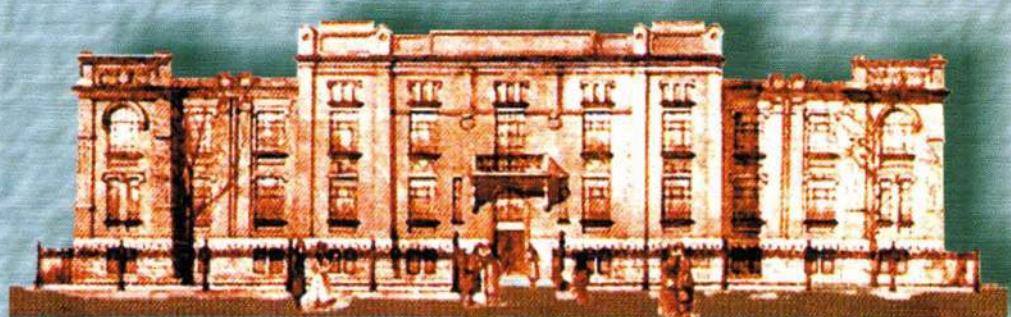


ИЗВЕСТИЯ

Уральского государственного
горного университета



Выпуск 4 (40), 2015

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Уральский государственный горный университет»

ИЗВЕСТИЯ
Уральского государственного
горного университета

Научно-технический журнал

Издается с 1918 г.

Выпуск 4(40)

2015

Редакционная коллегия

КОСАРЕВ Николай Петрович (главный редактор) – д-р техн. наук, проф.,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
ГРЯЗНОВ Олег Николаевич (зам. главного редактора) – д-р геол.-минерал. наук, проф.,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
ПОЛЕНOV Юрий Алексеевич (ученый секретарь) – д-р геол.-минерал. наук, проф.,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
АМДУР Алексей Миронович – д-р техн. наук, проф.,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
БАРАННИКОВ Александр Григорьевич – д-р геол.-минерал. наук, проф.,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
БОЯРСКИХ Геннадий Алексеевич – д-р техн. наук, проф.,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
ВАЛИЕВ Нияз Гадым-оглы – д-р техн. наук, проф.,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
ВЕРШКОВ Александр Федорович – д-р экон. наук,
департамент геологии АО «Волковгеология», г. Алматы, Казахстан
ГОРДЕЕВ Виктор Александрович – д-р техн. наук, проф.,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
ГРЕВЦЕВ Николай Васильевич – д-р техн. наук, проф.,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
ЗОТОВ Алексей Николаевич – д-р техн. наук, проф.,
Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа
ИГНАТЬЕВА Маргарита Николаевна – д-р экон. наук, проф.,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
КОЖУШКО Герман Георгиевич – д-р техн. наук, проф.,
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург
КОРНИЛКОВ Сергей Викторович – д-р техн. наук, проф.,
Институт горного дела УрО РАН, г. Екатеринбург
КОРОТЕЕВ Виктор Алексеевич – академик РАН, д-р геол.-минерал. наук, проф.,
Институт геологии и геохимии им. А. Н. Заварицкого УрО РАН, г. Екатеринбург
ПОТАПОВ Валентин Яковлевич – д-р техн. наук, проф.,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
СУРНЕВ Виктор Борисович – д-р физ.-матем. наук, проф.,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
ТИМУХИН Сергей Андреевич – д-р техн. наук, проф.,
Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург
ХАЛЬФИН Марат Нурмухамедович – д-р техн. наук, проф.,
Южно-Российский государственный технический университет, г. Новочеркасск

Ответственные редакторы по разделам*Науки о Земле:* Баранников А. Г.*Технические науки:* Тимухин С. А.*Экономические науки:* Игнатьева М. Н.*История университета, юбилейные даты:* Поленов Ю. А.

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», действующий с 1.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Грязнов О. Н.
Природно-технические системы –
универсальные системы взаимодействия
инженерных сооружений (объектов)
и природной среды 5

Гревцев Н. В., Шампаров А. Г., Якупов Д. Р.
Рекультивация нефтезагрязненных почв
с применением модифицированных торфяных
мелиорантов 11

Боброва З. М., Ильина О. Ю., Хохряков А. В.,
Цейтлин Е. М.
Применение отходов горно-металлургических
и металлургических производств в целях
рационального природопользования 16

Болтыров В. Б., Селезнев С. Г., Стороженко Л. А.
Экологические последствия долговременного
хранения техногенных объектов типа «Отвалы
Аллареченского месторождения» (Печенгский
район Мурманской области) 27

Сурнев В. Б., Исламгалиев Д. В.
Рассеяние упругих волн предварительно
напряженным ограниченным объектом 35

Жабко А. В.
Теория расчета устойчивости откосов
и оснований. Анализ, характеристика
и классификация существующих методов
расчета устойчивости откосов 45

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Афанасьев А. И., Паньков С. А.,
Потапов В. Я., Симисинов Д. И., Угольников А. В.
Разделение бедных сульфидных руд методом
электрического пробоя 58

Петровых Л. В., Марченко А. Ю.,
Иващенко Е. П., Марченко М. Ю.,
Салтанов С. Н., Баринов И. М., Викулов Е. А.
Определение необходимой глубины
регулирования водоотливных установок
в условиях завышенного напора
насосов 62

EARTH SCIENCES

Gryaznov O. N.
Natural-technical systems as the universal
systems of interaction of engineering
structures (objects)
and natural environment 5

Grevtsev N. V., Shamparov A. G., Yakupov D. R.
Remediation of contaminated soils
with using
modified peat ameliorants 11

Bobrova Z. M., Ilyina O. Yu., Hohryakov A. V.,
Tseitlin E. M.
Using of metals and mining
industrial wastes
for the environmental management 16

Boltyrov V. B., Seleznyov S. G., Storozhenko L. A.
Ecological consequences of long-term storage
of technogenic objects
like “Dumps of the Allarechensk field”
(the Pechengsk area of Murmansk region) 27

Sournev V. B., Islamgaliev D. V.
Scattering of pressure waves by limited subject with
internal stresses 35

Zhabko A. V.
Theory of calculation of slopes
and grounds stability. Analysis, characterization
and classification of existing methods
for calculating the slopes stability 45

TECHNICAL SCIENCES

Afanasiev A. I., Pankov S. A., Potapov V. Ya., Simisinov
D. I., Ugolnikov A. V.
Separation of poor sulphide ores by electrical
breakdown 58

Petrovykh L. V., Marchenko A. Yu., Ivashenko E. P.,
Marchenko M. Yu., Saltanov S. N., Barinov I. M.,
Vikulov E. A.
Determining of necessary depth
to control drainage installations
in conditions of high pressure
of pumps 62

<i>Тимухин С. А., Иващенко Е. П., Марченко А. Ю., Марченко М. Ю., Салтанов С. Н., Баринов И. М., Викулов Е. А.</i>	<i>Timukhin S. A., Ivashenko E. P., Marchenko A. Yu., Marchenko M. Yu., Saltanov S. N., Barinov I. M., Vikulov E. A.</i>
О необходимости более полного учета максимальных притоков воды в проектных решениях комплексов главного водоотлива 67	About the need of better accommodate the maximum water flows in project solutions of main drainage systems 67
<i>Герике П. Б.</i>	<i>Gericke P. B.</i>
Выявление основных закономерностей изменения технического состояния динамического оборудования экскаваторов типа драглайн по результатам анализа параметров механических колебаний 71	Identification of basic laws of changes in the technical state of dynamic equipment such as draglines from the analysis of parameters of mechanical vibrations 71
<i>Макаров Н. В., Солдатенко А. А., Лаврёнов Н. Е., Макаров В. Н.</i>	<i>Makarov N. V., Soldatenko A. A., Lavryonov N. E., Makarov V. N.</i>
Центробежные вентиляторы местного проветривания с энергетическими регуляторами 79	Centrifugal fans of local ventilation with energetic regulators 79
ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ	
<i>Игнатьева М. Н., Логинов В. Г., Литвинова А. А., Балащенко В. В., Цейтлин Е. М.</i>	<i>Ignatieva M. N., Loginov V. G., Litvinova A. A., Balashenko V. V., Tseitlin E. M.</i>
Укрупненная оценка прогнозируемого экономического ущерба при освоении минерально-сырьевой базы северных территорий 84	Integrated evaluation of projected economic losses at development the mineral resource base of northern territories 84
<i>Душин А. В., Соколова О. Г.</i>	<i>Dushin A. V., Sokolova O. G.</i>
Институциональные изменения в мировом горнодобывающем секторе: некоторые тенденции 88	Some results of institutional changes in the global mining industry 88
<i>Косолапов О. В., Власова Л. В.</i>	<i>Kosolapov O. V., Vlasova L. V.</i>
Совершенствование прогноза экономического ущерба при освоении ресурсов недр 93	Improving the forecast of economic damage during the development of subsoil resources 93
<i>Логинов В. Г., Игнатьева М. Н., Душин А. В., Полянская И. Г.</i>	<i>Loginov V. G., Ignatieva M. N., Dushin A. V., Polyanskaya I. G.</i>
Социоэкосистемный подход как отражение специфики освоения арктических территорий 99	Socio-ecosystem approach as a reflection of specific development of Arctic territories 99
ABSTRACTS AND REFERENCES 103	
ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСЯМ СТАТЕЙ .. 108	
ABSTRACTS AND REFERENCES 103	
REQUIREMENTS TO MANUSCRIPTS 108	

Вниманию читателей

**Оформить подписку на журнал на 1-е полугодие 2016 года
можно во всех отделениях Почты России
(подписной индекс в каталоге «Газеты. Журналы» – 25145)**

УДК 556

ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ – УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ (ОБЪЕКТОВ) И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Грязнов О. Н.

На примере природно-технических систем «месторождение твердых полезных ископаемых (МТПИ) – горнодобывающее предприятие (ГДП)» и «геологическая среда (ГС) – высотное здание (ВЗ)» в условиях города Екатеринбурга рассмотрена универсальность систем взаимодействия инженерных сооружений (объектов) и природной среды.
Ключевые слова: природно-техническая система (ПТС); природная среда; инженерное сооружение; область взаимодействия; условия; компоненты; параметры.

Природно-техническая система, по В. Д. Ломтадзе, – «природный комплекс, в пределах которого размещены искусственные объекты, созданные в результате выполнения строительных и других инженерных работ. В географии (а теперь и в инженерной геологии) такую систему рассматривают как модель, характеризующую взаимодействие природы (геологической среды) с сооружениями. Такое название особых возражений не вызывает, так как оно связано с общими закономерностями развития тех или иных явлений в природе. Здесь понятия *геологическая среда*, *геологические условия* кодируют словом, имеющим более широкое значение, – *природная*, а понятие *сооружение* или *инженерные работы* – словом техническая, отражающим также более широкое понятие, связанное с техникой. В инженерной геологии используют понятие о бинарной системе геологическая среда – сооружение, отражающее функционирование реальных бинарных систем: фундаменты – естественные основания; подземное сооружение – *геологическая среда*; выемка, котлован, карьер – *геологическая среда*» [1].

Природно-техническая система (ПТС) – уникальная система, охватывающая все многообразие взаимоотношений инженерных сооружений (или объектов) с компонентами

природной среды.

Типы ПТС чрезвычайно разнообразны. Они определяются многими факторами. Основные из них – *тип инженерного сооружения* (объекта) и *ландшафтно-климатические условия природной среды*. В качестве примеров рассмотрим ПТС двух типов: ПТС месторождений твердых полезных ископаемых (МТПИ) в скальных массивах, разрабатываемых горными способами, и ПТС «геологическая среда (ГС) – высотное здание (ВЗ)» в условиях города Екатеринбурга.

ПТС МТПИ в скальных массивах и горнодобывающих предприятий (ГДП) схематически представлена на рис. 1. Эта система детально охарактеризована в статье [2]. Она включает две подсистемы: «сооружение» (шахта или карьер с их инфраструктурой) и «область взаимодействия» (ОВ). Последняя представляет собой объем массива скальных горных пород, в котором происходит изменение естественных условий в процессе строительства и эксплуатации «сооружения» при разработке МПИ (рис. 2). ОВ формируется в конкретных физико-географических, геологоструктурных, литолого-петрографических, мерзлотно-гидрогеологических и геодинамических условиях, которые характеризуются набором компонент, определяющих особенности и тенденции процессов изменения ГС

при вторжении ГДП в массив горных пород. Физико-географические условия включают рельеф, гидрологию, климат и биоту, влия-

ющие на уровень сложности формирования инженерно-геологических условий (ИГУ) освоения месторождения. Разработка МПИ

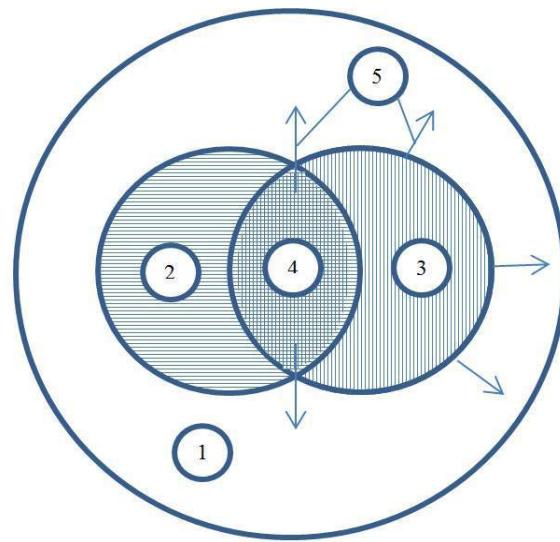


Рис. 1. ПТС МПИ в скальном массиве и ГДП:
1 – природная среда; 2 – МПИ в скальном массиве; 3 –
ГДП; 4 – область взаимодействия; 5 – стрелками показано
воздействие добывочных работ на компоненты природной
среды

горными способами начинается с уничтожения и угнетения биоты: лес, кустарник вырубаются, почва убирается, звери уходят, птицы улетают, природный ландшафт трансформируется в техногенный. Геолого-структурные, литолого-петрографические, мерзлотно-гидрогеологические особенности определяют ИГУ отработки месторождения. Особое значение при функционировании ОВ приобретают геодинамические условия. При разработке МПИ неизбежно возникают горно-геологические процессы, связанные с изменением поля естественных напряжений. Все компоненты условий функционирования ОВ характеризуются набором параметров.

На активной стадии горнопромышленного техногенеза ГДП (шахта, карьер с их инфраструктурой) вторгается в природную среду, оказывая воздействие на все её ингредиенты: биоту (растительность, животный мир), почвы, покровные отложения, массив горных пород коренной основы, полезные ископаемые, подземные воды, природные геологические процессы, поверхностные воды, приземную атмосферу. Техногенные и техногенерируемые процессы этой стадии весьма раз-

нообразны.

Создание техногенных ландшафтов.

Антрапогенный литогенез:

- субаэральный – насыпные грунты (отвалы горных пород, забалансовых руд); намывные грунты – хвосты обогащения и шламы;
- субаквальный – техногенный аллювий;
- субтерральный – выветривание, погребенные технологические потери горных пород и руд.

Гидролитогенные процессы: дренаж шахтных и карьерных полей – техногенные зоны аэрации, активизация геохимических процессов; сброс дренажных вод, загрязнение поверхностных и подземных вод.

Субтерральные процессы: деформационные процессы вследствие перераспределения напряженно-деформационного состояния массивов горных пород (горные удары, стреляние, разрушение горных выработок; зоны обрушения; вывалы, осипание горных пород; пучение глинистых пород); прорывы подземных вод и плытунов; активизация карстовых и супфозионных процессов; подземные пожары, выбросы газов.

