

ДОНБАССКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

Выпуск 23 (66) 2021



СБОРНИК
НАУЧНЫХ ТРУДОВ

**Сборник
научных трудов
Донбасского государственного технического
института**

Сборник
Выходит 4 раза в год
Основан в июне 1999 г.
Выпуск 23 (66) 2021

Collection of Scientific Papers of DonSTI

Collection
Publishing 4 times a year
Founded in June 1999
Issue 23 (66) 2021

Алчевск
2021

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 23 (66) 2021

**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 № 12 от 25.06.2021)*

Включён в наукометрическую базу данных РИНЦ

Формат 60×84½
Усл. печат. л. 11,5
Заказ № 153
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

Куберский С. В. — к.т.н., проф., и. о. ректора

Заместитель главного редактора

Вишневецкий Д. А. — к.т.н., доц.

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.

Зинченко А. М. — к.э.н., доц.

Зелинский А. Н. — к.т.н., проф.

Снитко С. А. — д.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», 2021
© Чернышова Н. В., художественное
оформление обложки, 2021

НАУКИ О ЗЕМЈЕ

GEOSCIENCES

УДК 622.251

*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)*

ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ТЕХНОГЕННОЙ КАТАСТРОФЫ В РАЙОНЕ ПРОВАЛА ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА КАЛИЙНОМ РУДНИКЕ

В статье приведен опыт проектирования защитных мероприятий по локализации техногенной катастрофы на калийном руднике Второго соликамского рудоуправления (СКРУ-2) ПАО «Уралкалий», связанных с разрушением межкамерных целиков, вызвавшим проседание земной поверхности и образование провальной воронки. Даны научно обоснованные технические решения по стабилизации грунтов и проницаемых горных пород путем формирования противодиффузионной завесы вокруг зоны проседания и провала земной поверхности с целью обеспечения безопасной работы калийного рудника и снижения притоков ненасыщенных рассолов и пресных вод к подземным выработкам.

Ключевые слова: *провалы и проседания земной поверхности, стабилизация горного массива, противодиффузионная завеса, тампонажные скважины, глиноцементный раствор.*

Калийный рудник № 2 (СКРУ-2) ПАО «Уралкалий» в г. Соликамске Пермской области является одним из ведущих мировых производителей и экспортеров хлористого калия для производства калийных удобрений. Поэтому безаварийная работа рудника имеет большое социально-экономическое значение для региона.

При отработке северо-восточных панелей СВП-1 и СВП-2 горизонта –143 м 05 января 1995 г. произошло массовое разрушение междукамерных целиков, сопровождавшееся землетрясением. На площади 950×750 м были раздавлены поддерживающие целики, а на земной поверхности образовалась мульда оседания глубиной от 1,5 м до 4,5 м. Водозащитная толща была нарушена. Приток ненасыщенных рассолов составлял 130 м³/час. Образование мульды было вызвано сдвижением горных пород в результате обрушения соляных пород в кровле очистных камер I–II СВП (пласт АБ, гор. –143) (рис. 1).

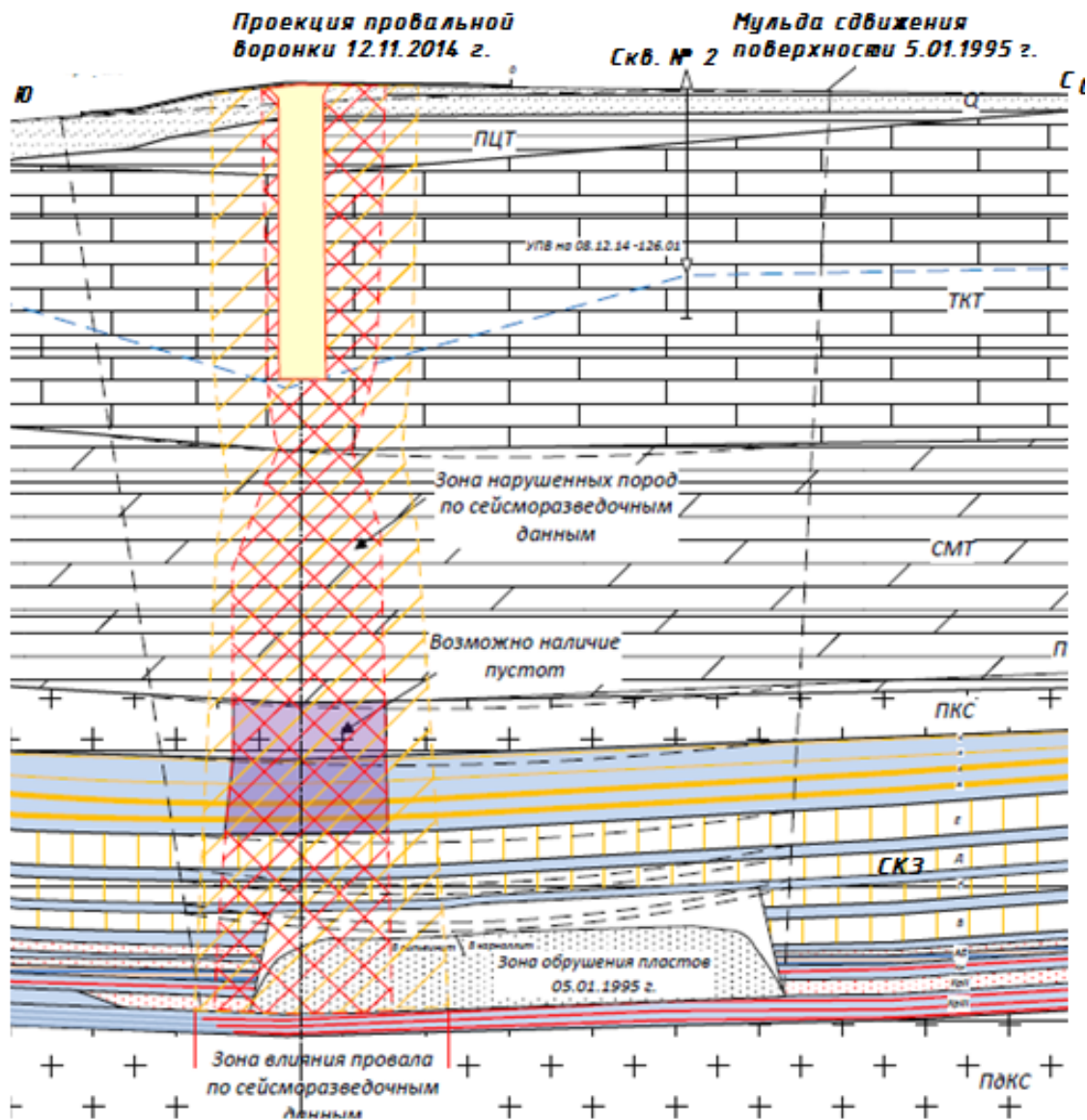
В сентябре 2014 г. зафиксировано новое проявление сейсмической активности на уровне продуктивных пластов в районе

мульдообразования. 18 ноября 2014 г. на дневной поверхности образовалась провальная воронка в районе юго-восточного контура зоны обрушения горных пород кровли вышеуказанных панелей глубиной 71,8 м и объемом свыше 135000 м³. Размеры провала: на уровне земной поверхности — 54–83 м, в коренных породах — 25×54 м.

В этих крайне сложных горно-геологических условиях повысить надежность защиты горных работ на горизонтах продуктивной толщ от поступления пресных подземных вод возможно при выполнении следующих мероприятий:

- создание искусственной водонепроницаемой преграды в виде противодиффузионной завесы вокруг аварийного участка, исключающей приток пресных вод из терригенно-карбонатной толщ в зону обрушения продуктивных пластов нижележащей соленосной толщ;

- понижение уровня подземных вод вокруг аварийного участка с помощью специальных водопонижающих и дренирующих систем (дренажные скважины, горные выработки).



ПЦТ — пестроцветная толща; ТКТ — терригенно-карбонатная толща;
 СМТ — соляно-мергельная толща; ПКС — покрывные пласты каменной соли;
 СКЗ — сальвинито-карналитовая зона (пласты К, И, З, Ж, Е, Д, Г)

Рисунок 1 Схема мульдообразования на поверхности земли и провальная воронка над зоной отработанных северо-восточных панелей №№ СВП-1 и СВП-2 горизонта –143 м

В связи с этим целью настоящей работы явилась разработка технических решений по сооружению противофильтрационной завесы вокруг провала.

Объект исследования — горные выработки и массив калийного рудника СКРУ-2.

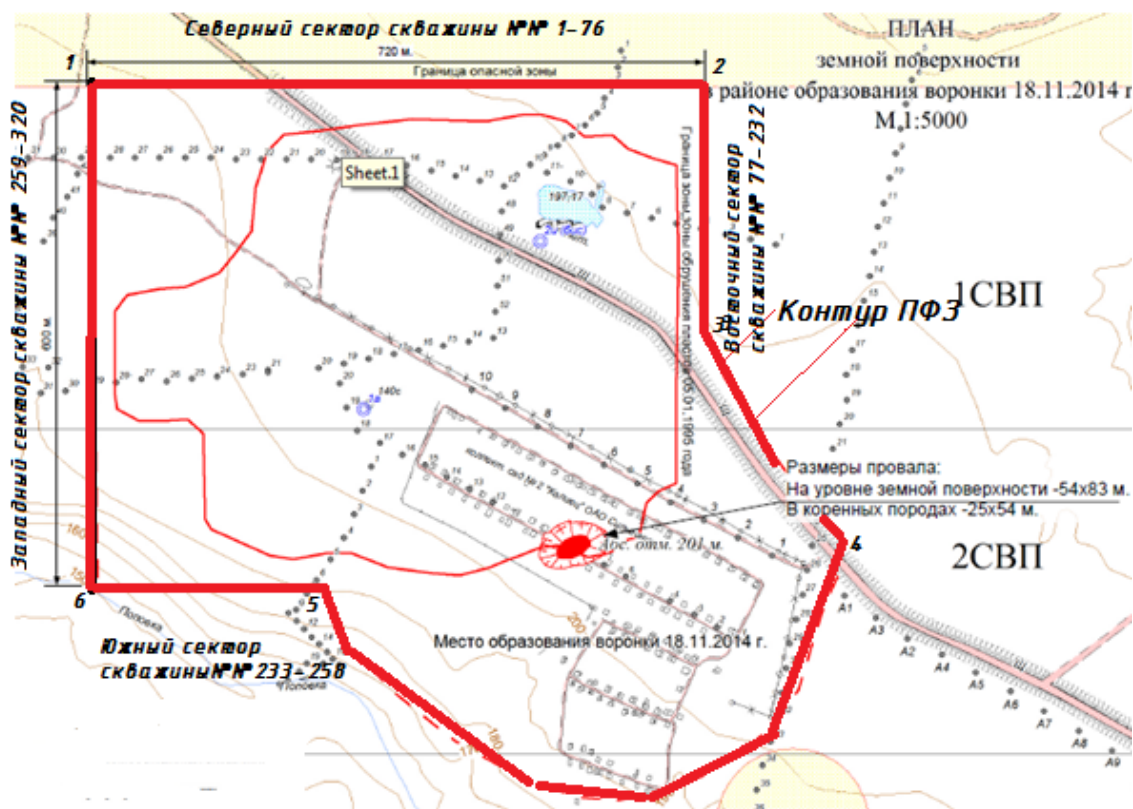
Предмет исследования — ликвидация провала и стабилизация грунтов в зоне сдвига пород.

Задача исследования: на основании анализа горно-геологических и гидрогеологических условий Соликамского месторождения калийных солей, в т. ч. аварийного участка обрушения пластов северо-восточной панели СВП-1 и СВП-2 горизонта –143 м шахтного поля СКРУ-2, основная задача заключается в снижении объемов поступления слабоминерализованных и пресных вод в

подземные горные выработки продуктивной толщи в зоне нарушенных пород в месте образования провала на поле СКРУ-2, что может быть достигнуто сооружением противофильтрационной завесы в водоносных трещиноватых породах терригенно-карбонатной толщи на глубину контакта с породами соляно-мергельной толщи.

Постановку замкнутой противофильтрационной завесы (ПФЗ) глубиной

150–170 м и общей протяженностью порядка 3150–3200 м, как показано на рисунке 2, и располагаемой по контуру границы опасной зоны можно осуществить путем нагнетания глиноцементных растворов через пробуренные тампонажные скважины в потенциально опасные водопроницаемые горизонты терригенно-карбонатной толщи (ТКТ) и в зону контакта ТКТ и соляно-мергельной толщи (СМТ).



1–2 — Северный сектор ПФЗ; 2–3–4 — Восточный сектор ПФЗ;
4–5 — Южный радиальный сектор ПФЗ; 5–6 — Южный горизонтальный сектор ПФЗ;
6–1 — Западный сектор ПФЗ

Рисунок 2 План земной поверхности в районе опасной зоны сдвижения горных пород и противофильтрационной завесы вокруг нее

Исходными предпосылками выбора местоположения противофильтрационной завесы (ПФЗ) являются:

– наличие зоны оседания поверхности земли и сдвижения породы в результате обрушения пластов 05 января 1995 г. района северо-восточных панелей №№ СВП-1 и СВП-2 горизонта –143 м.;

– наличие провала земли с образованием воронки 18 ноября 2014 г. на границе зоны обрушения пластов 05 января 1995 г.;

– установление 300-метровой зоны полного запрета доступа вокруг контура провала с южной и юго-восточной сторон и вокруг зоны обрушения пластов 05 января 1995 г. с северной, восточной и западной сторон;

– наличие кольца водопонижающих скважин, расположенных по периметру опасной зоны вокруг провала, образовавшегося 18 ноября 2014 г.

Учитывая вышеперечисленные факторы, противофильтрационную завесу предусматривается разместить с внешнего контура за границами опасной зоны на удалении 10 м от нее. При этом тампонажные скважины должны находиться внутри кольца водопонижающих скважин, как показано на рисунке 3. При производстве тампонажных работ и до их окончания сохраняется вся система водопонижения с водопонижающими скважинами.

Замкнутую противофильтрационную завесу предусматривается расположить по всему периметру опасной зоны, имеющему протяженность порядка 3150 м. Расстояние от тампонажных скважин до границы опасной зоны принимаем равным не

менее 10 м, что должно быть достаточным для размещения бурового оборудования. Тампонажное оборудование может быть размещено на более удаленном расстоянии от запретной зоны. Учитывая большую протяженность проектируемой ПФЗ, для удобства пользования она разделена на следующие участки или сектора:

1) северный сектор между точками 1–2, имеет протяженность 760 м;

2) восточный сектор между точками 2–3–4 протяженностью 560 м;

3) южный радиальный сектор между точками 4–5, расположен по радиусу 300-метровой опасной зоны вокруг провала, имеет протяженность 1000 м;

4) южный горизонтальный сектор между точками 5–6 вблизи речки Поповки и имеет протяженность 260 м;

5) западный сектор между точками 6–1 имеет протяженность 620 м.

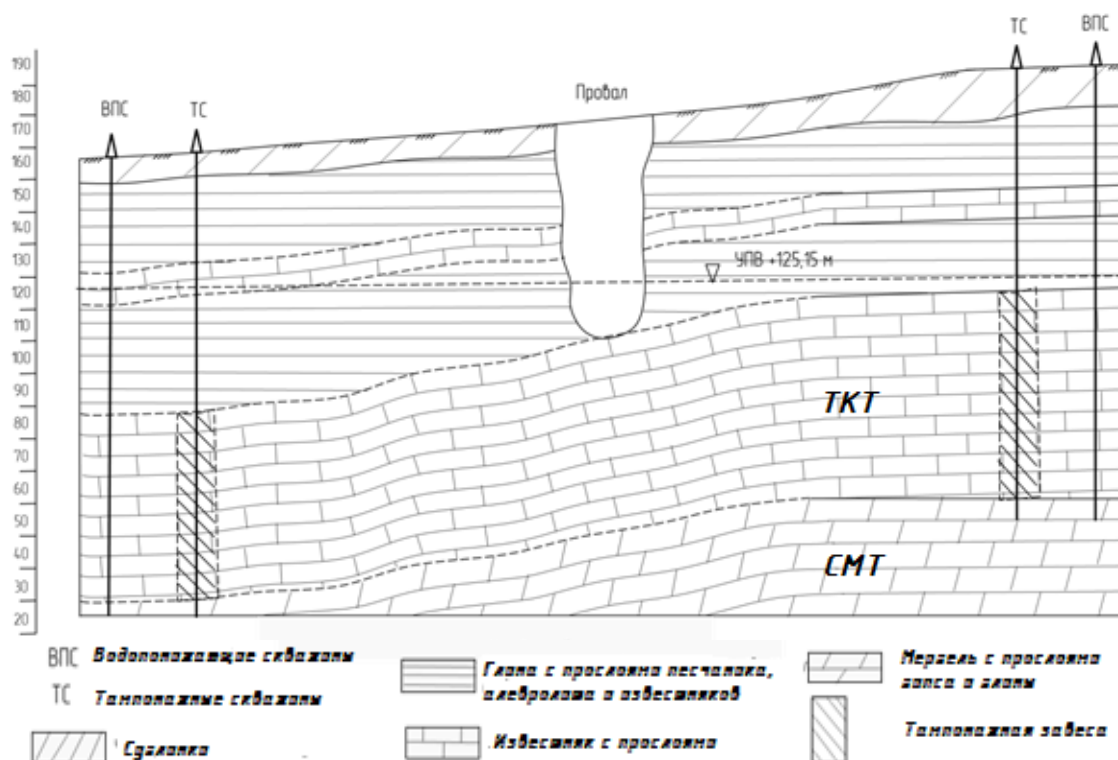


Рисунок 3 Схематический геологический разрез по оси провала с указанием тампонажных и водопонижающих скважин

Наиболее трудными участками по горно-техническим условиям являются южный сектор между точками 5–6 и прилегающий к нему участок южного сектора между точками 4–5 из-за сложности рельефа местности, наличия водозащитной зоны вокруг русла речки Поповки и подтапливаемых земель вокруг нее. Для этих участков при сооружении ПФЗ потребуются разработка специальных мероприятий, таких как устройство горизонтальных площадок на крутых склонах, отсыпка дамб, укладка железобетонных плит, и выполнения ряда других конструктивных мероприятий, требующих значительных материальных затрат.

Противофильтрационная завеса будет сооружаться в водовмещающих породах терригенно-карбонатной толщи, а также в зоне ее контакта с кровлей соляно-мергельной толщи и иметь глубину порядка 110–180 м в зависимости от гипсометрии кровли СМТ и рельефа земной поверхности. Наибольшая глубина завесы будет в южном радиальном секторе, наименьшая — в западном секторе — 110–120 м (рис. 3). Эффективность создаваемой противофильтрационной завесы будет зависеть от ее мощности. Для формирования ПФЗ с требуемыми характеристиками по проницаемости необходимо при нагнетании тампонажного раствора получить достаточные контуры распространения раствора в трещинах и карстовых каналах в каждом из проницаемых горизонтов. При этом отличительной особенностью сооружения противофильтрационных завес инъекционного типа неглубокого, до 100–200 м, заложения является необходимость ограничения давления нагнетания тампонажного раствора до величин, не превышающих давление гидроразрыва или гидрорасчленения горных пород. Превышение давления нагнетания приводит к неконтролируемому выходу раствора в соседние скважины или на земную поверхность. Это условие, требующее снижения давления нагнетания тампонажного раствора, влечет за собой уменьшение расчетных контуров распространения раствора вокруг тампонажной скважины и, следовательно, к уве-

личению количества тампонажных скважин. Учитывая этот фактор, на практике в геотехнике сооружают двух- и трехрядные ПФЗ, что резко увеличивает объемы буровых работ, сроки и стоимость строительства. Применительно к горно-геологическим условиям СКРУ-2, учитывая крайне сложную аварийную ситуацию, для защиты горных работ от подтопления предусматривается сооружение однорядной противофильтрационной завесы, но в две очереди:

– *I очередь* — бурение на заданном расстоянии L друг от друга, как показано на схеме, приведенной на рисунке 4, а и 4, б, замкнутого кольца тампонажных скважин вокруг опасной зоны и нагнетание в них глиноцементного раствора [3].

При расчетном радиусе распространения тампонажного раствора из скважины R_3 толщина ПФЗ будет составлять $M = 2R_3$.

На этом этапе в теле ПФЗ будут протампонированы все трещины и каналы с раскрытием от 1,0 мм и выше.

Расчетные контуры распространения тампонажного раствора, как видно из схемы на рисунке 4, надежно сомкнутся.

Однако расчеты контура распространения тампонажного раствора в трещинах с минимальным раскрытием 0,2 мм, являющихся границей проникновения глиноцементных растворов, показывают, что такие трещины будут протампонированы только на незначительном расстоянии r от скважины. В результате контуры распространения тампонажного раствора в трещинах 0,2 мм не смыкаются, что скажется на водозащитных свойствах и проницаемости ПФЗ в целом.

– *II очередь* — предусматривает бурение серии тампонажных скважин между ранее протампонированными тампонажными скважинами I очереди (рис. 4, б).

При этом этапе для достижения необходимых контуров распространения тампонажного раствора в трещинах с раскрытием 0,2 мм предусматривается использование глиноцементного раствора с более низкими реологическими характеристиками, чем при тампонажных работах I очереди.

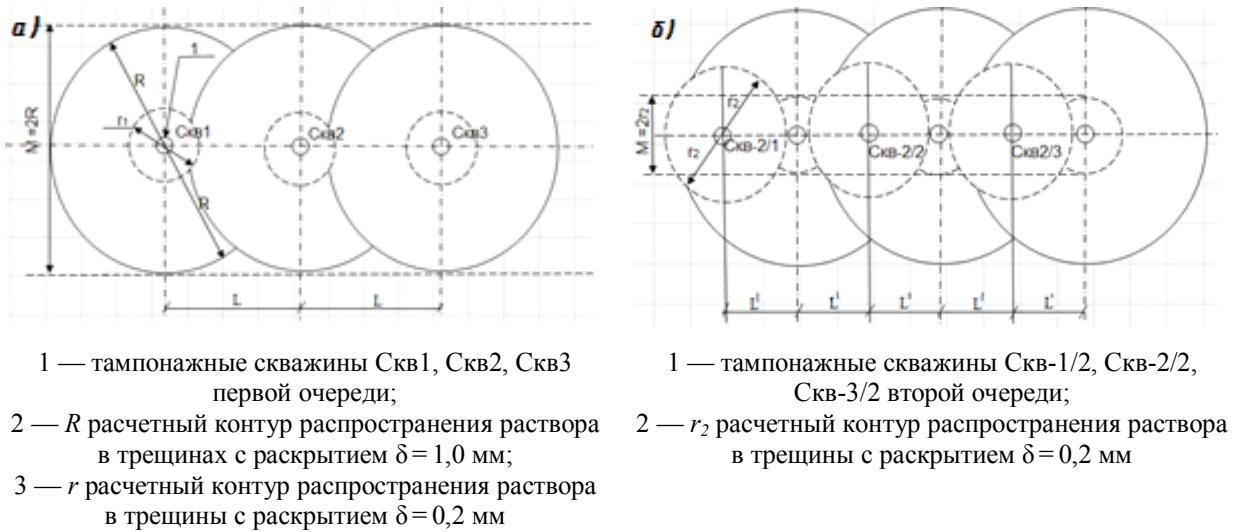


Рисунок 4 Схемы формирования противофильтрационной завесы

Расчет технологических параметров противофильтрационной завесы произведен по методике комплексного метода тампонажа [2] и включает определение:

- давления гидроразрыва и гидрорасчленения горных пород;
- контуров распространения тампонажного раствора из отдельной скважины в каждом из выделенных проницаемых горизонтов;
- давления нагнетания тампонажного раствора.

Результаты расчетов технологических параметров формирования противофильтрационной завесы приведены в таблице 1.

Расчет размеров контуров распространения тампонажного раствора для верхней дренированной зоны I производился только для трещин с раскрытием 1,00 мм и более.

В расчете объемов нагнетаемого раствора в скважины II очереди дренированной зоны ТКТ приняты размеры контуров распространения по аналогии 1-го этапа.

Технология сооружения противофильтрационной завесы:

1. Сооружение ПФЗ вокруг зоны сдвижения горных пород выполняется по технологии комплексного метода тампонажа обводненных горных пород, предусматривающей нагнетание тампонажного материала через вертикальные скважины, пробуренные с поверхности земли вокруг границ опасной зо-

ны изолированно в каждый из выделенных проницаемых горизонтов с использованием для герметизации ствола скважины пакерующих устройств или перфорированной колонны обсадных труб [2, 3].

2. В качестве гидроизоляционного материала предусматривается использовать глиноцементный тампонажный раствор, в состав которого входит до 89 % глинистого раствора, 10–12 % сульфатостойкого портландцемента М 400 и 1 % структурообразователя.

3. Бурение скважин предусматривается производить самоходными буровыми установками типа УКБ-500С, 1БА-15 и УРБ-3АМ.

4. В каждой из пробуренных тампонажных скважин предусматривается проведение комплекса геофизических исследований, включающих кавернометрию, инклинометрию, расходометрию и стандартный электро- и гамма-каротаж.

5. Глинистый раствор из комовых глин готовится на механизированной глиностанции, оснащенной высокопроизводительными фрезерно-струйными мельницами типа ФСМ-9 или на других смесительных устройствах.

6. Приготовление и нагнетание глиноцементного раствора осуществляли с использованием мобильного тампонажного комплекса типа КЦС-40, включающего цементировочные агрегаты АН-100, УНБ1-160/40 и смесительные машины типа УС-6/30.

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

7. Тампонажные работы по устройству ПФЗ выполняются в две очереди: сначала необходимо бурить скважины 1-й очереди с расстоянием между ними в 20 метров с целью получения замкнутого кольца, обеспечивающего снижение притоков воды к опасной зоне, и только затем производить бурение скважин 2-й очереди, в которых дополнительно проводится комплекс гид-

родинамических исследований для определения качества ПФЗ и снижения коэффициента фильтрации (K_f) пород в теле ПФЗ и нагнетание тампонажного раствора.

Основные технические показатели тампонажных работ по сооружению замкнутой ПФЗ вокруг опасной зоны сдвижения горных пород и провальной воронки приведены в таблице 2.

Таблица 1

Данные расчетов контуров распространения тампонажного раствора вокруг скважин и объемов тампонажного раствора для сооружения ПФЗ

Наименование интервалов	Номер заходки тампонажа	Интервал проницаемого горизонта	Мощность проницаемых пород, м	Давление гидроразрыва $P_{г.г}$, МПа	Расчетные радиусы распространения раствора вокруг тампонажной скважины, r_c , м				Объем раствора в скважину V , m^3		Суммарный объем тампонажного раствора по всем скважинам, V , m^3		
					I этап $\delta_{1-1} = 1,0$ мм	I этап $\delta_{1-1} = 0,2$ мм	II этап		I этап	II этап	I этап	II этап	Всего
							$\delta_{1-1} = 1,0$ мм	$\delta_{1-1} = 0,2$ мм					
1ТКТ б/н	Ia	42.2–60.0	10.3	1.76	6.30	-	17.6	-	28	28	4880	880	9860
2ТКТ б/н	Iб	60.0–75.0	5.65	2.14	7.60	-	21.4	-	15	15	2400	2400	4800
3ТКТ нап	IIa	75.0–100.0	21.0	2.86	10.20	2.03	-	5.72	96	22	15360	3520	18880
4ТКТ нап	IIб	100.0–125.0	17.50	3.58	12.80	2.54	-	7.16	118	28	18880	4480	23360
5ТКТ нап	IIв	125.0–150.0	22.50	4.30	15.30	3.05	-	8.6	232	52	37120	8320	45440
6СМТ нап	III	150.0–170.0	12.0	4.86	17.30	3.45	-	9.72	158	35	25280	5600	30880
									647	180	103520	28800	132320

Таблица 2

Характеристика противofильтрационной завесы и сводные объемы комплекса тампонажных работ

№	Показатели	Ед. изм.	Количество		
			I очередь	II очередь	Всего
1	Протяженность тампонажной завесы	м	3200		
2	Глубина ПФЗ	м	110–180		
3	Количество скважин	скв.	160	160	320
4	Объем буровых работ	скв./п.м.	23430	23430	46860
5	Объем тампонажных работ	m^3	103520	28800	132320

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Эффективным способом локализации и устранения притоков ненасыщенных растворов и пресных вод в подземные горные вы-

работки из вышележащих насыщенных пород на калийных месторождениях может служить противofильтрационная завеса, сооружаемая с поверхности земли вокруг всей зоны сдвижения и разуплотнения пород.

2. Противоаварийные мероприятия по снижению притоков подземных вод в отработанное пространство при нарушении целостности вышележащей толщи, направленные на сохранение безопасной работы калийного рудника, должны включать, наравне с завершением сооружения противо-

фильтрационной завесы, надежную закладку провальной воронки и гидравлическую закладку отработанного пространства для исключения деформации горного массива.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку методики прогноза размеров зоны разрушенных пород во времени.

Библиографический список

1. Шиман, М. И. Предотвращение затопления калийных рудников [Текст] / М. И. Шиман. — М. : Недра, 1992. — 23 с.
2. Комплексный метод тампонажа строительстве шахт [Текст] / Э. Я. Кипко, Ю. А. Полозов и др. — М. : Недра, 1984. — 243 с.
3. Тампонаж обводненных горных пород [Текст] : справочное пособие / Э. Я. Кипко, Ю. А. Полозов и др. — М. : Недра, 1989. — 318 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. СГ АФГТ ЛГУ им. В. Даля Савченко И. В.

Статья поступила в редакцию 31.05.2021.

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

RECTIFICATION OF THE CONSEQUENCES OF MANMADE DISASTER IN THE AREA OF THE EARTH'S SURFACE SINKHOLE IN A POTASH MINE

The article describes the experience of designing protective measures to localize a manmade disaster in a potash mine of the Second Solikamsk Mine Administration (SKRU-2) of PJSC "Uralkali", associated with the destruction of room fenders that caused subsidence of the Earth's surface and sinkhole formation. Scientifically grounded engineering solutions are given to stabilize soils and permeable rocks by forming a sealing curtain around the subsidence and sinkhole of the Earth's surface in order to ensure the safe operation of a potash mine and reduce the inflow of unsaturated brines and fresh water to underground workings.

Key words: *sinkhole and subsidence of the Earth's surface, rock mass stabilization, sealing curtain, grouting hole, clay-cement mortar.*

УДК 550.832:550.8.011

к.г.-м.н. Иванов Л. А.,

Туманов В. В.,

к.г.-м.н. Савченко А. В.

(РАНИМИ, г. Донецк, ДНР, ivanov.donetsk@mail.ru)

ОЦЕНКА ГАЗОНОСНОСТИ УГЛЕВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ПО СВОБОДНОМУ ГАЗУ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

На основе данных угольной геофизики и петрофизики разработан способ определения газоносности угленосных пород по свободному газу, в котором удельное электрическое сопротивление газоносного пласта определяется по данным каротажа скважин, а коэффициент открытой пористости и удельное электрическое сопротивление того же пласта в водонасыщенном состоянии — по петрофизическим данным.

Ключевые слова: газоносность, углеводородные породы, геофизические методы.

Введение. Изучение газоносности углеводородных пород является актуальным вопросом, поскольку с ним связано решение проблем безопасной добычи угля и определения условий попутной добычи метана на угольных месторождениях.

Согласно инструкции [1], рекомендуется использование прямого метода определения газоносности при помощи газокернонаборников (ГКН), но лишь при условии, что породы характеризуются малой скоростью газоотдачи. Из-за невыполнения данного условия прямой метод определения газоносности пород практически не используется. Для этого применяется косвенный метод.

В РАНИМИ разработана геолого-геофизическая система оценки газоносности углеводородных пород. В ней выделяются две составляющие газоносности, соответствующие свободной и сорбированной форме нахождения газа.

Свободная форма газа распространена преимущественно в высокопористых песчаниках и алевролитах. Они залегают на месторождениях углей начальных стадий метаморфизма (1Д–4Ж) углей.

Газоносность по свободному газу определяется по газоемкости, приведенной к пластовым условиям залегания породы. Для расчета используется следующая формула:

$$X_{n.свб} = K_{нэф} \cdot \frac{P_{пл}}{P_o} \cdot \frac{T_{пл}}{T_o} \cdot \frac{\alpha}{\alpha_o}, \quad (1)$$

где $X_{n.свб}$ — газоносность вмещающих пород по свободному газу, м³/м³;

$K_{нэф}$ — коэффициент эффективной пористости, отн. ед.;

$P_{пл}$ — пластовое давление, МПа;

P_o — атмосферное давление у устья скважин в период отбора проб, МПа;

$T_{пл}$ — пластовая температура, К;

T_o — стандартная температура (293 К);

α — поправка на отклонение реальных газов от закона Бойля-Мариотта при пластовом давлении, отн. ед.;

α_o — поправка на отклонение реальных газов от закона Бойля — Мариотта при атмосферном давлении у устья скважины, отн. ед.

Оценка газоносности пород по свободному газу сводится к определению расчетных параметров, входящих в выражение (1). Данные параметры определяются двумя видами методов: лабораторными и геофизическими исследованиями скважин (ГИС). Первые методы позволяют получить точечную характеристику геологического разреза в местах отбора проб. Вторые методы раскрывают непрерывную картину изменения газоносности по разрезу скважины в условиях естественного залегания пород, что дает наиболее реали-

стичное представление о газоносности исследуемого месторождения.

