 (65)	5
<i>Ivanov L. A., Tumanov V. V., Savchenko A. V.</i> Assessment of gas-bearing capacity of coal-enclosing rocks by free gas under the lack of geophysical parameters	23 (66)	13
<i>Kapustin D. A., Kushchenko A. V.</i> Research of rheological characteristics of coal-water suspensions based on hard coals	24 (67)	33
<i>Kiziyarov O. L., Dotsenko O. G., Averin G. A., Grishko N. V.</i> Fixing the stabilization time of rock pressure on the extracted bed bottom	24 (67)	25
<i>Kniazkov O. V., Riabichev V. D., Spichak Yu. N., Paleyichuk N. N.</i> Influence of the worked-out area of long wall face width on rock convergence in preliminary development	22 (65)	16
<i>Larchenko V. G., Kovalenko E. V., Matalkina Yu. A.</i> Prediction of probable subsidence of the earth's surface during its undermining at great depths	24 (67)	40
<i>Larchenko V. G., Matalkina Yu. A., Kovalenko E. V.</i> Operational method of determining the expected earth's crust subsidence during coal mining at large depths	22 (65)	29
<i>Larchenko V. G., Shpakova A. O.</i> Dependence of the rock subsidence rate on the influencing factors	25 (68)	5
<i>Litvinsky G. G.</i> Selection and justification of parameters of the operating member of drilling machines and aggregates	24 (67)	5
<i>Novikov A. O., Shestopalov I. N., Dripan P. S.</i> The results of mine studying the way of installing an anchor in a guide drill hole of a smaller diameter under the dynamic load	24 (67)	18
<i>Polozov Yu. A., Bizianov E. E., Lazebnik A. Yu.</i> Rectification of the consequences of manmade disaster in the area of the earth's surface sinkhole in a potash mine	23 (66)	5
<i>Shulgin P. N.</i> 300th anniversary developing of the Donetsk coal mining basin (history of the emergence and development of mining in Donbass)	25 (68)	11
<b>METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES</b>		
<i>Babanin A. Ya., Chukharkin A. V.</i> Hardening and recovering surfacing of valves of the gas distribution mechanism of internal combustion engines	25 (68)	26
<i>Dimentiev A. O., Dolzhikov V. V., Mikhailuk G. D., Karpov A. V.</i> Studies of links between the main melting indicators and the driving rate intensity of the blast furnaces of different volumes	25 (68)	46
<i>Dimentiev A. O., Vlasenko D. A., Antishin A. S., Karpov A. V.</i> Effect of uneven viscosity of accumulated slag in blast furnace hearth with a volume of 3000 m <sup>3</sup> on smelting products output	22 (65)	46
<i>Goretskiy Yu. V., Denishchenko P. N.</i> Development of blanking technology in conditions of heavy section mills using gaugeless rolling	24 (67)	61
<i>Kuberskiy S. V., Romanchuk Ya. A., Saratovskiy R. N.</i> Physical modeling of pulsating mixing of metal in a steel ladle	23 (66)	47
<i>Kuberskiy S. V., Velikotskiy R. E.</i> Influence of chemical composition and microstructure of pipe steel strength class k60 on its cold resistance	24 (67)	54