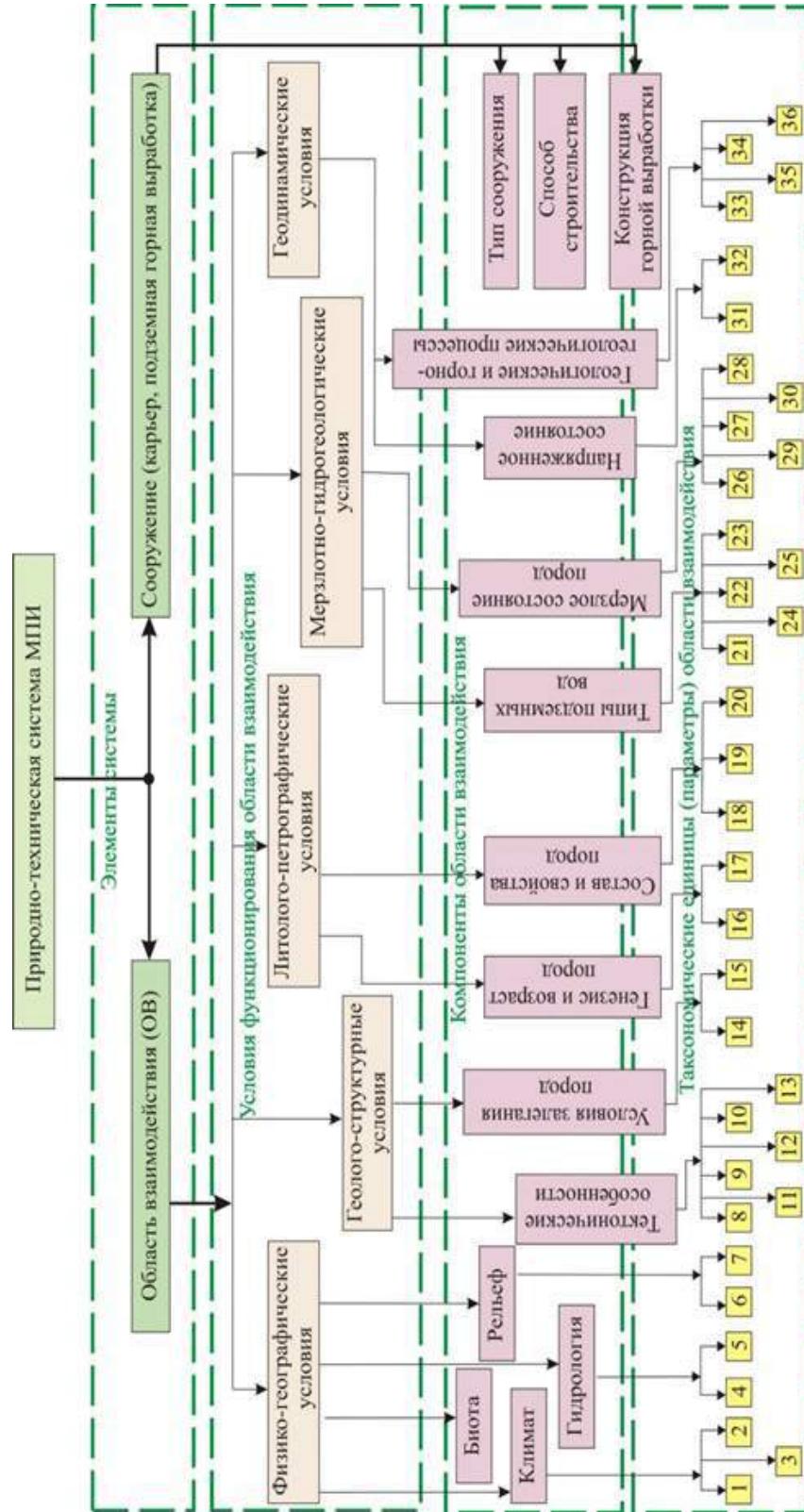


Рис. 2. Структура ПТС МПИ [2]:

1–3 – климат: 1 – количество атмосферных осадков, 2 – среднегодовая температура воздуха, 3 – сила и направление ветра; 4, 5 – гидрология: 4 – модуль поверхности стока, 5 – химический состав поверхностных вод; 6, 7 – рельеф: 6 – абсолютные отметки рельефа, 7 – коэффициент расчененности рельефа; 8–13 – тектонические особенности: 8 – тип нарушенный (плакативные, дислокационные), 9 – возраст и характер тектонических нарушений, 10 – степень и характер трещиноватости; 11 – наличие зон дробления, 12 – наличие рассланцованных, плойчатых, миллионитизаций, 13 – состав и свойства заполнителя трещин; 14, 15 – условия залегания пород; 14 – приуроченность к крупным геологическим структурам, 15 – этажность в вертикальном строении; 16, 17 – генезис и возраст пород; 16 – генезис горных пород, 17 – возраст горных пород; 18 – состав горных пород, 19 – структурно-текстурные особенности горных пород, 20 – физико-механические свойства горных пород; 21–25 – типы подземных вод, 22 – гидравлические особенности водоносных горизонтов и комплексов, 23 – условия питания, 24 – химический состав подземных вод, 25 – режим подземных вод; 26–30 – мёрзлые состояния пород: 26 – характер распространения многолетнемёрзлых пород, 27 – среднегодовая температура горных пород, 28 – криогенные текстуры, 29 – льдистость горных пород; 31, 32 – напряженное состояние горных пород, 31 – скорости продольных, поперечных волн, 32 – коэффициент Пуассона; 33–36 – геологические и горно-геологические процессы, 33 – характер и тип экзотенных и горно-геологических процессов, 34 – условия экзотенных и горно-геологических процессов, 35 – масштабы процессов, 36 – пораженность территории

Гравитационные процессы в открытых горных выработках: соли, обвалы, оползни.

Техногенные землетрясения.

На пассивной стадии горнопромышленного техногенеза, после прекращения добычных работ и ликвидации горного предприятия происходит самозатопление горных выработок, развиваются своеобразные техногенные и техноприродные процессы, охарактеризованные на примере Урала С. Н. Елохиной [3]. Они перечислены ниже.

Деградация техногенных ландшафтов.

Гидролитогенные процессы: излив шахтных вод на поверхность земли; подтопление, заболачивание территории; загрязнение поверхностных и подземных вод рудничными водами; изменение структуры фильтрационного потока и общего водного баланса; включение в область питания водозаборных сооружений затопленных шахтных полей; снижение прочностных свойств горных пород вследствие их замачивания.

Выветривание грунтов отвалов, дамб хвостохранилищ и других объектов.

Эрозионные процессы на отвалах горных пород, дамбах хвостохранилищ и других объектах (плоскостной смыв, промоины).

Гравитационные процессы на подработанных территориях, в том числе в зонах сдвижения, обрушения, в карьерах.

Подземная водная эрозия горных пород затопленных выработок.

Активизация карстовых и суффозионных процессов.

Техногенные землетрясения.

Таким образом, ПТС МТПИ – структурированная область взаимодействия массива горных пород месторождения и горного сооружения, функционирующая в природных, а после прекращения добычных работ – в техногенных условиях территории и характеризующаяся свойственным ей набором компонент и их параметров [2].

ПТС «ГС – ВЗ» города Екатеринбурга, по О. Н. Овечкиной, «является областью системного взаимодействия высотного сооружения и грунтового массива, природно-технические условия которого определяются набором ин-

женерно-геологических компонент и их параметров с учетом глубины заложения фундамента, его конструктивных особенностей и величины силовой нагрузки, добавленной в существующую систему городской застройки» [4]. Структура ПТС, условия функционирования области взаимодействия, их компоненты и параметры практически идентичны охарактеризованным для ПТС МТПИ. Для ПТС «ГС – ВЗ» на рис. 1 следует понимать: под 2 – геологическую среду, под 3 – высотное здание. Особенности ПТС определяются природными условиями города Екатеринбурга: типами массивов горных пород коренной основы, геоморфологическими условиями, мощностью коры выветривания и соотношением мощностей составляющих её зон, гидрогеологическими особенностями (табл.). Ведущим фактором является состав горных пород грунтовых массивов: гранитоиды Верх-Исетского и Шарташского массивов, габброиды Балтымского массива, гипербазиты и серпентиниты, метаморфические породы по сланцам и эффузивам О–С, контакты горных пород (гранитов – габбро, габбро – сланцев, сланцев – серпентинитов) и кора их выветривания. Типы применяемых фундаментов – столбчатые, монолитные плиты, ленточный и комбинированный. В денудационно-тектонической впадине долины р. Исеть высотные здания построены на свайных фундаментах, опирающихся на скальные грунты, перекрытые аллювиальными отложениями.

В ПТС «ГС – ВЗ» развиваются своеобразные инженерно-геологические процессы: техногенная трансформация ландшафтов, перераспределение напряженно-деформированного состояния массивов горных пород вследствие гравитационного воздействия высотного здания (вплоть до наведённых сейсмических событий); гидролитогенные процессы, связанные с понижением уровня грунтовых вод при дренаже подземных вод; барражный эффект в связи с заглублением ВЗ; положительный баланс подземных вод в связи с утечками из водонесущих коммуникаций; антропогенный субаэральный литогенез; загрязнение приземной атмосферы,

Общая характеристика ПТС «ГС – ВЗ» города Екатеринбурга [4]

Типы массивов горных пород	Геоморфологические условия	Гидрогеологические условия (УГВ, м)	Глубина залегания кровли скальных грунтов, м	Мощность коры выветривания, м	Зональность коры выветривания (мощность, м)			Величина силы сейсмического воздействия, баллы	Тип фундамента
					Дисперсная зона (III)	обломочная зона (II)	трещиноватая зона (I)		
Гранитный массив	Чистовская и Юго-Западная впадины	1,1–3,2	0,1–12,0	0,5–14	0,5–4,6	0,2–11	3–8	8	5,5–6
Габбровый массив	Тектонические впадины, возвышенности, периферийный вал городской радиально-концентрической структуры	Во впадинах 0,7–6,8; на возвышенностях 7,8–12,0 м	0,7–18	0,2–26	0,2–17	0,3–4	1–15	21	6–7
Метаморфические	Тектонические возвышенности и впадины	Во впадинах 1,5–3,5, на возвышенностях 5,3–6,8 м и > 21 (при водопонижении в метро)	3,5–11,0 и > 21	1,0–35	от 1 до > 21	0,6–35	1–16	—	5–6
Контакты горных пород	Тектонические возвышенности и впадины	Во впадинах 6,0–15,0; на возвышенностях 2,2–7,8	0,5–25 и > 35	0,3–14 и > 35	0,3–22	0,5–7,5	1,5–20	—	6–8
По берегам р. Исеть	Исетская денудационно-тектоническая впадина	0,0–5,1	1,8–16	0,5–11,3	0,5–5,8	1,0–5,3	0,7–9,0	—	6–7

поверхностных вод (через ливневый сток), подземных вод (через утечки); тепловое, шумовое, вибрационное воздействие на окружающую среду и человека.

Краткое рассмотрение двух типов ПТС (МТПИ – ГДП, ГС – ВЗ) в достаточной степени характеризует универсальность природно-технической системы. При понимании на рис. 1 под цифрой 2 «геологической среды»,

а под цифрой 3 «инженерного сооружения (объекта)», схема будет отражать структуру ПТС любого типа. Для природно-технических систем любой сложности характерны открытость, динамичность, управляемость, а при объективной оценке и учете параметров компонент, условий функционирования области взаимодействия – и устойчивость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ломтадзе В. Д. Словарь по инженерной геологии. СПб: Изд. СПБГИ, 1999. 360 с.
2. Абатурова И. В., Грязнов О. Н. Инженерно-геологические условия месторождений Урала в скальных массивах // Изв. вузов. Горный журнал. 2014. № 6. С. 160–168.
3. Елохина С. Н. Гидрогеоэкологические последствия горного техногенеза на Урале. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. 187 с.
4. Овечкина О. Н. Оценка и прогноз изменения состояния геологической среды при техногенном воздействии зданий высотной конструкции в пределах города Екатеринбурга: автореф. ... дис. канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2013. 24 с.

Грязнов Олег Николаевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры гидрогеологии, инженерной геологии геоэкологии. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: Gryaznov.O@ursmu.ru

РЕКУЛЬТИВАЦИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ТОРФЯНЫХ МЕЛИОРАНТОВ

Гревцев Н. В., Шампиров А. Г., Якупов Д. Р.

В статье рассмотрен вопрос рекультивации нефтезагрязненных заболоченных почв с применением модифицированного торфяного мелиоранта. Дано обоснование применения при рекультивации нефтезагрязненных почв торфа и осадков сточных вод. Проведены исследования сорбционных свойств и деструкционной способности мелиорантов к углеводородам нефти, в различных композициях верхового и низинного торфа с добавлением в разных соотношениях осадков сточных вод. Для получения необходимых технологических свойств применяли метод грануляции. В процессе грануляции получали гомогенную смесь торфа и осадков сточных вод, оказывающую влияние на устойчивую работу шнекового гранулятора и служащую упрочняющим фактором для готовой продукции. По завершении деструкции углеводородов нефти проведены исследования на содержание тяжелых металлов в зеленой массе высевянной ржи.

Ключевые слова: рекультивация; торф; осадки сточных вод; торфяной мелиорант; нефтезагрязнение.

Для нефтяной промышленности вопросы снижения вредного воздействия отрасли на окружающую среду – проблема чрезвычайная и требующая особого внимания. Опасность нефтяного загрязнения состоит в нарушении динамического равновесия в сложившихся экосистемах из-за изменения структуры почвенного покрова, биогеохимических свойств почв и токсического действия на растения и почвенные микроорганизмы. Непринятие срочных мер к восстановлению нефтезагрязненных территорий ведет к разрушению всех биологических компонентов ландшафта и зачастую носит необратимый характер.

В настоящее время большое внимание уделяется способам, позволяющим стимулировать деятельность аборигенной углеводородокисляющей микрофлоры, и тем самым исключить из технологии дорогостоящие операции, связанные с выделением, культивированием и внесением углеводородокисляющей культуры микроорганизмов.

На территории крупнейшей нефтегазодобывающей области России – Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО-Югра) – расположено 2176 торфяных месторождений общей площадью 13,2 млн га с запасами около 45 млрд т торфа, что составляет при-

мерно 25 % российских торфяных ресурсов [1]. Наличие больших запасов и широкая распространенность торфа в ХМАО-Югра находит широкое применение при рекультивации нефтезагрязненных почв.

Наличие в торфе углеводородокисляющих микроорганизмов, численность которых в 4–5 раз выше аналогичного показателя для почв, позволяет использовать его в качестве биосорбента. После физико-химической активации торфа количество микроорганизмов возрастает в 20–100 раз и составляет в среднем $5\text{--}10^{10}$ клеток / 1 г абсолютно сухого вещества. Углеводородокисляющее сообщество торфа весьма разнообразно в видовом отношении, основу его составляют мезофильные бациллы, актиномицеты и проактиномицеты [2].

Вследствие сложности гидрологических и гидрогеологических условий, а также неблагоприятных природно-климатических условий, на территории ХМАО-Югра наиболее распространенный способ добычи – фрекзерный – не находит широкого применения. Добыча торфа производится экскаваторным способом с погрузкой его в автосамосвалы, с последующей доставкой его на предварительную площадку складирования, откуда частично обезвоженный торф по мере необ-

ходимости развозится автосамосвалами на объекты рекультивации.

Отсутствие в технологическом процессе обезвоживания при осушении и естественной полевой сушке добываемого торфяного сырья приводит к использованию для рекультивации переувлажненный торф, который приносит скорее вред, чем пользу из-за присутствия в нем закисных форм железа, фитотоксичных форм марганца, алюминия и других элементов. Азот в переувлажненном торфе находится в недоступной для растений форме, также отсутствует основное свойство торфа – способность к водо-газопоглощению и структурообразованию почвы [1].