Определение газоносности является основной задачей изучения нефтегазовых месторождений. Для ее решения используется соответствующий комплекс методов ГИС. Поэтому было бы целесообразно позаимствовать геофизические технологии нефтегазовой геологии. Однако такой подход является нереальным, поскольку угольные месторождения исследуются иным комплексом ГИС, не позволяющим в рядовых разведочных скважинах непосредственно по геофизическим данным определить газоносность пород.

Из всех геофизических параметров, измеряемых в углеразведочных скважинах, особо выделяется удельное электрическое сопротивление пород. Оно определяется во всех рядовых скважинах и реагирует на изменение газоносности пород. Однако его использованию препятствует отсутствие возможности получить опорное значение данного параметра, соответствующее водонасыщенному состоянию исследуемого газоносного пласта. Поэтому проблема оценки газоносности пород на угольных месторождениях непосредственно по данным ГИС заключается в дефиците геофизических параметров.

Цель исследования — обосновать способ преодоления дефицита геофизических параметров, необходимых для определения газоносности на угольных месторождениях, на основе определения удельного электрического сопротивления пласта в водонасыщенном состоянии по петрофизическим характеристикам исследуемого газоносного пласта.

Изложение основного материала. Определение газоносности пород предполагает использование петрофизических связей, необходимых для определения коэффициента эффективной пористости пород и его расчетных параметров.

Коэффициент эффективной пористости рассчитывается по формуле

$$K_{нэф} = K_{но} \cdot k_2, \quad (2)$$

где $K_{нэф}$ — коэффициент эффективной пористости, отн. ед.;

$K_{но}$ — коэффициент открытой пористости, отн. ед.;

k_2 — коэффициент газонасыщенности пород, отн. ед.

Из формулы (2) следует необходимость в нахождении параметров $K_{но}$ и k_2 . Параметр $K_{но}$ определяется лабораторными и геофизическими методами, либо по его тесной связи с коэффициентом общей пористости (K_n)

$$K_{но} = a \cdot K_n + b, \quad (3)$$

где a и b — эмпирические коэффициенты.

Коэффициент k_2 выражается через коэффициент водонасыщенности ($k_в$), от которого зависит электропроводность породы

$$k_2 = (1 - k_в). \quad (4)$$

Коэффициент $k_в$ определяется на основе использования зависимости Арчи — Дахнова для параметра насыщения (P_n)

$$P_n = a \cdot k_в^{-n}, \quad (5)$$

$$P_n = \frac{\rho_{2n}}{\rho_{вn}}, \quad (6)$$

где a , n — эмпирические коэффициенты, зависящие от типа породы и определяемые лабораторным путем;

ρ_{2n} — удельное электрическое сопротивление газоносного пласта, Ом·м;

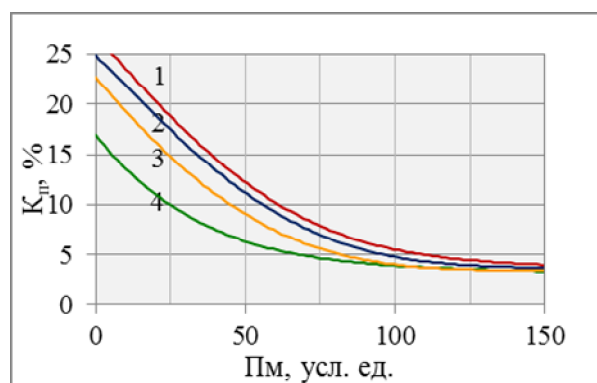
$\rho_{вn}$ — удельное электрическое сопротивление того же пласта в водонасыщенном состоянии Ом·м.

Рассмотрим возможности определения расчетных параметров на угольных месторождениях.

Коэффициент открытой пористости. Параметр $K_{но}$ определяется лабораторным или акустическим методом ГИС. Последний применяется лишь в некоторых разведочных скважинах. Предпочтительным является петрофизический подход, базирующийся на определении параметра

K_{no} по его тесной связи с параметром K_n . Выбор данного подхода объясняется тем, что по параметру K_n выполнены детальные петрофизические исследования. Очень важно, что в результате этих исследований установлены закономерности изменения пористости, обусловленные первичными (генетическими) и вторичными (эпигенетическими) факторами. Также создана геолого-геофизическая методика определения параметра K_n в числе других физико-механических свойств по результатам ГИС [2, 3]. Данное обстоятельство позволяет получить детальную картину изменения параметра K_{no} по разрезу скважины на основе использования параметра K_n .

Изменение параметра K_n пород с глинистым цементом обусловлено степенью катагенеза (или метаморфизма углей) и размером обломочных зерен пород (рис. 1, табл. 1). При этом показатель метаморфизма (Пм) довольно точно определяется по углехимическим и углепетрографическим данным [4], размер зерен и глинистый цемент пород — по данным ГИС [5]. Поэтому параметр K_n исследуемого слоя породы с достаточной точностью определяется по показателям Пм и d_3 .



Пм — параметр метаморфизма углей;
1 — песчаник к/з; 2 — песчаник с/з;
3 — песчаник м/з; 4 — алевролит

Рисунок 1 Общая пористость обломочных пород донецкого карбона в метаморфическом ряде углей

Таблица 1
Параметр метаморфизма и стадии метаморфизма углей Донбасса

Стадия метаморфизма	Параметр метаморфизма	
	от	до
ОБД	0	20
1Д	20	40
2Г	40	60
3Г	60	80
4Ж	80	120
5К	120	150

Коэффициент газонасыщенности. Для определения параметра k_2 необходимо задать величины коэффициентов a и n в уравнении (5) и значения параметров ρ_{zn} и $\rho_{вп}$. Коэффициент a обычно принимается равным единице. Численное значение коэффициента n может изменяться от 1,73 до 4,33. Для песчано-глинистых пород чаще всего значение коэффициента n изменяется от 2,00 до 2,16 и в среднем равняется 2,08 [6].

Связь параметров K_n и K_{no} показана на рисунке 2. Данная зависимость характеризуется некоторой универсальностью, допускающей определение параметра K_{no} без разделения песчаников по размеру зерен (d_3).

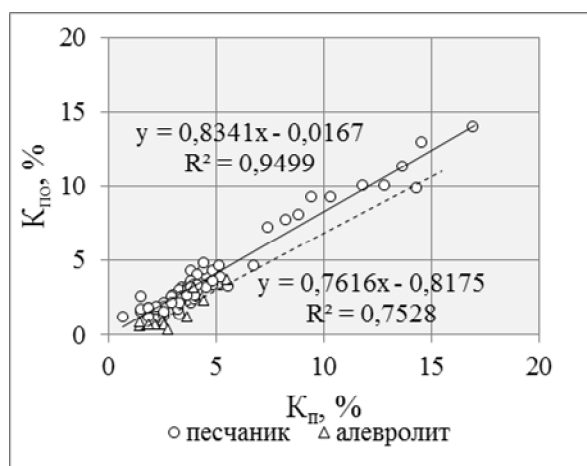


Рисунок 2 Связь открытой пористости (K_{no}) с общей пористостью (K_n) углевещающих пород. Донецкий каменноугольный бассейн, Очеретинская глубокая скважина К-900

При уменьшении пористости пород значение коэффициента n увеличится. По данным [7], вблизи северо-западной границы Донбасса в Днепровско-Донецкой впадине, где параметр K_{no} песчаников среднего и верхнего карбона составляет около 4 %, коэффициент n равняется 5,2. При уменьшении размера зерен пород от песчаников до алевролитов и аргиллитов величина коэффициента n увеличивается соответственно от 5,2 до 6,9 и 9,5.

Приведенные данные свидетельствуют об увеличении коэффициента n угленосных пород с ростом катагенеза и уменьшением размера зерен пород. Однако ввиду отсутствия лабораторных данных по Донбассу значение данного коэффициента принято равным 2.

Учитывая выражения (3)–(6), получаем окончательную формулу для определения коэффициента k_2 углеводящих пород по их электрическим свойствам

$$k_2 = 1 - \left(\frac{\rho_{en}}{\rho_{en}} \right)^{0,5} \quad (7)$$

Чтобы воспользоваться выражением (7), необходимо получить значения параметра ρ_{en} для того же слоя породы, по которому геофизическим методом измерен параметр ρ_{en} .

Параметр ρ_{en} в нефтегазовой геофизике рекомендуется определять несколькими способами [8]:

– путем измерения данного параметра в других скважинах, расположенных за контуром газоносности;

– путем расчета данного параметра на основании проведения повторных измерений или использования дополнительных методов ГИС;

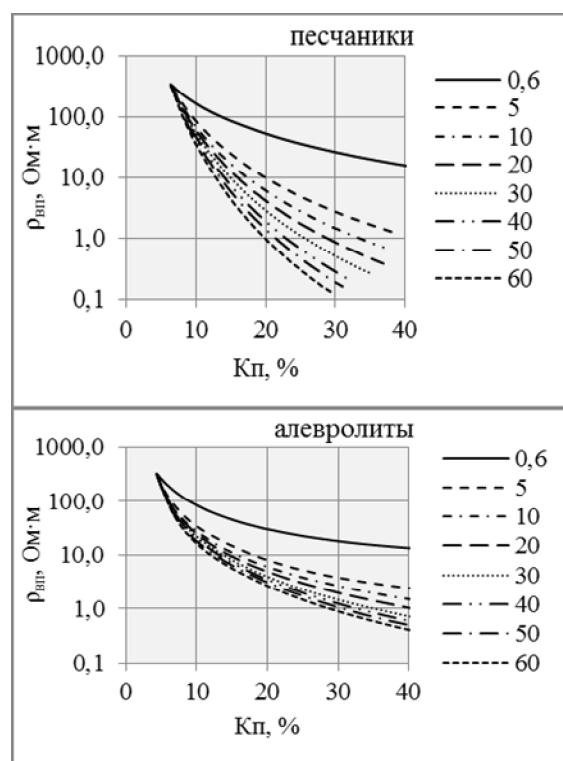
– на основе использования параметра пористости и удельного электрического сопротивления пластовых вод.

Применение указанных способов на угольных месторождениях является проблематичным по нескольким причинам. Так, определение параметра ρ_{en} в другой скважине нарушает идентичность состава и свойств

исследуемого пласта. Использование параметра пористости приводит к значимым погрешностям, поскольку уравнение данного параметра не остается постоянным на угольном месторождении [6]. Повторные измерения и использование дополнительных геофизических методов (не включенных в основной комплекс) реализуются в редких случаях и не позволяют изучать газоносность по всем пластам и скважинам.

Предлагаемый способ определения параметра ρ_{en} по данным угольной петрофизики является решением указанной проблемы. Способ заключается в расчете параметра ρ_{en} по факторам, определяющим его изменение: типу породы, минерализации пластовых вод (C_v), параметрам K_n и T_{nl} .

Связь параметра ρ_{en} с указанными факторами представлена на рисунке 3.



Шифр кривых — минерализация пластовых вод, г/л

Рисунок 3 Зависимость удельного электрического сопротивления водонасыщенных песчаников и алевролитов (ρ_{en}) от коэффициента общей пористости (K_n) и минерализации пластовых вод при температуре 20 °С [6]

При использовании данной связи тип породы определяется по данным ГИС, параметр K_n — по типу породы и показателю Пм (см. рис. 1). Показатель C_e снимается с графика изменения данного показателя с глубиной (Н), построенного для исследуемого месторождения. Величина параметра ρ_{en} , полученная по рисунку 3, приводится к температуре пласта по формуле [3]

$$\rho_{nt} = \frac{\rho_{nt20}}{0.022 \cdot T_{nl} + 0,56}, \quad (8)$$

где ρ_{nt} — удельное электрическое сопротивление породы при температуре пласта, Ом·м;

ρ_{nt20} — удельное электрическое сопротивление породы при температуре 20 °С, Ом·м;

T_{nl} — температура пласта, °С.

Значения параметров ρ_{en} и K_n , определенные по петрофизическим связям, являются исходными данными для нахождения параметров k_e и K_{no} , по которым рассчитывается параметр $K_{нэф}$.

В формулу (1), используемую для определения показателя $X_{н.свб}$, наряду с параметром $K_{нэф}$, входят показатели P_{nl} , T_{nl} , a . Их определение не представляет особой трудности. Параметры P_{nl} и T_{nl} измеряются в ходе испытания пластов и выполнения ГИС. Обычно значения данных параметров снимаются с графиков их изменения с глубиной. Параметр a , учитывающий отклонение углеводородных газов от закона

Бойля — Мариотта, зависит от величин P_{nl} и T_{nl} [9]. С глубиной параметр a закономерно увеличивается и составляет 1,0 на земной поверхности, 1,02 на глубине 500 м, 1,04 на глубине 1000 м и 1,06 на глубине 1500 м.

Выводы. Таким образом, на основе данных угольной петрофизики разработан способ определения газоносности, заключающийся в использовании двух параметров удельного электрического сопротивления пород: измеренного в газоносном пласте (ρ_{en}) и приведенного к водонасыщенному состоянию этого же пласта (ρ_{en}).

Данный способ позволяет использовать результаты измерения параметра ρ_{en} электрическими методами ГИС и результаты определения коэффициента открытой пористости (K_{no}) и параметра ρ_{en} по петрофизическим данным. При помощи данного способа кривые угольного комплекса ГИС трансформируются в кривую изменения коэффициента газонасыщенности по разрезу скважины.

В предложенном способе эмпирические коэффициенты, входящие в выражение Арчи — Дахнова, приняты как постоянные величины. Предполагается, что дальнейшее развитие данного способа связано с установлением генетических и эпигенетических закономерностей изменения указанных коэффициентов.

Библиографический список

1. Инструкция по определению и прогнозу газоносности угольных пластов и вмещающих пород при геологоразведочных работах [Текст]. — М. : Недра, 1977. — 96 с.
2. Гречухин, В. В. Изучение угленосных формаций геофизическими методами [Текст] / В. В. Гречухин. — М. : Недра, 1980. — 360 с.
3. Гречухин, В. В. Петрофизика угленосных формаций [Текст] / В. В. Гречухин. — М. : Недра, 1990. — 472 с.
4. Левенштейн, М. Л. Комплект карт метаморфизма углей Донецкого бассейна [Текст] / М. Л. Левенштейн, О. И. Спирина. — К. : ЦТЭ, 1991. — 104 с.
5. Руководство по геолого-геофизической методике изучения литологии отложений угольных месторождений [Текст] : утв. Министерством геологии СССР. — М. : ВНИИГеофизика, 1980. — 83 с.
6. Авчян, Г. М. Петрофизика осадочных пород в глубинных условиях [Текст] / Г. М. Авчян, А. А. Матвеев, З. Б. Стефанкевич. — М. : Недра, 1979. — 224 с.

7. Вижева, С. А. Петрофізичні параметри порід, перспективних на сланцевий газ (ділянки східного сектору Дніпровсько-Донецької западини) [Текст] / С. А. Вижева, В. А. Михайлов, Д. І. Онищук, І. І. Онищук // Геофізичний журнал. — 2014. — Т. 36. — № 1. — С. 145–157.

8. Дахнов, В. Н. Геофизические методы определения коллекторских свойств и нефтегазонасыщения горных пород [Текст] / В. Н. Дахнов. — М. : Недра, 1985. — 310 с.

9. Коэффициент сжимаемости природного газа [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.chem21.info/page/219149164218215191156003115085227135229206125153/15.10.2020>.

© Иванов Л. А.

© Туманов В. В.

© Савченко А. В.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. СГ ДонГТИ Литвинским Г. Г.,
д.т.н., с.н.с., зав. отделом компьютерных технологий
РАНИМИ МОН ДНР Глуховым А. А.*

Статья поступила в редакцию 14.04.2021.

**PhD in Geological and Mineralogical Sciences Ivanov L. A., Tumanov V. V., PhD in Geological and Mineralogical Sciences Savchenko A. V. (RANIMI, Donetsk, DPR, ivanov.donetsk@mail.ru)
ASSESSMENT OF GAS-BEARING CAPACITY OF COAL-ENCLOSING ROCKS BY FREE GAS UNDER THE LACK OF GEOPHYSICAL PARAMETERS**

Based on the data of coal geophysics and petrophysics, a method for determining the gas-bearing capacity of coal-bearing rocks by free gas has been developed, in which the specific electrical resistance of gas-bearing formation is determined from well logging data, and the open porosity coefficient and the specific electrical resistance of the same formation in the water-saturated state are determined from petrophysical data.

Key words: *gas-bearing capacity, coal-enclosing rocks, geophysical methods.*

**МЕТАЛЛУРГИЯ
И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ**

**METALLURGY
AND MATERIAL SCIENCES**

УДК 621.771.23(075.8)

д.т.н. Яковченко А. В.,
к.т.н. Денищенко П. Н.,
Кравцова С. И.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР),
Ивлева Н. И.
(ДонНИИчермет, г. Донецк, ДНР)

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ И МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ДЕФОРМАЦИИ

Разработана специализированная компьютерная программа автоматизированного моделирования напряжения течения низколегированных и микролегированных сталей на базе объединенной формулы расчёта величины энергии активации деформации. Для более чем 50-ти марок сталей, в том числе низко- и микролегированных, определены значения величины энергии активации деформации. Разработанная компьютерная программа обеспечивает определение напряжения течения при заданных значениях накопленной деформации, скорости деформации и температуры металла. С использованием метода планируемого эксперимента определено влияние микролегирующих элементов V, Mo, Ti, Nb на напряжение течения.

Ключевые слова: автоматизированное моделирование напряжения течения низколегированных и микролегированных сталей, динамическое преобразование структуры, экспериментальные кривые течения, сплайн-интерполяция, теория планируемого эксперимента.

Определение напряжения течения металла основывается на экспериментальной информации, например, [1, 2 и др.]. На практике широко используются методы В. И. Зюзина [2], В. А. Николаева [3], Л. В. Андreyюка [4] и др. Вместе с тем при создании этих методов использовалась экспериментальная информация, в которой степень деформации не превышала значения 0,3–0,5. При больших значениях деформации используется понятие суммарной относительной или логарифмической деформации, которая в указанной экспериментальной информации не превышала соответственно значения 0,4–0,7. При разработке рациональных технологических процессов горячей прокатки важными вопросами являются расчеты энергосиловых параметров и деформированного состояния металла, в которых напряжение течения металла оказывает существенное влияние на результаты. В ряде технологических процессов актуально учитывать накопленную деформацию, которая может

существенно превышать указанные выше значения, достигая единицы и более. Это возможно реализовать, например, на базе метода [5], который позволяет учитывать накопленную деформацию в рассматриваемой точке очага, а также процессы динамического преобразования структуры металла в процессе его горячей прокатки.

В работе поставлена задача автоматизированного моделирования напряжения течения низколегированных и микролегированных сталей на базе метода [5], который учитывает химический состав сталей, температуру, скорость деформации, накопленную деформацию в рассматриваемой точке очага, а также процессы динамического преобразования структуры металла в процессе его горячей прокатки. Планируется также выполнить проверку адекватности метода и изучить влияние микролегирования на напряжение течения этих сталей.

В работе [6] создана специализированная компьютерная программа расчета на-

пряжения течения металла σ на базе математической модели [5], учитывающей химический состав углеродистой стали, температуру T , скорость U и накопленную деформацию ε , а также процессы динамического преобразования структуры при горячей деформации.

Основные формулы модели показаны в фрагменте окна программы (рис. 1). Здесь σ_y , σ_p , ε_p и ε_x — термокинетические параметры: σ_p — пиковое значение напряжения σ на кривой течения, соответствует пиковой деформации ε_p ; σ_y — установившееся напряжение, при котором наступает равновесие процессов упрочнения и динамической рекристаллизации при достижении деформации ε_x . Влияние химического состава стали отражается величиной энергии активации деформации Q ($\text{кДж} \cdot \text{моль}^{-1}$), которая входит в комплексный температурно-скоростной параметр процесса деформации (параметр Зинера — Холломона (z)); A — скоростная константа деформируемого материала.

Математическую модель [5] в настоящей работе дополнили слагаемым δQ , полученным в работе [7], которое учитывает влияние на величину энергии активации деформации следующих химических элементов: Mo , Ti , Nb (см. фрагмент окна программы на рисунке 2).

Выполним анализ полученной объединенной формулы расчета величины энергии активации деформации применительно к моделированию напряжения течения низколегированных и микролегированных сталей при горячей деформации.

Для этого воспользуемся компьютерной программой, созданной в работе [8], которая на первом этапе в автоматизированном режиме формирует план-матрицу эксперимента, обеспечивающую научно-обоснованный выбор наиболее рациональных точек в области изменения факторов ε , U , T , а на следующем — определяет соответствующие экспериментальные $\sigma_{\text{экс}}$

значения. Метод автоматизированного определения экспериментальных значений напряжения течения металла σ в зависимости от фиксированных значений степени деформации ε , скорости деформации U и температуры T основан на использовании компьютерной базы соответствующей цифровой информации [8].

На рисунке 3 показано окно компьютерной программы автоматизированного моделирования напряжения течения низколегированных и микролегированных сталей при горячей пластической деформации. Расчёты выполнены для хромомолибденовой стали, по которой в работе [1] представлены экспериментальные данные по кривым течения. Химический состав стали указан в правом верхнем углу окна программы (рис. 3).

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

$$\text{где } \sigma_p = 72,06 \cdot (Z/A)^{0,131}, \quad \sigma_y = 51,66 \cdot (Z/A)^{0,149},$$

$$\varepsilon_x = 0,193 \cdot (Z/A)^{0,112}, \quad \varepsilon_p = 0,268 \cdot (Z/A)^{0,107}.$$

$$Z = U \cdot \exp[Q/(R \cdot T)],$$

где $R = 8,318 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ - газовая постоянная; T - абсолютная температура.

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

а

$$Q = 308700 + 37100 \cdot \ln(C\%) + 10900 \cdot \ln(C\%)^2 + 27000 \cdot (Si\%) + 8100 \cdot (Mn\%) + 337100 \cdot (Cr\%) + 249900 \cdot (Ni\%) - 119000 \cdot (Cu\%) + 181000 \cdot (V\%) - 288000 \cdot (P\%) - 855000 \cdot (S\%)$$

б

Рисунок 1 Фрагмент окна программы: а — основные формулы математической модели [2]; б — формула расчета величины Q [2]

$$\delta Q = 35651,28 \cdot (Mo\%) + 93680,52 \cdot (Ti\%)^{0,2919} + 70729,85 \cdot (Nb\%)^{0,5649}$$

Рисунок 2 Формула, учитывающая влияние на величину энергии активации деформации следующих химических элементов:

$$Mo, Ti, Nb [7]$$

Имя файла: КАТАЛОГ\3.
(моллид 0.49)Сталь типа
хромоникобанодовой,стр.88,рис.
II, 62-63

Пределы изменения факторов

ε_{\min}	ε_{\max}	U min (1/с)	U max (1/с)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.051	0.511	1	100	900	1200

Химический состав (%)

Mo	0.49
Ti	
Nb	
C (0.05 - 1.1)	0.26
Si (0 - 1.65)	0.35
Mn (0.03 - 1.55)	0.57
Cr (0 - 0.3)	0.03
Ni (0 - 0.3)	0.29
P (0 - 0.05)	0.023

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	-1, 2154	-1	0	+1	+1, 2154
Натуральные значения факторов	ε	U (1/с)	T (град.С)		
	0.051	0.0918	0.2810	0.4702	0.511
	1	9.773	50.500	91.227	100
	900	926.584	1050.000	1173.416	1200

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ε	U (1/с)	T (град.С)	$\sigma_{\text{экс}}$ (МПа)
1	-1	-1	-1	0.0918	9.773	926.584	133.678
2	+1	-1	-1	0.4702	9.773	926.584	181.515
3	-1	+1	-1	0.0918	91.227	926.584	179.514
4	+1	+1	-1	0.4702	91.227	926.584	243.751
5	-1	-1	+1	0.0918	9.773	1173.416	70.004
6	+1	-1	+1	0.4702	9.773	1173.416	95.053
7	-1	+1	+1	0.0918	91.227	1173.416	94.005
8	+1	+1	+1	0.4702	91.227	1173.416	127.643
9	-1.2154	0	0	0.051	50.500	1050.000	96.197
10	+1.2154	0	0	0.511	50.500	1050.000	157.793
11	0	-1.2154	0	0.2810	1	1050.000	103.116
12	0	+1.2154	0	0.2810	100	1050.000	162.054
13	0	0	-1.2154	0.2810	50.500	900	230.396
14	0	0	+1.2154	0.2810	50.500	1200	104.077
15	0	0	0	0.2810	50.500	1050.000	147.536

Результаты расчета

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

σ (МПа)	Δ (%)
138.435	3.559
184.665	1.735
192.860	7.434
243.229	0.214
66.881	4.461
85.679	9.862
87.395	7.031
118.621	7.068
100.378	4.347
154.104	2.338
91.677	11.094
158.153	2.407
231.627	0.534
102.003	1.993
$\Delta \sigma$ (%)	4.343

Z/A

	1	2	3
Z/A	1391.742	1391.742	12991.344
σ_y	151.895	151.895	211.879
σ_p	185.995	185.995	249.220
ε_p	0.581	0.581	0.738
ε_x	0.434	0.434	0.558

$Q = 329158.489$
 $A = 1489220392120.064$

Q по формуле В.С. Солода и др.
 Q по формуле S.F. Medina и др.
 Q по объединенной формуле

Проверка адекватности модели по критерию Фишера (уровень значимости - 5%)
Грассч 244.481 Гтабл 3.59 Грассч > Гтабл (адекватность обоснована)

Выполнить Дополнительно Графики <<Назад Далее>>

Рисунок 3 Окно усовершенствованной компьютерной программы по проверке адекватности модели на базе объединенной формулы расчёта величины энергии активации деформации по отношению к экспериментальным данным

С применением центрального композиционного ортогонального планирования разработан план-матрица [9] в виде, представленном на рисунке 3. Здесь в верхней части окна указаны пределы изменения факторов ε , U , T . Ниже формируется таблица кодовых и натуральных значений факторов.

План-матрица содержит 15 строк (опытов) для определения величин σ при указанных в них сочетаниях значений факторов ε , U , T . Последняя колонка план-матрицы содержит значения напряжения течения металла $\sigma_{\text{экс}}$, которые определены по методу [8] с использованием компьютерной базы цифровой экспериментальной информации для выбранной стали.

Выполнена разработка функции компьютерной программы определения соответствующих расчетных значений $\sigma_{\text{расч}}$ для каждого из 15-ти опытов на основе объединенной формулы.

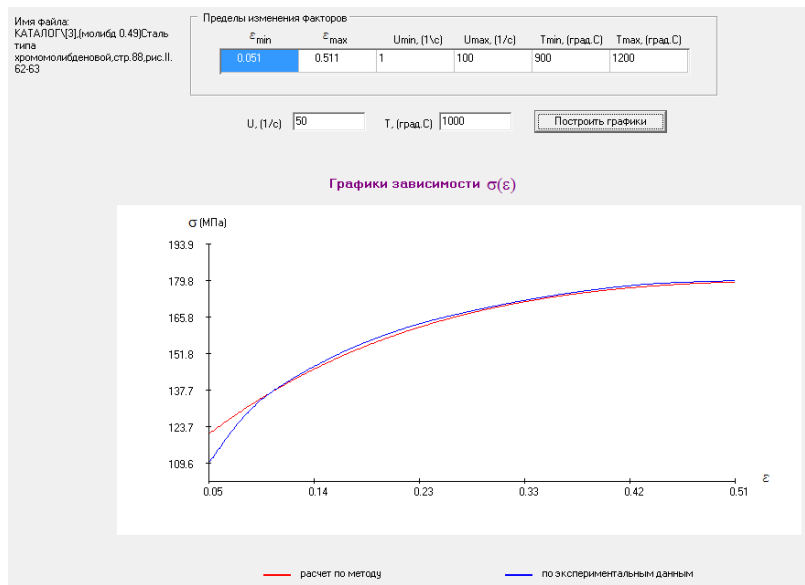
Определена средняя относительная погрешность по всему планируемому эксперименту для указанной стали, которая составила 4,3 %.

Проверка адекватности модели с помощью критерия Фишера также реализована в компьютерной программе, окно которой показано на рисунке 3. Указанная проверка дала удовлетворительный результат.

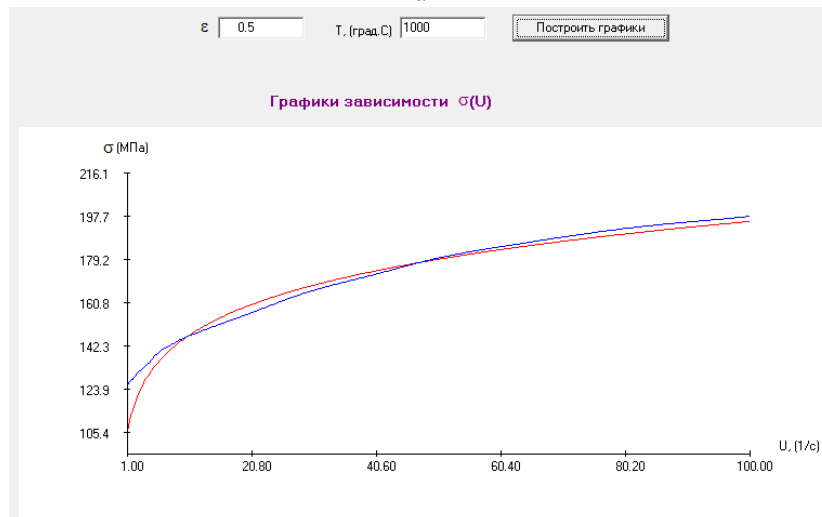
Предусмотрена функция компьютерной программы расчета и построения графических зависимостей напряжения течения металла ($\sigma_{\text{расч}}$ и $\sigma_{\text{экс}}$) от каждого из трёх факторов ε , U , T . Результаты, представленные на рисунке 4, позволяют сделать вывод о том, что кривые, построенные по расчетным данным (показаны красным цветом), адекватно описывают экспериментальные кривые течения (показаны синим цветом).

Полученные выше результаты позволяют использовать предложенную объединенную формулу расчета величины энергии активации деформации применительно к моделированию напряжения течения низколегированных и микрелегированных сталей при горячей деформации, в том числе для выполнения конечно-элементного моделирования этих процессов.

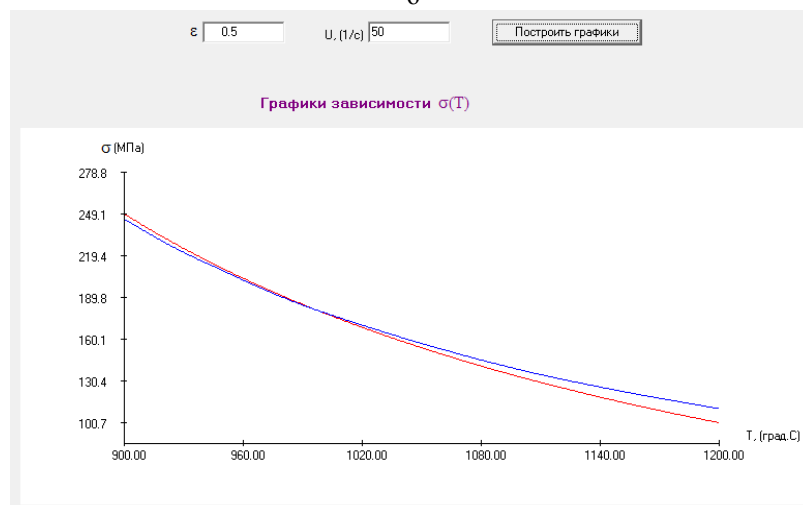
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



а



б



в

Рисунок 4 Графические зависимости напряжения течения металла σ от ϵ (а), U (б), T (в)

В таблицах 1–7 представлены, полученные на базе объединенной формулы (рис. 5) значения величины энергии активации деформации Q для ряда низколегированных и микролегированных сталей. Значения Q в таблицах 1–7 определены по указанным в них массовым долям элементов. С использованием этих значений Q напряжение течения σ рассчитывается по математической модели, представленной на рисунке 1, а.