<b>Section, title, author</b>	<b>No.</b>	<b>P.</b>
<i>Mitichkina N. G., Tokarev A. V.</i> Improving the method of pipe stock production by cold stamping method	22 (65)	52
<i>Protsenko M. Yu., Voron'ko M. I., Protsenko V. I., Angelov V. Yu.</i> Analysis of the waste composition of ferroalloy industry	23 (66)	56
<i>Riabicheva L. A., Korobko T. B., Diadichev A. V.</i> Experimental study of back pressure during extrusion of hollow parts from a powdered porous blank	25 (68)	21
<i>Rusanov I. F., Kuberskiy S. V., Protsenko M. Yu.</i> Prospects for the use of semi-coke in the agglomeration of iron ore raw materials	24 (67)	47
<i>Rusanov I. F., Kuberskiy S. V., Protsenko M. Yu., Zavgorodniy S. R.</i> Assessment of possibility for producing the staflux based on technogenic wastes	22 (65)	37
<i>Rusanova N. I., Rusanov I. F.</i> Calculation of the surface of polyfractive sinter and coke	23 (66)	40
<i>Snitko S. A., Denishchenko N. P., Pilipenko V. V.</i> Adaptative method of finite-element simulation of rolling the oval roll in round pass	23 (66)	32
<i>Snitko S. A., Denishchenko N. P., Yakovchenko A. V., Denishchenko P. N.</i> Development of the theory and technology of rolling round profiles	25 (68)	32
<i>Yakovchenko A. V., Denishchenko P. N., Kravtsova S. I., Ivleva N. I.</i> Automated simulation of the flow stress of low-alloy and micro-alloy steels under hot deformation	23 (66)	21
<b>CIVIL ENGINEERING AND ARCHITECTURE</b>		
<i>Budzilo E. E., Gorovaia N. A.</i> The question of qualitative finishing work on the example of surveying the painting of metal structures of pithead of mine named after S. Tyulenin SUE LPR "Uglerestrukturizatia"	25 (68)	65
<i>Emets E. V., Karapetian S. Kh.</i> Studying of the dependence of pile capacity on indicators of soil physical condition	22 (65)	61
<i>Grechishkina E. V., Psiuk V. V.</i> Identification of the main factors affecting the assembling and dismantling processes at replacing coatings of industrial buildings	25 (68)	71
<i>Psiuk V. V., Antoshina T. V., Psiuk M. Yu., Nikishina I. A.</i> Assessment of the stress-strain state of coating structures of the roll production rolling mill of branch № 12 ZAO "Vneshtorgservis"	25 (68)	55
<i>Zbitskaia V. V., Psiuk V. V.</i> Analyzing the indicators of bored piles capacity obtained by various methods	22 (65)	66
<b>MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE</b>		
<i>Artiukh V. G., Korikhin N. V., Chernysheva N. V., Chigareva I. N.</i> Concept of an active part in mechanical equipment	24 (67)	81
<i>Eronko S. P., Tsykhmistro E. S., Petrov P. A., Zozulya F. S.</i> Calculation and design the system of mechanized supply of slag-forming mixtures to the bloom caster mold	24 (67)	91
<i>Eronko S. P., Tsykhmistro E. S., Vishnevskiy D. A., Ivanenko A. S.</i> Design improvement and model studies of stopper pouring system of the intermediate caster ladle	24 (67)	71
<i>Kharlamov Yu. A., Petrov P. A., Kozachishen V. A., Iziumov Yu. V.</i> Detonation-gas technologies and devices: state and prospects of development. Report 1. Gas detonation and its application in engines and power engineering	25 (68)	81
<i>Korneev S. V., Dobronogova V. Y., Dolgikh V. P.</i> Weight load distribution in belt idlers	22 (65)	77
<i>Levchenko E. P., Pavlinenko O. I., Cheban V. G., Levchenko O. A., Kutsenko E. V.</i> Justification of the main parameters of rotary impact crusher that implements constrained impact conditions	22 (65)	100

<b>Section, title, author</b>	<b>No.</b>	<b>P.</b>
<i>Levchenko E. P., Petrenko A. V., Chernyshov E. A., Ivanova E. O.</i> Practical application of methods and means for mechanical defouling of water supply and sewerage nets	22 (65)	114
<i>Levchenko E. P., Vishnevskiy D. A., Zinchenko A. M., Levchenko O. A., Moroz V. V.</i> Features of modernization of single-roll crushers design of hot iron-ore sinter	25 (68)	93
<i>Rybezhanskiy V. I.</i> Flow of microstructural liquid with internal heat sources in vertical layer	22 (65)	106
<i>Tkachov M. Yu.</i> Justification of energy-power parameters of the evacuation system of gas-dust emissions	23 (66)	75
<i>Vishnevskiy D. A., Petrov P. A., Kharlamov Yu. A., Podgorniy V. Yu.</i> Classification of machine parts by wear conditions	23 (66)	65
<i>Vlasenko D. A.</i> Analytical method for determining drive power of toothed rotary crusher	22 (65)	90
<i>Zubkov V. E., Kiziyarov O. L., Polev A. Yu.</i> Determining the rational parameters of air-distribution system for separator of loose grain materials	22 (65)	84

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 26 (69) 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 № 7 dated 25.03.2022)*

*Added to scientometrical database of RSCI*

Format 60×84½  
Conventional printed sheet 15,75  
Order № 65

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