При выборе технологии переработки торфяного сырья для получения рекультивационного материала необходимо учитывать особенности взаимодействия торфа и нефтепродуктов, различия структурно-механических и физико-химических свойств различных видов торфяной продукции. Научно-методологический подход к оценке взаимодействия торфа и нефтеполлютанта позволяет сформулировать рекомендации по получению качественной и эффективной продукции экологического назначения.

Гранулированный торф имеет улучшенные физико-механические свойства: насыпную массу в 1,5–1,75 раза выше, чем фрезерный торф, однородный зерновой состав, водопоглощение в 2,5–3 раза ниже по сравнению с фрезерным торфом [3].

На процесс формирования физико-механических, водно-физических и других свойств торфяных гранул оказывает влияние множество факторов: от исходных физико-химических свойств сырья до технологических процессов изготовления гранул. В процессе подготовки торфяного сырья к гранулированию происходит усреднение влажности смеси, изменение фракционного состава элементов вследствие истирания отдельных частиц материала о рабочие органы и стенки смесителя, трения частиц друг о друга. Эти факторы могут снизить сорбционные способности торфяных гранул. Вместе с тем при грануляции имеется возможность вводить различные

добавки и получать мелиорант, позволяющий решить одну из задач при рекультивации нефтезагрязненной почвы – обеспечение необходимыми макро- и микроэлементами углеводородокисляющих микроорганизмов на длительное время. Немаловажной особенностью процесса гранулирования торфа является способность торфяных гранул удерживать элементы питания в промывном режиме почв.

Гранулирование торфа упрощает множество технологических вопросов, таких как длительное хранение, транспортировка, механизированное внесение сорбента на загрязненные участки; исключает процесс самовозгорания торфа и др. Равномерное распределение компонентов в смеси оказывает влияние на устойчивую работу шнекового гранулятора и служит упрочняющим фактором для готовой продукции. С помощью изменения технологических режимов формования в шнековом грануляторе становится возможным получение гранул необходимой плотности. В процессе механического воздействия достигается возможность изменения физико-химических свойств торфа и составляющих его высокомолекулярных соединений [4].

Одной из острых проблем, как в центральных, так и в нефтедобывающих районах России является утилизация осадков сточных вод станций биохимической очистки городских сточных вод (ОСВ), содержащих все необходимые компоненты для обеспечения жизнедеятельности углеродокисляющих микроорганизмов. Введение в композицию осадков сточных вод позволит активировать агрехимические и биологические свойства торфа и значительно снизит себестоимость проводимых рекультивационных работ.

Ежегодно на территории ХМАО-Югры образуется более 12,3 тыс. т ОСВ с размещением их на полигонах ТБО и ПО, и они могут образовывать очаги вторичного загрязнения окружающей среды. ОСВ образуются в результате использования природных механизмов самоочищения сточных вод от загрязнителей, поэтому перспективными для утилизации следует признать те направления,

в которых они вовлекаются в естественный природный цикл веществ в биосфере.

Одним из основных факторов, сдерживающих применение ОСВ в растениеводстве, является наличие в них солей тяжелых металлов, влияние которых на почву, растения недостаточно изучено. Следовательно, решению вопроса применения препятствует ряд трудностей и нерешенных задач.

Из существующих методов утилизации ОСВ наиболее надежным и экологически выгодным является метод почвенного удаления, при этом одновременно решается ряд задач: исключается необходимость хранения (захоронения), повышается плодородие почв. Одним из методов применения ОСВ является внесение его как органического удобрения в почвы с большой буферной ёмкостью, применяемые для лесоразведения, выращивания декоративных растений, постоянного залужения многолетними травами, не применяемыми для пищевых и кормовых целей.

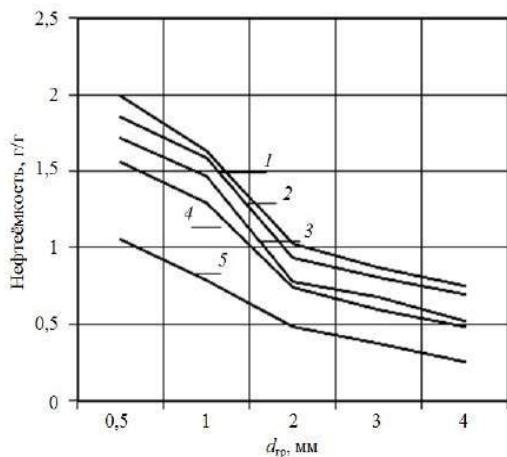


Рис. 1. Зависимость изменения сорбционной ёмкости МТМ на основе верхового типа торфа от содержания в нем ОСВ и фракционного состава:
1 – торфяной мелиорант; 2 – МТМ содержанием ОСВ 17 % по массе; 3 – МТМ содержанием ОСВ 25 % по массе;
4 – МТМ содержанием ОСВ 33 % по массе; 5 – МТМ содержанием ОСВ 50 % по массе

Поиск приемов, позволяющих упростить и снизить затраты на процесс рекультивации нефтезагрязненных земель без потери качества проводимых работ, является актуальным и по сей день. Одним из таких приемов может стать использование композиций торфа и осадков сточных вод станций биохимической очистки городских сточных вод.

Проведенные исследования позволяют оценить влияние содержания ОСВ в торфяном мелиоранте на изменения сорбционной ёмкости и деструкцию углеводородов нефти.

Исследования показали (рис. 1), что с увеличением содержания ОСВ снижается сорбционная ёмкость модифицированных торфяных мелиорантов (МТМ), что объясняется агрегатным состоянием ОСВ, которые являются мелкодисперсной системой [5] и в процессе окатывания выступают в качестве пластифицирующего вещества, заполняя межпоровое пространство торфяных ассоциатов.

Из анализа графиков видно, что с уменьшением диаметра гранул МТМ увеличивается его сорбционная ёмкость. Данный факт может быть объяснен влиянием двух причин: во-первых, сорбционная ёмкость материала зависит от удельной площади поверхности, контактирующей с сорбатом, и чем меньше диаметр частиц мелиоранта, тем больше площадь контакта и тем выше его сорбционные свойства. Во-вторых, гранулы МТМ имеют не идеально сферическую форму, поэтому плотность упаковки гранул мелиоранта в мелкодисперсной фракции увеличивается, создавая пористое пространство, способное удерживать нефтепродукт.

Исследования деструкции углеводородов нефти проводились в лабораторных условиях поэтапно в течение двух летних сезонов с июня по август согласно схеме эксперимента (рис. 2). Контролем в эксперименте служили образцы торфяной почвы без внесения МТМ и минеральных удобрений.

Во всех образцах с внесением МТМ и минеральных удобрений с начальной концентрацией нефтепродуктов 50 г/кг, содержание снизилось ниже ПДК [6] уже по истечении 60–70 дней. В образцах с внесением МТМ с содержанием ОСВ 25–33 % содержание нефтепродуктов снизилось до значений ПДК по истечении 180 дней с начальной концентрацией нефтепродуктов 100 г/кг. В образцах с внесением торфяного мелиоранта по истечении 180 дней содержание нефтепродуктов было выше, чем при внесении МТМ. По истечении 180 дней в образцах с высокими

начальными концентрациями 250 г/кг и внесением МТМ содержанием ОСВ 17 %; 25 %; 33 %; 50 % наблюдалось снижение содержания нефтепродуктов на 77,5 %, 77,9 %, 80,8 %,

81,3 % соответственно (рис. 3).

Как было сказано выше, одним из факторов, сдерживающих применение ОСВ в сельском хозяйстве, является наличие в них солей



Рис. 2. Схема проведения экспериментов

тяжелых металлов. С целью определения влияния различного содержания ОСВ в мелиоранте на миграционную способность ионов

тяжелых металлов в зеленую массу растений из мелиоранта по истечении второго летнего сезона в исследуемые образцы все-

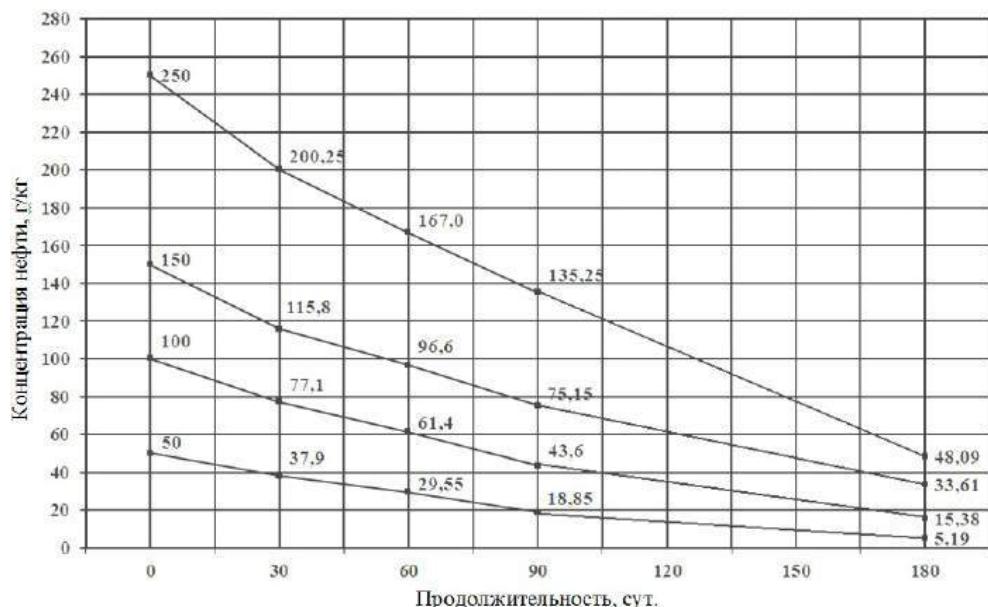


Рис. 3. Изменение во времени содержания углеводородов нефти в торфяной почве верхового типа с внесением МТМ с содержанием ОСВ 33 % и 67 % торфа верхового типа

валась рожь с последующим отбором проб зеленой массы для проведения химического анализа.

Химический анализ ОСВ выявил превышение содержания Zn в 1,13 раз, а содержание остальных тяжелых металлов находилось в пределах допустимых норм [7].

При использовании МТМ, содержащих ОСВ от 25 до 33 % во всех образцах с концентрацией нефтепродуктов до 150 г/кг, превы-

шение временного максимально допустимого уровня (МДУ) контролируемых металлов не обнаружено. При содержании ОСВ более 33 % концентрация тяжелых металлов (Cu, Ni, Cr, Zn) может превышать МДУ в зеленой массе растений.

По результатам исследований наиболее подвижными тяжелыми металлами при деструкции углеводородов нефти МТМ с содержанием ОСВ от 15 до 50 % оказались:

Cr – превышение МДУ в 7 образцах из 42 образцов; Ni – превышение МДУ в 4 образцах из 42 образцов; Cu – превышение МДУ в 2 образцах из 42 образцов; Zn – превышение МДУ в 1 образце из 42 образцов.

Непосредственное применение торфяного мелиоранта при рекультивации нефтезагрязненных почв в качестве сорбента и деструктора является выгодным и рациональ-

ным способом снизить финансовые затраты на проведении рекультивационных работ. Очистка почвы от нефтяных загрязнений с использованием торфяного мелиоранта позволяет обогатить почвы биологически активными веществами, стимулирующими процессы гумусообразования, способствует экологическому оздоровлению и реабилитации деградированных почв.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Толстограй В. И. Проблемы торфяных ресурсов ХМАО // Эколого-географические проблемы природопользования нефтегазовых регионов: Теория, методы, практика / под. общ. ред. Ф. Н. Рянского, С. Н. Соколова. Нижневартовск, 2003. С. 31–40.
2. Использование торфяных мелиорантов для реабилитации нефтезагрязненных почв Нефтеюганского района / Т. И. Бурмистрова [и др.] // Изв. вузов. Нефть и газ. 2004. № 4. С. 77–79.
3. Испирян С. Р. Разработка методики комплексной оценки поглощения торфом нефтепродуктов: дис. ... канд. техн. наук. Тверь, 2001. 149 с.
4. Добыча и использование торфа для рекультивации нефтезагрязненных почв / Гречев Н. В. [и др.] // Изв. вузов. Горный журнал. 2012. № 1. С. 51–56.
5. Пахненко Е. П. Осадки сточных вод и другие нетрадиционные органические удобрения М.: Бином. Лаборатория знаний, 2007. 312 с.
6. Допустимое остаточное содержание нефти и нефтепродуктов в почвах после проведения рекультивационных и иных восстановительных работ на территории Ханты-Мансийского автономного округа-Югры: региональный норматив. 2004.
7. СанПиН 2.1.7.573-96. Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения. М.: Минздрав России, 1997.

Гревцев Николай Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой природообустройства и водопользования. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.

Шампаров Аркадий Геннадьевич – кандидат геолого-минералогических наук, директор. 620075, г. Екатеринбург, ул. Шарташская, д. 19, ООО «Институт местных видов топлива – «Уралгипроторф».

Якупов Дамир Радифович – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник. 620075, г. Екатеринбург, ул. Толмачева, д. 11, ЧУ ФНПР «Научно-исследовательский институт охраны труда в г. Екатеринбурге». E-mail: magistr98@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ОТХОДОВ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ В ЦЕЛЯХ РАЦИОНАЛЬНОГО ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

Боброва З. М., Ильина О. Ю., Хохряков А. В., Цейтлин Е. М.

Проведен анализ образования и пути использования отходов на крупных металлургических предприятиях РФ. Показана нерациональность применения отходов только в качестве закладочного материала для рекультивации отработанных карьеров. Приведен пример зарубежного опыта в этой области. Предложены направления применения шлаков металлургических производств.

Ключевые слова: отходы металлургических производств; рациональное природопользование; рекультивация отвалов; воздействие на окружающую среду; применение металлургических шлаков.

Высококачественная металлопродукция металлургических предприятий в виде отходов их производства применяется в различных стратегически важных отраслях экономики РФ, от строительства и машиностроения до производства энергетического оборудования и труб большого диаметра.

Утвержден целый ряд стратегических документов, определяющих вектор развития основных потребителей металлопродукции. Прогнозируется рост потребления металлопродукции из черных металлов, направляемой на капитальное строительство, включая строительство новых магистральных газо- и нефтепроводов, дорожное строительство и ремонтно-эксплуатационные нужды, а также для обеспечения реализации национальных проектов [1].

Одной из главных задач продолжающегося развития металлургических мощностей является значительное сокращение воздействия предприятий на окружающую среду и достижение эффективности природоохранных мероприятий на уровне не ниже лучших мировых показателей [2, 3, 4]. Исходными данными для работы послужили годовые отчеты металлургических предприятий, полученные из открытых источников.

Среди субъектов федерации по Уральскому федеральному округу с наибольшим объемом образованных отходов в 2014 г. вы-

деляются Свердловская область (185,2 млн т) и Челябинская область (73,778 млн т). Объем размещенных отходов для Свердловской области составил 105,9 млн т, для Челябинской области – 43,1 млн т [5, 6].

В рейтингах металлургических компаний, регулярно составляемых различными агентствами, показатели ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК) и «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» (ЕВРАЗ НТМК) сопоставимы. Сравнение подходов к решению экологических задач на этих предприятиях будет вполне правомерным. Также интересны показатели Новолипецкого металлургического комбината (входит в Группу НЛМК), который в первом полугодии 2015 г. благодаря реализации мероприятий «Экологической программы–2020» продолжил улучшать экологические характеристики производства, приближаясь к достижению уровня наилучших мировых доступных технологий.

Объемы производства стали составили: на ОАО «НЛМК» – 9,28 млн т, на ОАО «ММК» – 11,4 млн т, на ОАО «ЕВРАЗ НТМК» – 3,8 млн т.