При микролегировании введенный элемент имеет возможность образования соединений с другими элементами, находящимися в твердом растворе. Известно, что

при введении малых добавок, остаточное содержание которых не превышает 0,1 %, имеет место комплексное воздействие на сталь, при этом значительно повышаются её механические свойства в холодном состоянии [10].

$$Q = 308700 + 37100 \cdot \ln(C\%) + 10900 \cdot \ln(C\%)^2 + 27000 \cdot (Si\%) + 8100 \cdot (Mn\%) + 337100 \cdot (Cr\%) + 249900 \cdot (Ni\%) - 119000 \cdot (Cu\%) + 181000 \cdot (V\%) + 35651.28(Mo\%) + 93680.52(Ti\%)^{0.5919} + 70729.85(Nb\%)^{0.5669} - 288000 \cdot (P\%) - 855000 \cdot (S\%)$$

Рисунок 5 Фрагмент окна программы — объединенная формула расчета величины энергии активации деформации Q , полученная на базе моделей [5], [7]

Таблица 1

Значения величины энергии активации деформации для сталей по ГОСТ 1050–2013

Металлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей, ГОСТ 1050–2013									Q , кДж · моль ⁻¹
Марка стали	Массовая доля элементов, %								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	
08кп	0,12	0,50	0,03	0,035	0,030	0,10	0,30	0,25	229041,5
08пс	0,11	0,65	0,17	0,035	0,030	0,10	0,30	0,25	228911,5
10кп	0,14	0,50	0,07	0,035	0,030	0,15	0,30	0,25	256056,0
10пс	0,14	0,65	0,17	0,035	0,030	0,15	0,30	0,25	259971,0
20кп	0,24	0,50	0,07	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	321512,8
20пс	0,24	0,65	0,17	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	325427,8
20	0,24	0,65	0,37	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	330827,8
30	0,35	0,80	0,37	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	354265,5
40	0,45	0,80	0,37	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	369067,9
45	0,50	0,80	0,37	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	375273,6
50	0,55	0,80	0,37	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	380887,4
60	0,65	0,80	0,37	0,035	0,030	0,25	0,30	0,25	390726,9
15Г	0,19	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	336757,9
20Г	0,24	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	350517,8
25Г	0,30	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	363661,0
30Г	0,35	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	372740,5
35Г	0,40	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	380605,5
40Г	0,45	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	387542,9
45Г	0,50	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	393748,6
50Г	0,56	1,00	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	400423,7
10Г2	0,15	1,55	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	327289,6
30Г2	0,35	1,55	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	377195,5
35Г2	0,39	1,55	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	383569,3
40Г2	0,44	1,55	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	390674,2
45Г2	0,49	1,55	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	397013,7
50Г2	0,55	1,55	0,37	0,035	0,030	0,30	0,30	0,25	403817,4

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Таблица 2

Значения величины энергии активации деформации для сталей по ГОСТ 14959–2016

Металлопродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали, ГОСТ 14959–2016										$Q,$ $кДж \cdot моль^{-1}$
Марка стали	Массовая доля элементов, %									
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	V	Cu	
65	0,70	0,80	0,37	0,035	0,035	0,25	0,25		0,20	387106,8
85	0,90	0,80	0,37	0,035	0,035	0,25	0,25		0,20	401909,3
70Г	0,75	1,20	0,37	0,035	0,035	0,25	0,25		0,20	394410,5
80Г	0,85	1,20	0,37	0,035	0,035	0,25	0,25		0,20	401782,6
40С2А	0,42	0,80	1,65	0,035	0,035	0,15	0,20		0,20	345374,2
55С2А	0,58	0,90	1,65	0,035	0,035	0,30	0,25		0,20	428255,6
55С2ГФ	0,60	1,25	1,65	0,035	0,035	0,30	0,25	0,15	0,20	460237,4
60С2	0,65	0,90	1,65	0,035	0,035	0,30	0,25		0,20	434966,9
70С2ХА	0,75	0,60	1,65	0,035	0,035	0,30	0,25		0,20	440965,5

Таблица 3

Значения величины энергии активации деформации для сталей по ГОСТ 5520–2017

Прокат толстолистовой из нелегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением, ГОСТ 5520–2017											$Q,$ $кДж \cdot моль^{-1}$
Марка стали	Массовая доля элементов, %										
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	V	Cu	
15К	0,20	0,65	0,30	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	354066,2
16К	0,20	0,75	0,37	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	356766,2
18К	0,22	0,85	0,37	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	363190,0
20К	0,24	0,65	0,30	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	364804,9
22К	0,26	1,00	0,40	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	375054,5
16ГС	0,18	1,20	0,70	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	363115,5
10Г2С1	0,12	1,55	1,10	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	352868,6
17ГС	0,20	1,40	0,60	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	368241,2
17Г1С	0,20	1,55	0,60	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	369456,2
09Г2С	0,12	1,55	0,80	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	344768,6
10Г2С1	0,12	1,55	1,10	0,025	0,035	0,30	0,30	0,08	0,05	0,25	352868,6

Таблица 4

Значения величины энергии активации деформации для сталей по ГОСТ 4728–2010

Заготовки осевые для железнодорожного подвижного состава, ГОСТ 4728–2010										$Q,$ $кДж \cdot моль^{-1}$
Марка стали	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu		
ОС	0,50	0,90	0,35	0,035	0,035	0,30	0,30	0,25		390958,6

Таблица 5

Значения величины энергии активации деформации для сталей по ГОСТ 4543–2016

Металлопродукция из конструкционной легированной стали, ГОСТ 4543–2016										$Q,$ $кДж \cdot моль^{-1}$
Марка стали	Массовая доля элементов, %									
	C	Mn	Si	S	P	Cr	V	Ti	Mo	
40ГМФР	0,44	1,2	0,37	0,035	0,035	0,3	0,1	0,045	0,16	350178,1

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Таблица 6

Значения величины энергии активации деформации для сталей по ГОСТ 6713–91

Прокат низколегированный конструкционный для мостостроения, ГОСТ 6713–91									Q, кДж · моль ⁻¹
Марка стали	Массовая доля элементов, %								
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	
16Д	0,18	0,70	0,25	0,04	0,035	0,30	0,30	0,2	328138,4

Таблица 7

Значения величины энергии активации деформации для сталей по ГОСТ 5521–93

Прокат стальной для судостроения, ГОСТ 5521-93													Q, кДж · моль ⁻¹
Марка стали	Массовая доля элементов, %												
	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	V	Ti	Mo	Nb	
A	0,21	1,00	0,35	0,04	0,04	0,30	0,30	0,25	-	-	-	-	334957,8
A32	0,18	1,55	0,50	0,03	0,03	0,20	0,30	0,25	0,10	0,02	0,08	0,05	349609,3
A40	0,18	1,55	0,50	0,03	0,03	0,20	0,30	0,25	0,10			0,05	337509,6

Влияние микролегирования на напряжение течения металла при его горячей пластической деформации изучено недостаточно. С этой целью разработана новая компьютерная программа, представленная на рисунке 6. В верхней части окна задаются пределы изменения факторов ε , U , T . В правом верхнем углу окна указываются массовые доли химических элементов исследуемой стали.

Аналогично окну программы, показанному на рисунке 3, автоматически формируется план-матрица с кодовыми и натуральными значениями факторов. В средней части окна предусмотрены результаты расчётов напряжения течения металла σ по объединённой формуле (рис. 5). Параллельно предусмотрена дополнительная функция. Так, в правом верхнем углу окна напротив одного или нескольких химических элементов можно указать, что их содержание в стали равно нулю. Например, на рисунке 6 напротив микролегирующих элементов V , Mo , Ti , Nb указано, что их содержание в стали равно нулю. Результаты соответствующих расчётов напряжения течения металла σ_0 предусмотрены в последней колонке план-матрицы. Рядом с колонкой σ предусмотрена колонка Δ — относительное отклонение σ_0 по отношению к σ .

В окне программы (см. рис. 6) на примере стали А32, представленной в таблице 7, установлено, что наличие микролегирующих элементов V , Mo , Ti , Nb с указанными их массовыми долями приводит к увеличению (на 6,5 %) напряжения течения σ .

Также установлено, что увеличение массовой доли каждого из микролегирующих элементов V , Mo , Ti , Nb до 0,1 % приводит к увеличению напряжения течения σ до 10 %.

Предусмотрена также функция компьютерной программы построения графических зависимостей, представленных на рисунках 7–9.

Таким образом, на базе объединённой формулы (рис. 5) реализована возможность в автоматизированном режиме выполнять расчёты напряжения течения низколегированных и микролегированных сталей при горячей деформации, в том числе когда накопленная деформация ε достигает единицы и более.

Установлена возможность практического использования объединённой формулы расчёта величины энергии активации деформации для ряда низколегированных и микролегированных сталей, на базе которой выполняется определение напряжения их течения при горячей пластической деформации.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Автоматизированное моделирование напряжения течения низколегированных и микролегированных сталей с учетом процессов динамического преобразования структуры

Марка стали: A32 Прокат стальной для судостроения, ГОСТ 5521-93

Пределы изменения факторов

ϵ_{min}	ϵ_{max}	U min (1/c)	U max (1/c)	T min, (град.С)	T max, (град.С)
0.01	1.2	1	100	900	1200

Кодовые и натуральные значения факторов

Кодовые значения факторов	-1.2154	-1	0	+1	+1.2154
Натуральные значения факторов	ϵ	U (1/c)	T (град.С)		
	0.01	1	900		
	0.1154	9.773	926.584		
	0.6050	50.500	1050.000		
	1.0946	91.227	1173.416		
	1.2	100	1173.416		

Химический состав (%)
коррект. для σ_0

Cr (0 - 0.3)	0.2
Ni (0 - 0.3)	0.3
P (0 - 0.05)	0.035
S (0 - 0.05)	0.035
V (0 - 0.26)	0.1
Cu (0 - 0.28)	0.25
Mo	0.08
Ti	0.02
Nb	0.05

План-матрица эксперимента

	X1	X2	X3	ϵ	U (1/c)	T (град.С)	σ_0 (МПа)
1	-1	-1	-1	0.1154	9.773	926.584	140.490
2	+1	-1	-1	1.0946	9.773	926.584	169.076
3	-1	+1	-1	0.1154	91.227	926.584	192.486
4	+1	+1	-1	1.0946	91.227	926.584	236.882
5	-1	-1	+1	0.1154	9.773	1173.416	73.930
6	+1	-1	+1	1.0946	9.773	1173.416	71.285
7	-1	+1	+1	0.1154	91.227	1173.416	95.564
8	+1	+1	+1	1.0946	91.227	1173.416	103.625
9	-1.2154	0	0	0.01	50.500	1050.000	84.727
10	+1.2154	0	0	1.2	50.500	1050.000	136.397
11	0	-1.2154	0	0.6050	1	1050.000	84.518
12	0	+1.2154	0	0.6050	100	1050.000	168.188
13	0	0	-1.2154	0.6050	50.500	900	244.684
14	0	0	+1.2154	0.6050	50.500	1200	100.648
15	0	0	0	0.6050	50.500	1050.000	153.108

Результаты расчета

$$\sigma = \sigma_y + (\sigma_p - \sigma_y) \cdot \left(\frac{\epsilon - \epsilon_p}{\epsilon_x - \epsilon_p} + 1 \right) \cdot \exp\left(\frac{\epsilon_p - \epsilon}{\epsilon_x} \right)$$

σ (МПа)	Δ (%)
148.362	5.603
179.900	6.402
204.050	6.008
250.888	5.912
71.229	3.654
67.362	5.503
91.752	3.989
97.880	5.544
84.634	0.110
136.272	0.092
84.441	0.092
168.060	0.076
260.494	6.461
94.381	6.226

Δ ср (%) 3.717

Z / A	1	2	3
σ_y	1680.503	1680.503	15686.818
σ_p	156.223	156.223	217.916
ϵ_p	190.646	190.646	255.452
ϵ_x	0.593	0.593	0.753
ϵ_x	0.443	0.443	0.569

Q: 349609.270
A: 9576132056043.715

Q по формуле В.С. Слода и др.
 Q по формуле S.F. Медина и др.
 Q по объединенной формуле

[? Справка](#)

Рисунок 6 Окно усовершенствованной компьютерной программы по определению влияния массовой доли химических элементов на напряжение течения металла (расчёты выполнены на примере стали А32, таблица 7)

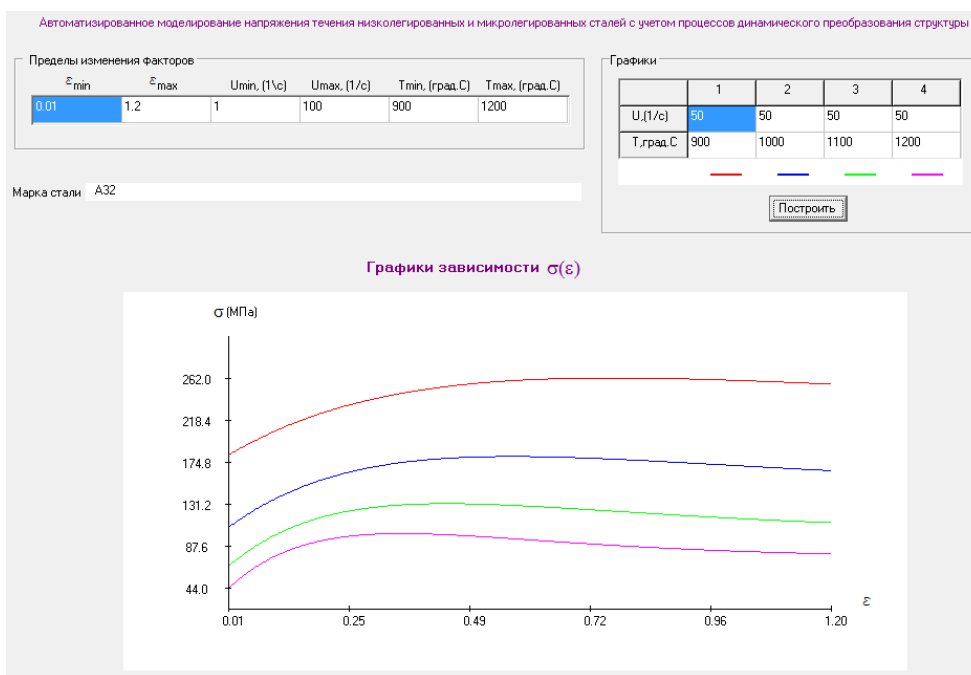


Рисунок 7 Графические зависимости напряжения течения стали А32 от накопленной деформации

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

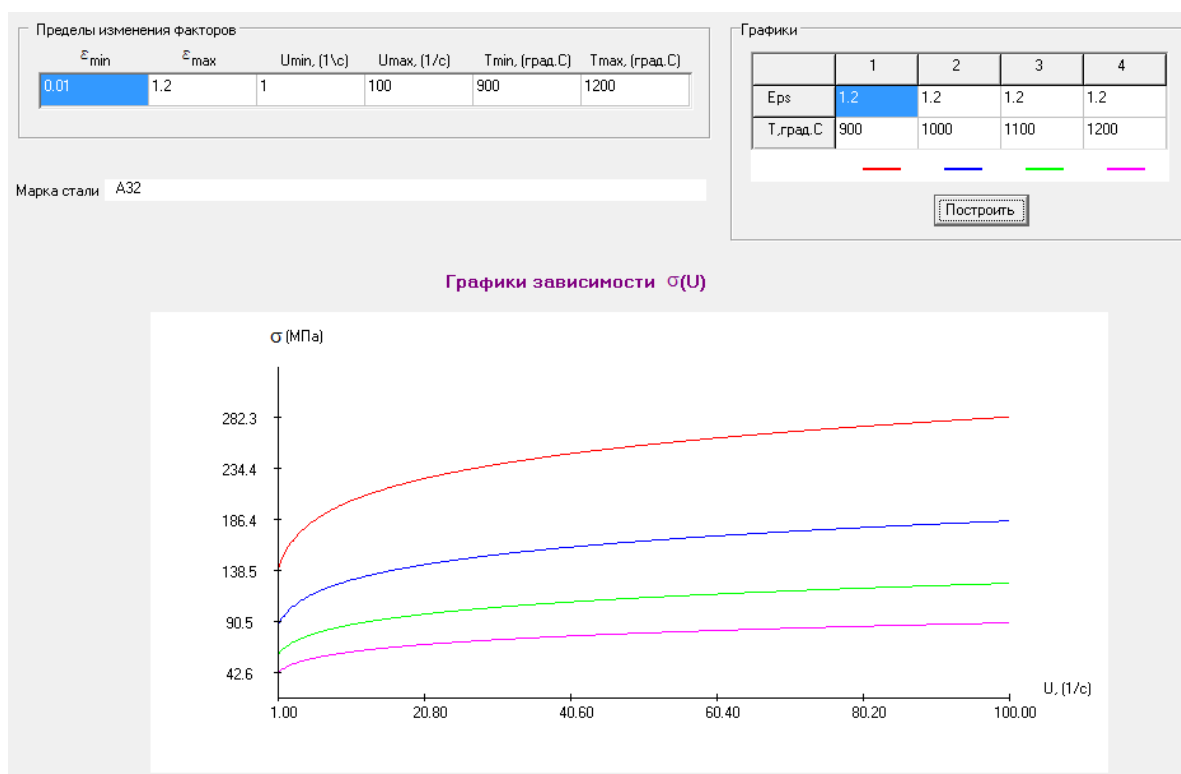


Рисунок 8 Графические зависимости напряжения течения стали А32 от скорости деформации

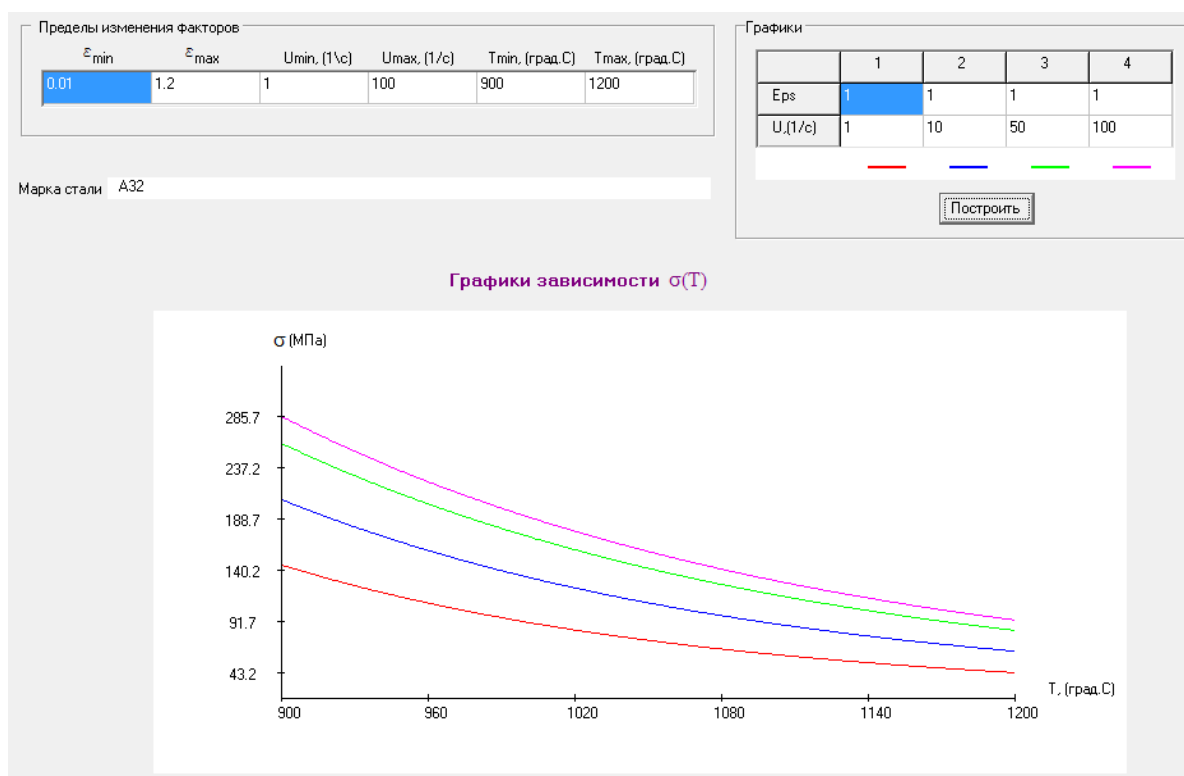


Рисунок 9 Графические зависимости напряжения течения стали А32 от температуры

Для более чем 50-ти марок сталей, в том числе низко- и микролегированных, определены значения величины энергии активации деформации. Разработанная специализированная компьютерная программа обеспечивает определение напряжения течения при заданных значениях накопленной деформации, скорости деформации и температуры металла.

Разработанная компьютерная программа подтвердила адекватность объединенной формулы, а также с использованием метода

планируемого эксперимента позволила установить, что увеличение массовой доли каждого из микролегирующих элементов V , Mo , Ti , Nb до 0,1 % приводит к увеличению напряжения течения σ до 10 %.

Перспективным направлением дальнейших исследования является разработка формул расчёта величины энергии активации деформации для легированных сталей и жаропрочных сплавов.

Библиографический список

1. Теория прокатки [Текст] : справочник / А. И. Целиков [и др.]. — М. : Металлургия, 1982. — 335 с.
2. Полухин, П. И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов [Текст] : справочник / П. И. Полухин, Г. Я. Гун, А. М. Галкин. — М. : Металлургия, 1976. — 488 с.
3. Николаев, В. А. Теория и практика процессов прокатки [Текст] : учеб. пособ. / В. А. Николаев. — Запорожье : ЗГИА, 2002. — 232 с.
4. Андреюк, Л. В. Аналитическая зависимость сопротивления деформации сталей и сплавов от их химического состава [Текст] / Л. В. Андреюк, Г. Г. Тюленев, Б. С. Прицкер // Сталь. — 1972. — № 6. — С. 522–523.
5. 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.
6. 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. — Том 19. — № 1. — С. 45–52.
7. 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.
8. 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.
9. Винарский, М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях [Текст] : учеб. пособ. / М. С. Винарский, М. В. Лурье. — К. : Техника, 1975. — 168 с.
10. Браун, В. С. Микролегирование стали [Текст] / В. С. Браун. — К. : Наук. думка, 1982. — 303 с.

© 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 11.06.2021.

**Doctor of Technical Sciences Yakovchenko A. V., PhD in Engineering Denishchenko P. N.,
Kravtsova S. I. (DonSTI, Alchevsk, LPR), Ivleva N. I. (DonNIICherMet, Donetsk, DPR, mond1991@mail.ru)**
**AUTOMATED SIMULATION OF THE FLOW STRESS OF LOW-ALLOY
AND MICRO-ALLOY STEELS UNDER HOT DEFORMATION**

The work is devoted to the development of a specialized software application for automated modeling of the flow stress of low-alloy and micro-alloy steels based on a combined formula for calculating the value of the strain activation energy, which will allow determining the flow stress at given values of cumulative deformation, strain rate and metal temperature. Utilize the method of the planned experiment, the influence of micro-alloying elements V, Mo, Ti, Nb was determined for the flow stress.

Key words: *automated modeling of the flow stress of low-alloy and micro-alloy steels, dynamic structure transformation, experimental flow curves, spline interpolation, theory of the planned experiment.*

УДК 621.785

д.т.н. Снитко С. А.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, snitko_sa@mail.ru),
Денищенко Н. П.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, nd76696@gmail.ru),
Пилипенко В. В.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР, dvenaxa94@mail.ru)

АДАПТАЦИЯ МЕТОДА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ОВАЛЬНОГО РАСКАТА В КРУГЛОМ КАЛИБРЕ

Метод конечно-элементного моделирования является эффективным инструментом совершенствования технологии прокатки сортовых профилей. Известно, что он требует адаптации применительно к каждому исследуемому процессу. Настоящая работа посвящена его адаптации применительно к процессу прокатки овального раската в круглом калибре. С использованием метода расчета напряжения течения металла, учитывающего накопленную деформацию, а также процессов динамического преобразования структуры металла при горячей прокатке разработана функция компьютерной программы по автоматизированному формированию компьютерной базы цифровой информации о напряжении течения металла, которая необходима для выполнения конечно-элементных расчётов в системе DEFORM-3D. Выполнено конечно-элементное моделирование процесса прокатки в клети 750 круга диаметром 150 мм из стали 45. Отклонение расчетного значения силы прокатки от экспериментального составило 9,3 %.

Ключевые слова: процесс прокатки овального раската в круглом калибре; система DEFORM-3D; конечно-элементное моделирование; напряжение течения металла; накопленная деформация; динамическое преобразование структуры металла при горячей прокатке; компьютерная программа.

На базе конечно-элементного моделирования выполнены исследования многих процессов обработки металлов давлением и получены решения широкого круга задач [1–6]. Совершенствование калибровок валков для прокатки круглых профилей по системе калибров овал — круг, которые являются одним из основных элементов рассматриваемой технологии, непосредственно связано с конечно-элементным моделированием напряженно-деформированного состояния металла в очаге.

Поставлена задача адаптации метода конечно-элементного моделирования применительно к процессу прокатки овального раската в круглом калибре. При этом актуальным вопросом является разработка компьютерной программы автоматизированного формирования компьютерной базы цифровой информации о напряжении течения металла, которая необходима для вы-

полнения конечно-элементных расчётов в системе DEFORM-3D. Также необходимо, используя результаты конечно-элементного моделирования процесса прокатки круга, выполнить сопоставление расчётной и экспериментальной информации по размерам полученного профиля и силе прокатки.

Реализация моделирования процесса прокатки выполнена в системе DEFORM-3D. Проверка адекватности результатов моделирования осуществлена на основе экспериментально установленных в работе [7] закономерностей изменения температурно-скоростных и силовых параметров процесса прокатки круглых профилей Ø150 мм из конструкционной стали 45 в клети 750. Калибровка валков представлена на рисунке 1.

Использовали автоматический режим генерации конечно-элементной сетки с четырёхузловыми тетраэдрами, имеющими

размеры в диапазоне 2,5–7,5 мм (рис. 2). Это позволило адекватно описать геометрию раската до и после деформирования, а также исключить пробуксовку валков, связанную с занижением фактической площади контакта металла с валками, которое имеет место при использовании конечных элементов большего размера. Установлено, что дальнейшее измельчение сетки нецелесообразно, поскольку приводит к су-

щественному повышению времени моделирования, не обеспечивая уточнение получаемых результатов расчета.

Моделирование выполняется для нестационарного теплового режима раската с учетом процессов теплообмена обрабатываемого металла с окружающей средой как при деформации, так и во время междеформационных пауз, а также с учетом теплового эффекта пластической деформации.

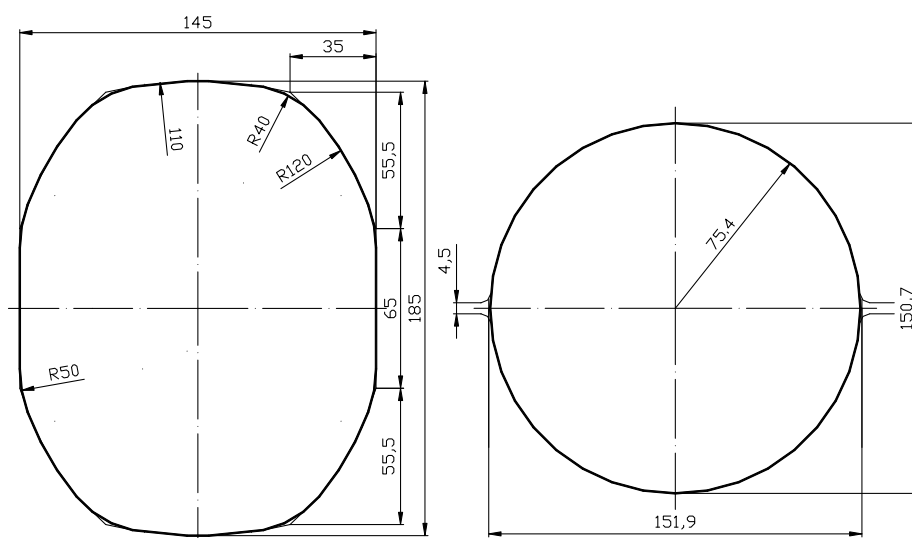


Рисунок 1 Калибровка для прокатки круга $\varnothing 150$ мм из овального раската

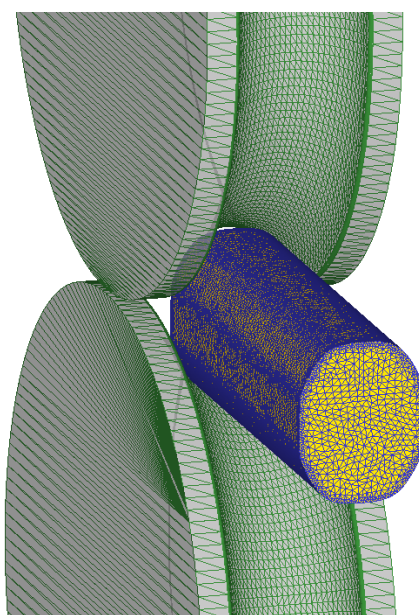


Рисунок 2 Визуализация сетки конечных элементов овального раската, задаваемого в круглый калибр

Моделирование процесса теплообмена выполнено на основе известной зависимости

$$q = A\alpha(t_s - t_c), \quad (1)$$

где q — тепловой поток; A — площадь поверхности, на которой происходит теплообмен; α — коэффициент теплообмена; t_s, t_c — температура поверхности металла и окружающей среды соответственно.

Температура окружающей среды и коэффициент конвекции были приняты постоянными и равными $20\text{ }^\circ\text{C}$ и $100\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$ соответственно. Коэффициент теплопередачи на контакте раската с валками равен $5000\text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$. Температура валков принята постоянной и равной $50\text{ }^\circ\text{C}$, температура выдачи заготовок из печи — $1240\text{ }^\circ\text{C}$.

Для заготовки использовали пластическую модель материала. В качестве материала использовали конструкционную сталь 45, для которой параметры, характеризующие теплофизические свойства, взяли из базы данных DEFORM-3D.

Для валков была выбрана модель недеформируемого материала. Расстояние между осями валков 750 мм . Скорость прокатки овального раската в круглом калибре принята постоянной — $3,5\text{ м/с}$.

Поведение материала раската в процессе решения описывается диаграммой «эквивалентное напряжение течения — эквива-

лентная деформация». При моделировании металл деформируется пластически, а сумма напряжений определяется в зависимости от пошаговой суммы деформаций по кривой течения. Соответствующие кривые течения в исследуемом диапазоне температур $850\text{--}1250\text{ }^\circ\text{C}$ в системе DEFORM-3D строятся на основе базы цифровой информации о напряжении течения металла, для получения которой в настоящей работе была предусмотрена новая функция компьютерной программы, созданной в [8]. Расчёт напряжения течения металла выполнялся с учётом накопленной деформации, а также процессов динамического преобразования структуры металла при горячей прокатке по методу [9].

Исходная информация по химическому составу стали 45 и диапазонам изменения факторов накопленной деформации ε , скорости деформации U и температуры T применительно к исследуемому процессу прокатки представлены в фрагменте окна программы [8] на рисунке 3.

Новое окно программы автоматизированного формирования компьютерной базы цифровой информации о напряжении течения металла показано на рисунке 4.

На рисунке 5 представлены кривые течения для стали 45 с учётом накопленной деформации ε в диапазоне $0,01\text{--}5,0$.

Марка стали сталь 45 по ГОСТ 1050-2013					
Пределы изменения факторов					
ε_{\min}	ε_{\max}	U_{\min} (1/с)	U_{\max} (1/с)	T_{\min} (град.С)	T_{\max} (град.С)
0.01	5	0.01	150	850	1250
OK					

C (0.05 - 1.1)	0.46
Si (0 - 1.65)	0.27
Mn (0.03 - 1.55)	0.65
Cr (0 - 0.3)	0.125
Ni (0 - 0.3)	0.125
P (0 - 0.05)	0.0175
S (0 - 0.05)	0.02
V (0 - 0.26)	
Cu (0 - 0.28)	0.125

Рисунок 3 Исходная информация по химическому составу стали 45 и диапазонам изменения факторов ε , U , T в окне компьютерной программы, разработанной в [8], для расчёта напряжения течения металла по методу [9]

Исходная информация

Степень деформации (ϵ)
 Количество значений: 18
 1.50
1.75
2.0
3.0
4.0
5.0

Скорость деформации ($U, 1/c$)
 Количество значений: 8
 0.50
1.0
10
50
100
150

Температура ($T, \text{град.С}$)
 Количество значений: 5
 850
950
1050
1150
1250

Продолжить...

$T (^{\circ}\text{C})$ 1050

Результаты расчета

		$U, (1/c)$							
		0.01	0.10	0.50	1.0	10	50	100	150
ϵ	0.25	49.673	68.200	83.412	90.643	118.488	142.711	154.784	162.396
	0.30	47.951	67.737	84.217	92.052	121.940	147.436	159.976	167.833
	0.40	43.895	64.586	82.628	91.333	124.640	152.635	166.183	174.596
	0.50	40.491	60.704	79.203	88.329	123.885	153.966	168.454	177.413
	0.75	36.074	53.495	70.711	79.632	116.473	149.267	165.298	175.235
	1.00	34.823	50.281	65.682	73.823	108.814	141.584	158.016	168.304
	1.25	34.522	49.104	63.323	70.820	103.469	134.988	151.132	161.343
	1.50	34.456	48.712	62.326	69.430	100.230	130.268	145.854	155.785

Рисунок 4 Окно компьютерной программы автоматизированного формирования компьютерной базы цифровой информации о напряжении течения металла на основе программы [8] и метода [9]

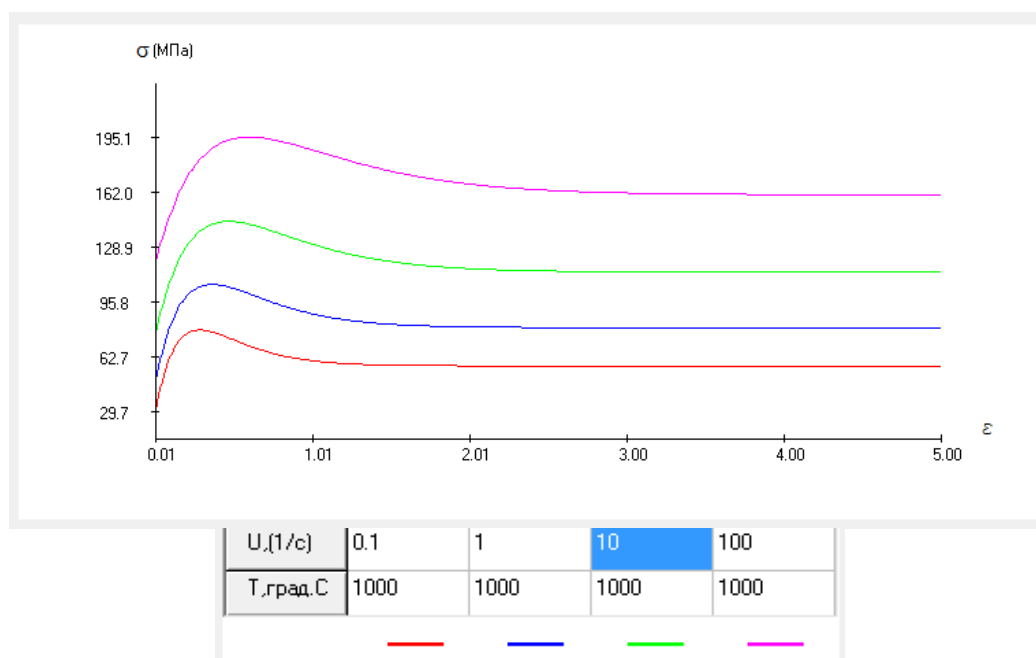


Рисунок 5 Графические зависимости напряжения течения стали 45 с учётом накопленной деформации ϵ в диапазоне 0,01–5,0

В качестве модели контактного трения принята сдвиговая модель

$$\tau_{mp} = mk, \quad (2)$$

где τ_{mp} — напряжение трения; m — фактор трения; k — напряжение течения металла заготовки на сдвиг.