Правительством Свердловской области одобрена «Концепция экологической безопасности Свердловской области на период до 2020 года». Из протокола № 7 Выездного заседания Комитета по природопользованию и экологии Свердловской области от 13.02.2012

г. в городе Нижний Тагил видно, что сравнение данных по удельным выбросам НТМК с аналогичными предприятиями Российской Федерации НМЛК и ММК показывает большую эффективность экологических мероприятий на ОАО «ЕВРАЗ НТМК».

Среди негативных результатов в государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в

2014 году» отмечено, что объем образования отходов всех классов опасности из года в год практически в два раза превышает объем использования и обезвреживания отходов, что продолжает увеличивать нагрузку на окружающую среду.

Объем образования отходов (по данным официальной статистической отчетности [7, 8]) представлен в табл.

Динамика изменения образования, использования, обезвреживания, захоронения и хранения отходов за 2007–2014 гг.

Объем образования отходов, млн т	Год					
	2007	2010	2011	2012	2013	2014
Общий объем образования отходов	3899,3	3734,7	4303,3	5007,9	5152,8	5168,3
Общий объем использования и обезвреживания отходов в Российской Федерации	2257,4	1738,1	1990,7	2348,1	2043,6	2357,2
Общий объем отходов, переданных на захоронение и хранение	2782,8	2227,5	2584,4	2912,0	4897,7	2951,4

Большое внимание ОАО «ММК» уделяет деятельности по обращению с отходами, постоянно увеличивая количество отходов, перерабатываемых на специализированных установках и утилизируемых в собственных технологических процессах. Основным направлением переработки отходов является комплексная переработка металлургических шлаков. Доля пустой породы составляет более 95 % от общего количества размещаемых ОАО «ММК» отходов производства. Основной составляющей этой деятельности является комплексная работа по переработке и повторному использованию отходов производства.

Реализация целей экологической политики ОАО «ММК» в 2014 г. позволила снизить воздействие на окружающую среду:

- валовые выбросы загрязняющих веществ в атмосферу города Магнитогорска относительно 2013 г. сократились на 942 т и составили 219,1 тыс. т;

- переработано на специализированных установках 11,2 млн т текущих и отвальных металлургических шлаков; в качестве вторичных материальных ресурсов использовано 2,26 млн т промышленных отходов;

- использовано на технический этап ре-

культивации отработанных железорудных карьеров 9,3 млн т отходов производства.

Большое внимание уделяется использованию промышленных отходов в собственном производстве и рекультивации отработанных карьеров. Результаты работ по данному направлению представлены на рис. 1.

За последние годы на ММК были построены и введены в эксплуатацию три шлакоперерабатывающих комплекса американской фирмы «AMCOM LLC» общей производительностью 6,5 млн т в год. Всего в настоящий момент переработка шлаков на ММК осуществляется на пяти установках по переработке шлаков и установке грануляции шлаков суммарной годовой производительностью более 11 млн т.

ОАО «ММК» осуществляет рекультивацию земель, ранее нарушенных объектами размещения отходов и горными работами. Так, в 2008–2009 гг. был выполнен технический этап рекультивации шламонакопителя ЛПЦ-5 площадью 12 га. В 2009–2010 гг. выполнен технический этап рекультивации шламохранилища № 1 площадью около 29 га, в 2012 г. начаты работы по биологической рекультивации территории: здесь были посажены многолетние травы, кустарники и сосны.

Другим примером восстановления нарушенных земель является рекультивация отработанных карьеров, горнотехнический этап которой осуществляется в настоящий

момент на двух объектах: Западном карьере горы Магнитной и Восточном карьере валунчатых руд. После восстановления в предыдущие годы природного ландшафта и приведе-

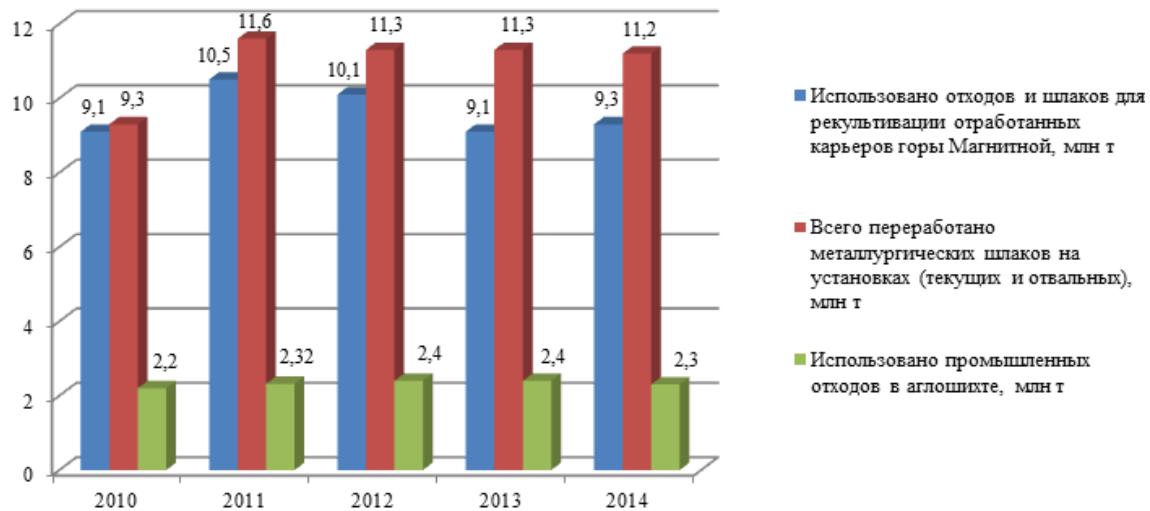


Рис. 1. Динамика использования отходов производства ОАО «ММК»

ния территории Западного карьера площадью 17,23 га в технически безопасное состояние в 2012 г. на территории площадью 1,5 га были посажены травы, акации, шиповник, а также саженцы ясения и березы. В 2013 г. работы по биологической рекультивации продолжены на площади в 3 га.

Снижение негативного воздействия на окружающую среду осуществляется за счет перехода на современные технологические процессы, оснащенные природоохранными сооружениями на базе лучших имеющихся технологий, с одновременным выводом из эксплуатации устаревших агрегатов.

Суммарная мощность переработки шлаков составляет на данный момент 11,2 млн т шлака в год. Размер отвалов metallurgicеских шлаков в ММК составляет около 60 млн т. Отгрузка потребителям шлакового щебня составила 1,86 млн т. С учетом текущего производства отвалы metallurgicеских шлаков будут полностью переработаны в течение 6–9 лет.

В соответствии с экологической программой ОАО «ММК» на 2014 г. выполнено 50 технических мероприятий (10 находятся в стадии выполнения) различной степени

сложности, направленных на сокращение и предотвращение негативного воздействия на окружающую среду. Фактические затраты на реализацию экологической программы ОАО «ММК» в 2014 г. составили 1671,7 млн руб. (в том числе на капитальное строительство – 1520,1 млн руб.).

В условиях сохраняющейся тенденции истощения природных ресурсов представляется нецелесообразным продолжать использование отвалов metallurgicеских шлаков ОАО «ММК» в качестве закладочного материала для рекультивации отработанных карьеров горы Магнитной, в то время как они могут быть использованы в качестве сырья при производстве других материалов.

На НЛМК при рекордно высоких объемах производства с 2004 г. фактически прекращено наращивание технологических отходов за счет того, что объемы их переработки превысили объемы накопления (рис. 2). За шесть месяцев 2015 г. на предприятии за счет совершенствования технологий образовалось на 12 % меньше отходов производства, чем в первом полугодии 2014 г.

Благодаря рециклингу на шлаковый отвал поступило в 1,5 раза меньше отходов произ-

водства, чем год назад. В этом году шлаковый отвал уменьшился почти на 12 тыс. т, а в целом с 2004 г. – на 3 млн т. Согласно экологической программе НЛМК к 2020 г. весь шла-

ковый отвал предприятия будет переработан, а его территория рекультивирована (рис. 3).

Новый современный природоохраный объект – комплекс переработки доменного



Рис. 2. Соотношение различных методов обращения с отходами на НЛМК

шлака – позволил перейти на безводную технологию охлаждения шлака и более чем в 8 раз снизить образующиеся при охлаждении выбросы сероводорода. Общий объем инвестиций в проект составил 409 млн руб.

На рис. 4 представлена схема получения щебня из шлаков конвертерного и доменного производств.

Щебень из доменных шлаков предназначается для устройства всех видов покрытий, оснований и подстилающих слоев дорожных одежд. Нулевую фракцию – шлаковую мелочь, обладающую вяжущими свойствами, применяют для устройства монолитных шлакобетонных оснований и покрытий.

Щебень получают медленным охлаждением шлака. Его производят из жидких шлаков (литой щебень), оставших ковшовых

остатков или из отвальных шлаков.

Литой щебень получают при сливе расплава из шлаковоза в траншею слоями толщиной 80–100 мм. После затвердевания в течение 20–30 мин. поверхность шлака орошают водой. Следующую партию шлака сливают в эту траншею после испарения влаги с поверхностного слоя. После выдержки в течение двух суток шлак разрабатывается экскаватором и направляется на дробление. Сортированный щебень транспортируется по фракциям в штабеля готовой продукции, из которых отпускается в транспорт потребителя.

Получение шлакового щебня из ковшовых остатков является технологическим завершением полного использования шлака. Ковшовые остатки, образующиеся возле стенок и на поверхности ковша при перевозке шлака,

составляют 25–30 % от жидких шлаков, которые поступают на переработку на отдельно стоящих установках для получения товарной

продукции. Их отделение представляет траншею для приема остатков, оборудованную магнитно-грейферным краном для предвари-

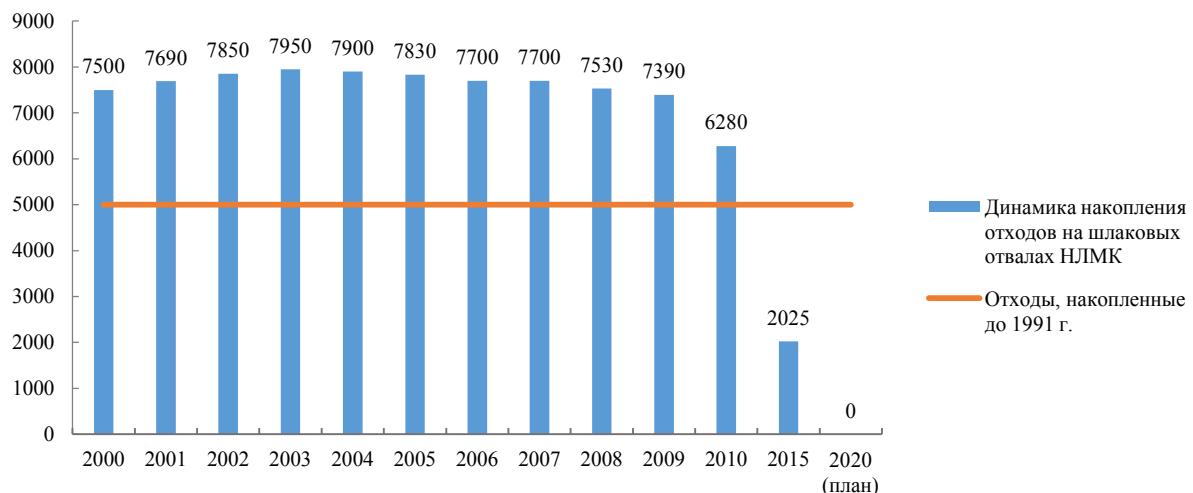


Рис. 3. Динамика накопления отходов на шлаковых отвалах НЛМК

тельного дробления и извлечения крупного металла. Выбивка остатков проводится путем удара груза по днищу чаши. Куски шлака отправляются в дробильно-сортировочное отделение.

Схемы получения щебня из отвальных шлаков представляют собой разновидности существующих дробильно-сортировочных установок. Отличаются они лишь применением передвижных агрегатов. Шлаковые отвалы могут разрабатываться как металлургическими предприятиями, так и строительными организациями – потребителями щебня. При дроблении щебня из отвального доменного шлака образуется до 15–20 % песка.

Песок полностью используется при изготовлении бетона и гипсобетона. В производстве железобетонных труб шлаковый песок заменил обычный песок и мелкий щебень, в производстве гипсошлаковых прокатных перегородок – весь обычный песок. Щебень и песок из доменных шлаков применяются в качестве заполнителей в жаростойком бетоне, заменяя щебень из боя шамотного кирпича, который в три раза дороже.

Многочисленные эксперименты показали, что доменные шлаки не уступают обычным известковым удобрениям, а в некоторых отношениях превосходят их. Главным компонентом этих шлаков является известь, котораяочно связана в силикатных соединениях.

Это препятствует быстрому ее вымыванию, наблюдаемому при применении обычных известковых удобрений, повышая тем самым абсорбционную способность почвы. Известь не только способствует питанию растений, но и снижает кислотность почвы, разрыхляет ее, способствуя удержанию влаги, возбуждает жизнедеятельность полезных микроорганизмов. Легко распадающиеся силикаты кальция шлака оказывают почти такое же нейтрализующее действие, как окись или карбонат кальция. При известковании доменным шлаком в почву вносится существенное количество окиси магния, необходимого для нормального развития картофеля, сахарной и кормовой свеклы, люцерны и других культур. В шлаке содержится окись марганца, недостаточное количество её в почве вызывает заболевания растений. Магний и другие микроэлементы принимают участие в фотосинтезе.

Помимо окиси кальция и магния, доменные шлаки содержат фосфаты, кремнезем, глинозем, железо, серу, а также следы ряда элементов, которые полезны для растений. В частности, кремнезем хорошо усваивается растениями и повышает прочность стеблей. Установлено, что растения, выращенные на почвах, где в качестве удобрения применялся доменный шлак, имеют большую сопротивляемость против заражения болезнями, чем растениями, выращенными без таких удобрений.

Молотые основные доменные шлаки способствуют улучшению структуры как легких, так и тяжелых почв. Шлаки разрыхляют плотную структуру тяжелых почв, улучшая

тем самым проникновение воздуха и влаги. В легких почвах шлак вызывает некоторую связанность комков благодаря образованию коллоидных веществ, не уступая по своему

КОНВЕРТЕРНЫЙ ШЛАК



ДОМЕННЫЙ ШЛАК

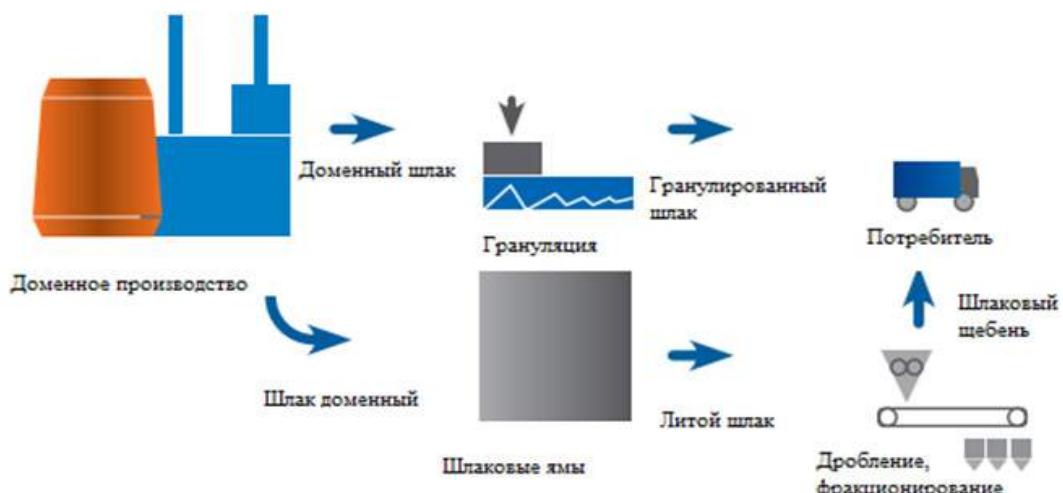


Рис. 4. Схема производства щебня из конвертерного и доменного шлаков

действию известковому мергелю.

Однако в настоящее время сами шлаки редко применяются как известковые удобрения, а используются для переработки на удобрения, в частности для получения известковой муки.

Доказана эффективность применения доменных шлаков в сельском хозяйстве в виде

гранул, т. к. влияние извести шлака длится 10–15 лет, и за этот срок крупные зерна успевают разложиться. Крупнозернистый гранулированный шлак отличается повышенным содержанием частиц размером 1 мм, а также наличием частиц размером 2,9–10 мм; он не пылит, не подвергается слеживанию, может вноситься как в зимних, так и в летних усло-

виях и обходится дешевле известковой муки, полученной из доменного шлака.

Из доменных шлаков производят брускатку для дорожного строительства, шлаковые и металлошлаковые трубы, плиты и детали трубопровода.

Производство брускатки осуществляется полигонным способом. В литейную яму устанавливают металлические формы, в которые засыпают измельченный шлак, верх накрывают пластинаами и заливают расплав.

Существенный прогресс в сфере вторичной переработки отходов может быть достигнут за счет привлечения средств среднего и малого бизнеса. При этом необходима централизованная комплексная система организации управления отходами, которая включала бы способы совмещения нескольких видов отходов при использовании их в качестве вторичных материальных ресурсов (производстве новых композиций), например: стекло и бумага – в производстве стеклопористых материалов (замена керамзита), древесные отходы и полиэтиленовая пленка – полимердревесные плиты, используемые в металлургии и резинотехнической промышленности и т. д.

Один из наиболее очевидных путей решения проблемы отходов – использование их для производства строительных материалов, силикатного кирпича и других изделий. По этому пути идут Китай, Япония, США и многие другие страны [9–13]. Причем опыт Китая в этом плане можно признать передовым.

Китай с 1 октября 2012 г. ввел новые правила, регулирующие обращение с отходами: запрещается переработка отходов в жилых кварталах, переработка опасных отходов без соответствующей лицензии, сжигание отходов полистирина и остатков, возникающих после вторичной переработки, и многое другое. Новые правила регулируют обращение как с местными отходами, так и с импортными. Очень жестко регламентируются отношения с немытыми полимерными отходами: их импорт запрещен. Также правилами оговорено, что с 1 января 2013 г. осуществлять переработку отходов смогут только те компании, которые прошли инспекционную проверку.

В Китае при каждой энергогенерирующей компании в непосредственной близости расположен завод по производству силикатного кирпича. При более крупных компаниях такого типа работают 2–3 завода по производству силикатного кирпича. Причем производимый силикатный кирпич состоит в основном на 90 % из золы. Если при этом учесть, что для автоклавной обработки используется вторичный пар, образующийся после выработки электроэнергии из энергоблоков, то становится понятным, насколько это экономически выгодное производство. Утилизация и переработка золы в КНР – одна из приоритетных задач. Китай с успехом справляется с данной проблемой, применяя золу в производстве силикатного кирпича. Например, стоимость одного утолщенного (250 × 120 × 88 мм) силикатного кирпича в пересчете на рубли в Китае обходится в 35 коп. Рыночная стоимость такого кирпича в России 8–9 руб. Таким образом, зола практически полностью используется для производства строительных материалов, не занимая огромные территории золоотвалами.

В Японии сталеплавильные шлаки используются в качестве заполнителей в бетоны, дорожные материалы, цементы и т. д. Японский патент (кл. 22/3/Д12, № 47-29592) авторов Кацуеси И, Сехей С, Кацутоси А. предлагает использовать смесь литього и доменного порошкообразного конвертерного шлаков в качестве заполнителя при производстве дорожных покрытий и бетона. Бетон повышенной плотности получают по японскому патенту № 52-29332 при использовании в качестве мелкозернистого заполнителя дробленого конвертерного шлака. Способ использования конвертерных шлаков в качестве заполнителя при производстве асфальта разработан совместно фирмами «Ниппон Кокай» и «Ниппон Ходо» (Япония). Этот способ позволяет утилизировать более 10 млн т шлака ежегодно.

В Японии шлаки применяются в основном для производства заполнителя. Последнее направление позволяет вовлечь в строительный комплекс значительно большее количество

шлака, чем в производство из него вяжущих веществ. Особенно эффективно производство шлакового щебня при использовании технологии придоменной переработки шлака. При этом используется та тепловая энергия, которая была аккумулирована шлаковым расплавом в процессе производства чугуна. Такая технология позволяет достичь значительной экономии топливно-энергетических ресурсов.

Одной из причин уменьшения использования доменных гранулированных шлаков цементной промышленностью является падение спроса на шлакопортландцемент. В этой связи приобретает большое значение расширение масштабов производства шлакового заполнителя, в том числе шлаковой пемзы, которая является заменителем керамзита, а также литого шлакового щебня для тяжелых бетонов.

Необходимо подчеркнуть, что бетоны с заполнителем из доменных гранулированных шлаков отличаются рядом преимуществ перед традиционными бетонами. Как было установлено, доменный шлак в составе портландцементного бетона выполняет функцию активного заполнителя, т. е. его поверхностный слой реагирует с гидроксидом кальция, выделяющимся при гидролизе алита. При этом образуется дополнительное количество гидросиликатов кальция, которые создают чрезвычайно прочную связь заполнителя с цементной матрицей, полностью исчезают капиллярные каналы, которые в результате усадки цементного камня образуются между ним и поверхностью заполнителя. Это приводит к значительному повышению коррозионной стойкости бетона с активным заполнителем по сравнению с традиционными составами в большинстве агрессивных сред, в том числе даже против такого грозного вида химической агрессии, как кислотная. Кроме того, благодаря специфической структуре и отсутствию микрозазоров на границе раздела вяжущего и заполнителя, такие бетоны обладают отличительными физико-механическими характеристиками. Именно этим обусловлено широкое применение бетонов

на шлаковом заполнителе в Японии и других странах.

Все старые шлаковые отвалы в значительной степени переработаны, а шлаки текущего выхода перерабатываются или используются полностью. Опыт показал, что асфальтобетоны на сталеплавильных шлаках отличаются высокой сдвигостойчивостью при повышенных температурах воздуха.

В Японии в качестве сырья для цементной промышленности применяют конвертерный или доменный шлаки для получения специального ферритцементного клинкера; при этом существенно снижается расход топлива на обжиг указанного клинкера по сравнению с обычным портландцементным клинкером.

В Японии, как известно, высокая сейсмическая активность, и в этой стране всегда делали высокомарочный чистый цемент. В то же самое время страны ЕС двигались в сторону увеличения добавок. Когда в Европе были приняты новые нормы, японцы сравнили их со своими и поняли, что они, работая по текущей схеме, тратят слишком много сил и средств на производство стандартного продукта. В результате японские производители переняли европейский опыт, как, впоследствии, и США с Канадой.

Европейский подход более приемлем еще и потому, что уменьшает загрязнение окружающей среды. Меньше расходуется энергии – меньше выбросов CO₂ в атмосферу. Замечено, что добавки в виде сульфатированных клинкеров позволяют снижать количество других компонентов (например, известняка, на добывчу которого тратится много энергии). Улучшается качество цемента, он быстрее твердеет. На принципы экологической политики в производстве сегодня переходят почти все правительства развитых стран. Зарубежные специалисты считают, что эра бездобавочных цементов закончилась. Необходимо искать и придумывать новые примеси, которые существенно улучшили бы свойства бетона.

Области применения шлаков и золы в строительной индустрии описываются по масштабности использования сырья, относящегося к крупнотоннажному производству:

- производство силикатного кирпича;
- производство газосиликатобетонных блоков и изделий, в том числе и армированных;
- производство сухих строительных смесей более 20 видов по области применения;
- производство гидравлических вяжущих и добавок к портландцементу;
- производство теплоизоляционных материалов;
- производство строительных шпатлевок, герметизирующих материалов (в качестве наполнителя);
- производство тонких ультрадисперсных наполнителей;
- производство фильтров тонкой очистки промышленного назначения;
- производство гидравлических вяжущих: пуллонового цемента, золо-шлако-известкового вяжущего, добавки к портландцементу. Например, марка ПЦ-400 Д20 означает, что портландцемент марки 400 содержит в своем составе 20 % тонкомолотых шлаков, при сохранении прочностных характеристик, другие виды цементов специального назначения;
- производство теплоизоляционных материалов, аналогичных стекловате, базальтовым или муллитовым ватам различного технического назначения;
- производство тонкомолотых наполнителей;
- производство газосиликатобетонных блоков, изделий автоклавного твердения теплоизоляционного стенового строительного материала;
- производство шпатлевок и клеевых составов строительного и технического назначения на вододисперсионной вяжущей основе;
- в химической промышленности: производство катализаторов, производство наполнителей (производство резинотехнических изделий реактопластов и термопластичных материалов, производство герметиков в качестве наполнителей) и т. д.

Позитивным примером рационального

природопользования может служить шлаковый отвал Белорецкого металлургического комбината (БМК), который расположен на площади порядка 27 га, в двух-трех километрах от города. По оценкам специалистов, в отвале находится около 3,5 млн т доменных и мартеновских шлаков.

До 2007 г. переработкой шлака занималась БМК. В 2007 г. в компании «Мечел» было принято решение выделить направление, специализирующееся на переработке отходов металлургического производства с целью их вторичного использования и снижения экологической нагрузки на подведомственных предприятиям территориях, и создать ООО «Мечел-Материалы». В октябре 2008 г. шлаковый отвал БМК стал одним из участков нового подразделения.

В октябре 2013 г. компания «Мечел» закончила строительство комплекса по производству шлакопортландцемента мощностью 1,6 млн т. Строительство на базе Челябинского металлургического комбината вела дочерняя компания ОАО «Мечел» – ООО «Мечел-Материалы». Мощность предприятия составляет 1,6 млн т продукции в год. На возведение завода было потрачено 174,4 млн долл. Строительство велось с 2010 г. за счет средств, выделенных банками *Commerzbank Aktiengesellschaft* (ФРГ) и *UniCreditBank Austria AG* (Австрия). В качестве подрядчика выступила компания *FMW GmbH* из Австрии. В настоящее время на предприятии проводятся испытания оборудования.

В качестве сырья на предприятии будет использоваться доменный шлак металлургического комбината, т. е. предполагается безотходное производство. Шлакопортландцемент широко используется для производства железобетонных изделий и конструкций, требующих пропаривания, производства конструкций, работающих во влажных условиях или в горячих цехах, возведения наземных и подземных сооружений, наиболее подверженных действию агрессивных сред. Данный материал широко используется в строительстве и доказал свою эффективность при возведении гидроэлектростанций, цехов предприятий

черной металлургии и тяжелой индустрии.

На примере деятельности по обращению с отходами производства и потребления в Магнитогорске видно, что использовано на технический этап рекультивации отработанных железорудных карьеров 9,3 млн т отходов производства из шлакового отвала, при этом происходит смешивание их с другими закладочными материалами, в том числе с твердыми бытовыми отходами ЖКХ города. Для сравнения, в Липецке шлаковый отвал уменьшился в целом с 2004 г. всего на 3 млн т.

По информации в отчетах ММК, отгрузка потребителям шлакового щебня составляет 1,8–1,9 млн т, переработке подвергается около 11 млн т шлаков; с учетом текущего производства отвалы metallurgических шлаков будут полностью переработаны в течение 6–9 лет. Это позволяет сделать пессимистичные выводы о том, что шлаки расходуются нерационально, и они не будут использованы в качестве сырья для производства цемента или других строительных материалов.

Бережное отношение к окружающей среде является одним из главных требований, которые предъявляются сегодня к любому современному производству. Поэтому, планируя долгосрочное и устойчивое развитие, руководство каждого предприятия обязано считать сокращение вредных воздействий на

окружающую среду и рациональное природопользование одними из своих стратегических целей.

Планирование долгосрочного и устойчивого развития metallurgических комплексов должно основываться на принципах рационального природопользования, стимулировать максимально полное использование ресурсов.

Итак, проведение metallurgическими предприятиями мероприятий по повышению технического и технологического уровня производства способствует расширению номенклатуры и созданию новых видов продукции и росту потребления чёрных металлов.

Актуальным остается сокращение объема накопленных и вновь образующихся отходов за счет вовлечения их в хозяйственный оборот, внедрения и совершенствования технологий по их переработке с последующим получением полезной продукции.

Экологическая политика разработана и реализуется на всех metallurgических предприятиях; стратегической целью является постоянное снижение и предотвращение вредного воздействия на окружающую среду.

В условиях истощения природных ресурсов представляется нецелесообразным использование отвалов metallurgических шлаков в качестве закладочного материала для рекультивации отработанных карьеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Стратегия развития metallurgической промышленности РФ до 2020 г. (приказ № 150 от 18.03.2009 г.).
2. Хохряков А. В., Цейтлин Е. М. Образование отходов metallurgических предприятий Урала и их воздействие на окружающую среду / Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14. № 1–3. С. 834–837
3. Хохряков А. В., Фадеичев А. Ф., Цейтлин Е. М. Динамика изменения воздействия ведущих горных предприятий Урала на окружающую среду. Изв. вузов. Горный журнал. 2011. № 8. С. 44–53.
4. Антонинова Н. Ю., Шубина Л. А. Экологическая реабилитация экосистем в районах функционирования горно-metallurgических комплексов // Изв. вузов. Горный журнал. 2013. № 8. С. 64–68.
5. О состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области в 2014 году: государственный доклад.
6. Комплексный доклад о состоянии окружающей среды Челябинской области в 2014 году. Екатеринбург, 2015.
7. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2013 году: государственный доклад. Челябинск, 2014.
8. Федеральная служба государственной статистики. URL: <http://www.gks.ru>
9. Боброва З. М., Ильина О. Ю., Зуева Т. Ю. Анализ способов обращения с отходами в г. Магнитогорске / Литейные процессы: межрегион. сб. науч. тр. / под ред. В. М. Колокольцева. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2014. Вып. 13. С. 212–216.
10. Ивановская О. С., Сычева Т. С., Боброва З. М. Изучение свойств, способов переработки и применения metallurgических шлаков // Актуальные проблемы современной науки: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. Уфа: Научный центр «АЭТЕРНА», 2014. С. 25–26.
11. Ильина О. Ю., Пивоварова К. А., Домнин В. Ю. Перспективные направления в сфере применения отходов производства и потребления в строительной индустрии // Актуальные проблемы архитектуры, строительства и диг-

- зайна: сб. матер. Междунар. студ. науч. конф. / под общ. ред. М. Б. Пермякова, Э. П. Чернышовой. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2015. С. 75–78.
12. Сомова Ю. В., Сомов В. А., Давлетова Д. Д. Применение безотходной технологии при переработке доменных шлаков // Дальневосточная весна – 2015: матер. 13-й Междунар. науч.-практ. конф. по проблемам экологии и безопасности. Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2015. С. 145–148.
13. Старостина Н. Н., Мансурова М. С. Анализ возможности снижения загрязнения окружающей среды при утилизации отвалов горного производства // Экология и безопасность жизнедеятельности. 2014. № 1. С. 141–146.