В процессе решения учитывали условие непроницаемости на контакте металла с валками.

Моделирование выполняли путем решения объемной задачи. Длина овального рас-

ката перед прокаткой в круглом калибре равнялась 485 мм, что позволило учесть влияние внешних зон и обеспечить наличие установившейся стадии прокатки (рис. 6, а).

На рисунке 7 показано распределение по длине очага при прокатке овального раската в круглом калибре накопленной деформации ε (а) и скорости деформации U (б). Полученные результаты позволили уточнить диапазоны изменения факторов ε , U при разработке базы цифровой информации, показанной на рисунке 4.

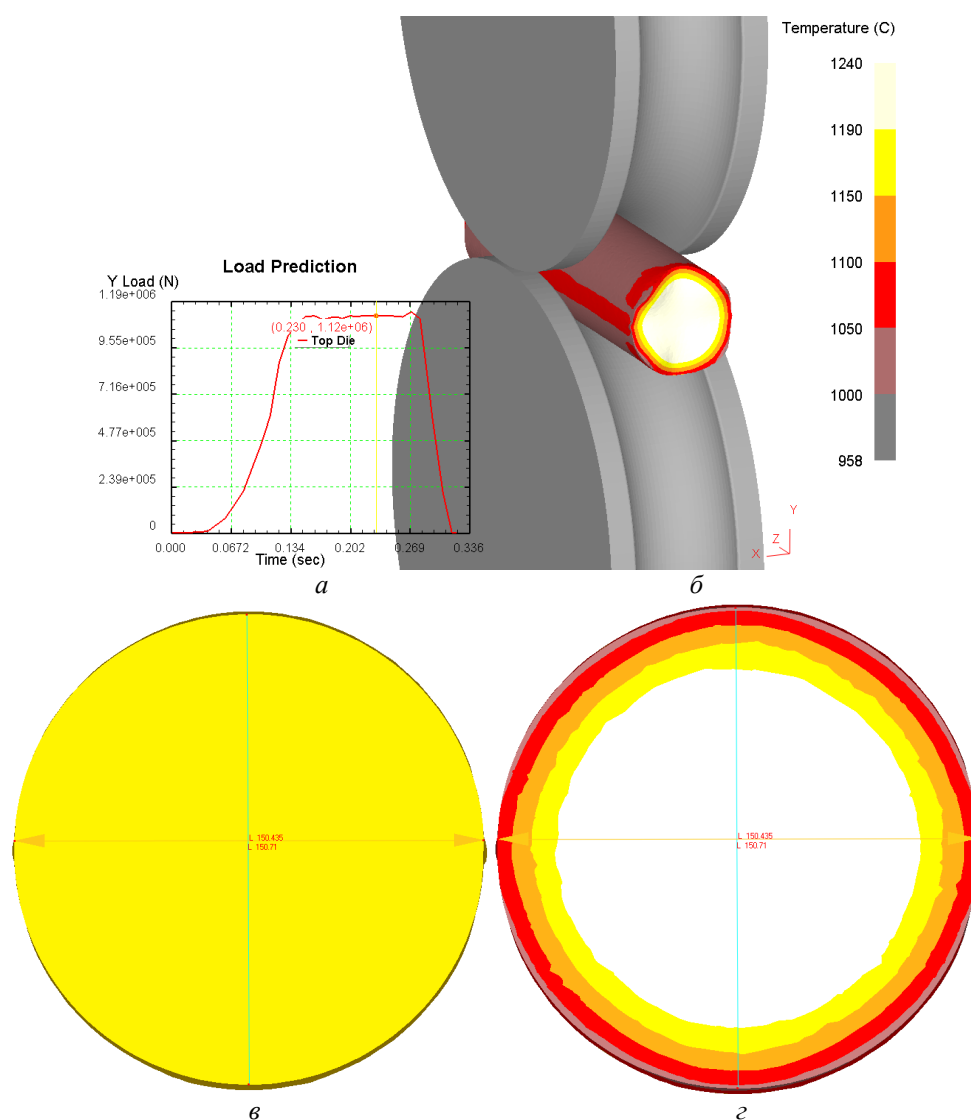


Рисунок 6 Результаты моделирования процесса прокатки овального раската в круглом калибре: а — график силы прокатки; б — очаг деформации; в, г — сечения прокатанного круга с указанными размерами и температурным полем

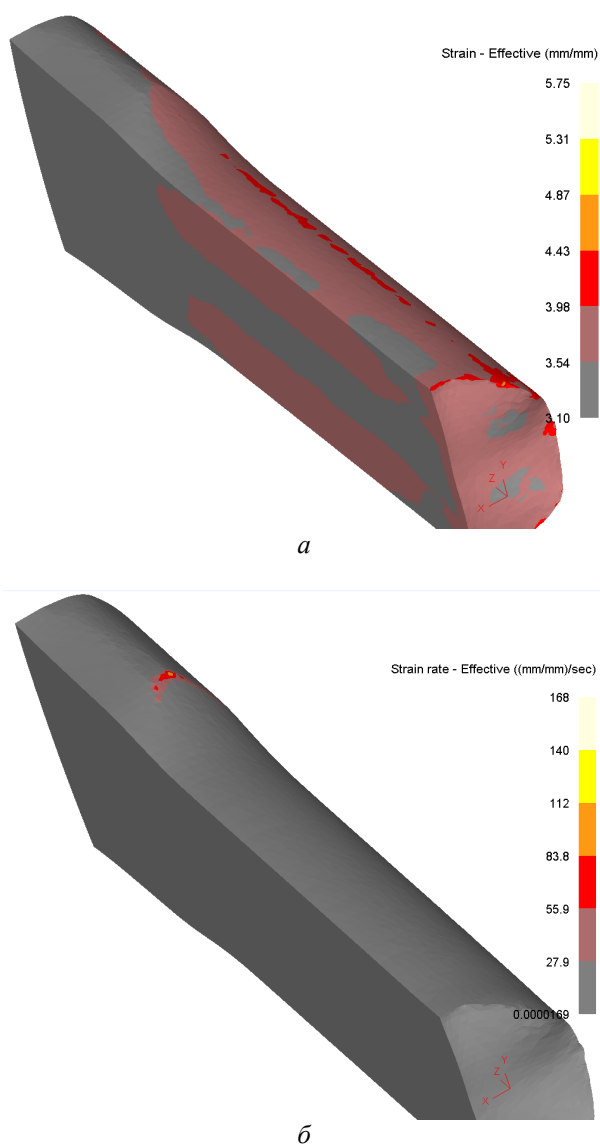


Рисунок 7 Распределение накопленной деформации ε (а) и скорости деформации U (б) по длине очага при прокатке круга $\varnothing 150$ мм

Анализ полученных результатов показал, что при прокатке в круглом калибре металл имел температуру в диапазоне 958–1240 °С. Температура металла на поверхности круга 1045 °С (рис. 6, з). Отклонение расчетного значения температуры металла на поверхности круга от экспериментального (1000 °С) [7] составило 4,5 %. Сила прокатки 1,12 МН (рис. 6, а). Отклонение расчетного значения силы прокатки от экспериментального (1,025 МН) [7] составило 9,3 %. Размеры круга получены в пределах поля допусков по ГОСТ 2590–2006.

Выполнена адаптация метода конечно-элементного моделирования применительно к процессу прокатки овального раската в круглом калибре. При этом определён режим генерации конечно-элементной сетки, выбраны модели процесса теплообмена, деформируемого материала и валков, напряжения течения металла.

Разработана функция компьютерной программы по автоматизированному формированию компьютерной базы цифровой информации о напряжении течения металла, которая необходима для выполнения

конечно-элементных расчётов в системе DEFORM-3D. При этом использовали метод расчета напряжения течения металла, учитывающий накопленную деформацию, а также процессы динамического преобразования структуры металла при горячей прокатке.

Выполнено конечно-элементное моделирование процесса прокатки в клети 750 круга диаметром 150 мм из стали 45. Отклонение расчетного значения силы прокатки от экспериментального состави-

ло 9,3 %. Отклонение расчетного значения температуры металла на поверхности круга от экспериментального составило 4,5 %. Размеры круга получены в пределах поля допусков по ГОСТ 2590–2006.

Перспективным направлением дальнейших исследований является совершенствование способов и калибровок для прокатки круглых профилей с использованием конечно-элементного моделирования напряженно-деформированного состояния металла в очаге.

Библиографический список

1. Ершов, С. В. О моделировании процесса прокатки с использованием метода конечных элементов [Текст] / С. В. Ершов // *Металлы*. — 2004. — № 4. — С. 36–40.
2. Dimensional analysis in steel rod rolling for different types of grooves [Text] / F. Capece Minutolo [et al.] // *Journal of Materials Engineering and Performance*. — 2005. — Vol. 14. — Iss. 3. — P. 373–377.
3. Mathematical model of neutral line on the contact zone in alloyed bar rolling by the round-oval-round pass sequence [Text] / Yo. Dong [et al.] // *International Journal of Mechanical Sciences*. — 2016. — Vol. 115–116. — P. 180–189.
4. Analytical model for predicting the surface profile of a work piece in round-to-2-R and square-to-2-R oval groove rolling [Text] / U. K. Yoo [et al.] // *Journal of Mechanical Science and Technology*. — 2010. — Vol. 24. — Iss. 11. — P. 2289–2295.
5. Dong, Yo. Novel analytic model for the projected contact zone based on the flow line element method in alloyed bar rolling [Text] / Yo. Dong, H. Zhu, J. Song // *Open Access Library Journal*. — 2017. — Vol. 4, e3247. — 16 p.
6. Зуев, И. А. Разработка способа повышения качества проката и износостойкости инструмента в условиях стана 150 ОАО «БМЗ — Управляющая компания холдинга „БМК“» [Текст] / И. А. Зуев // *Литье и металлургия*. — 2016. — Вып. 85. — № 4. — С. 56–61.
7. Производство трубной заготовки [Текст] / А. П. Чекмарёв [и др.]. — М. : Металлургия, 1970. — 304 с.
8. 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. — Том 19. — № 1. — С. 45–52.
9. 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.

© Снитко С. А.

© Денищенко Н. П.

© Пилипенко В. В.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМД ДонГТИ Денищенко П. Н.,
д.т.н., проф. каф. ОМД ДонНТУ Яковченко А. В.**

Статья поступила в редакцию 10.06.2021.

Doctor of Technical Sciences Snitko S. A. (DonNTU, Donetsk, DPR, snitko_sa@mail.ru),
Denishchenko N. P. (DonSTI, Alchevsk, LPR, nd76696@gmail.ru), **Pilipenko V. V.** (DonNTU,
Donetsk, DPR, dvenaxa94@mail.ru)

ADAPTATIVE METHOD OF FINITE-ELEMENT SIMULATION OF ROLLING THE OVAL ROLL IN ROUND PASS

The finite-element simulation method is an effective tool for improving the rolling technology of section bars. It is known to require adaptation for each process under research. The present work is devoted to its adaptation to the process of rolling the oval roll in a round pass. Utilize the method of metal flow stressing, considering the accumulated deformation, as well as the processes of dynamic transformation of metal structure during hot rolling, a function of software application for automated formation of computer database of digital information on the metal flow stress, which is necessary for performing finite-element calculations in the DEFORM-3D system, has been developed. Finite-element simulation of rolling process in 750 circle stand with diameter of 150 mm made of steel 45 was performed. The deviation of the calculated rolling force value from the experimental one was 9,3 %.

Key words: rolling the oval roll in round pass, DEFORM-3D system, finite-element simulation, metal flow stressing, cumulative deformation, dynamic conversion of metal structure at hot rolling, software application.

УДК 669.162.2

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

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

РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИФРАКЦИОННЫХ АГЛОМЕРАТА И КОКСА

На основании опытных данных определены коэффициенты формы кусков отдельных фракций агломерата и кокса. Установлена их зависимость от размера фракции. Разработана методика расчета удельной поверхности полифракционного материала по обобщенным характеристикам его ситового состава.

Ключевые слова: *агломерат, кокс, удельная поверхность кусков агломерата и кокса, обобщенные характеристики ситового состава, средний размер кусков, коэффициент вариации размера кусков, удельная поверхность полифракционного материала.*

Одной из важнейших обобщенных характеристик слоя сыпучих материалов является удельная поверхность, определяемая отношением поверхности к единице объема или массы, как единичного кусочка (частицы, гранулы, зерна), так и материала в целом.

Для элементов, имеющих правильную форму (шара, куба, цилиндра и т. д.), расчет удельной поверхности по их известным размерам не вызывает особых трудностей. Расчет же поверхности кусков полифракционного материала, когда они имеют неправильную форму, какими являются шихтовые материалы доменного производства, затруднен. При этом необходимо провести специальные исследования по определению коэффициента формы всех фракций материала, а затем по его ситовому составу рассчитать удельную поверхность материала в целом.

С целью упрощения расчета удельной поверхности шихтовых материалов необходимо установить такие зависимости, которые позволили бы проводить расчет без проведения дополнительных исследований, имея лишь данные о ситовом составе материала, что даст возможность проводить анализ процессов, протекающих на поверхности материалов, и совершенствовать их. К таким процессам относятся процессы, связанные с движением газа в слое материалов, теплообменом в нем,

протеканием физико-химических взаимодействий.

В данной работе поставлены следующие задачи: на основании опытных данных определить коэффициенты формы кусочков отдельных фракций агломерата и кокса, установить их зависимость от размера фракции; разработать методику расчета удельной поверхности полифракционных агломерата и кокса, используя данные об их ситовом составе.

Удельная поверхность материалов может определяться как на единицу их объема, так и на единицу массы. При этом используются физические или расчетные методы.

К физическим методам относятся фильтрационный и метод адсорбции меченых атомов или красителей. Эти методы широко используются для определения удельной поверхности горных пород (алевритов, глин, песков и др.), а также строительных и других материалов, состоящих из частиц малого размера [1]. Проведение анализа с использованием физических методов требует специального оборудования и затрат средств и времени, что не позволяет использовать их для определения удельной поверхности шихтовых материалов доменной плавки, таких как агломерат и кокс.

Так как удельная поверхность материалов зависит от степени их дисперсности, предложены расчетные методы, основанные на

данных о гранулометрическом (ситовом) составе полифракционного материала [2].

При расчете удельной поверхности полифракционных материалов по их ситовому составу используются выражения вида

$$S = \sum S_{y\partial} \cdot a = \int_0^{d_{\max}} S_{y\partial} \cdot f(d), \quad (1)$$

где S — поверхность единицы массы или объема материала, $\text{м}^2/\text{кг}$ или $\text{м}^2/\text{м}^3$; $S_{y\partial}$ — удельная поверхность единичного кусочка размером d , $\text{м}^2/\text{кг}$ или $\text{м}^2/\text{м}^3$; a — количество кусочков размером d ; $f(d)$ — функция распределения, определяющая количество кусочков одинакового размера в материале.

При расчетном определении удельной поверхности обычно предполагается, что форма частиц материала шарообразная и их размер характеризуется эквивалентным диаметром шара, объем которого равен объему частицы. Такой подход вполне оправдан, потому что только объект сферической формы может быть охарактеризован одним параметром — его диаметром.

Частицы же реальных дисперсных крупных материалов имеют разнообразную геометрическую форму, отличную от идеальных геометрических тел. Согласно принятому условному делению частицы неправильной формы могут быть округленными (окатанными), угловатыми (кубоподобные), удлинненными (продолговатые) и плоскими (пластинчатые). Оценка формы частицы при этом носит субъективный характер.

Учитывая, что точная оценка действительной формы частиц материала практически невозможна, а шар является идеальным геометрическим телом, которое имеет максимальный объем при минимальной поверхности, в результате подсчетов по известным методикам находится некоторая условная поверхность, меньшая, чем действительная.

Для приближения расчетной удельной поверхности тел неправильной формы к действительной введены понятия сферич-

ности и коэффициента формы. Под сферичностью, по определению Х. Уоделлома, понимается отношение поверхности сферы (того же объема, что и частица) к площади поверхности частицы.

Обратная сферичности характеристика является коэффициентом формы частицы. Численные значения этих характеристик могут быть определены после экспериментального определения эквивалентных диаметров шаров.

В зависимости от выбранного определяющего фактора эквивалентный диаметр определяется по различным формулам. Если определяющим фактором является объем частиц, их заменяют шарами такого же объема, а если поверхность — шарами такой же площади [3].

Эквивалентные диаметры шаров при этом определяются по формулам

$$d_V = \left(\frac{6 \cdot V}{\pi} \right)^{1/3}, \quad d_S = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (2)$$

где d_V — эквивалентный диаметр шара по объему; V — объем частицы; d_S — эквивалентный диаметр шара по поверхности; S — поверхность частицы.

Коэффициент формы Φ определяется по соотношению

$$\Phi = \frac{d_S^2}{d_V^2} = \frac{S_{y\partial} \cdot d_V}{6}. \quad (3)$$

Для шара коэффициент формы Φ равен единице, для остальных тел, в том числе и для кусочков шихтовых материалов доменной плавки, он больше единицы.

Для Платоновых тел (правильных многогранников) значения коэффициентов сферичности f и формы Φ и приведены в таблице 1.

Значения коэффициентов сферичности и формы для реальных частиц неправильной формы, в соответствии с приведенным выше их условным делением по форме, по данным авторов работы [4], приведены в таблице 2.

Таблица 1
Значения коэффициента формы и сферичности
Платоновых тел

Тело	f	Φ
Тетраэдр	0,67	1,49
Куб	0,81	1,24
Октаэдр	0,85	1,18
Додекаэдр	0,91	1,10
Икосаэдр	0,93	1,07

Таблица 2
Значения коэффициента формы и сферичности
реальных частиц

Форма частицы материала	f	Φ
Округленная	0,77	1,30
Угловатая	0,66	1,52
Продолговатая	0,58	1,72
Пластинчатая	0,43	2,33

Согласно формуле (3), для расчета коэффициента формы кусков необходимо определить два эквивалентных диаметра d_V и d_S . Эти диаметры могут быть определены по опытным данным, в ходе которых надлежит определить объем и поверхность опытного образца.

Для определения объема реальных кусочков агломерата и кокса был использован метод гидростатического взвешивания парафинированных кусков пробы, основанный на трех взвешиваниях образца. Образец взвешивался на воздухе (m_1), затем он покрывался тонким слоем парафина и взвешивался на воздухе (m_2) и в воде (m_3).

По результатам взвешиваний и известной плотности парафина ρ вычисляли объем кусочка V_K и объем парафина $V_{нар}$ по формулам

$$V_K = m_2 - m_3 - \frac{m_2 - m_1}{\rho_{нар}}, \quad (4)$$

$$V_{нар} = \frac{m_2 - m_1}{\rho_{нар}}, \text{ см}^3.$$

Методика расчета объема пористых тел по результатам трех взвешиваний исполь-

зуется при определении кажущейся плотности материалов [5].

После расчета объема парафина, помещенного на покрытие кусочка, замерялась толщина слоя парафина δ и определялась его поверхность по очевидному соотношению $S = V_{нар} / \delta$. Толщину слоя парафина с достаточной точностью можно измерить при помощи измерительного микроскопа или микрометром с иглами, жестко закрепленными на торцах пятки и микрометрического винта.

При замере толщины слоя парафина микроскопом слой парафина осторожно срезается перпендикулярно поверхности кусочка в нескольких местах. Затем он устанавливается на подставку так, чтобы плоскость среза была перпендикулярна оптической оси микроскопа. Далее замер производится согласно инструкции к микроскопу. По полученным таким образом для нескольких срезов значениям δ рассчитывается средняя толщина слоя парафина.

По описанной методике для кусочков агломерата и кокса различных классов крупности были определены объем, площадь поверхности и кажущаяся плотность. Количество кусочков каждой фракции составляло 20–25 шт. Кусочки одной фракции отбирались произвольно, однако при этом стремились, чтобы они существенно отличались по крупности.

Опробование методики и оценка погрешностей измерения проведены на окатышах, форма которых близка к шарообразной. Объем и площадь поверхности образцов определялись двумя способами. По первому способу определялся диаметр в десяти сечениях при помощи штангенциркуля. Затем по этим замерам находился средний размер окатыша и в предположении, что окатыш имеет форму шара, вычислялись его объем и площадь поверхности.

Затем объем и площадь поверхности тех же образцов определялась по вышеописанной методике.

Сравнение вычисленных при обработке полученных результатов дисперсий по

F-распределению (распределению Фишера) показало, что различие в их значениях носит случайный характер и они являются приближенными оценками одной и той же генеральной совокупности.

Сопоставление средних значений, рассчитанных по двум способам, с использованием t-распределения показало, что статистически значимая разница между результатами опытов отсутствует и выборки принадлежат одной и той же генеральной совокупности.

По полученным экспериментальным данным установлена погрешность расчета значений рассматриваемых величин.

Абсолютная погрешность составила: при расчете объема образцов — $\pm 0,032 \text{ см}^3$, их площади поверхности — $\pm 0,54 \text{ см}^2$ и удельной поверхности — $\pm 0,176 \text{ см}^2/\text{см}^3$.

При замере толщины парафина микрометром иглы подводятся к образцу и снимается показание с барабана. Затем трещоткой иглы углубляются в слой парафи-

на до упора и снимается новое показание с барабана. По разнице показаний определяется удвоенная толщина парафина. Такая методика дает хорошие результаты для образцов, не имеющих больших пор, — среднеквадратичная погрешность составляет около 0,28, а относительная — не более 3 % отн. Для кусочков агломерата и кокса погрешность может быть намного больше, так как иглы могут проникать в поры большого радиуса и замеренная толщина парафина в этом случае будет существенно превышать действительную. В связи с этим толщину парафина при определении поверхности кусочков агломерата и кокса целесообразней определять при помощи микроскопа.

Осреднённые результаты исследований приведены в таблице 3.

Как следует из приведенных данных, с увеличением крупности кусочков агломерата их удельная поверхность уменьшается, а коэффициент формы увеличивается.

Таблица 3

Результаты экспериментального определения объема, поверхности, удельной поверхности и коэффициентов формы кусочков агломерата и кокса различных фракций

Материал	Характеристика	Размер фракции, мм				
		5–10	10–15	15–25	25–40	40–60
Агломерат	$V, \text{ см}^3$	0,36	1,05	2,93	6,15	Не определяли
	$S, \text{ см}^2$	2,88	6,27	13,06	23,62	
	$d_v, \text{ см}$	0,88	1,26	1,77	2,27	
	$d_s, \text{ см}$	0,96	1,41	2,04	2,74	
	$S_{уд}, \frac{\text{см}^2}{\text{см}^3}$	8,02	6,00	4,46	3,84	
	Φ	1,18	1,26	1,32	1,46	
Кокс	$V, \text{ см}^3$	0,13	0,79	4,78	20,61	45,36
	$S, \text{ см}^2$	1,51	5,40	19,76	54,56	100,14
	$d_v, \text{ см}$	0,63	1,15	2,09	3,4	4,43
	$d_s, \text{ см}$	0,69	1,31	2,51	4,17	5,65
	$S_{уд}, \frac{\text{см}^2}{\text{см}^3}$	11,62	6,83	4,13	2,65	2,21
	Φ	1,22	1,31	1,44	1,5	1,63

Это свидетельствует о том, что чем крупнее кусочки агломерата, тем их форма в большей степени отличается от сферической.

Сравнение полученных данных с данными таблицы 2 показывает, что мелкие кусочки агломерата имеют форму, близкую к округленной, а по мере увеличения их размера — к угловатой.

Зависимость коэффициента формы от размера кусочков агломерата d (см) описывается уравнением

$$\Phi = 0,19 \cdot d + 1,0. \quad (5)$$

Коэффициент детерминации для этой зависимости равен 0,975.

После преобразования уравнения (3) и подстановки в него коэффициента формы кусочков Φ , определяемого по формуле (5), их удельная поверхность на единицу объема будет определяться зависимостью

$$S_{y\partial}^v = \frac{6}{d} + 1,14, \frac{\text{см}^2}{\text{см}^3}. \quad (6)$$

Кажущаяся плотность кусочков агломерата ρ , определенная во время экспериментов, находилась в диапазоне 3,47–3,63 г/см³ и в среднем равнялась 3,55 г/см³. Учитывая небольшой диапазон изменения кажущейся плотности в первом приближении, можно считать, что она одинакова для кусочков разного размера и равна среднему значению. Тогда удельная поверхность кусочков на единицу массы будет определяться зависимостью

$$S_{y\partial}^m = \frac{S_{y\partial}^v}{\rho} = \frac{1,69}{d} + 0,32, \frac{\text{см}^2}{\text{г}}. \quad (7)$$

Качественное изменение определенных экспериментально и вычисленных характеристик для кокса и агломерата идентично. При этом численные значения коэффициента формы кусочков кокса больше.

Согласно данным таблицы 2, кусочки кокса имеют угловатую форму.

Для кокса зависимость коэффициента формы от размера кусочков d имеет следующий вид

$$\Phi = 0,10 \cdot d + 1,20. \quad (8)$$

Коэффициент детерминации для этой зависимости равен 0,945.

Зависимости (6) и (7) при средней кажущейся плотности кусочков кокса, равной 1,14 г/см³, имеют следующий вид

$$S_{y\partial}^v = \frac{7,2}{d} + 0,62, \frac{\text{см}^2}{\text{см}^3}; \quad (9)$$

$$S_{y\partial}^m = \frac{S_{y\partial}^v}{\rho} = \frac{6,31}{d} + 0,54, \frac{\text{см}^2}{\text{см}^3}.$$

При всем многообразии сыпучих материалов и их гранулометрических составов в распределении отдельных кусочков по крупности наблюдается наличие единого закона. Достаточно полный обзор и анализ работ, в которых делались попытки описания ситового состава неоднородного сыпучего материала, дан в монографии [6]. Предложенные различные уравнения в какой-то мере удовлетворительно описывают эмпирические данные, но не вполне согласуются с теоретическими положениями, которые вскрывают сущность процесса образования частиц различной крупности.

Наиболее удачным и широко применяемым на практике является уравнение Розина и Раммлера.

Уравнение Розина и Раммлера по сути является функцией известного в математике распределения Вейбулла [7, 8], плотность распределения которого выражается уравнением

$$f(x) = \frac{m}{b} \cdot x^{m-1} \cdot \exp\left(-\frac{x^m}{b}\right). \quad (10)$$

Параметры m и b определяют вид кривой плотности распределения кусочков по крупности. Параметр m характеризует полидисперсность ситового состава, а параметр b масштабирует крупность материала.

Функция распределения Вейбулла, являющаяся интегральной к уравнению (10), имеет вид

$$F(d) = 1 - \exp\left(-\frac{d^m}{b}\right). \quad (11)$$

При описании ситового состава материала функция распределения Вейбулла показывает суммарный выход материала крупностью менее d .

Подставив в формулу (1) значения удельной поверхности $S_{y\partial}^m$ и плотности распределения $f(d)$ для кусочков агломерата и кокса в общем виде получим

$$S = \int_0^x \left(\frac{A}{x} + B \right) \cdot \frac{m}{b} \cdot x^{m-1} \cdot \exp\left(-\frac{x^m}{b}\right) \cdot d(x),$$

где x — переменное значение размера кусочка агломерата или кокса d , см.

После интегрирования и соответствующих преобразований для вычисления поверхности единицы массы материалов по их ситовому составу получим формулу (12)

$$S = \frac{A}{m-1} \left[F(d) - d^{m-1} \cdot \{1 - F(d)\} \right] + B \cdot F(d). \quad (12)$$

Полученная формула (12) по определению является интегральной. Ее преимущество заключается в следующем.

При задании конкретного значения d рассчитывается удельная поверхность кусочков меньше заданного размера.

Расчет поверхности при любых двух значениях d позволяет оценить поверхность кусочков материала диапазона, ограниченного этими значениями d .

Наконец, при приближении функции $F(d)$ к единице определяется удельная поверхность единицы массы материала в целом.

Как показано в работе [8], ситовый состав неоднородных по крупности материалов (полифракционных) однозначно характеризуется двумя величинами — средним размером частиц \bar{d} и коэффициентом вариации их размера ν .

Средневзвешенная крупность материала \bar{d} связана с параметром b соотношением

$$\bar{d}^m = b \cdot \Gamma\left(\frac{m+1}{m}\right) = b \cdot \chi. \quad (13)$$

Тогда функция распределения Вейбулла запишется в следующем виде

$$F(d) = 1 - \exp\left[-\chi \left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^m\right]. \quad (14)$$

Параметры m и χ взаимосвязаны: χ с помощью гамма-функции однозначно выражается через m

$$\chi = \left[\Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \right]^m \approx \frac{0,43}{m} + 0,57. \quad (15)$$

Коэффициент вариации размера частиц также однозначно выражается через m с помощью гамма-функции

$$\nu = \sqrt{\frac{\Gamma(1+2/m)}{[\Gamma(1+1/m)]^2} - 1} \approx \frac{0,95}{m} + 0,05. \quad (16)$$

Для нахождения обобщенных характеристик ситового состава и параметров функции (1) рекомендуется проводить регрессионный анализ после двойного логарифмирования уравнения (12). При этом коэффициент регрессии даст значение параметра m , а свободный член уравнения регрессии c позволит определить средневзвешенный размер частиц по формуле

$$d = \exp\frac{\ln \chi - c}{m}. \quad (17)$$

Совокупность формул (14)–(17) позволяет по ситовому составу материалов определить удельную поверхность любой его массы по уравнению (12).

Набор этих же формул позволяет априори определить удельную поверхность массы материала по известным (заданным) обобщенным характеристикам ситового состава материала.

На основании опытных данных определения удельной поверхности и коэффициентов формы для кусочков агломерата и кокса различных фракций установлено, что с увеличением крупности кусочков агломерата и кокса их удельная поверхность уменьшается, а коэффициент формы уве-

личивается. Чем крупнее кусочки агломерата и кокса, тем их форма в большей степени отличается от сферической. Мелкие кусочки агломерата имеют форму, близкую к округленной, а по мере увеличения их размера — к угловатой. Кусочки кокса имеют угловатую форму.

Приведенная методика позволяет рассчитывать поверхность массы материала

по обобщенным характеристикам ситового состава агломерата и кокса.

В ходе дальнейших исследований целесообразно провести аналогичные исследования по определению поверхности остальных шихтовых материалов доменной плавки.

Необходимо также получить эмпирические зависимости, позволяющие упростить расчет.

Библиографический список

1. Носенко, А. А. Методы и устройства для измерения удельной поверхности дисперсных материалов [Текст] / А. А. Носенко, С. И. Половнева // Изв. ВУЗов. Прикладная химия и биотехнология. — 2017. — Т. 7. — № 2. — С. 114–121.
2. Чушиев, В. Б. Математический метод определения зерновых характеристик сыпучих материалов [Текст] / В. Б. Чушиев // Изв. Самарского науч. центра РАН. — 2006. — Т. 8. — №4. — С. 1152–1152.
3. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным зернистым слоем [Текст] / М. Э. Аэров, О. М. Тодес. — Л.: Химия. — 1968. — 512 с.
4. Расчеты аппаратов кипящего слоя [Текст]: справочник / под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. — Л.: Химия. — 1986. — 352 с.
5. ГОСТ 2160–2015. Топливо твердое минеральное. Определение действительной и кажущейся плотности [Текст]. — Введ. 2017–04–01. — М.: Стандартинформ, 2016. — 12 с.
6. Андреев, С. Е. Закономерности измельчения и исчисление характеристик гранулометрического состава [Текст] / С. Е. Андреев, В. В. Товаров, В. А. Перов. — М.: Металлургиздат. — 1959. — 437 с.
7. Кнотек, М. Анализ металлургических процессов методами математической статистики [Текст] / М. Кнотек, Р. Войта, И. Шефц; пер. с чеш. — М.: Металлургия. — 1968. — 212 с.
8. Русаков, П. Г. Обобщенные характеристики ситового состава неоднородного сыпучего материала [Текст] / П. Г. Русаков, И. Ф. Русанов // Заводская лаборатория. — 1990. — № 2. — С. 68–69.

© Русанова Н. И.

© Русанов И. Ф.

Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиМ ДонГТИ Денищенко П. Н., зам. нач. ЦЛК Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» Тарасовым В. Н.

Статья поступила в редакцию 15.06.2021.

PhD in Physics and Mathematics Rusanova N. I., PhD in Engineering Rusanov I. F. (DonSTI, Alchevsk, LPR, rusanova-2011@inbox.ru)

CALCULATION OF THE SURFACE OF POLYFRACTIVE SINTER AND COKE

On the basis of experimental data, the coefficients of slump shape of individual fractions of sinter and coke were determined. Their dependence on the size of fraction is determined. A method for calculating the specific surface area of a polyfractive material based on the generalized characteristics of its sieve composition is developed.

Key words: sinter, coke, specific surface area of sinter and coke pieces, generalized characteristics of sieve composition, average size of pieces, coefficient of variation of the size of pieces, specific surface of polyfractive material.

УДК 669.18

к.т.н. Куберский С. В.,
Романчук Я. А.,
к.т.н. Саратовский Р. Н.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, waruk007@gmail.com)

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ МЕТАЛЛА В СТАЛРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ

В работе приведены результаты физического моделирования процесса перемешивания металла в сталеразливочном ковше при его продувке аргоном, подаваемым через два донных продувочных устройства в виде стационарной и пульсирующей струи. Проанализирована динамика и определена площадь раскрытия зеркала воды, а также установлено влияние интенсивности продувки и частоты пульсаций на время усреднения модельной жидкости при стационарной и пульсирующей подаче газа. Показаны преимущества пульсационного перемешивания в сравнении с барботажным.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, сталь, шлак, физическая модель, продувка, инертный газ, барботажное перемешивание, пульсационное перемешивание, стационарная струя, пульсирующая струя, интенсивность, расход, зеркало, усреднение.

В настоящее время достаточно распространенным способом гомогенизации металлического расплава в процессе его внепечной обработки является наиболее простое в реализации барботажное перемешивание посредством вдувания инертных газов (свободный газовый поток). Основными недостатками его являются загрязнение металла шлаковыми и оксидными включениями, потери металла при выбросах, ограниченная интенсивность ввода газа и низкая интенсивность перемешивания металла с вводимыми реагентами (кроме порошкообразных) [1].

Динамика усреднения металла в процессе его продувки аргоном представляется крайне важным технологическим параметром, определяющим выбор критериев оптимизации параметров продувки для различных стадий внепечной обработки. Достаточно очевидно, что интенсивность перемешивания зависит от расхода вдуваемого аргона, а также от количества продувочных узлов. Вместе с тем повышение расхода вдуваемого газа приводит к раскрытию зеркала металла, интенсификации его перемешивания со шлаком и, как следствие, к увеличению интенсивности процессов вторичного окисления [2]. Поэтому

актуальным направлением исследований является изучение новых, альтернативных методов продувки металла инертным газом во время его внепечной обработки.

Одним из относительно новых для металлургии методов продувки может быть продувка пульсирующей затопленной струей (пульсационное перемешивание) [1]. Однако механизм и особенности этого процесса изучены недостаточно и требуется проведение комплекса фундаментальных и прикладных исследований для создания новой эффективной технологии внепечной обработки расплавов посредством инжентирования в них инертных газов.

Наиболее распространенным и эффективным методом исследования процессов, протекающих в объеме жидкого металлического расплава при его продувке инертным газом, является физическое моделирование. Такой подход позволяет визуализировать потоки, образующиеся при гомогенизации расплава, и поведение неметаллических включений.

Поэтому основной задачей представленных исследований было физическое моделирование и сравнительный анализ процессов и параметров, имеющих место

при продувке жидкости газом, подаваемым через донные пробки в виде стационарной и пульсирующей струи.

Процесс моделирования осуществлялся на холодной физической модели сталеразливочного ковша, выполненной по геометрическому подобию в масштабе 1:8 к промышленному объекту емкостью 300 т. Положение продувочных узлов в днище физической модели по радиусу и удалённости от вертикальной оси ковша выбрано в соответствии с их расположением на промышленном объекте.

В качестве жидкостей, моделирующих сталь и шлак, применяли соответственно воду и машинное масло, а в качестве продувочного газа — сжатый воздух. Подача воздуха к продувочным пробкам осуществлялась от компрессора через газовый счётчик и регулировалась игольчатым вентилем.

Для создания пульсирующей струи в месте расположения донных продувочных узлов были установлены два автомобильных электромагнитных клапана фирмы Atiker. Электромагнитный клапан предназначен для работы в качестве запорного двухпозиционного устройства управления потоком газа. При подаче напряжения 12 В на катушку (соленоид) клапан открывается. Управление электромагнитными клапанами осуществлялось через звуковую карту Lexicon Alpha компьютера. При помощи программы Cubase создавалась аудиозапись (проект) с определенной частотой подачи стереосигнала и передавалась в блок управления электромагнитными клапанами. Стереосигнал разделяется на 2 канала (левый и правый). При подаче звукового сигнала на левый или правый звуковой канал через блок управления открывается первый или второй клапан соответственно. Время, на протяжении которого клапан остаётся открытым, зависит от длительности поступающего не него сигнала, что позволяет подавать газ в виде импульсов различной величины.

Для рациональной организации процесса исследований использована методика

планированного эксперимента с двумя звездными точками, позволяющая разработать оптимальную схему проведения экспериментов, обеспечивающую получение необходимой информации при минимальных временных и материальных затратах. На основании данной методики для исследования параметров, влияющих на время гомогенизации жидкости при продувке пульсирующей струей, была составлена матрица планированного эксперимента. Первым влияющим фактором являлся расход воздуха, а вторым — частота срабатывания электромагнитного клапана.

Использованная на модели система подачи воздуха обеспечивала максимальную частоту в диапазоне 1–360 пульсаций в минуту. Максимальные и минимальные значения частоты пульсаций, определённые с использованием матрицы планирования эксперимента, составили 22 и 348 пульсаций в минуту соответственно.

При выборе расхода газа для моделирования процессов продувки учитывался аналогичный параметр, характерный для действующих промышленных объектов. В частности, при продувке стали аргоном в ковшах емкостью 300 т через две донные пробки расход последнего находится в пределах 0,33–3,67 л/т·мин. Расчёты, проведенные по методике, представленной в работе [3], показали, что с использованием критериев гидродинамического подобия для разработанной физической модели сталеразливочного ковша расход модельного газа должен составлять 2–28 л/мин. Максимальные и минимальные значения расхода воздуха для пульсирующей продувки, определённые с использованием матрицы планирования эксперимента, составили 27,73 л/мин и 2,27 л/мин соответственно.

При проведении исследований параметров, характерных барботажной гомогенизации, с использованием стационарной газовой струи расход воздуха устанавливался с шагом 2 л/мин в диапазоне от 2 л/мин до 28 л/мин.

На первом этапе исследований изучалось раскрытие зеркала воды при стационарном и пульсирующем способе подачи газа.

В ходе продувки в зависимости от её интенсивности поверхность воды может оголяться с образованием «буруна», что приводит к непосредственному контакту жидкости с атмосферой. Размер «буруна» зависит от расхода вдуваемого газа, а также способа его подачи. Процесс формирования «буруна» фиксировался фото-видеокамерой, расположенной сверху, над моделью с помощью штатива. Для определения размеров «буруна» использовался графический метод исследования с помощью системы трехмерного проектирования «Компас-3D». Полученное изображение загружалось в систему трехмерного проектирования. Области изображений, соответствующие машинному маслу и «буруну», обрабатывались встроенным инструментом программы, в результате чего образовывались два замкнутых графических контура, соответствующие данным областям. Для каждого из полученных контуров рассчитывалась занимаемая ими площадь, что позволяло оценить степень раскрытия зеркала воды при стационарной и пульсирующей подаче продувочного газа.

Вторым этапом исследований являлось изучение времени усреднения модельной жидкости по объёму физической модели сталеразливочного ковша. В качестве критерия эффективности перемешивания жидкости в ковше было принято время её гомогенизации по объёму модели. Время гомогенизации определялось как период, требуемый для достижения соответствующей высокой однородности системы, необходимой с технологической точки зрения. Следовательно, время гомогенизации является условной величиной, зависящей от способа определения степени перемешивания, ее численного значения и масштаба наблюдений. Вместе с тем время гомогенизации позволяет произвести сравнительную оценку эффективности ус-

реднения жидкости в ковше при различных режимах продувки.

Одним из эффективных методов определения степени гомогенизации модельной жидкости является электрохимический метод с введением в её объём (воду) определенного количества раствора поваренной соли и одновременным измерением напряжения в различных точках объема модели с помощью специальных датчиков [4].

При осуществлении физического моделирования использовалось восемь датчиков (рис. 1), каждый из которых представлял собой два равноудалённых медных контакта, между которыми пропускался электрический ток.

В качестве электролита, вводимого в воду, применялся насыщенный раствор поваренной соли. Датчики располагались вблизи стенок (4 датчика) и днища ковша (2 датчика), а также в центре физической модели (2 датчика).

Значения, фиксируемые каждым из датчиков, позволяют судить о степени гомогенизации раствора в объеме ковша после введения электролита. Считывающие датчики подключались через блок согласования каналов к аналоговому цифровому преобразователю (АЦП) E-154. В рабочем окне программы LGraph2 отображались линии напряжения на каждом из датчиков. До введения электролита показания на всех датчиках были равны нулю. При достижении электролитом датчика на экране монитора наблюдалось повышение напряжения на нем (до 3–5 В). В процессе продувки, с целью гомогенизации раствора показания напряжения на датчиках постепенно изменяли свои значения. По истечении определенного времени напряжение на всех датчиках стабилизировалось. Стабильное значение напряжения, фиксируемого датчиками (изменение показаний в диапазоне $\pm 0,1-0,2$ В), свидетельствовало об усреднении химического состава жидкости, и процесс продувки прекращали [5].

В таблице 1 представлены результаты исследования массообмена при стационарной и пульсирующей подаче воздуха.

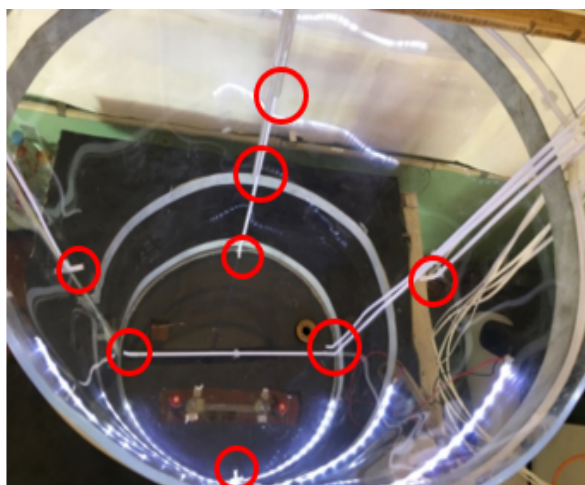


Рисунок 1 Расположение датчиков в физической модели

В ходе исследований, выполненных на холодной физической модели при стационарном режиме подачи воздуха, отмечено, что вдувание инертного газа в металл оказывало существенное влияние на поведе-

ние шлакового слоя. Раскрытие зеркала воды и вовлечение масляной фазы в объем физической модели при стационарной продувке свидетельствуют о прямой взаимосвязи с динамикой вторичного окисления стали и образования неметаллических включений в производственных условиях.

С увеличением расхода воздуха более 10 л/мин наблюдался эффект, при котором одна часть масла захватывалась потоком и втягивалась в объем воды, а другая сдвигалась к стенке модели, оставаясь на поверхности воды. Выходящий из продувочных узлов газожидкостный поток, достигая границы раздела «вода — масло», дробил масляный покров на разные (преимущественно мелкие) по размеру сферические образования. Полученные образования затягивались внутренними потоками вглубь воды, распространялись практически по всему объему, но большая их часть циркулировала преимущественно в средней части модели.

Таблица 1

Результаты исследований, полученные при перемешивании жидкости стационарной и пульсирующей струей

Режим продувки	Расход воздуха, л/мин	Частота пульсаций, ед./мин	Степень раскрытия зеркала воды, %			Время усреднения, с
			за время подачи воздуха	за время паузы в подаче воздуха	средняя	
Стационарный	2,27	–	≤10	–	≤10	135
	6	–	15,72	–	15,72	130
	15	–	40,81	–	40,81	61
	24	–	64,30	–	64,30	20,75
	27,73	–	71,5	–	71,5	15,42
Пульсирующий	2,27	185	17,14	15,41	16,27	112,5
	6	70	32,20	22,60	27,4	82,3
	6	300	27,25	27,03	27,14	74,1
	15	22	67,60	2,00	34,8	54
	15	348	46,12	45,10	45,6	41,4
	15	185	41,22	38,90	40	48
	24	70	51,66	40,90	46,28	41,4
	24	300	54,40	50,53	52,46	32,1
	27,73	185	56,10	53,45	54,77	25,4

При расходе газа 27,73 л/мин наблюдалось интенсивное перемешивание жидкости по всему объёму модели. В этих условиях большая часть масла вовлекалась циркуляционными потоками в перемешивание, оголяя значительную часть зеркала воды. Вследствие взаимодействия масла с восходящими и нисходящими циркуляционными потоками происходил отрыв его капель от моделируемого шлакового покрова и затягивание их в объем воды. Такая картина характерна для поведения шлака и стали при продувке стационарной струей в производственных условиях и объясняет механизм загрязнения металла шлаковыми неметаллическими включениями. Слой масла, который не участвовал в перемешивании, сдвигался к стенке модели, противоположной от места выхода на поверхность пузырьков воздуха («буруна»). Отмечено, что при продувке через два продувочных узла вовлеченное в объем воды масло циркулировало преимущественно в донной части модели, ближе к противоположной от продувочных узлов стенке.

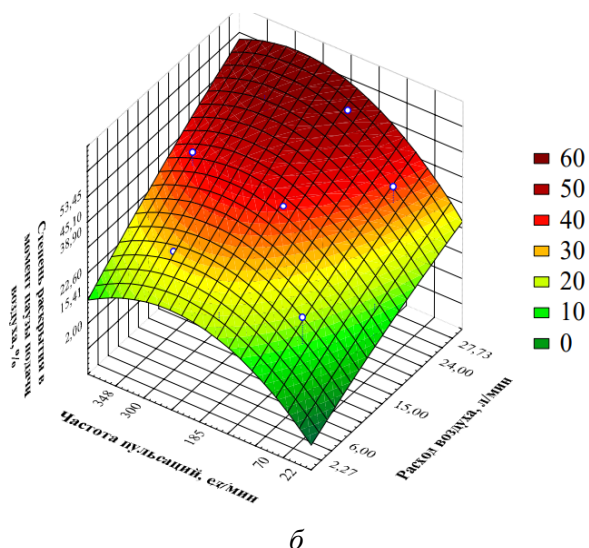
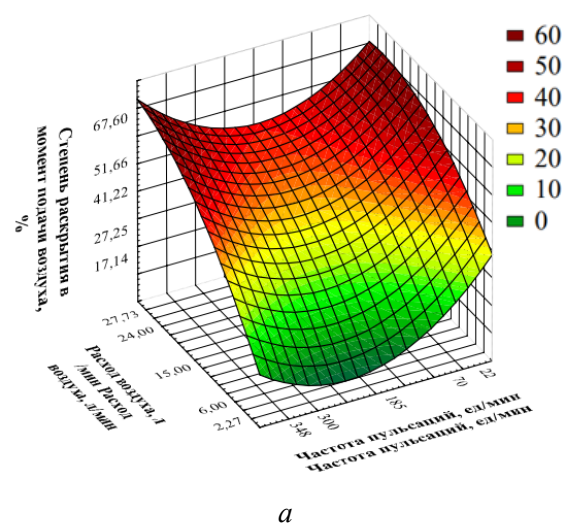
На следующем этапе работы изучалось поведение воды и масла при пульсационном режиме перемешивания.

Обработка экспериментальных данных с использованием программы Statistica позволила определить влияние расхода воздуха и частоты его пульсаций на степень раскрытия зеркала жидкости при её продувке. Полученные зависимости представлены на рисунках 2, а и 2, б и описываются квадратичными уравнениями регрессии (1) и (2).

При барботажном перемешивании образующаяся струя представляет собой непрерывный газожидкостный поток, проходящий через весь объем жидкости по высоте модели от продувочного узла до находящегося на поверхности воды масла. При подаче продувочного газа пульсирующей струей процесс продувки можно разделить на циклы, состоящие из двух основных периодов. Первый период — это время, при котором электромагнитный клапан открыт и в объем жидкости вдува-

ется газ. Второй период имеет место при закрытии электромагнитного клапана, и его длительность определяется временем прекращения подачи продувочного газа.

Наличие таких различных по характеру перемешивания временных отрезков накладывает свое влияние и на площадь раскрытия зеркала металла, величина которой для первого периода описывается уравнением (1), а для второго — соответственно (2).



а — первый период цикла;
б — второй период цикла

Рисунок 2 Зависимость степени раскрытия зеркала воды от расхода воздуха и частоты пульсаций

$$S_1 = 38,4107 + 2,4099x - 0,2444y - 0,0447x^2 + 0,0019xy - 0,0005y^2, \quad (1)$$

$$S_2 = 10,2853 + 1,3496x + 0,2335y - 0,0085x^2 + 0,0013xy + 0,0005y^2, \quad (2)$$

где S_1 и S_2 — площадь раскрытия зеркала за первый и второй период цикла пульсирующей продувки, %; x — расход воздуха при продувке, л/мин; y — частота пульсаций воздуха, ед./мин.

При пульсирующей подаче газа вследствие столкновения газового потока с более плотной жидкостной средой имело место грибообразное его раскрытие в объеме жидкости с последующим дроблением на элементарные объемы различной конфигурации и величины. Кроме того, в нижней части модели, вблизи расположения продувочных узлов, образовывались дополнительные вихревые потоки.

Также отмечено, что при определенных режимах пульсирующей подачи газа в результате раскрытия вдуваемого потока в средней и нижней части объема жидкости образуются потоки, способствующие выносу неметаллических включений к поверхности раздела «вода — масло».

На основании данных таблицы 1 были построены зависимости площади раскры-

тия зеркала воды от расхода воздуха при стационарном и пульсирующем способе продувки (рис. 3).

Сравнительный анализ результатов экспериментов, полученных при расходе воздуха в диапазоне 18–28 л/мин для случая стационарной и пульсирующей подачи газа, показал, что при высокой частоте пульсаций (свыше 185 пульсаций в минуту) пульсационное перемешивание обеспечивает меньшую площадь раскрытия зеркала воды в сравнении с барботажным.

Также отмечено, что при использовании пульсирующей струи с расходом воздуха 15 л/мин и низкой частотой пульсаций (22 ед./мин) за время второго периода цикла продувки зеркало воды успевает вновь покрыться маслом. Такой эффект будет способствовать уменьшению времени контакта расплава с атмосферой в реальных производственных условиях, а следовательно, и уменьшению степени вторичного окисления стали.

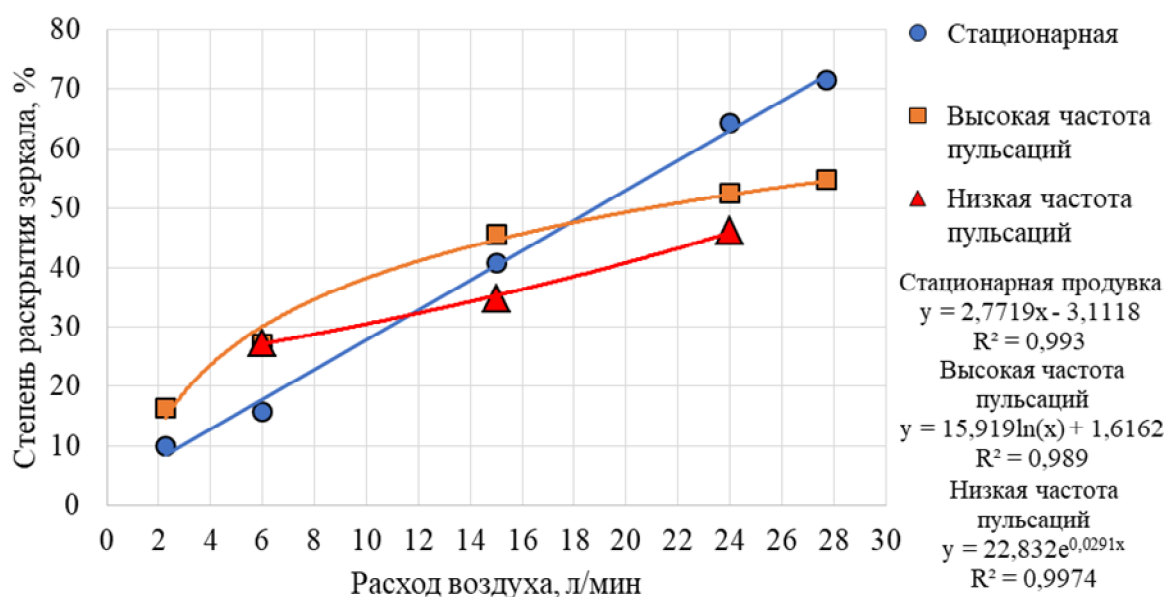


Рисунок 3 Зависимость времени усреднения от расхода воздуха при стационарном и пульсирующем способе продувки

При режиме продувки с расходом воздуха 6 л/мин и частотой пульсаций 300 ед./мин наблюдается раскрытие зеркала воды, близкое к раскрытию, имеющему место при стационарной продувке с интенсивностью 11 л/мин, что еще раз подтверждает преимущества предложенного способа продувки по сравнению с базовым с точки зрения расхода продувочного газа и вторичного окисления.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что изменение частоты пульсаций позволяет управлять степенью раскрытия зеркала воды и при одинаковых расходах воздуха для исследуемых способов продувки обеспечить меньшую площадь ее оголения (рис. 3).

Также важно отметить, что варьирование частотой пульсаций может обеспечить

$$\tau = 124,8093 - 6,6113x - 0,0239y + 0,1266x^2 - 0,0003xy - 2,777 \cdot 10^{-5}y^2, \quad (3)$$

где τ — время усреднения воды, с; x — расход воздуха на модели, л/мин; y — частота пульсаций воздуха, ед./мин.

Полученные данные свидетельствуют о том, что использование пульсирующей подачи воздуха в сравнении со стационарной обеспечивает более интенсивное усреднение модельной жидкости после ввода в нее солевого раствора при одинаковых расходах продувочного газа.

На основе полученных в ходе моделирования данных (табл. 1) были построены зависимости времени усреднения от расхода воздуха при стационарном и пульсирующем способе продувки (рис. 5). Важно отметить, что полученные в ходе экспериментов данные с датчиков, расположенных в районе днища модели, указывают на более интенсивное перемешивание при пульсирующей продувке в предполагаемых застойных зонах (в нижней части модели ковша).

Из представленных на рисунке 5 графиков видно, что при пульсирующей продувке с высокой частотой (более 185 пульсаций в минуту) в пределах расхода газа 2–22 л/мин усреднение проходит быстрее. С увеличени-

меньшую площадь раскрытия зеркала воды в сравнении с барботажным перемешиванием практически для любого расхода продувочного газа.

По аналогии с исследованиями влияния технологических параметров пульсационного перемешивания на площадь раскрытия зеркала воды была установлена зависимость времени усреднения модельной жидкости по объёму физической модели сталеразливочного ковша от расхода воздуха и частоты его пульсаций.

Полученная зависимость представлена на рисунке 4.

Представленная регрессионная полиномиальная зависимость времени усреднения от частоты подачи и расхода воздуха при пульсирующей продувке описывается степенным уравнением второго порядка

ем расхода газа и частоты пульсаций время усреднения уменьшается. При расходе воздуха 22–28 л/мин для случая пульсирующей струи усреднение протекает несколько медленнее, однако степень раскрытия зеркала воды значительно меньше, чем при стационарной подаче воздуха, что, в свою очередь, является положительным эффектом, способствующим уменьшению интенсивности вторичного окисления стали кислородом атмосферы в производственных условиях.

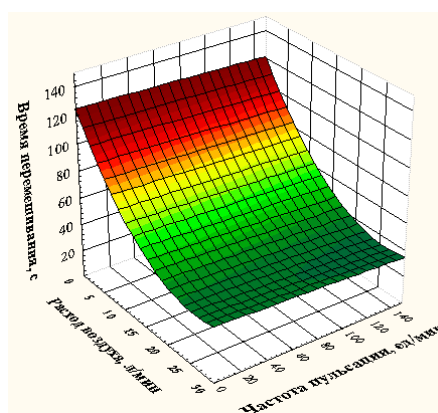


Рисунок 4 Зависимость времени усреднения от частоты подачи и расхода воздуха при пульсирующей продувке

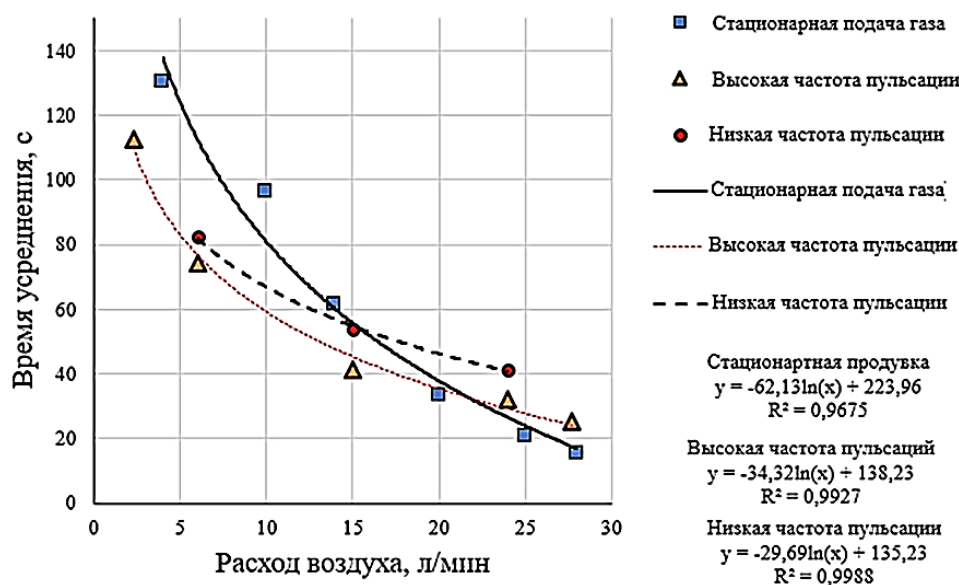


Рисунок 5 Зависимость времени усреднения от расхода воздуха при стационарном и пульсирующем способе продувки

В данном диапазоне расхода продувочного газа время усреднения может изменяться варьированием частоты пульсаций.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие основные выводы:

– анализ технологических параметров гомогенизации жидкости продувкой ее газом с использованием стационарной и пульсирующей струи показал большую эффективность пульсационного перемешивания в сравнении с барботажным с точки зрения степени оголения зеркала воды, времени ее усреднения и расхода продувочного газа;

– для снижения степени вторичного окисления, времени гомогенизации и расхода продувочного газа можно рекомендовать пульсационное перемешивание для обработки практически любых марок ста-

ли в диапазоне интенсивности продувки 0,33–3,67 л/т·мин, что соответствует интенсивности 2–22 л/мин, имеющей место при физическом моделировании;

– при обработке сталей, имеющих в своем составе высокоактивные по отношению к кислороду и азоту элементы и, следовательно, склонных к вторичному окислению, пульсирующая подача может быть эффективнее и при более высокой интенсивности продувки (на физической модели — более 22 л/мин). Несмотря на некоторое удлинение времени операции площадь контакта зеркала с воздухом в этом случае значительно меньше.

В ходе последующих исследований предполагается проанализировать эффективность пульсационного перемешивания для гомогенизации жидкости по температуре.

Библиографический список

1. Ефименко, С. П. Пульсационное перемешивание металлургических расплавов [Текст] / С. П. Ефименко, В. Л. Пилюшенко, А. Н. Смирнов. — М. : Металлургия, 1989. — 168 с.
2. Смирнов, А. Н. Внепечное рафинирование чугуна и стали [Текст] : учебное пособие / А. Н. Смирнов, А. М. Зборицк. — Донецк : ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. — 186 с.
3. Смирнов, А. Н. Физическое моделирование процессов перемешивания металла в конвертере с комбинированной продувкой [Текст] / А. Н. Смирнов, Е. Н. Лебедев, К. Н. Шарандин // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* — 2010. — № 7. — С. 44–46.

4. Смирнов, А. Н. Исследование процессов перемешивания металла в сталеразливочном ковше при продувке инертным газом [Текст] / А. Н. Смирнов, С. Г. Жемеров // «Украинская ассоциация сталеплавильщиков» ДонНТУ. — 2010.

5. Куберский, С. В. Усовершенствование методики моделирования продувки металла инертными газами в агрегате ковш-печь [Текст] / С. В. Куберский, А. Н. Романчук, Я. А. Романчук // Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства : сборник научных трудов IV международной научно-технической конференции. — 2019. — С. 127–130.

© Куберский С. В.

© Романчук Я. А.

© Саратовский Р. Н.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В.,
зам. нач. ЦЛК Филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» Тарасовым В. Н.*

Статья поступила в редакцию 22.06.2021.

PhD in Engineering Kuberskiy S. V., Romanchuk Ya. A., PhD in Engineering Saratovskiy R. N.
(DonSTI, Alchevsk, LPR, wapuk007@gmail.com)

PHYSICAL MODELING OF PULSATING MIXING OF METAL IN A STEEL LADLE

The paper presents the results of physical modeling of metal mixing process in a steel ladle when it is purged with argon supplied through two bottom purging devices in the form of a stationary and pulsating jet. The dynamics is analyzed and the opening area of water mirror is determined, as well as the influence of the purge intensity and the pulsation frequency on averaging time of the model liquid with stationary and pulsating gas supply is determined. The advantages of pulsation mixing in comparison with bubbling are shown.

Key words: *steel ladle, steel, slag, physical model, purge, inert gas, bubbling mixing, pulsation mixing, stationary jet, pulsating jet, intensity, flow rate, mirror, averaging.*

УДК 669.054.8

*к.т.н. Проценко М. Ю.,
Воронько М. И.,
Проценко В. И.,
Ангелов В. Ю.*

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, mikhalu4@yandex.ru)

АНАЛИЗ СОСТАВА ОТХОДОВ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Исследованы физико-химические свойства отходов, получаемых при производстве электропечных ферросплавов, и выполнена оценка эффективности использования полученного вторичного сырья в металлургических технологиях.

Ключевые слова: *отходы, ферросплавы, шлак, корольки сплава, ферросилиций, ферросиликомарганец, химический состав, переплав отходов.*

За многолетнюю историю деятельности Стахановского завода ферросплавов (ныне филиал № 13 «Стахановский завод ферросплавов» ЗАО «Внешторгсервис») в отвалах скопилось довольно большое количество отходов ферросплавного производства (ОФП). С целью вовлечения техногенных отходов в металлургический передел необходимо выполнить комплексный анализ физико-химических свойств данных отходов.

Продуктами химических реакций при карботермическом способе восстановления элементов на филиале № 13 «Стахановский завод ферросплавов» ЗАО «Внешторгсервис» (СЗФ) являются непосредственно ферросплав определенной марки, пыль и шлак, содержащий в основном кремнезем (SiO_2). Помимо кремнезема шлак содержит оксиды других элементов, участвующих в реакции. По литературным данным, в ОФП, кроме корольков сплава, содержится 30÷80 % кремнезема, содержание других компонентов (Al_2O_3 , CaO , MgO , MnO и т. д.) 0,5÷35 % в зависимости от вида выплавляемого сплава [1].

Производство ферросплавов сопровождается образованием значительного количества шлаков. Кратность шлака (отношение массы шлака к массе металла) зависит от вида сплава и составляет [2]:

– при выплавке ферросилиция 0,05–0,10 (это бесшлаковый или малошлаковый процесс);

– при производстве ферросиликомарганца 1,1–1,3;

– при плавке высокоуглеродистого ферромарганца 1,2–1,6 (это флюсовый способ).

Также при производстве ферросилиция на 1 т выплавляемого кремния образуется 300÷900 кг пыли (шлама), а при производстве ферросиликомарганца образуется 200÷600 кг пыли, содержащей ценные компоненты на 1 т полученного сплава [2–5]. СЗФ производит в основном кремнистые и марганцевые ферросплавы, определенная доля которых запутывается в шлаковой фазе в виде корольков сплава и с ОФП вывозится в отвал. За годы работы СЗФ в основном производил ферросилиций и ферросиликомарганец, а также ферромарганец, и, следовательно, в отвалах скопились ценные для металлургии компоненты.

Отвальные шлаки от производства ферросилиция содержат до 30–50 % сплава в виде корольков и до 15 % карбида кремния. При дроблении шлака от производства марганцевых ферросплавов образуется фракция 0–5 мм, называемая «шлаковым песком», содержащая до 20 % корольков готового сплава [3–6]. На рисунке 1 представлены снимки со спутника, где обозначены места расположения ОФП СЗФ.

Если учесть масштаб снимков со спутника (рис. 1, б), то занимаемая шлаковыми отвалами площадь составляет около 8000 м^2 , и они пагубно влияют на окружающую среду региона.



Рисунок 1 Расположение ОФП СЗФ

Поскольку в шлаке содержится достаточно большое количество полезных компонентов, а шлаковые отвалы оказывают негативное влияние на экологию региона, актуальным является более полное исследование компонентного состава отвала от производства ферросплавов СЗФ и повторного его использования в качестве сырья, что, в свою очередь, обеспечит ресурсосбережение и улучшит экологию.