Боброва Залия Маратовна – кандидат технических наук, доцент. 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова. E-mail: eco_safe@magtu.ru

Ильина Оксана Юрьевна – кандидат технических наук, доцент. 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, Магнитогорский государственный технический университет имени Г. И. Носова. E-mail: eco_safe@magtu.ru

Хохряков Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой инженерной экологии. 620144, г. Екатеринбург, Куйбышева 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: scarface2004@rambler.ru

Цейтлин Евгений Михайлович – кандидат геолго-минералогических наук, доцент. 620144, г. Екатеринбург, Куйбышева 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: tseitlin.e.m@gmail.com

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ТИПА «ОТВАЛЫ АЛЛАРЕЧЕНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ» (ПЕЧЕНГСКИЙ РАЙОН МУРМАНСКОЙ ОБЛАСТИ)

Болтыров В. Б., Селезнев С. Г., Стороженко Л. А.

На примере техногенного объекта «Отвалы Аллареченского месторождения» (Печенгский район Мурманской области) показаны масштабы загрязнения окружающей среды, которое могут создавать отходы горнодобывающих предприятий в местах их накопления. Описаны процессы изменения химического и минералогического состава руд, приводящие не только к деградации окружающей среды, но и к значительному обесцениванию техногенного объекта как источника минеральных ресурсов.

Ключевые слова: техногенный объект; горнопромышленные отходы; сульфидные медно-никелевые руды; магнитная сепарация; техногенная нагрузка; деградация экосистемы; инфляция запасов.

Техногенный объект (ТО) «Отвалы Аллареченского месторождения» расположен в Печенгском районе Мурманской области и представляет собой отвал горных пород, образованный отходами добычи коренного Аллареченского месторождения сульфидных медно-никелевых руд. Разработка месторождения велась открытым способом и была завершена в 1971 г. [1]. Основными добываемыми полезными ископаемыми являлись никель, медь и кобальт.

В процессе эксплуатации месторождения образовались новые формы рельефа. Это карьер площадью в верхней части 1000×300 м и глубиной более 75 м, который в настоящее время затоплен; кроме того сформирован отвал, превышение абсолютных отметок которого над окружающим рельефом составляет около 50 м, а общий объем пород оценивается в 6,7 млн м³ (более 12 млн т). Также значительно изменился гидрологический режим местности (было перенесено русло реки Алла). После завершения эксплуатации карьер, отвалы и нарушенные земли были заброшены.

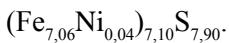
Породы отвала представлены вскрышными, преимущественно безрудными гнейсами, гранито-гнейсами, амфиболитами и в разной степени оруденелыми вмещающими породами: перidotитами, оливинитами, kontaktovymi амфиболитами и др. Состав мелкозернистой фракции определяют раздробленные

в процессе взрывных работ вмещающие и вскрышные породы, в том числе вскрышные четвертичные флювиогляциальные и озерно-ледниковые отложения. Гранулометрический состав пород отвала весьма неравномерен и характеризуется следующими усредненными параметрами: ($-2000+500$ мм) – 5–15 %; ($-500+300$ мм) – 15–25 %; ($-300+150$ мм) – 25–35 %; ($-150+5$ мм) – 25–30 %; (-5 мм) – 10–15 %.

Руды отвала представлены двумя типами – массивными (сплошными) и вкрапленными. Основными рудными минералами обоих типов являются пирротин, пентландит и реже халькопирит, которые находятся в тесной парагенетической связи с магнетитом.

Доминирующим концентратором никеля в руде является пентландит. Его средний химический состав, определенный по данным микрозондовых анализов, в массивных рудах: Ni – 35,3; Fe – 30,8; Co – 0,7; S – 33,2; сумма – 99,9; формула: $(Ni_{4,65}Fe_{4,26}Co_{0,08})_{8,99}S_{8,00}$; во вкрапленных: Ni – 34,1; Fe – 32,0; Co – 0,6; S – 33,0; сумма – 99,7; формула: $(Ni_{4,50}Fe_{4,44}Co_{0,08})_{8,02}S_{8,98}$.

Относительно небольшая доля никеля приходится на пирротин. Его средний химический состав, определенный по данным микрозондовых анализов, в массивных рудах: Fe – 60,1; Ni – 0,3; S – 39,5; сумма – 99,9; формула: $(Fe_{6,98}Ni_{0,03})_{7,01}S_{7,99}$; во вкрапленных: Fe – 60,6; Ni – 0,3; S – 38,9; сумма – 99,8; формула:

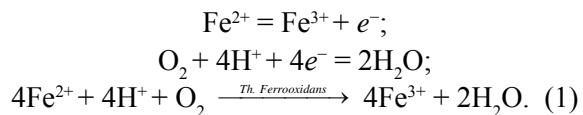


Медь сконцентрирована преимущественно в составе тетрагонального халькопирита. Химический состав этого минерала практически одинаков во всех рудах и отвечает стехиометрии $(\text{Cu}, \text{Fe})\text{S}_2$: Cu – 34,6; Fe – 30,4; S – 35,0; сумма – 100.

Единственным концентратором кобальта в рудах является пентландит. И пентландит, и пирротин весьма неустойчивы в условиях гипергенеза. В срастаниях образуют гальваническую пару, в которой пентландит (у которого электродный потенциал выше) исполняет роль анода. В результате в первую очередь происходит окисление моноклинного пирротина как одного из наименее устойчивых минералов сульфидных руд. Низкая устойчивость моноклинного пирротина обусловлена его кристаллохимическими особенностями. Хотя эта разновидность пирротина имеет структуру, аналогичную троилиту и гексагональному пирротину, соотношение атомов Fe и S существенно ниже 1:1 и составляет 7:8. Нестехиометрическая формула сульфида объясняется дефектами структуры – уда-

лением части атомов железа. Упорядоченное размещение вакансий приводит к понижению симметрии минерала и появлению у него магнитных свойств. Процесс окисления пирротина протекает с образованием свободной серной кислоты, которая действует как на сам пирротин, так и на ассоциирующие с ним минералы, в частности, пентландит.

Электрохимические реакции многократно ускоряются и усиливаются присутствием в рудах бактерий *Th. Ferrooxidans*, основой обеспечения жизнедеятельности которых является их способность к окислению (переводу) оксида железа (Fe^{2+}) в оксид (Fe^{3+}). Реакции осуществляются в соответствии со схемой:



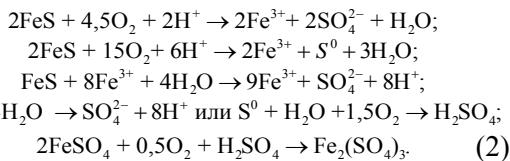
Бактерии *Th. Ferrooxidans* характерны не только для руд отвалов Аллареченского месторождения. Они достаточно распространены и в других медно-никелевых месторождениях арктической зоны Кольского полуострова [2] (табл. 1).

Таблица 1

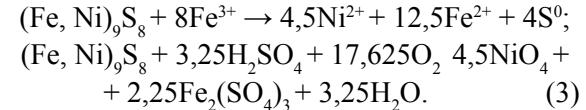
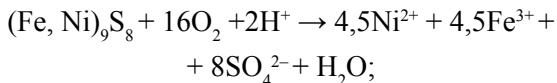
**Распространенность бактерий *Th. Ferrooxidans*
в рудах медно-никелевых месторождений Кольского полуострова**

Месторождения	Температура проб, °C	pH растворов	Eh растворов	Количество клеток в 1 г руды
Каула	2–4	7–8	–	0–10 ²
Ниттис-Кумужье	2–4	6–8	0,20–0,40	0–10 ³
Нюд	2–4	2,4–2,8	–	10 ³ –10 ⁴

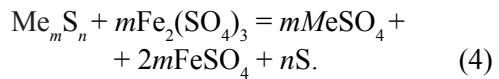
В соответствии с формулой (1) реакция биологического окисления пирротина протекает по вероятной схеме [3]:



Реакция биологического окисления пентландита дополняется реакциями по схеме:

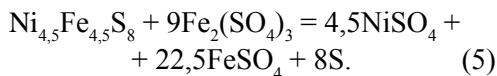


В свою очередь, образуемый в процессе данных реакций сульфат оксида железа также является сильным окислителем сульфидов и взаимодействует с ними по известной реакции:



В соответствии с формулой (4) распад пентландита осуществляется по следующей

реакции:



В обычных условиях получаемый в результате этой реакции сульфат оксида железа (Fe^{2+}) в кислых растворах очень медленно окисляется до сульфата оксида железа (Fe^{3+}), но в присутствии микроорганизмов скорость его окисления увеличивается в десятки тысяч раз, что намного ускоряет процесс разрушения сульфидов.

Следует отметить, что процесс выщелачивания сульфидной массы отвалов не прекращается даже в зимний период, о чем свидетельствует образование проталин в снегу, из которых выделяется пар.

В результате окисления значительная часть сплошных руд отвалов потеряла свои первоначальные свойства. Так, если в богатых разновидностях первичных руд коренного Аллареченского месторождения содержания полезных компонентов достигали: Ni – 18 %, Cu – 8 %, Co – 0,3 %, то в отвалах в их окисленных аналогах максимальные обнаруженные содержания не превышают Ni – 3,3 %, Cu – 2,0 %, Co – 0,05 %.

В результате химических изменений в рудах появляются также характерные гипергенные минералы, такие как ковеллин (CuS), самородная медь, виоларит, ретгерсит ($a\text{-Ni}[\text{SO}_4] \times 6\text{H}_2\text{O}$) и подобные ему.

Обращает на себя внимание постоянное присутствие в рудах виоларита. Его средний химический состав, по данным микрозондовых анализов, соответствует (масс. %): Fe – 21,0; Ni – 35,3; Co – 0,8; S – 42,6, что отвечает формуле $(\text{Ni}_{1,52}\text{Fe}_{1,14}\text{Co}_{0,04})_{3,00}\text{S}_{4,00}$. О гипергенном происхождении этого минерала свидетельствует очень близкий для пентландита показатель соотношения Ni/Co, что говорит о замещении пентландита виоларитом. Кроме того, под электронным микроскопом виоларит часто наблюдается в сростках с гетитом ($a\text{-FeOOH}$) и обладает многочисленными трещинами, что свидетельствует о дефиците объема в результате выноса железа.

Особо отмечается повсеместное распространение ретгерсита, который образует хорошо заметные сине-зеленые натеки на вмещающих породах. Он частично аккумулируется в мелкозернистой фракции, а также, вследствие своей легкой растворимости, выносится вместе с атмосферными осадками и паводковыми водами в нижние горизонты и за пределы отвалов.

Показательны результаты тестирования наличия водорастворимых минералов в мелкозернистой ($-3+0$ мм) фракции в пробе с содержаниями никеля – 0,36 %, меди – 0,41 %, серы – 1,57 %. Тестирование длилось в течение трех часов при постоянном перемешивании воды, имеющей температуру 95 °C (табл. 2).

Таблица 2

Результаты тестирования наличия водорастворимых минералов, содержащихся в мелкозернистой ($-3+0$ мм) фракции

№	Измельчение	Выход нерастворимого остатка, %	Eh, mB	pH	Конечный раствор				Извлечение в раствор, %	
					Плотность, г/см ³	Концентрация, г/литр			Ni	Cu
						Ni	Cu	Fe		
1	Нет	98,5	373	3,11	1,003	0,127	–	0,05	14,5	–
2	Да	98,1	359	3,43	1,002	0,063	–	0,046	6,7	–

Из приведенных данных видно, что в количественном отношении сульфаты никеля в классе крупности $-3+0$ мм аккумулируют в себе не более 14,5 % от общего никеля. Но,

учитывая, что этот класс по объему составляет около 10 % всего отвала, а также принимая во внимание повсеместное распространение ретгерсита в крупнозернистой фракции, сле-

дует ожидать, что не менее 3–5 % общего никеля ТО представлено его сульфатами.

Обращает на себя внимание отсутствие водорастворимых (сульфатных) форм меди в тестовых опытах, что однозначно указывает на более интенсивную способность к окислению и растворению никеля в сравнении с медью.

Таким образом, очевиден вывод, что пентландит, основной полезный минерал, содержащийся в отвалах, в силу своей неустойчивости в гипергенных процессах одновременно является доминирующим источником загрязнения окружающих территорий никелем.

С целью определения уровня и ареалов загрязнения участка расположения ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» в 2010 г. был проведен экологический мониторинг, позволивший оценить состояние местных экосистем и направление максимальной миграции токсичных веществ. В процессе работ по мониторингу опробовались поверхностные воды, мох (*Pleuroziumschreberi*) и верхний органогенный почвенный горизонт (A_o).

Анализ поверхностных вод позволил выявить загрязненность всех водоемов, расположенных в непосредственной близости к

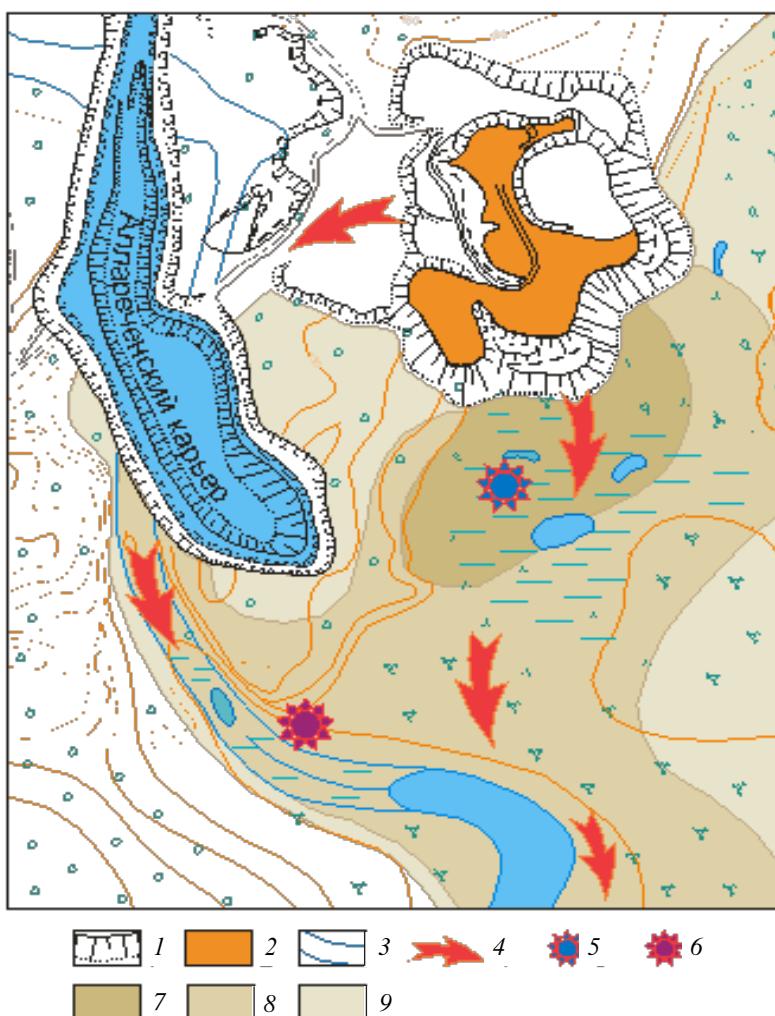


Рис. 1. Ситуационный план ТО «Отвалы Аллареченского месторождения»:
1 – границы кровли и подошвы ярусов отвала; 2 – рудосодержащий участок отвала;
3 – бывшее русло р. Аллы; максимальное выявленное загрязнение: 4 – поверхностных вод; 5 – почвенно-растительного слоя; степень деградации экосистем: 6 – техногенная пустошь; 7 – прогрессирующая деградация; 8 – слабая степень деградации; 9 – преобладающие направления потоков поллютантов

отвалам, никелем (превышение ПДК в 3–79 раз). Также во всех водоемах нарушено соотношение распределений главных ионов,

характерное для вод пресных озер. Особенно загрязнено болото, примыкающее к отвалам с южной стороны (рис. 1), в котором концент-

рации Ni превышают ПДК в 4736 раз; Cu – в 1,2 раза; Co – в 5,3 раза; Mn – в 5,5 раз; аниона (SO_4^{2-}) – в 1,8 раза; содержание Cd при этом почти критическое. Вода в болоте имеет кислую среду ($\text{pH} = 3,65$).