Основной целью данной работы являлся физико-химический анализ отвального шлака от производства электропечных ферросплавов.

Объект исследования — электропечное производство ферросплавов.

Предмет исследования — анализ физико-химических свойств отходов ферросплавного производства.

Задачи исследования:

- определение физико-химических свойств отходов посредством их переплава и дальнейшего химического анализа продуктов плавки;

- оценка металлургической ценности ферросплавных отходов для дальнейшего возвращения их в технологический процесс.

При проведении исследований использовали стандартные методики определения насыпной и истинной плотности, подго-

товки сырья, измерения температуры, отбора и подготовки проб для химического анализа состава отходов. Переплав подготовленных проб отходов производился на кафедре металлургии черных металлов ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ», а его дальнейший химический анализ выполняли в комплексной многопрофильной научно-исследовательской лаборатории научного центра мониторинга окружающей среды.

На промышленном отвале СЗФ (рис. 1) отходы ферросплавного производства визуально представляют собой многочисленные насыпи, состоящие в основном из частиц фракцией 40÷100 мм разной массы и цвета. В большей части насыпи состоят из отходов производства ферросплавов, а также мусора (резина, бытовые отходы и т. п.), боя электродной массы и кусков огнеупоров (в основном шамотного кирпича).

Для исследований отходов на территории отвала среди насыпей визуально были определены возможные места разного периода производства ферросплавов, из которых было отобрано 3 пробы по 10 кг.

На первом этапе исследований физико-химических свойств отобранных проб отходов определили их насыпную и истинную плотность (табл. 1).

Таблица 1
Физические свойства ОФП

Показатель	Ед. изм.	№ пробы		
		1	2	3
Насыпная плотность	кг/м ³	2091	1665	1508
Истинная плотность	кг/м ³	3571	3125	2564

Представленные в таблице 1 данные показывают, что пробы имеют высокую истинную плотность, что свидетельствует о наличии значительного количества тяжелых компонентов в виде металлической фазы, которая визуальна представлена вкраплениями (корольками сплава).

В связи с тем, что корольки марганцовистого сплава имеют довольно мелкую фракцию, плохо поддаются магнитной сепарации, а корольки ферросилиция вообще не обладают магнитными свойствами и при ручном разделении возможна большая погрешность ввиду присутствия «человеческого» фактора, было принято решение разделить шлаковую фазу и металлическую методом расплавления ОФП.

Для дальнейшего переплава пробы ОФП были измельчены до фракции «-1,0» мм и усреднены (рис. 2). Переплав проб производили в специально изготовленных графитовых тиглях с применением индукционной печи ИСТ-0,01 (рис. 3).

В процессе переплава проб порционно использовали в качестве флюса негашёную известь для достижения максимально возможной жидкоподвижности шлака. Для более полного контакта флюса и переплавляемой пробы ОФП расплав перемешивали стальным прутом. В процессе расплавления ОФП производили замер температуры с помощью платина-платинородиевой термомпары. При переплаве пробы № 1 (плавка № 1) полного ее расплавления достигли при температуре 1650 °С.

Переплав пробы № 1 позволил разделить шихту на две составляющие: металлическую и шлаковую фазы (рис. 4). Металлическая фаза представляла собой твердый хрупкий сплав серого цвета с металлическим блеском, шлаковая — пористый материал ближе к черному цвету.

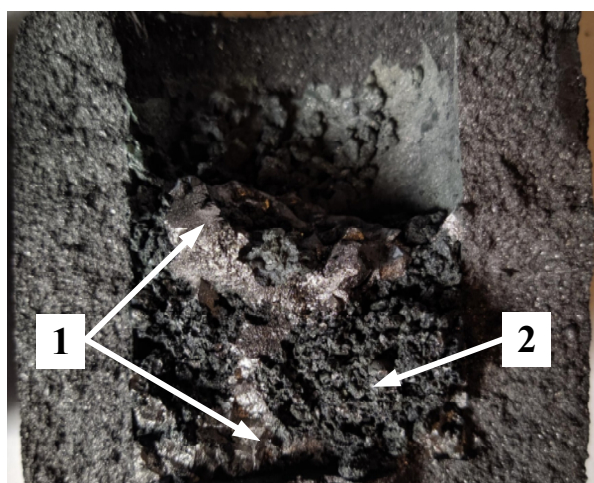


а — проба № 1; б — проба № 2; в — проба № 3

Рисунок 2 Общий вид отобранных проб ОФП после дробления



Рисунок 3 Индукционная печь ИСТ-0,01



1 — металлическая фаза; 2 — шлаковая фаза

Рисунок 4 Общий вид пробы № 1 после переплава

При температуре около 1400 °С произошло расплавление пробы № 2 (плавка № 2). Продукты переплава данной пробы также разделились на металлическую и шлаковую фазы (рис. 5). Металлическая фаза сформировалась на дне графитового тигля в отличие от пробы № 1, которая представляла собой твердый хрупкий сплав серого цвета с металлическим блеском. Плотный материал зеленоватого цвета характерен для шлаковой фазы.

Переплав пробы № 3 (плавка № 3) осуществляли до температуры 1550 °С. При этой температуре проба расплавилась, но

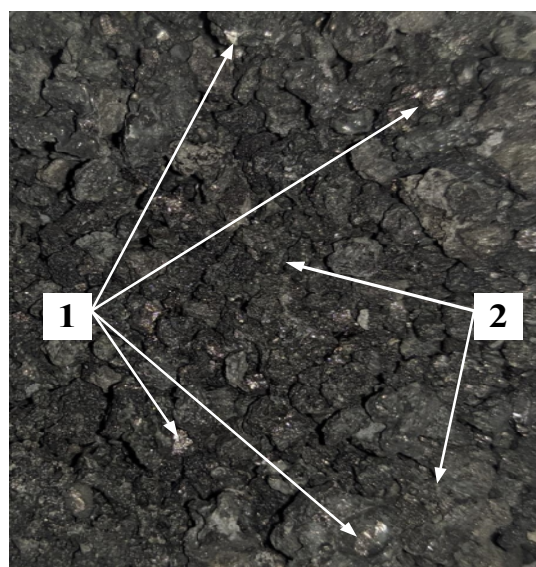
разделение продуктов плавки на металлическую и шлаковую фазы произошло не в полной мере (рис. 6).

Металлическая фаза представляла собой корольки твердого и хрупкого сплава серого цвета с металлическим блеском, запутавшегося в шлаке по всему объёму графитового тигля. Шлаковая фаза — пористый материал черного цвета.



1 — металлическая фаза; 2 — шлаковая фаза

Рисунок 5 Общий вид пробы № 2 после переплава



1 — металлическая фаза; 2 — шлаковая фаза

Рисунок 6 Общий вид пробы № 3 после переплава

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

На основании проведенных плавов по переплаву отходов ферросплавного производства СЗФ были составлены материальные балансы, которые представлены в таблице 2.

Данные таблицы 2 свидетельствуют о том, что в результате переплава проб № 1 и № 2 получено наибольшее количество металла — 0,120 и 0,079 кг (48,6 % и 25,1 %), а выход сплава из ОФП (без учета металла стального прута) составил 41,5 % и 32,8 % соответственно. При переплаве данных проб общий угар компонентов навески составил по 0,032 кг, что связано с наличием в данных пробах мусора и летучих веществ. В результате переплава пробы № 3 общий угар составил 0,018 кг. При этом металла получено лишь 0,038 кг (15,6 %), а выход сплава из ОФП — 13,5 %. Полученное низкое количество металлической фазы при переплаве пробы № 3, доказывает низкое содержание корольков сплава в данных ОФП, что подтверждает его невысокую истинную плотность.

Результаты исследований показывают, что получаемые в результате расплавления отходов ферросплавного производства металлическая и шлаковая фазы имеют различную структуру и цвет и могут содержать полезные компоненты для металлургического передела или строительной промышленности. Поэтому был выполнен химический анализ полученных продуктов

плавки после переплава трех проб ОФП, результаты которого представлены в таблицах 3 и 4.

Выполненный химический анализ полученного металла после переплава ОФП проб № 1 и № 3 близок по составу к кремнистым ферросплавам, а именно: пробу № 1 можно отнести к ферросилицию марки ФС65 и ФС70, а пробу № 3 — к ферросилицию марки ФС25. Металл проб № 1 и № 3 может быть использован в процессах раскисления-легирувания железоуглеродистых расплавов, однако необходимо учитывать, что он содержит повышенное количество вредных примесей (серы и фосфора) согласно ГОСТ 1415–93 и ДСТУ 4127:2002.

Таблица 2
Материальный баланс переплава ОФП

Статья баланса	№ плавки		
	1	2	3
Поступило, кг:			
ОФП	0,205	0,241	0,222
Негашёная известь	0,007	0,074	0,014
Стальной прут	0,035	-	0,008
Итого:	0,247	0,315	0,244
Получено, кг:			
Металл	0,120	0,079	0,038
Шлак	0,095	0,204	0,188
Угар	0,032	0,032	0,018
Итого:	0,215	0,283	0,226

Таблица 3

Химический состав шлака после переплава отходов СЗФ, %

№ плавки	MnO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	Прочее
1	0,29	66,30	14,10	12,46	0,36	1,60	3,96	0,93
2	33,20	26,80	22,70	6,42	4,35	4,12	1,21	1,20
3	0,62	64,20	11,20	10,80	0,58	1,24	9,96	1,40

Таблица 4

Химический состав металла после переплава отходов СЗФ, %

№ плавки	C	Si	Mn	P	S	Fe	Прочее
1	0,73	68,70	0,54	0,036	0,053	29,70	0,241
2	2,67	4,16	55,40	0,318	0,281	37,10	0,071
3	0,59	29,30	1,13	0,029	0,044	68,60	0,307

Высокое содержание марганца в металле пробы № 2 позволяет применять его для легирования чугуна.

Применение шлака, полученного после переплава данных отходов, возможно в дорожном строительстве и при производстве строительных материалов.

Отходы ферросплавного производства СЗФ содержат значительное количество ценных для металлургии компонентов, возврат которых в металлургический пе-

редел позволит частично заменить дорогостоящее сырье, используемое в технологических схемах предприятий.

В ходе дальнейших исследований необходимо определить технологические параметры, способствующие наиболее полному извлечению и разделению фаз на ценное вторичное сырье и шлак. Целесообразно провести исследования состава пылей и шламов ферросплавного производства.

Библиографический список

1. Зубов, В. Л. *Электрометаллургия ферросилиция [Текст]* / В. Л. Зубов, М. И. Гасик. — Днепропетровск : Системные технологии, 2002. — 704 с.
2. *Утилизация отходов ферросплавного производства [Текст]* / Р. У. Кожамуратов, Р. З. Сафаров, Ж. К. Шоманова [и др.] // *Global science and innovations 2017 : materials of the international scientific conference.* — Bursa : Eurasian Center of Innovative Development «DARA», 2017. — P. 207–213.
3. Розенберг, В. Л. *Рудовосстановительные электропечи. Энергетические показатели и очистка газов [Текст]* / В. Л. Розенберг, А. Ю. Вальдберг. — М. : Энергия, 1974. — 130 с.
4. Толстогузов, Н. В. *Теоретические основы и технология плавки кремнистых и марганцевых сплавов [Текст]* / Н. В. Толстогузов. — М. : Металлургия, 1992. — 239 с.
5. Гасик, М. И., *Теория и технология производства ферросплавов [Текст]* : учеб. для вузов / М. И. Гасик, Н. П. Лякишев, Б. И. Емлин. — М. : Металлургия, 1988. — 784 с.
6. Рысс, М. А. *Производство ферросплавов [Текст]* / М. А. Рысс. — М. : Металлургия, 1985. — 346 с.

© Проценко М. Ю.

© Воронько М. И.

© Проценко В. И.

© Ангелов В. Ю.

Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В., зам. нач. ЦЛК филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» Тарасовым В. Н.

Статья поступила в редакцию 24.06.2021.

PhD in Engineering Protsenko M. Yu., Voron'ko M. I., Protsenko V. I., Angelov V. Yu. (DonSTI, Alchevsk, LPR, mikhalu4@yandex.ru)

ANALYSIS OF THE WASTE COMPOSITION OF FERROALLOY INDUSTRY

The physicochemical properties of waste obtained in the production of electric furnace ferroalloys are studied and the efficiency of using the obtained secondary raw materials in metallurgical technologies is assessed.

Key words: waste, ferroalloys, slag, alloy prills, ferrosilicon, ferrosilicon manganese, chemical composition, remelting of waste.

**МАШИНОСТРОЕНИЕ
И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

**MECHANICAL ENGINEERING
AND MACHINE SCIENCE**

УДК 621.785.5

*к.т.н. Вишнеvский Д. А.,
к.т.н. Петров П. А.,
д.т.н. Харламов Ю. А.,
Подгорный В. Ю.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР)*

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПО УСЛОВИЯМ ИЗНАШИВАНИЯ

В статье разработана классификация деталей машин в зависимости от условий трения сопрягаемых поверхностей, приведены примеры деталей и узлов для каждой группы и подгруппы. Представлены схемы распределения износов поверхностей трения.

Ключевые слова: детали машин, условия изнашивания, трибология, восстановление деталей.

Введение. Ремонтные комплексы металлургических предприятий являются одними из важнейших служб, обеспечивающих поддержание оборудования в работоспособном состоянии, своевременную замену, восстановление или ремонт изношенных деталей. Во многих случаях обеспечение надлежащего уровня эксплуатационных свойств деталей технологического оборудования основных цехов, а соответственно, снижение простоев, увеличение объемов выпуска и улучшения качества продукции обуславливают также необходимость применения упрочняющих технологий (методов инженерии поверхности).

Основными причинами выхода из строя деталей машин металлургического комплекса (ММК) являются как поломки, так и износы. Изнашиваемые детали машин отличаются по большому количеству конструктивно-технологических признаков: функциональному назначению; основному материалу и материалу поверхностных слоев; способам получения заготовок; геометрической форме, массе и размерам; точности; технологичности конструкций и пр. Номенклатура таких деталей весьма обширна, в том числе она охватывает машины агломерационного производства, доменных, сталеплавильных и прокатных цехов. Детали и узлы металлургического оборудования подвергаются различным видам изнашивания (механического, термического, усталостно-

го, коррозионного, эрозийного, химического и молекулярного). Воздействия, вызывающие износ, влекут за собой образование дефектов. При этом условия эксплуатации определяют различные доминирующие виды изнашивания, типичные для тех или иных деталей: изменение размеров и формы поверхностей; появление царапин, рисок и задиров на сопрягаемых поверхностях; появление трещин; смятие и выкрошивание рабочих поверхностей; износ и разрушение резьб и многие другие [1–4].

При проектировании новых и совершенствовании существующих конструкций машин недостаточное внимание уделяется учету трибологических факторов. Трение и износ оказывают решающее влияние на работоспособность деталей машин и их сопряжений. Однако современная наука не обеспечивает конструкторов достаточными сведениями по расчету деталей на износ. Методы физического и математического моделирования процессов изнашивания разработаны главным образом для ряда типовых деталей и узлов трения. Более широко применяют экспериментальное моделирование трения и изнашивания. Совершенствование узлов трения требует больших затрат и проведения многоступенчатых научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

В последние годы большое внимание уделяется созданию научно-методических

баз данных технологического обеспечения эксплуатационных свойств восстанавливаемых деталей [5–7]. В известных работах систематизация результатов производственного опыта и научных исследований по изнашиванию деталей оборудования выполняется по типам деталей и физическим механизмам их износа. При этом не учитывается неравномерность изнашивания поверхностей деталей вследствие неравномерного распределения удельных давлений и скоростей относительного скольжения, различающихся условий смазывания, интенсивности поступления в зону трения абразивов и агрессивной среды, организации удаления частиц изнашивания и других условий в контакте деталей. Это чрезмерно затрудняет создание и совершенствование баз данных и практическое их использование при технологической подготовке восстановления деталей, внедрение новых эффективных технологий для их восстановления и упрочнения.

Процессы трения и изнашивания в значительной мере зависят от конструктивного оформления узлов и деталей, выбранных конструкционных материалов и технологии упрочнения, а также эксплуатационных условий.

Проектирование оптимальных и совершенствование существующих конструкций изнашиваемых деталей и узлов, регламентирование режимов их эксплуатации, прогнозирование ресурса и технического состояния во времени невозможны без проведения соответствующих расчетов. Многообразие конструкций и условий их эксплуатации требует классификации деталей и узлов трения по типовым группам и создания соответствующих им моделей расчета на износ.

Целью данной статьи является систематизация деталей машин и их сопряжений по условиям изнашивания и разработка принципов их классификации.

Результаты исследования. Износ деталей и их сопряжения является геометрическим критерием потери их начальных пока-

зателей и выходных параметров, влияющих на надежность машин и механизмов. Актуальным направлением развития технологии ремонтного производства является создание информационных моделей, способствующих разработке рациональных технологических процессов восстановления деталей и обеспечению эксплуатационной технологичности конструкций с учетом условий их эксплуатации, характера отказов и закономерностей износа. Трибология как наука о трении и изнашивании изучает процессы, протекающие на локальных участках поверхностей на микроуровне. На этом уровне осуществляется моделирование трибологических явлений с целью выявления физических механизмов изнашивания для ограниченных сочетаний пар материалов и условий трения [8]. Широкое применение находят стендовые и эксплуатационные детали и узлы трения, а также развиваются методы математического моделирования. Тем не менее, в настоящее время отсутствуют достаточно надежные модели даже для расчета на износ типовых деталей машин. Модели процессов трения и изнашивания относятся к сложным неоднородным [9], различные части которых имеют описание с позиций механики, теплофизики, химии, теории контактного взаимодействия и пр. При моделировании, кроме учета режимов работы пар трения, физико-механических свойств материалов, конструктивных особенностей узлов и деталей и других факторов, важную роль играют как микро-, так и макрогеометрия поверхностей контакта, рациональное использование искусственных технологических баз. Для развития и совершенствования методов расчета и оценки износа основных видов изнашивающихся деталей и узлов машин металлургического комплекса необходима их систематизация и классификация по условиям изнашивания. В работе [8] предложено рассматривать две разновидности сопряжений деталей машин в зависимости от характера изменения их взаимного положения по мере изнашивания: 1) сопряжения с условием касания сопрягаемых по-

верхностей, когда при сближении вследствие изнашивания сохраняется их полный контакт; 2) сопряжения с самоустановкой сопрягаемых деталей, направление их сближения не задано. Однако этот подход не учитывает ряд других возможных условий изнашивания деталей и их сопряжений.

Сопряжения поверхностно упрочняемых и восстанавливаемых деталей по условиям изнашивания их контактирующих поверхностей можно разделить на 11 групп (табл. 1), из которых первые четыре группы относятся к подвижным сопряжениям деталей машин. Профессором Прониковым А. С. [11] предложено подразделять их по характеру взаимного сближения деталей сопряжения на две подгруппы: А — с постоянными условиями контакта; Б — с переменными условиями контакта. В сопряжениях типа Б происходит самоустановка изношенных деталей и износ больше сказывается на функциональных свойствах сопряжения.

Для сопряжений 1-й группы характерны одинаковые условия изнашивания для точек поверхностей, расположенных на одной траектории. Интенсивность и продолжительность изнашивания и износ на окружности определенного радиуса каждой из поверхностей будет одинаковой. Одна-

ко при наличии дополнительных факторов, связанных с конструктивными особенностями (организация теплоотвода и подачи смазки, удаления частиц износа из зоны трения и др.), режимами эксплуатации, внешними воздействиями и пр. условия изнашивания могут изменяться, и это потребует дальнейшей классификации на подгруппы по соответствующим признакам. Методы инженерии поверхности позволяют создавать на поверхностях трения упрочненные слои с переменными свойствами и толщиной [10]. Поэтому вполне целесообразно создание методов расчета не на износ, а рекомендаций, способствующих конструированию деталей и выбору технологий упрочнения поверхностей для более равномерного износа поверхностей трения.

К подгруппе 1А могут быть отнесены: осевые подшипники скольжения; шестерчатые насосы (торцовые поверхности шестерен и боковые стенки корпуса насоса); конические тормоза и фрикционные муфты; торцевые уплотнения и пр. Примерами сопряжений подгруппы 1Б являются: запорные прецизионные пояски деталей запорной арматуры; шаровые краны; диски фрикционных муфт; торцевые уплотнения; конусные краны и др.

Таблица 1

Классификация деталей машин и их сопряжений по условиям изнашивания

Группа	Условия изнашивания
1А	Одинаковые условия изнашивания для точек обеих поверхностей, расположенных на одной траектории, с постоянными условиями контакта
1Б	Одинаковые условия изнашивания для точек обеих поверхностей, расположенных на одной траектории, с переменными условиями контакта
2А	Постоянные условия изнашивания только для одной детали сопряжения с постоянными условиями контакта
2Б	Постоянные условия изнашивания только для одной детали сопряжения с переменными условиями контакта
3А	Переменные условия изнашивания для всех точек обеих деталей сопряжения с низшими кинематическими парами с постоянными условиями контакта
3Б	Переменные условия изнашивания для всех точек обеих деталей сопряжения с низшими кинематическими парами с переменными условиями контакта
4А	Переменные условия изнашивания для всех точек обеих деталей сопряжения с высшими кинематическими парами с постоянными условиями контакта

Продолжение таблицы 1

Группа	Условия изнашивания
4Б	Переменные условия изнашивания для всех точек обеих деталей сопряжения с высшими кинематическими парами с переменными условиями контакта
5А	Поверхности деталей, контактирующие с внешней средой — почвой, породой, обрабатываемой деталью или заготовкой, потоком жидкости или гидроабразивной среды и пр., — с постоянными условиями контакта
5Б	Поверхности деталей, контактирующие с внешней средой — почвой, породой, обрабатываемой деталью или заготовкой, потоком жидкости или гидроабразивной среды и пр., — с переменными условиями контакта
6	Сопряжения деталей с гарантированным натягом (повреждения вследствие фреттинг-коррозии). Неподвижные разъемные соединения
7	Подвижные сопряжения деталей, контактирующие через твердую среду
8	Поверхности контакта в подвижных и неподвижных сопряжениях деталей с эластичным контртелом
9	Запорные и регулирующие устройства, работающие в режиме замыкания и размыкания и предназначенные для перекрытия потоков среды
10	Электрические контакты (разрывные, скользящие и неподвижные). Одновременное действие механических, тепловых и электрических факторов приводит к существенному изменению свойств контактирующих материалов и их фрикционно-износостойких характеристик
11	Специальные сопряжения. Работа в условиях трения в вакууме, при низких или высоких температурах, в радиационной среде и пр.

На рисунке 1, а показана схема износа I по радиусу круговой площади контакта сопрягаемых деталей подгруппы 1А. Конструкция таких узлов, например осевых подшипников скольжения, обеспечивает сближение деталей при износе по оси вращения и суммарная величина износа $I = I_1 + I_2$ сопрягаемых деталей 1 и 2 одинакова при любых значениях радиуса R . Однако из-за различия износостойкости материалов сопрягаемых деталей, условий теплоотвода и пр. значения $I_1 \neq I_2$. Подбором более рационального варианта сочетания материалов деталей и технологий упрочнения деталей можно уменьшить износ отдельных деталей I_1 и I_2 , а также суммарный износ I (кривые 1' и 2').

Крайне неравномерное распределение износа по круговым траекториям контакта возможно у деталей подгруппы 1Б, а также при наличии больших зазоров в дополнительных направляющих сопряжениях группы 1А.

У сопряжений 2-й группы условия изнашивания сохраняются только для одной детали. К сопряжениям типа 2А можно от-

нести: колодочные тормоза с жестким закреплением колодки; ходовой винт-гайку; шестеренчатые насосы (контакт головок зубьев и корпуса насоса) и др. Равномерный износ проявляется у одной из сопрягаемых деталей, а для другой — неравномерный или даже имеет локальный характер. Примерами сопряжений типа 2А являются: вал-подшипник скольжения; осевые опоры скольжения с самоустанавливающимися несущими поверхностями (колодками); колодочные тормоза с самоустановкой колодок; круговые направляющие скольжения при эксцентричной нагрузке; центробежная колодочная муфта; тормозные диски; дисковый тормоз и др. На рисунке 1, б показана схема изменения износа вдоль поверхностей контакта деталей подгруппы 2А. Износ равномерен вдоль поверхности контакта только у детали 1. Более оптимальный выбор материалов и технологий упрочнения позволяет снизить износ деталей (кривые 1' и 2').

Переменные условия изнашивания для всех точек контакта обеих деталей харак-

терны для деталей сопряжений с низшими кинематическими парами (3-я группа). Величина износа на поверхностях трения распределена неравномерно. К сопряжениям подгруппы 3А относятся: золотниковые пары в гидрораспределителях; поршневые кольца-гильзы цилиндра; линейные подшипники скольжения и др. Примерами сопряжений подгруппы 3Б являются: пластинчатый насос; поступательные направляющие скольжения; кулиса — камень; пластины — корпус и пластины — ротор в пластинчатых насосах и гидромоторах; пазы полумуфт и выступы промежуточного диска крестовых муфт; пружинно-кулачковая предохранительная муфта и др.

На рисунке 1, в показана схема изменения износа поверхностей контакта деталей подгруппы 3А по направлению относительного движения. Наиболее неравномерный износ наблюдается у более протяженной поверхности контакта у детали 1. Неравномерность износа меньше у сопрягаемой детали 2. В подгруппе 3Б неравномерность износа таких деталей резко увеличивается (рис. 1, г). Подбором более рационального сочетания материалов и технологий упрочнения можно добиться повышения износостойкости деталей этой группы (кривые 1' и 2').

Сопряжения деталей 4-й группы (в отличие от 3-й) являются высшими кинематическими парами, в которых идеальным контактом поверхностей трения является место касания по линии или в точке. Также здесь высока вероятность неравномерного износа поверхностей. Примерами сопряжений подгруппы 4А являются: зубчатые зацепления; кулачок — толкатель; шестеренчатые насосы (зубья шестерен) и др. К сопряжениям подгруппы 4Б относятся: колесо — рельс; подшипники и направляющие качения; обгонная фрикционная роликовая муфта; фрикционные катки; шариковый винт и др.

К 5-й группе относят детали, поверхности которых контактируют с внешней средой — почвой, породой, обрабатываемыми

детальями или заготовками, потоком жидкости или гидроабразивной среды и пр. Рабочие поверхности этих деталей преимущественно подвергаются абразивному изнашиванию вследствие трения деталей (или рабочих органов) о более твердые тела или частицы минерального происхождения. Характер взаимодействия с этой средой и будет определять форму изношенной поверхности. Примерами деталей подгруппы 5А являются: режущий инструмент с жесткой установкой; зуб ковша экскаватора и пр. Износ формообразующих поверхностей деталей обычно неравномерен. Оценка распределения износа по поверхности обусловливает целесообразное распределение упрочненного поверхностного слоя по толщине. К деталям подгруппы 5Б могут быть отнесены: лопасти мешалок; лемехи плугов; плавающий режущий инструмент; рабочие молотки молотковых и роторных дробилок; рабочие детали машин струйно-абразивной обработки; загрузочные устройства доменных печей и др. Распределение износа по поверхностям этих деталей обычно неравномерно и зависит от их геометрии, интенсивности изнашивания по поверхности и пр. Например, в конусах засыпных устройств доменных печей износ распространяется концентрическим поясом шириной 1200÷1400 мм на расстоянии 350 мм от кромки усеченной части. Представления о постоянстве или переменчивости условий контакта деталей 5-й группы являются условными, поскольку, например, процесс резания жестко установленным инструментом может быть прерывистым, могут колебаться значения глубины резания при выполнении прохода и пр. В подгруппе 5Б взаимодействие может быть статистическим, пульсирующим или ударным.

Детали и сопряжения этих подгрупп также могут отличаться по ряду других признаков: направление воздействия среды (нормальное, касательное, одно- или двухстороннее и пр.); вид среды и ее параметры: твердая (компактная, дробленая, измельченная), жидкая, гидроабразивная и пр.; вре-

менные параметры процесса (непрерывные, пульсирующие, импульсные и пр.) и др.

В 6-ю группу входят сопряжения деталей с гарантированным натягом, поверхности которых подвергаются фреттинг-коррозии. Такое изнашивание происходит при малых взаимно колебательных движениях в пределах упругих деформаций микронеровностей поверхностей контакта. В качестве примеров таких сопряжений можно привести: посадки подшипников на вал или в корпус; соединение бронзового венца червячного колеса со стальной ступицей; поршневые пальцы; сопряжения поверхностей валов со ступицами лопаток турбин, компрессоров бандажей железнодорожных

колес, импеллера с валом в химическом реакторе и т. д.; клиновые, заклепочные, штифтовые и др. соединения и пр.

В 7-ю группу включены подвижные сопряжения деталей, контактирующие через твердую среду, в отличие от пар трения подгруппы 5Б. В качестве примеров можно привести взаимодействие инструментов с обрабатываемыми материалами при прокатке, штамповке, притирке (притир — абразивная среда — деталь); конусные дробилки; щековые дробилки; валковые дробилки и пр. Поверхности трения также изнашиваются неравномерно, даже у элементов трибологической системы, работающих в паре.

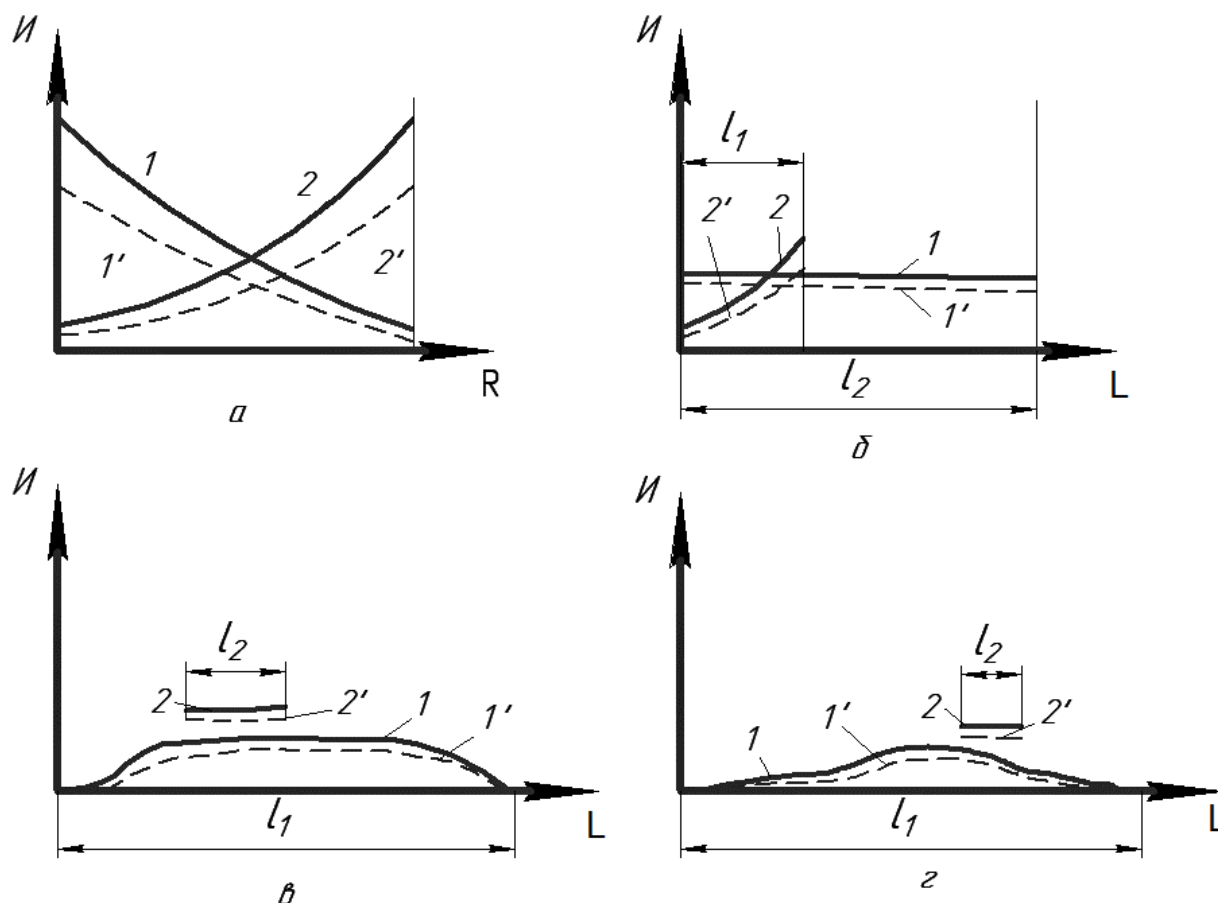


Рисунок 1 Схема распределения износов поверхностей трения для сопрягаемых деталей:
а — подгруппы 1А; б — подгруппы 2А; в — подгруппы 3А; г — подгруппы 3Б

В 8-ю группу входят подвижные и неподвижные сопряжения деталей, контактирующие через эластичную среду. В случае если одним из контактирующих тел является эластомер, обладающий способностью к эластической деформации, добавляется дополнительный (гистерезисный) компонент, вносящий вклад в процессы взаимодействия поверхностей трущихся тел. Для пар трения, в которых одним из контактирующих тел является эластомер, характерно эластогидродинамическое или вязкоупругое трение, если в качестве одного из элементов пары трения используются эластомеры. В качестве примера можно привести герметизирующие устройства, а также различные запорные устройства. Например, важной задачей является обеспечение высокой степени герметичности и надежности манжетных уплотнений валов при давлении жидкостей выше 5÷10 МПа и скорости скольжения более 10 м/с, а для торцовых уплотнений — при удельном давлении более 20 МПа и скорости скольжения более 40 м/с.

В 9-ю группу входят запорные и регулирующие устройства, работающие в режиме замыкания и размыкания и предназначенные для перекрытия потоков среды. *Краны* (шаровые и конусные), у которых запирающий или регулирующий элемент, имеющий форму тела вращения или его части, поворачивается вокруг собственной оси, произвольно расположенной по отношению к направлению потока рабочей среды. *Клапаны* (вентили), у которых запирающие элементы (тарельчатые (золотниковые) или конические) перемещаются параллельно оси потока рабочей среды. *Задвижки*, у которых запирающий или регулирующий элемент пе-

ремещаются перпендикулярно оси потока рабочей среды. Клиновые задвижки с двухдисковым или упругим клином. *Дисковые затворы*, у которых запирающий или регулирующий элемент имеет форму диска, поворачивающегося вокруг оси, перпендикулярной или расположенной под углом к направлению потока рабочей среды.

В 10-ю группу включены электрические контакты, которые могут быть разрывными, скользящими и неподвижными. Электрокоррозионное изнашивание происходит при прохождении через контакт поверхностей трения электрического тока. Особую сложность представляет работа скользящих контактов. Одновременное действие механических, тепловых и электрических факторов приводит к существенному изменению свойств контактирующих материалов и их фрикционно-износостойких характеристик.

В 11-ю группу следует выделить специальные сопряжения, работающие в условиях трения в вакууме, высоких и низких температур и пр. Особую проблему представляет обеспечение работоспособности узлов сухого трения, работающих без жидкой и пластичной смазки. Это обусловило создание твердых смазывающихся и самосмазывающихся материалов и покрытий. Для повышения долговечности смазывающие покрытия наносят на деталь, имеющую меньший путь трения скольжения. Возможно создание конструкций с непрерывно возобновляющимися покрытиями с ротационным способом подачи твердой смазки.

Примеры типовых деталей машин с различными условиями изнашивания приведены в таблице 2, а для машин металлургического комплекса — в таблице 3.

Таблица 2

Примеры типовых деталей машин с различными условиями изнашивания

Группа	Детали типовые и машин других отраслей
1А	Осевые подшипники скольжения; шестеренчатые насосы (торцовые поверхности шестерен и боковые стенки корпуса насоса); конические тормоза и фрикционные муфты; торцевые уплотнения и пр.
1Б	Запорные прецизионные пояски деталей запорной арматуры; шаровые краны; диски фрикционных муфт; торцевые уплотнения; конусные краны и др.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Продолжение таблицы 2

Группа	Детали типовые и машин других отраслей
2А	Колодочные тормоза с жестким закреплением колодки; ходовой винт-гайка; шестеренчатые насосы (контакт головок зубьев и корпуса насоса); контакт заготовок с инструментом дорнования и др.
2Б	Вал-подшипник скольжения; осевые опоры скольжения с самоустанавливающимися несущими поверхностями (колодками); колодочные тормоза с самоустановкой колодок; круговые направляющие скольжения при эксцентричной нагрузке; центробежная колодочная муфта; тормозные диски и др.
3А	Золотниковые пары в гидрораспределителях; поршневые кольца-гильзы цилиндра; линейные подшипники скольжения и др.
3Б	Пластинчатый насос; поступательные направляющие скольжения; кулиса — камень; пластины — корпус и пластины — ротор в пластинчатых насосах и гидромоторах; пазы полумуфт и выступы промежуточного диска крестовых муфт; пружинно-кулачковая предохранительная муфта и др.
4А	Зубчатое зацепление; кулачок — толкатель; шестеренчатые насосы (зубья шестерен) и др.
4Б	Колесо — рельс; подшипники и направляющие качения; обгонная фрикционная роликовая муфта; фрикционные катки; шариковый винт и др.
5А	Режущий инструмент с жесткой установкой; зуб ковша экскаватора; контакт заготовок с инструментом при волочении, экструзии, дорновании; лопасти мешалок и пр.
5Б	Лемехи плугов; плавающий режущий инструмент; дробилки молотковые и роторные; струйно-абразивная обработка и др.
6	Посадки подшипников на вал или в корпус; соединение бронзового венца червячного колеса со стальной ступицей; поршневые пальцы; сопряжения поверхностей валов со ступицами лопаток турбин, компрессоров бандажей железнодорожных колес, импеллера с валом в химическом реакторе и т. д.; клиновые, заклепочные, штифтовые и др. соединения; шлицевые, шпоночные сопряжения; плавающие опоры; поверхности контакта толкателей с заготовками в металлургических печах и пр.
7	Взаимодействие инструментов с обрабатываемыми материалами при прокатке, штамповке, притирка (притир — абразивная среда — деталь); конусные дробилки; щековые дробилки; валковые дробилки и пр.
8	Герметизирующие устройства, ременные передачи, а также различные запорные устройства
9	Краны (шаровые и конусные); клапаны (вентили); задвижки, у которых запирающий или регулирующий элемент перемещается перпендикулярно оси потока рабочей среды; клиновые задвижки с двухдисковым или упругим клином; дисковые затворы
10	Скользящие контакты электрических машин (электрощетки, кольца, токосъемные устройства и пр.); разъёмные контакты
11	Детали пар трения, работающие в вакууме, условиях агрессивной среды, радиационного облучения, при низких или высоких температурах и пр.

Таблица 3

Примеры деталей ММК с различными условиями изнашивания

Группа	Примеры деталей
2А	Тяга-винт ЧГ; винт, гайка ЭП, МНЛЗ, Ш, РКПС; сухарь и вкладыш универсального шпинделя ГЛПС; нажимные винты и гайки ПС; контакт заготовок с инструментом при волочении, экструзии и др.
2Б	Подшипниковые узлы дробилок, СОГ; вкладыши подшипников скольжения открытого типа РКПС
3А	Поршень, кольцо поршня, цилиндр ЭП

Продолжение таблицы 3

Группа	Примеры деталей
3Б	Канатные блоки и канаты ПБВО, СП; желоб для подачи лома ГН; вкладыши универсальных шпинделей механизма поворота КК; механизм центрирования фурмы МПКК; стенки кристаллизаторов МНЛЗ
4А	Коническая зубчатая передача КД; зубчатые шестерни ЧГ, ПСВО, СМ; приводные зубчатые рейки ДЭ; зубчатые шестерни и колеса шестеренных клеток и редукторов ГЛПС; зубчатые рейки рычажного печного кантователя
4Б	Опорные ролики ШМ, БСО, ПСВО; зубья звездочек, втулки, валики, ролики, оси цепей, звенья цепей ПК; звенья затравки МНЛЗ; ролики АКОМ; ходовые колеса ПБВО, ПСВО; скаты скипов СП; опорные ролики ЗУДП; станинный ролик АН; опорные ролики СМ; ходовые ролики, направляющие МПКК; ролики проводок и рольгангов МНЛЗ; опорные и упорные ролики, ролики каретки ДЭ; ходовые ролики ФП; ходовые колеса ЗМП; ролики ПМ; ролики рольгангов; фрикционные толкатели, опоры кольцевых нагревательных печей
5А	Сверло МВЧЛ; ножи АЛН, ГН, МНЛЗ; ножи летучих ножниц; ножницы; диски дисковых ножниц
6	Трефовые шпиндели ГЛПС
7	Подвижные и неподвижные щеки ЩД; конический и рабочий корпусы КД; бандажи валков МВД; диски ВГ; кольцевая матрица, пресс-штемпель, трамбовки ПБСт; валки РКПС; прошивные валки и др.
8	Ролики ЛК; механизмы уплотнения вращающихся печей
9	Контактные поверхности конуса с чашей, тарели и седла ЗУДП; захваты МНЛЗ
10	Хомуты зажима электрода ДЭ; щеки зажимов электродов ФП

В таблице использованы следующие обозначения: АКОМ — агломерационные и конвейерные обжиговые машины; АН — аллигаторные ножницы для разделки крупногабаритного лома; БСО — барабанные смесители и окомкователи; ВалГ — валковые грохоты; ВибГ — вибрационные грохоты; ВСтД — вальцовые стружкодробилки; ГЛПС — главные линии прокатных станов; ГН — гидравлические ножницы; Д — дробилка; ДЭ — дуговые электропечи; ЗМП — завалочные машины печей; ЗУДП — загрузочные устройства доменной печи; КД — конусная дробилка; КК — кислородные конвертеры; ЛК — ленточный конвейер; МВД — двух- и четырехвалковые дробилки; МВЧЛ — машины для вскрытия чугунной летки; МППК — машины для подачи кислорода в конвертер; МСтД — молотковые стружкодробилки; НДП — ножницы и дисковые пилы; ОЗД — одновалковые зубчатые дробилки; ПБВО — передвижные башенные вагоноопрокидыватели; ПБСт — прессы для брикетирования стружки; ПК — пластинчатые конвейеры; ПМ — правильные машины; ПС — прошивные станы; ПСВО — передвижные и стационарные вагоноопрокидыватели; ПУ — подшипниковые узлы; РКПС — рабочие клетки прокатных станов; СМ — стационарные миксеры; СОГ — самобалансные откатные грохоты; СП — скиповые подъемники; СтДА — стружкодробильные агрегаты; УКЗУ — уравнивательные клапаны загрузочного устройства; ФП — ферросплавные печи; ФСтД — фрезовые стружкодробилки; ЧГ — чашевые грануляторы; Ш — шлаковозы; ЩД — щековая дробилка; ЭП — электропушки.

Выводы:

1. Систематизация и классификация деталей машин, их сопряжений и узлов трения по условиям изнашивания стимулирует проведение исследований и разработок более рациональных конструкций и расширяет возможности обмена технологиями и конструкторскими решениями между отраслями, предприятиями и организациями по созданию и применению перспек-

тивных конструкций, технологиями их упрочнения и восстановления.

2. Для деталей с неравномерным износом поверхностей трения важное значение приобретает выбор и разработка методов и средств измерения локального износа. В конструкциях деталей при необходимости для оценки распределения износа следует предусматривать соответствующие точечные измерительные базы.

Библиографический список

1. Гребеник, В. М. Повышение надежности металлургического оборудования [Текст] : справочник / В. М. Гребеник, А. В. Гордиенко, В. К. Цапко. — М. : Металлургия, 1988. — 688 с.
2. Золотарев, А. В. Характерные дефекты деталей металлургического оборудования и технологическое обеспечение их ремонта на примере машин непрерывной разливки стали [Текст] : справочник / А. В. Золотарев, А. И. Кондаков // Инженерный журнал. — 2013. — № 11. — С. 38–42.
3. Восстановление деталей машин [Текст] : справочник / Ф. И. Пантелеенко и др. — М. : Машиностроение, 2003. — 673 с.
4. Ловчиновский, Э. В. Эксплуатационные свойства металлургических машин [Текст] / Э. В. Ловчиновский, В. С. Вагин. — М. : Металлургия, 1986. — 160 с.
5. Кондаков, А. И. Модификация маршрутных технологических процессов изготовления деталей [Текст] : справочник / А. И. Кондаков, А. В. Золотарев // Инженерный журнал. — 2010. — № 9. — С. 8–12.
6. Кондаков, А. И. Автоматизация управления ресурсами при ремонте деталей металлургического оборудования [Текст] : справочник / А. И. Кондаков, А. В. Золотарев // Инженерный журнал. — 2013. — № 7. — С. 35–39.
7. Золотарев, А. В. Научно-методическая база технологического обеспечения эксплуатационных свойств роликов установок непрерывной разливки стали при их ремонте [Текст] : справочник / А. В. Золотарев // Инженерный журнал. — 2014. — № 12. — С. 39–45.
8. Основы трибологии (трение, износ, смазка) [Текст] / Э. Д. Браун, Н. А. Буше и др. ; под ред. А. В. Чичинадзе. — М. : Наука и техника, 1995. — 778 с.
9. Браун, Э. Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах [Текст] / Э. Д. Браун, Ю. А. Евдокимов, А. В. Чичинадзе. — М. : Машиностроение, 1982. — 191 с.
10. Лецинский, Л. К. Слоистые наплавленные и упрочненные композиции [Текст] / Л. К. Лецинский, С. С. Самотугин. — Мариуполь : Новый мир, 2005. — 392 с.
11. Проников, А. С. Надежность машин [Текст] / А. С. Проников ; под ред. А. А. Смирнова. — М. : Машиностроение, 1978. — 590 с.

© Вишнеvский Д. А.© Петров П. А.© Харламов Ю. А.© Подгорный В. Ю.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ГЭМиО ДонГТИ Корнеевым С. В.,
д.т.н., проф., зав. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Еронько С. П.*

Статья поступила в редакцию 24.06.2021.

PhD in Engineering Vishnevskiy D. A., PhD in Engineering Petrov P. A., Doctor of Technical Sciences Kharlamov Yu. A., Podgorniy V. Yu. (DonSTI, ALchevsk, LPR)
CLASSIFICATION OF MACHINE PARTS BY WEAR CONDITIONS

The article develops a classification of machine parts depending on the friction conditions of the mating surfaces, provides examples of parts and assemblies for each group and subgroup. Schemes of wear distribution of the friction surfaces are given.

Key words: machine parts, wear conditions, tribology, restoration of parts.

УДК 621.184.85, 629.048.4, 697.92

к.т.н. Ткачѳв М. Ю.

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

ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЭВАКУАЦИИ ГАЗОПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ

Рассмотрена конструктивная схема и методика расчета энергосиловых параметров системы эвакуации газопылевых выбросов от источников их образования, состоящей из 3-х узлов безлопастного вентилятора, принцип действия которых основан на эффектах Коанда и торнадо. Полученные зависимости позволяют определить скорости течения исходных и индуцированного вихревыми кольцами газоздушных потоков, распределение давления внутри и вне сечения формируемых вихрей, а также обеспечиваемые системой расходы газоздушной смеси.

Ключевые слова: безлопастный вентилятор, эффект Коанда, вихрь Рэнкина, теория вихревого движения, скорость, давление, расход.

Работа машин и механизмов, реализующих современные производственные процессы, протекает в интенсивных режимах и сопровождается выделением значительного количества вредных веществ в виде паров, пылевидных частиц и различных газов от них. Данные вещества, в частности оксиды азота, углерода, серы и т. п., распространяясь в объеме помещений, зданий и сооружений, вызывают изменение состава воздушной среды и тем самым представляют опасность для здоровья человека, а также оказывают отрицательное влияние на производительность его труда. Для исключения вредного воздействия на атмосферу производственных помещений и создания благоприятных условий труда, которые соответствовали бы санитарно-гигиеническим нормативам, на рабочих местах внутри них используют вентиляцию.

Создание конструктивно простого и высокоэффективного с энергетической точки зрения оборудования в этой области является актуальной задачей. Частично ее решение было достигнуто, в частности, при разработке узла безлопастного вентилятора, предназначенного для эвакуации пылегазовых образований от источников их происхождения [1–3], в основе принципа действия которого лежат аэродинамические эффекты Коанда и торнадо. Актуальным

направлением этих исследований [4] является дальнейшее совершенствование концепции построения систем данного класса и обоснование их рациональных конструктивных и энергосиловых параметров для устранения присущих им недостатков, среди которых наибольшее распространение получили нерациональность траекторий воздушных потоков, обратный ток струй и образование застойных зон.

Целью данной работы является разработка системы эвакуации газопылевых выбросов за счет новой структурной взаимосвязи входящих в состав компонентов — узлов безлопастных вентиляторов, — направленная на расширение функциональных возможностей, повышение показателей ее работы, в частности расширение рабочей зоны.

Задачей данной работы являлось обоснование аэродинамических характеристик системы эвакуации газопылевых выбросов новой конструкции.

Объект исследования — процесс индуцирования системой устойчивого газоздушного потока заданной конфигурации замкнутыми вихревыми кольцами входящих в ее состав компонентов с учетом положений теории вихревого движения.

Предмет исследования — аналитическое и эмпирическое обоснование методики определения энергосиловых параметров

системы — скорости течения газозвуш-ных потоков, распределения давления внутри и вне сечения формируемых вихрей, а также исходного и индуцированного системой расходов газозвушной смеси.

Узел безлопастного вентилятора (рис. 1, 2) [1] включает подсистему вытяжки, образованную полыми сегментами 1, прикрепленными посредством кронштейнов 2 к круглым фланцам 3 несущего кольца 4 с возможностью относительного фиксированного поворота в радиальной плоскости и сообщаемыми посредством гибких рукавов 5 с полостью торообразной газораспределительной камеры 6, которая размещена концентрически относительно несущего кольца и снабжена подводным патрубком 7.

На входе подсистемы, образованной полыми сегментами 1 со щелевым соплом и поверхностью Коанда, размещена подсистема завихрения потоков, включающая полые сегменты 8, закрепленные последовательно по окружности на несущей шайбе 9 в плоскости, перпендикулярной ее продольной оси. Полости сегментов 8 посредством трубопроводов 10 сообщаются с торообразной камерой 11, имеющей подводный патрубок 12.

Принцип работы безлопастного вентилятора следующий. При отдельной подаче сжатого воздуха через подводные патрубки 7 и 12 соответственно в газораспределительные камеры 6 и 11 он по гибким рукавам 5 и трубопроводам 10 будет одновременно поступать в полости сегментов 1, образующих горловину, и сегментов 8, размещенных по окружности на несущей шайбе 9. Воздух, истекающий с большой скоростью из щелевых сопел сегментов 1, возбуждает первичные газовые потоки, направленные по поверхностям Коанда, которые создают зону пониженного давления, благодаря чему воздушные массы, находящиеся перед горловиной, всасываются в нее и выбрасываются вперед по ходу потока. Скорость этого потока можно регулировать с помощью изменения фокусировки

горловины путем поворота и последующей фиксации под оптимальным углом кронштейнов 2 с сегментами 1 относительно круглых фланцев 3 несущего кольца 4. В свою очередь, воздух, истекающий из щелевых сопел сегментов 8, огибает их внутренние поверхности Коанда и закручивает движущийся в горловину поток, возбуждая эффект торнадо, усиливающий приток к горловине вентилятора воздушных масс из окружающего пространства. При этом максимальная производительность вентилятора достигается при оптимальном соотношении расходов воздуха, отдельно подаваемого к подсистемам вытяжки и завихрения потоков, равном 1,5:1.

Узел безлопастного вентилятора в сравнении с известными аналогами обеспечивает возможность настройки технических характеристик в зависимости от конкретных условий его применения, а также повышение обеспечиваемого насосного эффекта [2, 4–7].

Для проверки правильности принятых технических решений при разработке узла безлопастного вентилятора были проведены эмпирические исследования на его физической модели (рис. 3), выполненной в масштабе 1:48, направленные на фиксацию картин образования генерируемого им устойчивого вихря (рис. 4), а также распределение горизонтальной и вертикальной компонент скорости течения газозвушных потоков в нем с использованием тензометрического метода исследований (рис. 5, 6).

Эксперименты проводились с соблюдением геометрического и динамического подобия, что подтверждалось равенством критериев Ньютона, Фруда и Струхалья для натурального образца и его модели, при давлении в узле вентилятора, равном $P = 0,1$ МПа, площади щелей сегментов подсистем вытяжки и завихрения, соответственно составляющих $6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ и $9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. При этом расход сжатого воздуха, подводимого к указанным подсистемам, составлял $Q_{исх}^{\uparrow} = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ и $Q_{исх}^{\leftarrow} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

Анализ полученных данных позволил сделать вывод о соответствии параметров полученного газозвдушного потока основ-

ным положениям теоретического описания комбинированного вихря, примыкающего к свободной поверхности (вихря Рэнкина).

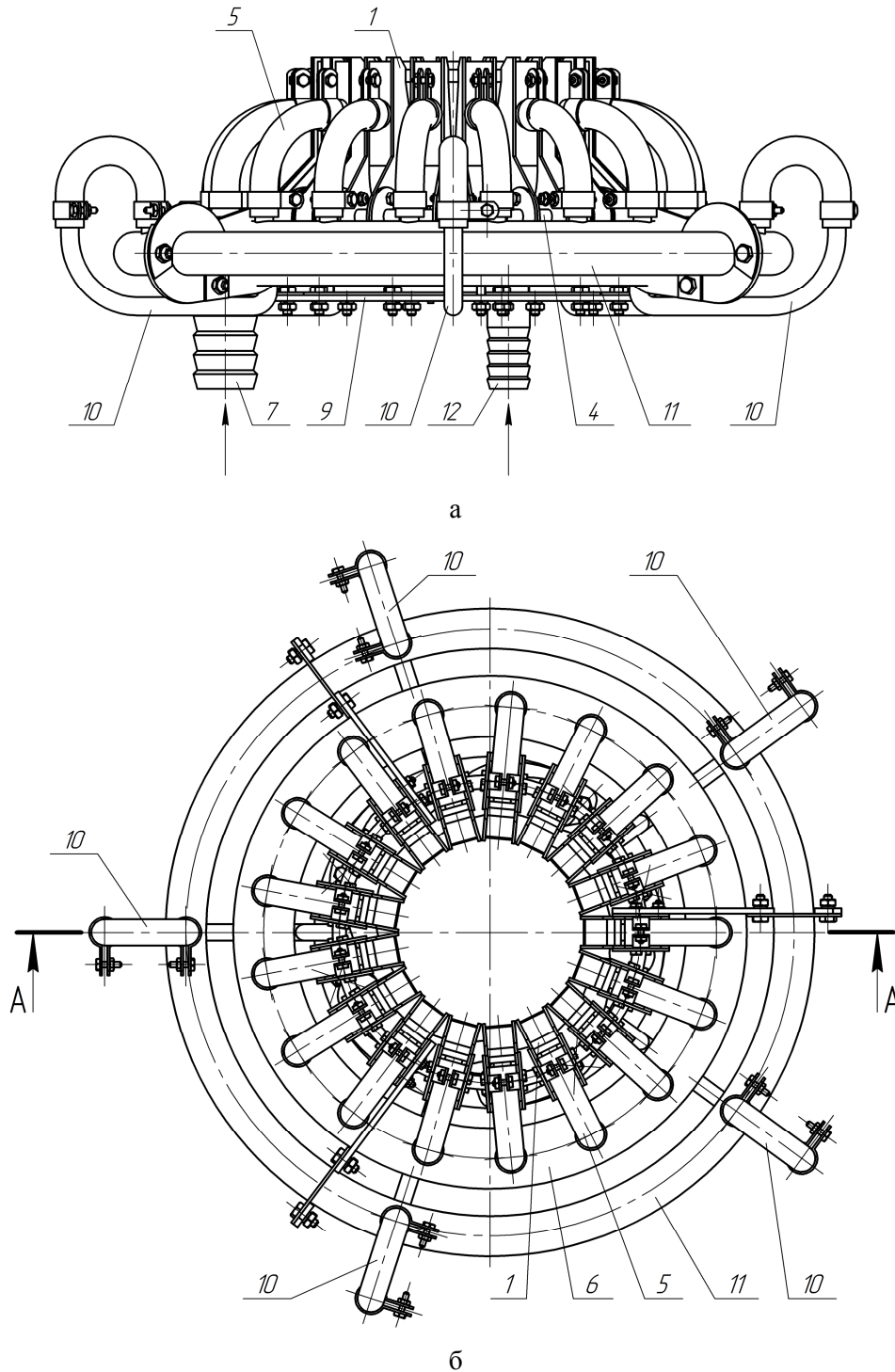


Рисунок 1 Узел безлопастного вентилятора: а — фронтальный вид; б — вид сверху

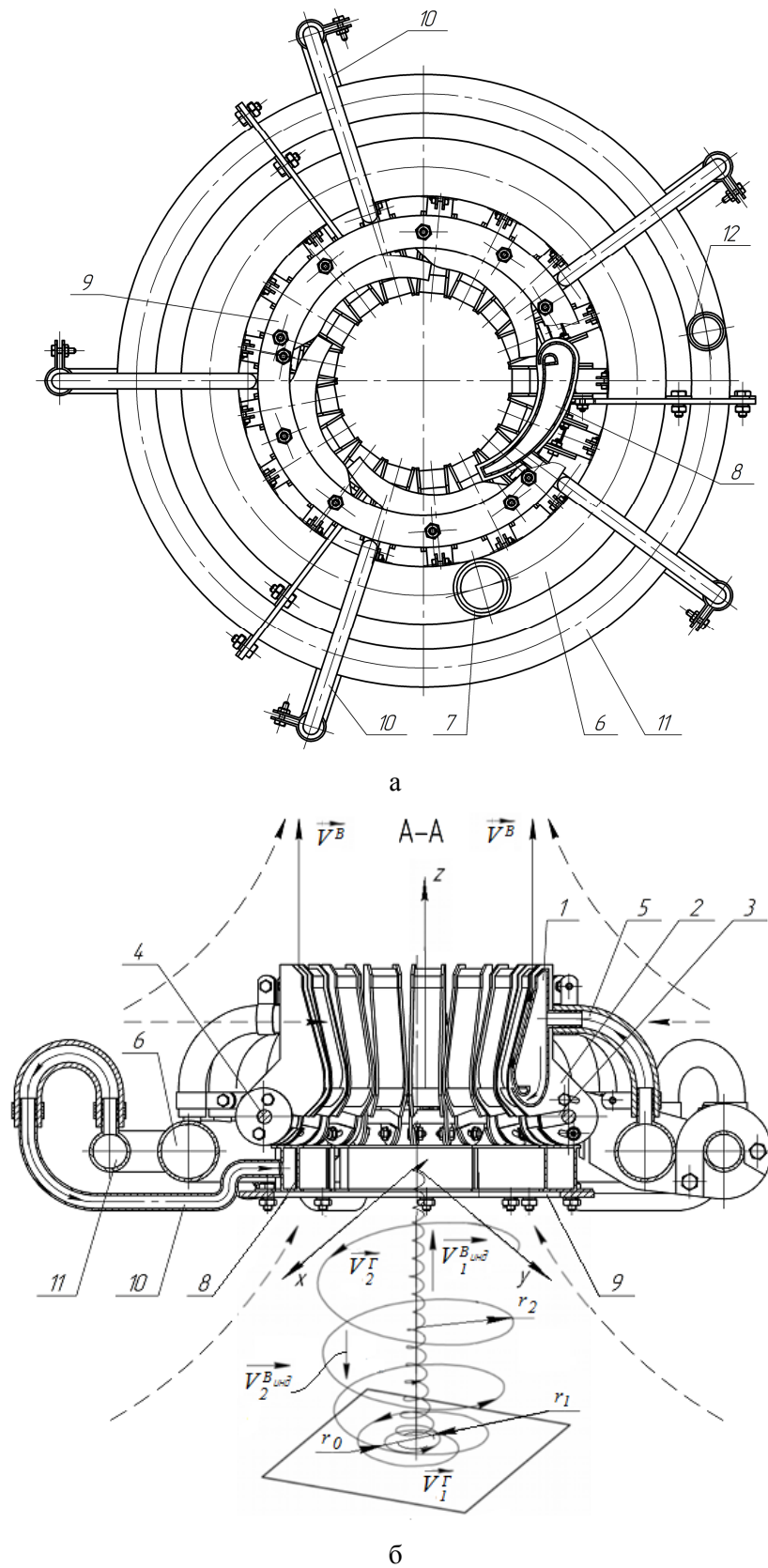


Рисунок 2 Узел безлопастного вентилятора: а — вид снизу; б — разрез А-А на рисунке 1, б со схемой распределения скоростей течения исходного и индуцированного газоздушных потоков

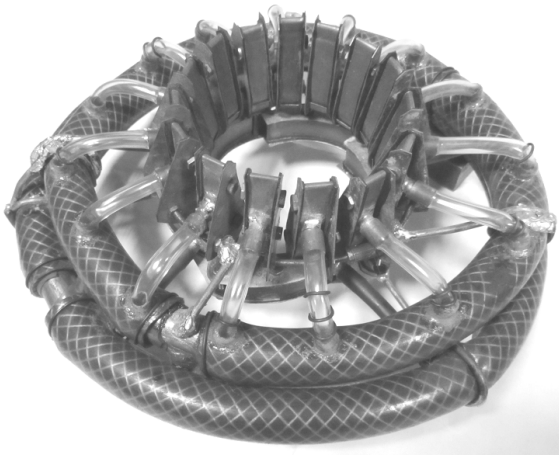


Рисунок 3 Физическая модель узла
безлопастного вентилятора

Линии тока в зоне работы узла представляют собой вложенные спирали (рис. 2). Двигаясь вниз (в сторону, противоположную положительному направлению вертикальной оси) по внешней спирали частица газа приближается к оси симметрии течения, при этом ее вертикальная и окружная компоненты поля скорости возрастают. Достигнув непроницаемой плоскости, частица переходит на внутреннюю спираль и начинает подниматься, удаляясь от плоскости, при этом ее вертикальная и окружная компоненты поля скорости убывают. Движение газоздушного потока является обратимым, в силу этого возможна противоположная картина движения. Направление закрутки потока также может быть произвольным в силу исходного допущения об осесимметричности движения.

Обоснование аэродинамических характеристик узла безлопастного вентилятора проводится при рассмотрении вихря как совокупности частиц, вращающихся по закону твердого тела с угловой скоростью ω [3]. Вне окружности r_0 (ядра вихря) завихренность равна нулю и вихрь называется свободным (при $r_1 < r_0$ вихрь называется вынужденным). Описание параметров вихря производится в соответствии с классическими положениями аэрогидромеханики с использованием теории Стокса (при опре-

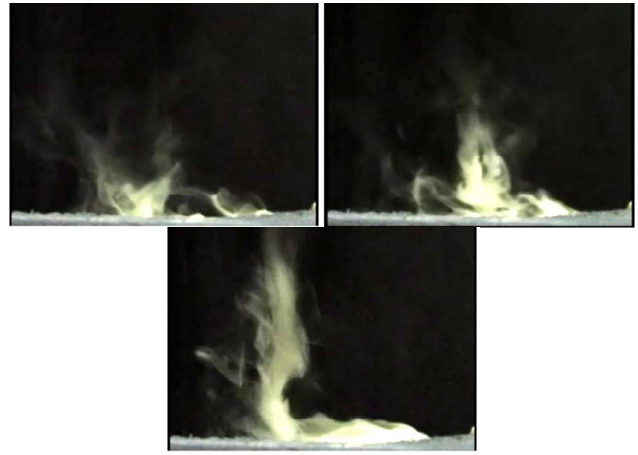


Рисунок 4 Характерные картины образования
устойчивого вихря, генерируемого узлом
безлопастного вентилятора

делении влияния вихря на окружающую среду), уравнений Эйлера (при установлении распределения значений давления внутри и вне его сечения), обобщенной формулы Био — Савара (для определения индуцируемой вихрем скорости).

При расчете распределения давления внутри и вне плоского вихря, генерируемого подсистемой завихрения узла (рис. 7), принимаются допущения, что он находится в первоначально невозмущенной среде. На границе ядра вихря при $r_i = r_0$ давление внутри равно давлению снаружи. При $r_i > r_0$ поток является потенциальным

$$V_i = \frac{\omega r_0^2}{r_i}, \quad (1)$$

$$p_i = -\frac{\rho \omega^2 r_0^4}{2r_i^2} + p_\infty, \quad (r_0 < r_i < \infty), \quad (2)$$

где V_i , p_i — значение скорости и давления соответственно на заданном от оси расстоянии r_i ; ρ — плотность газоздушной смеси; p_∞ — давление на бесконечности, принимаемое в расчетах равным атмосферному $p_\infty = p_{атм}$. Отсюда следует, что при приближении к вихрю (при уменьшении величины r_i) давление непрерывно убывает и всюду вне вихря меньше давления p_∞ в свободной окружающей среде.