Вода затопленного карьера оказалась менее загрязненной, чем предполагалось (превышение ПДК никеля в 38 раз). Однако из-за отсутствия специального оборудования был опробован лишь поверхностный слой, и послойное глубинное картирование не проводилось. С большой уверенностью можно утверждать, что общее загрязнение указанного водоема во много раз больше, о чем свидетельствует сине-зеленый цвет содержащейся в нем жидкости. Кроме того, нижние горизонты затопленного карьера не являются проточными, вследствие чего концентрации тяжелых металлов (в том числе сульфатов) с глубиной увеличиваются во много раз. Но даже если использовать данные результатов анализов содержания никеля в поверхностном слое (0,75 мг/л), то элементарные расчеты показывают, что воды карьера аккумулируют в себе не менее 5,5 т растворенного никеля.

Не менее загрязненными оказались почвы. Так, в верхнем органогенном почвенном горизонте болота, расположенного с южной стороны отвала, выявленные концентрации тяжелых элементов превысили условно-фоновые показатели¹: Ni – в 877 раз, Cu – в 227 раз, Co – в 61 раз. Но наибольшее загрязнение было отмечено на достаточном удалении от отвала, в левом берегу бывшего русла р. Аллы (рис. 1). Превышения концентраций поллютантов в этом месте в сравнении с условно-фоновыми показателями составили: Ni – в 1172 раза, Cu – в 123 раза, Co – в 233 раза.

Результаты химического анализа образцов мха *Pleuroziumschreberi* участка не выявили значительного превышения условно-фоновых содержаний, характерных в целом для района расположения отвала.

Тот факт, что мхи и лишайники концентрируют в себе химические элементы из сухих и мокрых атмосферных осадков (в результате чего используются в качестве биоиндикаторов атмосферного загрязнения), указывает, что загрязнение участка обусловлено только длительным воздействием ядовитых стоков отвала. При этом направление миграции поллютантов контролируется формами рельефа и осуществляется вдоль старого русла р. Аллы. В связи с этим возникает угроза загрязнения крупнейшей водной артерии Кольского полуострова – р. Тулома.

В результате техногенной нагрузки на прилегающих к отвалу территориях наблюдается прогрессирующая деградация экосистем. Некоторые участки превратились в техногенную пустошь (рис. 2, 3). При этом площадь пострадавших территорий значительно превышает площадь подошвы самого отвала.

Таким образом, если на начальном этапе хранения горнoprомышленных отходов типа «Отвалы Аллареченского месторождения» их ещё можно перерабатывать с финансовой выгодой, то с течением времени потребительская ценность полезных компонентов таких объектов становится ниже себестоимости их извлечения, они превращаются в источник постоянного негативного воздействия на окружающую среду.

В случае с ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» можно подсчитать экологический ущерб и ущерб от инфляции запасов.

В настоящее время около 3–4 % или 200–250 т (с учетом ресурсов и запасов) общего никеля ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» представлено его сульфатами, которые можно отнести к потерям технологического характера при обогащении руд традиционными способами, например флотацией.

Несложно произвести расчет количества Ni, который успел эlimинировать на нижние горизонты и за пределы отвалов в период их хранения.

¹ Условно-фоновые показатели приняты по данным обследования 610 разрезов горизонта A₀ подзолов на Кольском полуострове и соседней территории Финляндии и Норвегии.

За период эксплуатации Аллареченского месторождения в отвалы с различными типами руд поступило не менее 5–6 тыс. т Ni и 2,3–2,8 тыс. т Cu при среднем соотношении их в руде (2,0–2,3):1. Однако в отвалах Аллареченского месторождения соотношение



Рис. 2. Прогрессирующая деградация экосистемы: почти полное отсутствие напочвенного покрова

Ni:Cu нарушено и меняется от 5,9–2,5 в классах –150+40 мм до 1,35–1,5 в классе –40+10 мм, составляя 0,9–0,3 в классе –10 мм. Это свидетельствует об избирательном выщелачивании Ni в сравнении с Cu|. При этом средневзвешенное содержание Cu в классе –10 мм составляет 0,53 %, что существенно выше среднего её содержания в отвалах: 0,33 % в балансовых блоках и 0,1 – 0,18 % в участках забалансовых руд.

Учитывая, что класс крупности –10 мм составляет 20–30 % от объема отвальной массы, нетрудно подсчитать, что в нем аккумулируется не менее 40 % всей меди, вывезенной в отвалы при эксплуатации Аллареченского месторождения, или 0,9–1,1 тыс. т. Следовательно, учитывая природное соотношение Ni и Cu, класс –10 мм должен был аккумулировать не менее 1,9–2,4 тыс. т Ni. Однако в реальности его запасы в этом классе ниже, чем запасы Cu.

Таким образом, в результате гипергенных

процессов не менее 1,2–1,3 тыс. т (5-я часть запасов) никеля в виде его сульфатов и окислов были элиминированы за пределы отвалов или в его нижние горизонты.

Средняя цена никеля на Лондонской бирже цветных металлов LME, сложившаяся в 2014 г., составляет 15880 долл. за 1 т [4]. В результате оцененный ущерб от инфляции запасов ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» за сорокалетний период его хранения составляет около 20 млн долл., или около 600 млн руб.

Экологический ущерб можно оценить в соответствие с Методикой, утвержденной Государственным комитетом Российской Федерации по охране окружающей среды [5], по формуле:

$$Y = Y_{\text{уд}}^{\text{отх}} K_i V_{\text{отх}}, \quad (6)$$

где $Y_{\text{уд}}^{\text{отх}}$ – показатель удельного ущерба от размещения 1 т отходов, который рассчитывается по формуле:

$$Y_{уд}^{отх} = \frac{H_c SK'' + Y_{уд}^a M^a K_i^a}{V_{отх}}, \quad (7)$$

где H_c – норматив стоимости освоения земель, руб./га; S – площадь мест организованного захоронения отходов, га; K'' – коэффициент экологической значимости почв и земельных ресурсов для конкретного экономического района РФ; $Y_{уд}^a$ – показатель удельного ущерба атмосферному воздуху; M^a – приведенная масса выбросов загрязняющих веществ, усл. т; K_i^a – коэффициент экологической значимости атмосферного воздуха для конкретного

экономического района РФ; $V_{отх}$ – объем отходов, размещенных в местах организованного захоронения, т; K_i^o – коэффициент, учитывающий класс опасности отхода.

Для ТО «Отвалы Аллареченского месторождения» коэффициенты, рассчитанные в соответствии с данной методикой, равны: $Y_{уд}^{отх} = 115,6$ руб. (в ценах 1999 г.); $K_i^o = 2,5$ как для сульфидсодержащего отхода II–III классов опасности.

Таким образом, в соответствие с формулой (6), почвам и земельным ресурсам участка ТО «Отвалы Аллареченского месторожде-



Рис. 3. Полное отсутствие напочвенного покрова (техногенная пустошь)

ния» в результате размещения этого объекта нанесен ущерб в размере: $115,6 \times 2,5 \times 1$ 2млн т = 3,5 млрд неиндексир. руб.

Помимо рассчитанных прямых ущербов следует упомянуть о косвенных ущербах, не поддающихся подсчету. В их числе, например, бюджетный и социальный ущерб, вызванный сокращением запасов ТО; ущерб от повышенного уровня заболеваемости населения, связанного с хранением горнопромышленных отходов; ущерб биологическим

ресурсам и рыбному хозяйству и др.

Таким образом, с позиций синергетики все объекты размещения горнопромышленных отходов являются ярко выраженными прогрессивно самоорганизующимися диссипативными структурами. Процессы гипергенных изменений, заключающиеся в системе многочисленных окислительно-восстановительных реакций с закономерной энергетической направленностью, приводят к физическому разрушению пород, электро-

химическому и биохимическому преобразованию минералов, заметно ухудшающих качество первоначальных руд, а также пере- распределению полезных компонентов, которые элиминируют в окружающие территории, превращаясь в поллютанты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селезнев С. Г., Степанов Н. А. Отвалы Аллареченского сульфидного медно-никелевого месторождения как новый геолого-промышленный тип техногенных месторождений // Изв. вузов. Горный журнал. 2011. № 5. С. 32–40
2. Яхонтова Л. К. Основы минералогии гипергенеза: учеб. пособие / Л. К. Яхонтова, В. П. Зверева. Владивосток: Дальнаука, 2000. 331 с.
3. Адамов Э. В., Панин В. В. Биотехнология металлов: курс лекций. М.: Изд. Дом МИСиС, 2008. 153 с.
4. Центральный металлический портал РФ. URL: <http://metallicheckiy-portal.ru/index-cen-lme>
5. Методика определения предотвращенного экологического ущерба. М., 1999.
6. Селезнев С. Г. Отвалы Аллареченского месторождения сульфидных медно-никелевых руд – специфика и проблемы освоения: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург, 2013. 23 с.

Болтыров Владимир Босхаевич – доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геологии и защиты в чрезвычайных ситуациях. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: glzchs@mail.ru

Селезнев Сергей Геннадьевич – кандидат геолого-минералогических наук, главный геолог. 184420, Мурманская область, пгт. Никель, Гвардейский просп., 6/1, офис 6, ООО «Монолит». E-mail: glzchs@mail.ru

Стороженко Любовь Александровна – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры геологии и защиты в чрезвычайных ситуациях, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: stor_luba@mail.ru

РАССЕЯНИЕ УПРУГИХ ВОЛН ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫМ ОГРАНИЧЕННЫМ ОБЪЕКТОМ

Сурнев В. Б., Исламгалиев Д. В.

В статье описана математическая модель рассеяния упругих (сейсмических) волн предварительно напряженной ограниченной неоднородностью. Приведен вывод интегральных уравнений, обобщающих известные уравнения теории рассеяния упругих волн на случай предварительно напряженной неоднородности, без использования общей теории распространения волн в среде с предварительными напряжениями. Предлагается алгоритм численного моделирования рассеяния упругих волн на основе полученных уравнений.

Ключевые слова: гетерогенная среда; теория рассеяния; упругие волны; интегральные уравнения; предварительные напряжения.

Вводные замечания. Модель гетерогенной среды можно представить как сплошную однородную (фоновую) среду, в которой имеются как неоднородности, которые можно описать непрерывными функциями, так и локализованные включения с резкими границами. В общем случае предполагается, что неоднородности распределены случайным образом по некоторому закону [1]. Основой теории распространения волн, в частности, упругих, в гетерогенной среде является теория элементарного акта рассеяния волн уединённой неоднородностью [2, 3]. В статье рассматривается развитие теории элементарного акта рассеяния упругих (сейсмических) волн на случай локализованной предварительно напряженной неоднородности земной коры.

На рис. 1 в качестве примера гетерогенной среды изображен сильно упрощенный вариант типичного геологического разреза [4], отражающий известный из эксперимента факт того, что в твёрдой Земле в большом числе имеются локализованные неоднородности. Существование этих неоднородностей может быть обусловлено многими геологическими причинами, например, неоднородностью вещественного состава, наличием областей концентрации тектонических напряжений и т. д., причём характерный размер этих неоднородностей может варьироваться в широких пределах. Наиболее сложным для изучения является случай, когда характерные разме-

ры неоднородностей сравнимы или меньше длин распространяющихся в фоновой среде упругих (сейсмических) волн. Наличие таких неоднородностей в геологической среде приводит к тому, что процессы рассеяния сейсмических волн приобретают существенное значение для физики распространения последних [4, 5]. Таким образом, геологическая среда является характерным примером гетерогенной среды.

Ещё одним примером гетерогенных сред являются композиционные материалы (композиты), которые повсеместно встречаются в технике, например, в самолётостроении, строительстве и т. д. С композиционными материалами мы постоянно встречаемся в повседневной жизни. Так, например, стены наших домов, построенные из бетонных панелей, армированных металлическими стержнями, являются типичным композитом, не говоря уже о кирпичной кладке, которая является, по существу, в высокой степени упорядоченным композитом.

Композиты обладают многими полезными свойствами, такими как повышенная прочность, небольшой по сравнению с аналогичными по свойствам однородными материалами удельный вес и т. д., а широкое применение композитов обуславливает необходимость прогнозирования их свойств и поведения при различных внешних воздействиях. Такой прогноз может быть основан на сборе большого числа экспериментальных

данных и поиске эмпирических формул, моделирующих поведение композитов. Однако такие подходы, будучи в некоторых случаях

удовлетворительными для нужд практики, ограничены и по понятным причинам вряд ли могут удовлетворить с точки зрения по-

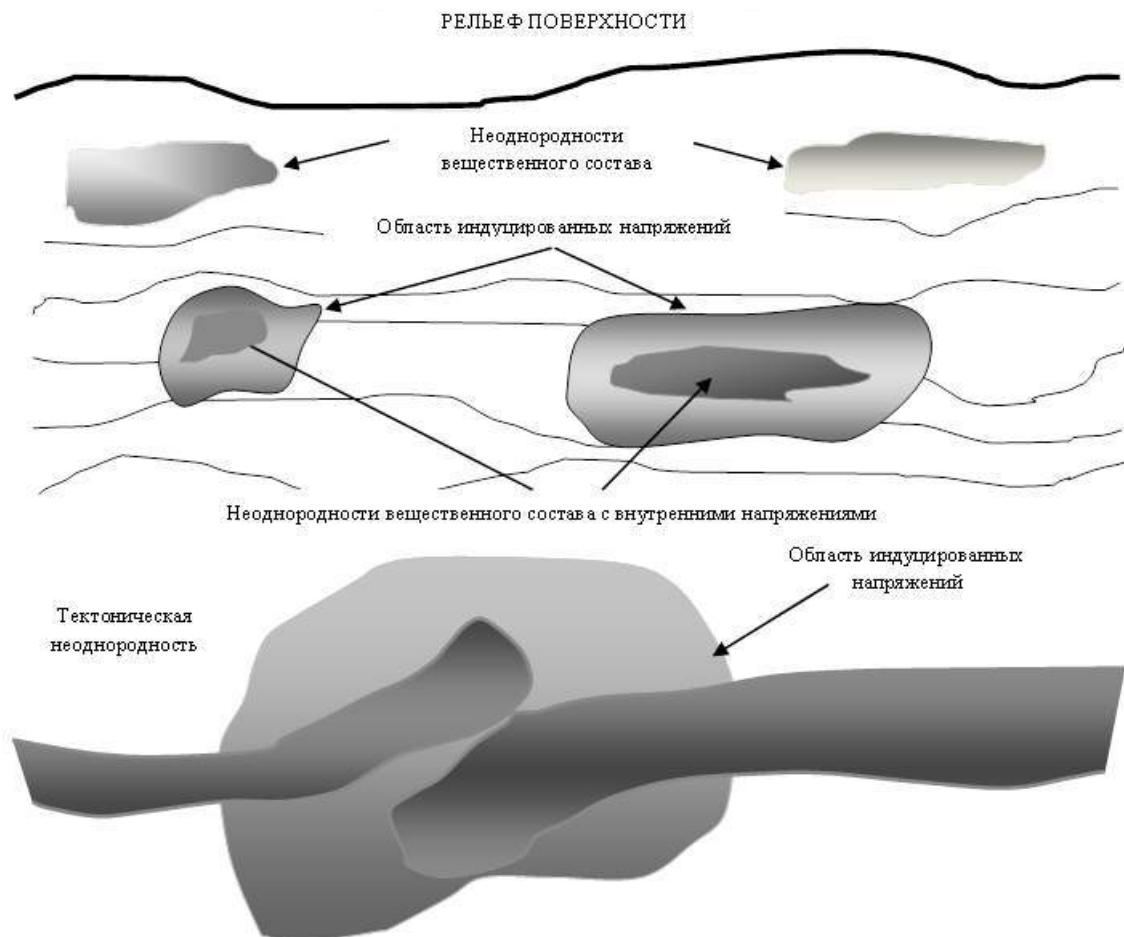


Рис. 1. Упрощенный вариант типичного геологического разреза

строения общей теории композитов, которая может только дать методы прогноза их свойств. Прогнозирование свойств и поведения композитов в настоящее время основано на математическом моделировании, как самих материалов, так и процессов, происходящих в них. Наиболее полное изложение теории распространения (рассечения) упругих волн в композитах приведено в работе [5], в которой изложены некоторые математические модели волновых процессов в упорядоченных и случайно неоднородных композитах.