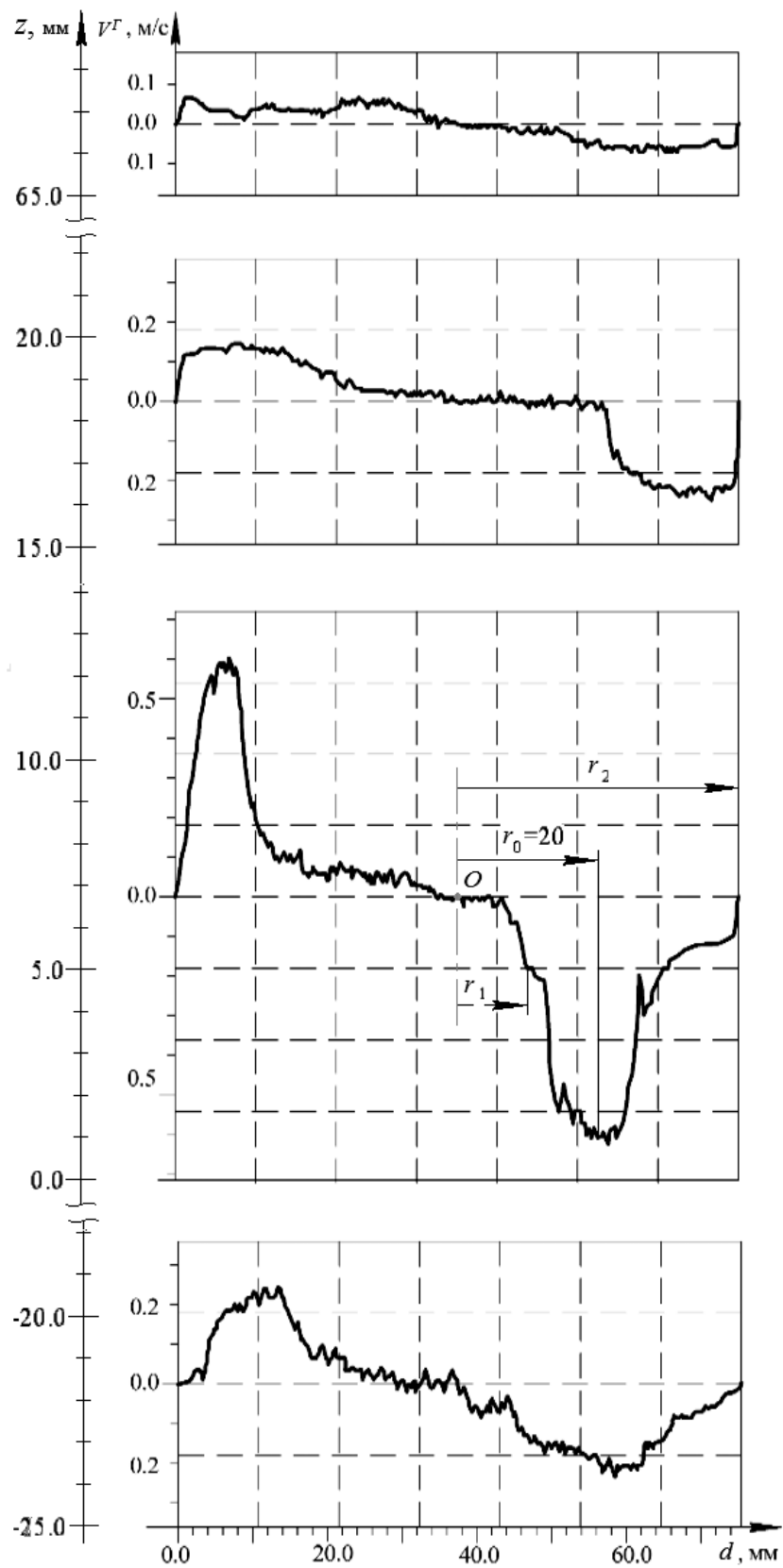


Рисунок 5 Распределение горизонтальной компоненты скорости течения газоздушных потоков в модели узла безлопастного вентилятора

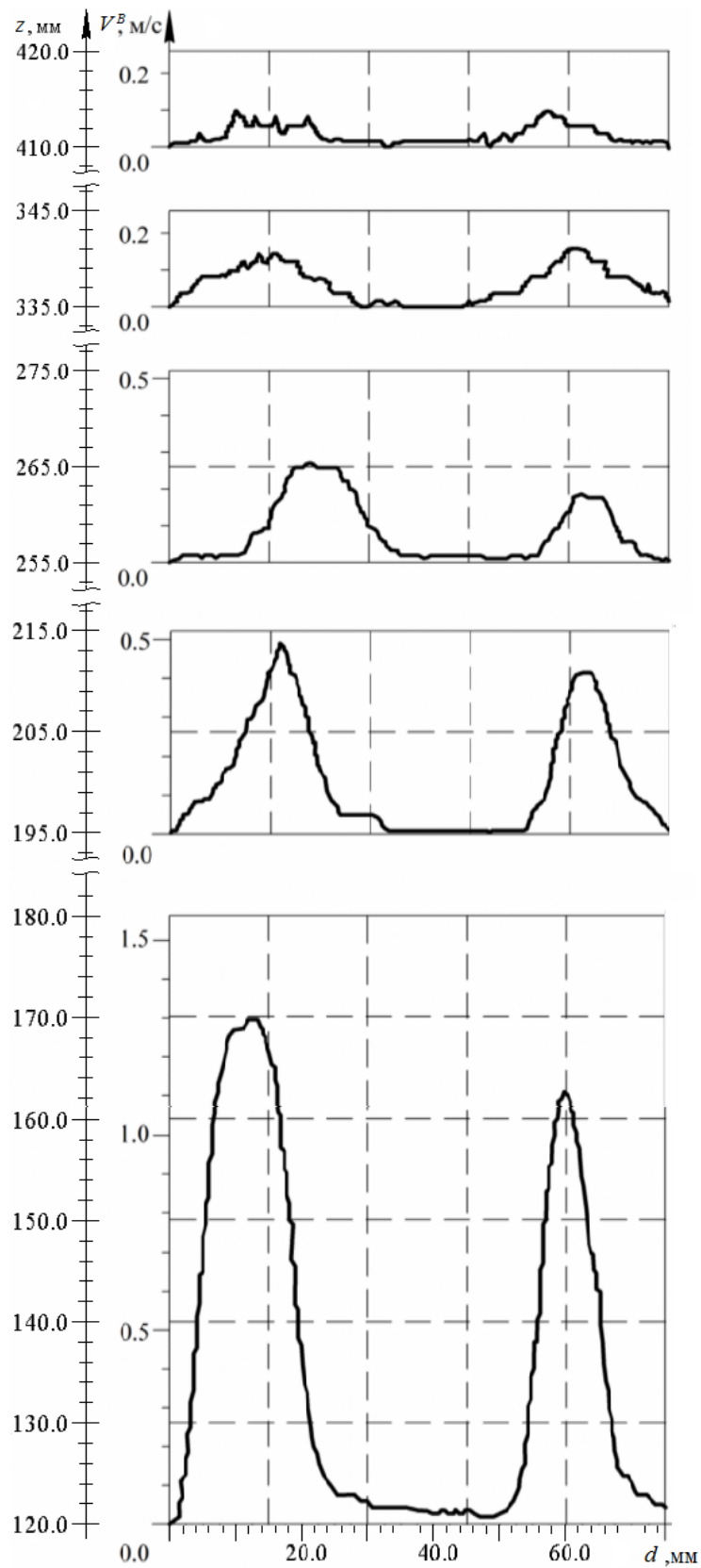


Рисунок 6 Распределение вертикальной компоненты скорости течения газозвудушных потоков в модели узла безлопастного вентилятора

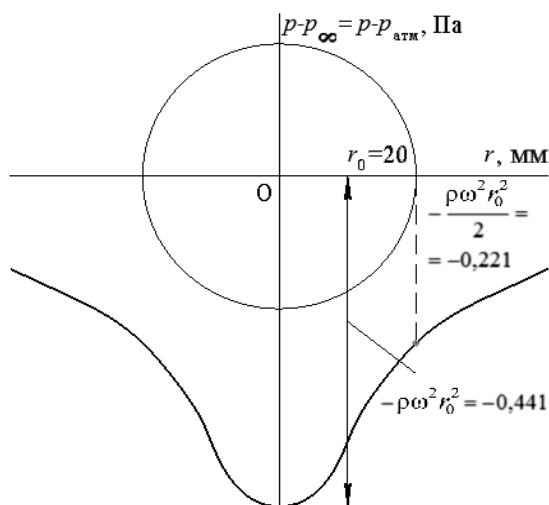


Рисунок 7 Распределение давления внутри и вне сечения цилиндрического вихря

При $r_i < r_0$ внутри ядра вихря поток непотенциальный. Изменение давления при этом описывается уравнением

$$p_i = \frac{\rho\omega^2}{2}(r_i^2 - 2r_0^2) + p_\infty. \quad (3)$$

Таким образом, в поле вихря давление убывает при приближении к оси, причем наиболее сильно — в его ядре.

Скорость, индуцируемая в вертикальной плоскости вихревым кольцом, имеющим радиус r_i , в соответствии с формулой Био — Савара, составляет

$$V_i^{B_{und}} = \frac{\Gamma_i r_i^2}{2(r_i^2 + z_i^2)^{3/2}}, \quad (4)$$

где Z_i — координата течения газовой воздушного потока; Γ_i — циркуляция вихря,

$$\Gamma_i = \frac{V_{li}^\Gamma 2\pi r_0^2}{r_i} \quad (\text{при } r_i < r_0); \quad (5)$$

$$\Gamma_i = V_{2i}^\Gamma 2\pi r_i \quad (\text{при } r_i > r_0). \quad (6)$$

Таким образом, при $r_i < r_0$

$$V_{li}^{B_{und}} = \frac{V_{li}^\Gamma 2\pi r_i^2 r_0^2}{2r_i \sqrt{(r_i^2 + z_i^2)^3}}, \quad (7)$$

при $r_i > r_0$

$$V_{2i}^{B_{und}} = \frac{V_{2i}^\Gamma 2\pi r_i^3}{2\sqrt{(r_i^2 + z_i^2)^3}}. \quad (8)$$

Результирующее значение скорости на уровне подсистемы завихрения узла определяется из выражения

$$\sum V_i^I = \sqrt{(V_i^{B_{und}})^2 + (V_i^\Gamma)^2}. \quad (9)$$

Расход газовой воздушной смеси в зоне индуцированного узлом вентилятора вихревого потока составляет

$$Q_i^I = S_i \sum V_i^I, \quad (10)$$

где S_i — площадь сечения узла, на котором действует значение $\sum V_i^I$.

Учет дополнительно инжектируемых в узел вентилятора за счет эффекта Коанда подсистемой вытяжки объемов Q^{II} учитывается так называемым умножающим эффектом k . Его значение варьируется от 6,5 при $P = 0,1$ МПа до 15 при $P = 0,7$ МПа. Таким образом,

$$Q^{II} = Q_{ucx}^\uparrow k. \quad (11)$$

Результирующее значение скорости $\sum V_i^{II}$ на выходе из подсистемы вытяжки узла вентилятора определяется с учетом скорости, индуцируемой вихревым кольцом $V_{li}^{B_{und}}$ при $z = 65 \cdot 10^{-3}$ м (для его физической модели), а также осредненного значения вертикальной компоненты скорости $\overline{V^B}$ воздушного потока, истекающего из соответствующих сегментов:

$$\sum V_i^{II} = \sqrt{\left(\overline{V^B}\right)^2 + (V_{li}^{B_{und}})^2}. \quad (12)$$

Значение динамического давления, генерируемого каждой из подсистем вентилятора, составляет

$$P_{дин}^j = \frac{\rho (\sum V_i^j)^2}{2}. \quad (13)$$

При обосновании энергосиловых параметров узла безлопастного вентилятора по вышеизложенной методике и использовании данных, полученных эмпирическим путем, необходимо применять масштабные множители линейных размеров ($a_l=48$) и скорости ($a_v=a_l^{0,5}=6,93$), значения которых получены в соответствии с критериями подобия [8].

Предлагаемая для расширения функциональных возможностей узла безлопастного вентилятора (увеличения рабочей зоны и повышения показателей его работы) конструкция системы эвакуации газопылевых выбросов (рис. 8) состоит из объединенных в одном корпусе 2-3-х узлов безлопастных вентиляторов 1, имеющих диаметр d и концентрически расположенных по окружности радиуса r_b .

В соответствии с положениями теории вихревого движения [3] и условием равной циркуляции потока в характерных точках представленной на рисунке 8 схемы, значение скорости сформированного в горизонтальной плоскости потока при $R_0 < R_i < r_e$ ($r_i < r_0$) составляет

$$V_{li}^{\Gamma} = \frac{V_{li}^{\Gamma} r_0^2 R_i}{r_i R_0^2}, \quad (14)$$

а при $R_0 + 2r_0 < R_i < R_2$ ($r_i > r_0$)

$$V_{li}^{\Gamma} = \frac{V_{2i}^{\Gamma} r_i}{R_i} \rightarrow 0. \quad (15)$$

Максимальное значение эта величина принимает в точках A, B, C , где проходит граница ядра R_0 создаваемого узлами безлопастных вентиляторов вихря

$$V_{I \max}^{\Gamma} = \frac{V_1^{\Gamma} r_0}{R_0}, \quad (16)$$

$$R_0 = d - r_0 = r_e - r_0 = 3r_0, \quad (17)$$

при условии, что $r_e = d$.

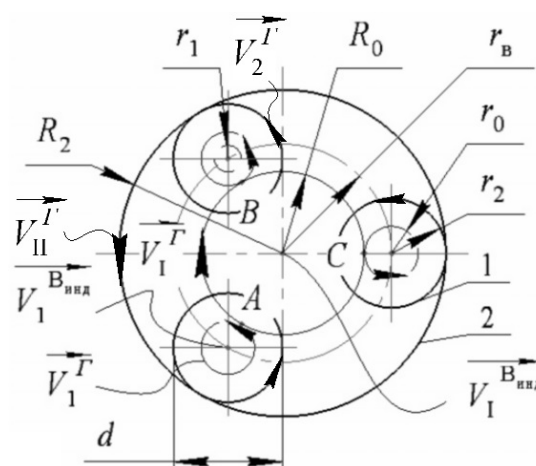


Рисунок 8 Схема к определению характеристик индуцированного системой устойчивого газоздушного потока

В соответствии с формулами (4), (7) и (16), скорость восходящего потока, индуцируемого при этом вихревым кольцом, имеющего радиус R_0 , в вертикальной плоскости

$$V_{li}^{B_{инд}} = \frac{27\pi r_0^3 V_{I \max}^{\Gamma}}{\sqrt{(9r_0^2 + z_i^2)^3}}. \quad (18)$$

Суммарное значение скорости восходящего потока, его динамическое давление и обеспечиваемый центральной частью системы расход соответственно составляют

$$\sum V_{li} = \sqrt{(V_{li}^{B_{инд}})^2 + (V_{I \max}^{\Gamma})^2}, \quad (19)$$

$$P_{I \text{дин}} = \frac{\rho (\sum V_{li})^2}{2}, \quad (20)$$

$$Q_I = 9\pi r_0^2 \overline{\sum V_I}, \quad (21)$$

где $\overline{\sum V_I}$ — осредненное значение скорости.

Таким образом, основные параметры системы эвакуации газопылевых выбросов, состоящей из 3-х узлов безлопастных вентиляторов, с учетом нисходящего и восходящего в вихре потоков определяются по следующим зависимостям

$$\sum V_{сист} = \sum V_i^{II} + \sum V_{II}, \quad (22)$$

$$P_{дин.сист} = P_{дин}^j + P_{Iдин}, \quad (23)$$

$$Q_{сист} = 3(Q_i^I + Q^{II}) + 2Q_I. \quad (24)$$

По разработанной методике были рассчитаны параметры опытно-промышленного образца системы эвакуации газопылевых выбросов, для обеспечения сжатым воздухом которой предусмотрены три центробежных турбогенератора серии TRX 180 со следующими характеристиками: мощность $N=1800$ кВт, обеспечиваемый расход $Q=5,55$ м³/с ($Q_{исх}^{\uparrow}=3,33$ м³/с и $Q_{исх}^{\leftarrow}=2,22$ м³/с), давление $P=0,69$ МПа [9]. Каждый из узлов безлопастных вентиляторов, имеющих диаметр горловины, образованной сегментами подсистемы вытяжки, равный 3,6 м, обеспечивает на выходе движение потока со скоростью 85 м/с, расходом 455 м³/с и динамическим давлением 2805 Па. При этом глубина рабочей зоны узла по оси z с учетом [6] составляет +70 м, а ее суммарный объем 2850 м³.

С учетом перечисленных выше значений параметров, в соответствии с выражениями (22–24), $\sum V_{сист} = 107$ м/с,

Библиографический список

1. Пат. 2630443 Российская Федерация, МПК F24F7/00, F04D25/00, F04D29/00. Узел безлопастного вентилятора для эвакуации газопылевых выбросов из промышленных агрегатов / Е. Н. Смирнов, С. П. Еронько, М. Ю. Ткачёв, 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.
2. Исследование на физической модели возможности использования принципа вентилятора Дайсона в системах газоотсоса металлургических агрегатов [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачёв, А. С. Сосонкин и др. // *Металлургические процессы и оборудование*. — 2014. — № 2 (36). — С. 51–59.
3. *Аэрогидромеханика* [Текст] / Е. Н. Бондарев, В. Т. Дубасов, Ю. А. Рыжов и др. — М. : Машиностроение, 1993. — 608 с.
4. Ткачёв, М. Ю. Использование энергии вихря для повышения эффективности работы вентиляционных устройств и систем [Текст] / М. Ю. Ткачёв, Е. В. Ошовская // *Донбасс будущего глазами молодых ученых : материалы научно-технической конференции*. — Донецк : ДонНТУ, 2017. — С. 94–98.

$P_{дин.сист} = 3135$ Па, $Q_{сист} = 2570$ м³/с, а глубина рабочей зоны составляет 6595 м³.

Таким образом, разработанная на основании достаточного объема эмпирических исследований методика расчета позволяет с минимальными временными затратами обосновать аэродинамические характеристики и энергосиловые параметры опытно-промышленного образца системы эвакуации газопылевых выбросов, состоящей из 3-х узлов безлопастных вентиляторов, в основе принципа действия которых лежат эффекты Коанда и торнадо, благодаря чему обеспечивается качественная эвакуация пылегазовых образований от источника их происхождения. При этом в соответствии с положениями теории вихревого движения впервые производится учет влияния скорости, индуцированной замкнутым вихревым кольцом, на характеристики генерируемого потока, взаимодействующего с источником пылегазовых образований.

Направлением дальнейших исследований следует считать изучение влияния масштабного фактора на эффективность работы системы в промышленных условиях.

5. Ткачѐв, М. Ю. Сопоставительные исследования эффективности функционирования узла безопасного вентилятора и сопла Лавалья [Текст] / М. Ю. Ткачѐв, М. Ю. Грищук // Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие. В 6 т. Т. 3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов : материалы VI международной научно-практической конференции. — Донецк : ДонНТУ, 2020. — С. 20–24.

6. Разработка конструкции и модельные исследования новой вентиляторной системы проветривания карьеров [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачѐв, Е. Н. Смирнов и др. // Черная металлургия : бюллетень научно-технической и экономической информации. — 2018. — № 1. — С. 26–33.

7. Вараксин, А. Ю. Торнадо [Текст] : монография / А. Ю. Вараксин, М. Э. Ромаи, В. Н. Копейцев. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 344 с.

8. Физическое моделирование технических систем [Текст] : учебное пособие / С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, М. Ю. Ткачев [и др.]. — Донецк : ДонНТУ, 2020. — 259 с.

9. Каталог центробежных компрессоров предприятия DALGAKIRAN KOMPRESÖR [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.dalgakiran.ru/product/centrobezhnyj-kompressor-trx-180-turbokompressor>.

© Ткачѐв М. Ю.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. ММ АДИ ДонНТУ Вовком Л. П.,
к.т.н., доц., зав. каф. ММК ДонГТИ Вишневым Д. А.*

Статья поступила в редакцию 07.05.2021.

PhD in Engineering Tkachov M. Yu. (Automobile and Road Institute of DonNTU, Gorlovka, DPR, mishel-tkachev@ya.ru)

JUSTIFICATION OF ENERGY-POWER PARAMETERS OF THE EVACUATION SYSTEM OF GAS-DUST EMISSIONS

The design scheme and method for calculating the energy-power parameters of evacuation system of gas and dust emissions from the sources of their formation, consisting of 3 sections of a bladeless fan which operating principle is based on the Coanda and tornado effects, is considered. The obtained dependences allow to determine the flow rates of the initial and induced by vortex rings of gas-air flows, the distribution of pressure inside and outside the section of the formed vortices, as well as the flow rates of the gas-air mixture provided by the system.

Key words: bladeless fan, Coanda effect, Rankine vortex, theory of vortex motion, speed, pressure, flow rate.

ТРЕБОВАНИЯ
к рукописям научных статей в сборник научных трудов
государственного образовательного учреждения
высшего образования Луганской Народной Республики
«Донбасский государственный технический институт»

Научные статьи, предоставляемые в редакцию, должны соответствовать требованиям ВАК МОН ДНР (Приложение 1 к правилам формирования в уведомительном порядке перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук (п. 4)) и базовым издательским стандартам по оформлению статей по ГОСТ 7.5–98 «Журналы, сборники, информационные издания».

Сборник научных трудов издаётся не менее 4 раз в год. Сборник формирует информационный отдел: 94204, г. Алчевск, пр. Ленина, 16, ДонГТИ; тел./факс: (06442) 2-68-87, e-mail: info@dstu.education (тема: для редакции сборника научных трудов ГОУ ВО ЛНР «ДонГТИ»); секретарь редакционной коллегии Скомская Светлана Анатольевна.

Сборник содержит следующие разделы: «Науки о земле», «Металлургия и материаловедение», «Машиностроение и машиноведение», «Строительство и архитектура».

Представляемые в статье материалы должны быть актуальными, отвечать новым достижениям науки и техники, иметь практическую значимость, соответствовать направленности сборника и представлять интерес для широкого круга специалистов.

Название статьи должно быть лаконичным и понятным, включать в себя объект и предмет исследований, иметь прямое отношение к области исследований и её результатам.

Обязательные элементы статьи:

- 1) постановка проблемы, обоснование её актуальности;
- 2) анализ последних исследований и публикаций по данной проблеме, вскрытие их недостатков и противоречий;
- 3) выделение не решённых ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья;
- 4) формулирование цели, идеи, объекта и предмета исследований, постановка задач исследований;
- 5) описание и обоснование принятой методики исследований;
- 6) изложение основного материала теоретических и (или) экспериментальных исследований с обоснованием достоверности полученных научных результатов;
- 7) выводы о научной новизне и практической ценности результатов, направление дальнейших исследований.

По решению редколлегии в каждом номере сборника может быть опубликовано не более одной статьи обзорного характера, включающей большую часть рекомендованных выше основных элементов.

Редакция оставляет за собой право отклонять рукописи обзорного и компилятивного характера с нечётко сформулированными научными результатами, новизна и достоверность которых недостаточно обоснованы.

Результаты работы не должны предоставляться в виде тезисов.

Ответственность за нарушение авторских прав, несоблюдение действующих стандартов и недостоверность приведённых в статье данных полностью несут авторы статьи.

Статья должна сопровождаться:

- внутренней и внешней рецензиями;

– лицензионным договором с автором(и).

Текст статьи предоставляется на электронном носителе и в печатном виде, сопроводительная документация только в печатном виде.

Рекомендуемое количество авторов статьи — до 3-х человек. При необходимости, по решению редколлегии, количество авторов может быть увеличено до 5-ти.

Языки предоставления статей: русский, английский.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Текст рукописи статьи от 5 до 10 страниц в книжной ориентации на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) с полями: верхнее, нижнее — 27 мм; левое, правое — 24 мм. Различать колонтитулы чётных и нечётных страниц: от края до верхнего колонтитула — 2 см; от края до нижнего колонтитула — 2 см. Страницы не нумеруются. Рукопись статьи оформляется с применением редактора **MS Word в формате, полностью совместимом с Word 97–2003**: шрифт — Times New Roman, размер — 12 пт, интервал — одинарный, выравнивание — по ширине, абзацный отступ — 0,5 см.

Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **активирована**. Весь материал подаётся в чёрно-белом оформлении (без градиентов серого или цветовой палитры).

Не допускается использование списков (маркированных и нумерованных) и элементов «Надпись». **Запрещено использование стилей!**

Оформление статей

Статья подаётся отдельным файлом «*Статья.doc*».

УДК проставляется вверху, выравнивание по левому краю, шрифт полужирный, без абзацного отступа. УДК можно определить самостоятельно с помощью классификатора <https://teacode.com/online/udc>. Проверить корректность расшифровки известного УДК можно здесь — <http://scs.viniti.ru/udc/Default.aspx>.

Через один интервал — учёная степень, фамилия, инициалы, разделённые пробелом. С новой строки в круглых скобках через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. Шрифт полужирный, курсив, выравнивание по правому краю, без абзацного отступа.

С новой строки — название статьи. Выравнивание по центру, шрифт Arial, полужирный, видоизменение — все прописные, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца — 12 пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. **Не допускается** набор всего названия заглавными буквами (Caps Lock).

С новой строки — краткая аннотация на языке статьи: размер шрифта — 11 пт, курсив. В аннотации сжато излагается формулировка задачи, которая решена в статье, и приводятся полученные основные результаты.

После аннотации с новой строки — ключевые слова (6–8 слов на языке статьи), курсивом, размером 11 пт, интервал после абзаца — «Авто». Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

С новой строки — текст статьи в **две колонки** одинаковой ширины, промежуток между колонками — 0,5 см.

Слова «рисунок» и «таблица» при упоминаниях в тексте пишутся полностью (пример: «... на рисунке 2 ...»), а в ссылках в конце предложения — сокращённо в скобках (примеры: «... схема инвертора (рис. 2).», «... получены экспериментальные данные (табл. 4).»).

После текста статьи полужирным шрифтом размером 11 пт располагается заголовок «Библиографический список»: интервал перед абзацем — 12 пт, после абзаца — 8 пт, выравнивание по левому краю.

Библиографический список оформляется согласно ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления» размером 11 пт, курсивом и должен быть составлен в порядке упоминания в тексте. Ссылки на литературу в тексте статьи заключаются в квадратные скобки. Рекомендованное количество ссылок — не более восьми источников с датой их издания не ранее чем 20 лет назад.

Оформление аннотаций отдельным файлом

Аннотация и ключевые слова дополнительно подаются на языке статьи отдельным файлом «*Аннотация.doc*», размером шрифта 11 пт.

Учёная степень, фамилия, инициалы оформляются полужирным шрифтом, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю. В круглых скобках курсивом через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора. С новой строки, без абзацного отступа, выравниванием по левому краю — название статьи заглавными буквами.

С новой строки — краткая аннотация курсивом.

С новой строки — ключевые слова курсивом. Фраза «Ключевые слова:» выделяется полужирным начертанием.

Не допускается внедрение в текст аннотации объектов (формул, рисунков и т. д.).

Оформление рефератов отдельным файлом

Реферат подаётся на языке статьи отдельным файлом «*Реферат.doc*»: размер шрифта — 11 пт, без абзацного отступа, выравнивание — по левому краю. Функция «Автоматическая расстановка переносов» должна быть **выключена**.

Фамилия, имя, отчество оформляются полужирным шрифтом.

С новой строки — учёная степень, должность.

С новой строки — название подразделения.

С новой строки через запятую — название организации, название города, страны, e-mail автора.

Через интервал повторить данные для каждого автора.

Через интервал — название статьи (полужирным начертанием).

Через интервал — текст реферата. Реферат объёмом от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель, методика, результаты, научная новизна, практическая значимость. Фразы «**Цель.**», «**Методика.**», «**Результаты.**», «**Научная новизна.**», «**Практическая значимость.**» (для статьи на русском языке); «**Aim.**», «**Technique.**», «**Results.**», «**Scientific novelty.**», «**Practical significance.**» (для статьи на английском языке) размещаются с новой строки и выделяются полужирным начертанием. Реферат не должен повторять название статьи.

Не допускается внедрение в текст реферата объектов (формул, рисунков, и т. д.).

Рисунки

Рисунки вставляются в текст единым объектом и могут быть представлены:

– *растровыми форматами* — gif, tiff, jpg, bmp и им подобными (качество 300 dpi);

– *векторными форматами* — emf, wmf (графики, диаграммы).

Рисунки, выполненные в программах Corel, CAD, Word и др., переводятся в один из описанных выше форматов, предпочтительно векторный.

Графический материал следует располагать непосредственно после текста, в котором он упоминается впервые, или на следующей странице. Все позиции, обозначенные на рисунке, должны быть объяснены в тексте и нанесены слева направо, сверху вниз. Перед рисунком интервал 12 пт. Выравнивание по центру, ширина в одну колонку (большие рисунки располагают на ширину страницы вверху или внизу). Рисунки размещают в тексте (не в таблицах), обтекание рисунка — «в тексте». Все рисунки подаются дополнительно отдельными файлами.

Допускается размещение пояснительных данных под иллюстрацией (подрисуночный текст) с выравниванием по центру, без абзацного отступа, размером 10 пт.

Под каждым рисунком (подрисуночным текстом) располагается надпись в формате «Рисунок № Название» с выравниванием по центру без абзацного отступа, интервалом перед и после абзаца — «Авто», размером шрифта 11пт, с запретом автоматического переноса слов в абзаце. Статья не должна заканчиваться рисунком. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема статьи.

Формулы

Абзац, содержащий формулы, должен иметь следующие параметры: выравнивание по левому краю, без абзацного отступа, интервал перед и после абзаца 6 пт, позиции табуляции — 3,93 см по центру (для расположения формулы) и 7,85 см по правому краю (для расположения номера формулы). Формулы целиком (включая размерности) выполняются с помощью редактора формул **Microsoft Equation 3** или **MathType** математическим стилем, обычное начертание шрифта (нормальный), со следующими размерами:

Full (обычный).....	12 pt
Subscript/Superscript (крупный индекс)	9 pt
Sub-Subscript/Superscript (мелкий индекс)	7 pt
Symbol (крупный символ).....	14 pt
Sub-Symbol (мелкий символ).....	12 pt
Формат	по центру
Междустрочный интервал	200 %

Недопустимо масштабирование и размещение формул в табличном формате. В одном блоке формулы, попадающем на границу колонок, допускается только одна строка (многострочные формулы разбиваются на блоки).

Упоминание элементов формул в тексте статьи также выполняется в редакторе формул.

Двоеточие перед формулой не ставится, независимо от правил пунктуации.

Таблицы

Все таблицы располагаются после упоминания в тексте и должны иметь нумерационный заголовок и название (размер шрифта 11 пт). Нумерационный заголовок (*Таблица 1*) выравнивается по правому краю над таблицей, курсив, интервал перед абзацем — 12 пт. С новой строки помещают название выравниванием по центру, без абзацного отступа, с запретом автоматического переноса слов в абзаце; интервал после абзаца — 6 пт.

Таблица выравнивается по центру контейнера, в книжной ориентации, шириной в 1 колонку (большие таблицы располагаются на ширину страницы 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***Полозов Ю. А., Бизянов Е. Е., Лазебник А. Ю.*ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ТЕХНОГЕННОЙ КАТАСТРОФЫ В РАЙОНЕ ПРОВАЛА
ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА КАЛИЙНОМ РУДНИКЕ 5*Иванов Л. А., Туманов В. В., Савченко А. В.*ОЦЕНКА ГАЗОНОСНОСТИ УГЛЕВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД ПО СВОБОДНОМУ ГАЗУ
В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ 13**МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ***Яковченко А. В., Денищенко П. Н., Кравцова С. И., Ивлева Н. И.*АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ТЕЧЕНИЯ
НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ И МИКРОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ГОРЯЧЕЙ
ДЕФОРМАЦИИ 21*Снитко С. А., Денищенко Н. П., Пилипенко В. В.*АДАПТАЦИЯ МЕТОДА КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА
ПРОКАТКИ ОВАЛЬНОГО РАСКАТА В КРУГЛОМ КАЛИБРЕ 32*Русанова Н. И., Русанов И. Ф.*

РАСЧЕТ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛИФРАКЦИОННЫХ АГЛОМЕРАТА И КОКСА 40

*Куберский С. В., Романчук Я. А., Саратовский Р. Н.*ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИОННОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ МЕТАЛЛА
В СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОМ КОВШЕ 47*Проценко М. Ю., Воронько М. И., Проценко В. И., Ангелов В. Ю.*

АНАЛИЗ СОСТАВА ОТХОДОВ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА 56

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ*Вишневский Д. А., Петров П. А., Харламов Ю. А., Подгорный В. Ю.*

КЛАССИФИКАЦИЯ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПО УСЛОВИЯМ ИЗНАШИВАНИЯ 65

*Ткачѳв М. Ю.*ОБОСНОВАНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ЭВАКУАЦИИ
ГАЗОПЫЛЕВЫХ ВЫБРОСОВ 75

CONTENT

GEOSCIENCES

<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	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	13

METALLURGY AND MATERIAL SCIENCES

<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	21
<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	32
<i>Rusanova N. I., Rusanov I. F.</i> CALCULATION OF THE SURFACE OF POLYFRACTIVE SINTER AND COKE	40
<i>Kuberskiy S. V., Romanchuk Ya. A., Saratovskiy R. N.</i> PHYSICAL MODELING OF PULSATING MIXING OF METAL IN A STEEL LADLE	47
<i>Protsenko M. Yu., Voron'ko M. I., Protsenko V. I., Angelov V. Yu.</i> ANALYSIS OF THE WASTE COMPOSITION OF FERROALLOY INDUSTRY	56

MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE

<i>Vishnevskiy D. A., Petrov P. A., Kharlamov Yu. A., Podgorniy V. Yu.</i> CLASSIFICATION OF MACHINE PARTS BY WEAR CONDITIONS	65
<i>Tkachov M. Yu.</i> JUSTIFICATION OF ENERGY-POWER PARAMETERS OF THE EVACUATION SYSTEM OF GAS-DUST EMISSIONS	75

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 23 (66) 2021

**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 № 12 dated 25.06.2021)*

Added to scientometrical database of RSCI

Format 60×84½
Conventional printed sheet 11,5
Order № 153

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

Kuberskyi S. V. — PhD in Engineering, Prof.,
Acting Rector

Deputy Editor-in-chief

Vishnevskiy D. A. — PhD in Engineering, Asst. Prof.

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.
Zinchenko A. M. — PhD in Economics, Asst. Prof.
Zelinskyi A. N. — PhD in Engineering, Prof.
Snitko S. A. — Doctor of Tech. Sc., 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", 2021
© Chernyshova N. V., graphic cover
design, 2021