Отметим, что теория элементарного акта рассечения (на одной локализованной неоднородности), развитая в работах [3, 6,

7], не описывает всё многообразие процессов рассечения упругих волн в гетерогенной среде. Действительно, при построении теории считается, что материальные параметры среды, а именно, модули упругости, которые в простейшем случае изотропии сводятся к двум параметрам Ламе, и массовая плотность среды являются функциями координат, причём неявно предполагается, что зависимость материальных параметров моделируемой среды от координат описывает неоднородность её вещественного состава. В качестве примеров можно привести следующие объекты: локализованное рудное месторождение, нефтяная ловушка и тому подобные объекты в геоло-

гии; щебёнка, или арматура в бетоне в индустрии стройматериалов. Можно привести множество других примеров, на которых мы не останавливаемся.

Известно, однако, что материальные параметры среды, например модули упругости, являются компонентами тензора четвертой валентности (везде дальше встречающиеся символы i, j, k, l, p, q, \dots независимо друг от друга принимают значения 1, 2, 3), определяются в соответствие с реализующимися в упругой среде термодинамическими условиями и выражаются следующей формулой [4]:

$$c_{ijkl}^{(p)} = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial S_{ij} \partial S_{kl}} \right)_{p=const},$$

где p – соответствующий термодинамический параметр. В случае, когда в качестве термодинамического параметра используется энтропия σ , модули упругости называются изоэнтропическими, если абсолютная температура θ – модули упругости называются изотермическими и т. д. Таким образом, модули упругости определяются для фиксированных термодинамических условий, а их значения, в общем, зависят от значений термодинамических параметров, при которых модули определяются.

Для модулей упругости, определенных при соответствующих термодинамических условиях, выполняется условие симметрии Максвелла [4], а именно: перестановка пары двух первых индексов с парой двух последних индексов в тензоре модулей упругости не меняет величины изоэнтропических, изотермических и пр. модулей упругости. Таким образом, в естественных условиях для модулей упругости выполняются следующие известные соотношения:

$$c_{ijkl}^{(p)} = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial S_{ij} \partial S_{kl}} \right)_{p=const} = c_{klji}^{(p)}.$$

На практике, однако, часто реализуется случай, когда модули упругости объекта могут зависеть от внешних, или внутренних факторов, не связанных напрямую с изменением термодинамического состояния упругой

среды. Так, например, если под термодинамическим параметром p подразумевается давление, то можно определить изобарические модули упругости, значения которых зависят от компонент тензора предварительных напряжений в упругой среде, причём значения последних в свою очередь определяются силовыми воздействиями со стороны внешних по отношению к выделенному объёму среды объектов или внутренних процессов, имеющих механический характер. Таковыми являются тектонические и техногенные процессы в геологии, процессы нагружения конструкций в строительстве и так далее. Поэтому при математическом моделировании рассеяния сейсмических волн неоднородностью среды желательно уметь разделять вклады в рассеяние, обусловленные как изменяющимся вещественным составом среды, так и наличием поля внутренних напряжений в объекте исследования, индуцирующих поле предварительных напряжений в окружающей среде. Такое разделение крайне полезно, например, при математическом моделировании рассеяния упругих волн нефтяной ловушкой, внутри которой существует избыточное давление, или при моделировании рассеяния упругих волн на тектоническом объекте. Действительно, такое моделирование позволит изучить динамику напряжённого состояния объекта исследования.

Формально можно считать, что координатная зависимость модулей упругости от вариации вещественного состава и от предварительных напряжений в среде учитывается теорией рассеяния упругих волн, которая основана на формализме теории возмущений для решения уравнений движения [7]:

$$\rho \frac{\partial^2 u^i}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x^j} \left[c_{ijkl} \frac{\partial u^l}{\partial x^k} \right] + \rho f^i.$$

В теории возмущений предполагается, что модули упругости зависят от координат точки сплошной среды, то есть

$$c_{ijkl} = c_{ijkl}(x_1, x_2, x_3) \equiv c_{ijkl}(\vec{x})$$

и могут быть представлены в виде

$$c_{ijkl}(x_1, x_2, x_3) \equiv c_{ijkl}^0 + \Delta c_{ijkl}(x_1, x_2, x_3). \quad (1)$$

Величины Δc_{ijkl} , зависящие от пространственных координат, называются вариациями, или флуктуациями модулей упругости и позволяют смоделировать наличие в среде неоднородностей [8].

Соотношение (1) – это, по существу, линейное приближение в разложении компонент тензора $c_{ijkl}(x_1, x_2, x_3)$ в ряд Тейлора по координатам точки наблюдения. Если предположить, что модули упругости зависят также от предварительных напряжений в среде, т. е. $c_{ijkl} = c_{ijkl}(x_1, x_2, x_3, \sigma_{pq})$, то можно в линейном приближении записать соотношения, аналогичные (1):

$$c_{ijkl}(x_1, x_2, x_3) \equiv c_{ijkl}^0 + \Delta c_{ijkl}(x_1, x_2, x_3) + \Delta c_{ijkl}^*(x_1, x_2, x_3, \sigma_{pq}). \quad (2)$$

В формуле (2) первое слагаемое – модули упругости однородной фоновой среды, второе слагаемое – вариации модулей упругости, обусловленные неоднородностью вещественного состава, а третье слагаемое – вариации модулей упругости, обусловленные наличием процессов, вызывающих появление предварительных напряжений в среде.

Нужно учитывать, что воздействия, генерирующие предварительные напряжения в среде, могут нарушать симметрию тензора модулей упругости вплоть до нарушения условий симметрии Максвелла. Следовательно,

можно ожидать, что для объекта, который можно охарактеризовать флуктуациями модулей упругости, обусловленными как неоднородностью вещественного состава, так и предварительными напряжениями, будет справедливо условие «несимметричности»:

$$\Delta c_{ijkl}^*(x_1, x_2, x_3, \sigma_{pq}) \neq \Delta c_{klji}^*(x_1, x_2, x_3, \sigma_{pq}).$$

Это условие существенно изменит картину рассеянного объектом волнового поля, что может служить дополнительным прогнозистическим признаком, например, в динамической сейсморазведке.

Суммируя сказанное выше, можно сделать вывод, что разработка математических моделей элементарных актов рассеяния упругих волн локализованными неоднородностями, обусловленными как неоднородностью вещественного состава, так и наличием предварительных напряжений в сплошной среде, сохраняет актуальность в настоящее время.

Математическая модель объекта, или носитель модели. В данной статье рассматривается простейший вариант математической модели рассеяния упругих волн единственным локализованным объектом, который может быть охарактеризован как предварительно напряженная неоднородность вещественного состава в однородной фоновой среде (рис. 2). Установим математическую модель

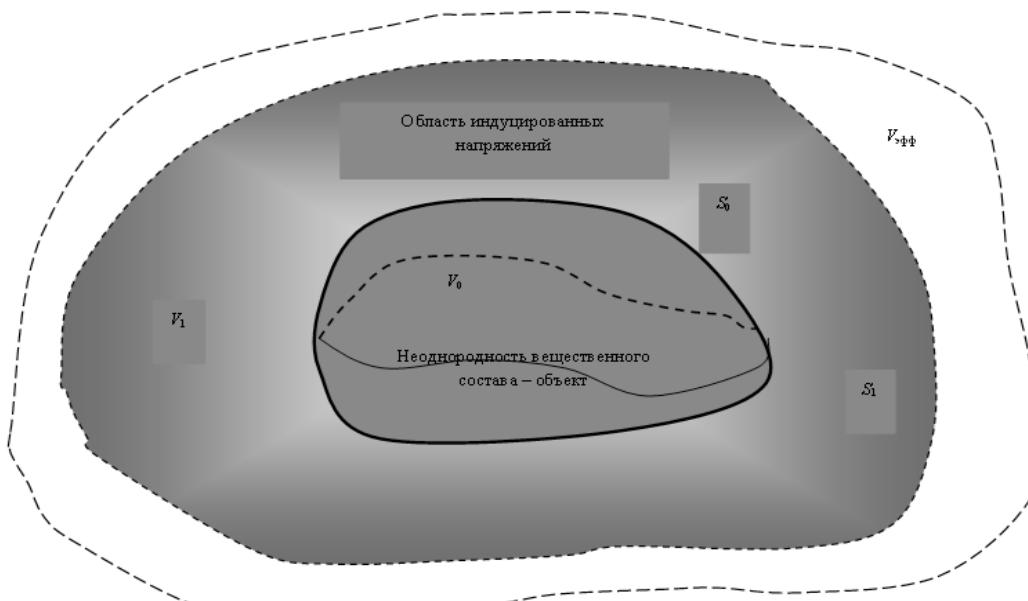


Рис. 2. Предварительно напряженная неоднородность вещественного состава в однородной фоновой среде

объекта, то есть опишем по терминологии теории систем носитель модели, который и является физической причиной уединенного акта рассеяния упругих волн, для чего обратимся к рис. 2.

На рисунке введены следующие обозначения: V_0 – неоднородность, обусловленная отличающимся от фоновой среды вещественным составом среды, – собственно рассеивающий объект; V_1 – неоднородность, обусловленная наличием поля предварительных напряжений объекта. Внешняя пунктирная линия – это условная граница эффективного объема неоднородности $V_{\text{эфф}}$, за пределами которого находится фоновая среда с постоянными материальными параметрами:

$$\rho = \rho_0, c_{ijkl} = c_{ijkl}^0. \quad (3)$$

Следовательно, в фоновой среде нет предварительных напряжений, а ее вещественный состав предполагается постоянным.

В идеальном случае эффективный объем неоднородности $\underset{\text{def}}{V_{\text{эфф}}} = V_0 \cup V_1$ может быть представлен в виде

Однако для численного моделирования удобно полагать (рис. 2), что полный объем неоднородности

$$V_0 \cup V_1 \subset \subset V_{\text{эфф}}, \quad (4)$$

то есть целиком заключен в $V_{\text{эфф}}$. Понятие эффективного объема неоднородности, введенное впервые в работе [8], позволит в дальнейшем при проведении выкладок отказаться от операции дифференцирования обобщенных функций, что значительно упростит все выводы.

В этих предположениях математическая модель объекта может быть описана соотношениями вида (2)

$$c_{ijkl}(x_1, x_2, x_3) \equiv c_{ijkl}^0 + \chi_0 \Delta c_{ijkl}(x_1, x_2, x_3) + \chi_1 \Delta c_{ijkl}^*(x_1, x_2, x_3, \sigma_{pq}), \quad (5)$$

где индикаторные, или характеристические функции области (далее просто функции области) определяются так:

$$\chi_0 = \chi_0(V_0) = \begin{cases} 1, & \vec{x} \in V_0, \\ 0, & \vec{x} \notin V_0, \end{cases} \quad \chi_1 = \chi_1(V_1) = \begin{cases} 1, & \vec{x} \in V_1, \\ 0, & \vec{x} \notin V_1. \end{cases}$$

К соотношениям (5) следует добавить аналогичное соотношение для массовой плотности:

$$\rho(x_1, x_2, x_3) \equiv \rho_0 + \chi_0 \Delta \rho(x_1, x_2, x_3) + \chi_1 \Delta \rho^*(x_1, x_2, x_3, \sigma_{pq}). \quad (6)$$

Здесь $\Delta \rho(x_1, x_2, x_3)$ – флуктуации массовой плотности, обусловленные изменением вещественного состава среды, а $\Delta \rho^*(x_1, x_2, x_3, \sigma_{pq})$ – флуктуации массовой плотности, обусловленные наличием в среде предварительных напряжений.

Соотношения (3)–(6) задают математическую модель объекта, которая используется в данной статье для построения теории уединенного акта рассеяния упругой (сейсмической) волны.

Математическая модель процесса рассеяния, или сигнатура модели. В данной статье математическая модель процесса рассеяния упругих волн строится на основе уравнений движения линейно упругой неоднородной среды, которые по терминологии теории систем и составляют сигнатуру математической модели рассеяния. Опишем сигнатуру модели.

Уравнение распространения упругих волн для неоднородной среды в компонентной форме имеет вид [3]:

$$\rho \frac{\partial^2 u^i}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial x^j} \left[c_{ijkl} \frac{\partial u^l}{\partial x^k} \right] + \rho f^i, \quad (7)$$

где $i = 1, 2, 3$, а модули упругости c_{ijkl} и массовая плотность ρ выражаются формулами (5) и (6) соответственно (зависимость от времени для этих величин не предполагается – среда считается стационарной). Напомним, что при записи всех уравнений используется соглашение о суммировании: по дважды повторяющемуся индексу (один раз внизу и один раз вверху) производится суммирование от 1 до 3.

Для простоты далее рассматривается математическая модель процесса рассеяния гармонических упругих волн, то есть для всех полевых функций и внешних сил предполагается временная зависимость вида $\exp(-i\omega t)$. Для случая гармонических волн уравнение (7) примет вид

$$\frac{\partial}{\partial x^j} \left[c_{ijkl} \frac{\partial u^l}{\partial x^k} \right] + \rho \omega^2 u^i = -\rho_0 f^i. \quad (8)$$

В уравнении (8) ω – круговая частота упругой волны, генерируемой источником монохроматического сигнала, или гармоники в его разложении Фурье. В уравнении (8) учтено, что источники упругого возмущения среды находятся вне рассеивающего объекта (ситуация, реализующаяся, например, в сейсмической разведке и дефектоскопии) – в правой части уравнения в качестве множителя при объемной плотности силы стоит плотность фоновой среды. Подставляя в (8) формулы (5) и (6), после простых преобразований получим

$$c_{ijkl}^0 \frac{\partial^2 u^l}{\partial x^j \partial x^k} (\vec{x}) + \rho_0 \omega^2 u^i (\vec{x}) = -\chi_0 (V_0) \cdot \Delta \rho (\vec{x}) \omega^2 u^i - \chi_1 (V_1) \cdot \Delta \rho^* (\vec{x}) \omega^2 u^i - \rho_0 f^i. \quad (9)$$

Система уравнений (9) описывает собственно **процесс рассеяния** упругих волн неоднородным предварительно напряженным включением $V_0 \cup V_1$, помещенным в однородную фоновую среду V , то есть является сигнатурой конструируемой математической модели.

Функция Грина дифференциального оператора в левой части (9) является решением уравнения

$$c_{ijkl}^0 \frac{\partial^2}{\partial x^j \partial x^k} G_{jk} + \rho^0 \omega^2 G_{ij} = -\delta_{ij} \delta(\vec{x} - \vec{x}_1). \quad (10)$$

Получение решения уравнения (10) – функции Грина для упругих волн, – весьма подробно описано, например, в работе [6]. Выпишем лишь конечный результат – функцию Грина для неограниченной изотропной среды:

$$G_{mn} (\vec{x}, \vec{x}_1, \omega) = \frac{1}{4\pi\rho\omega^2} \left[\delta_{mn} k_s^2 \frac{\exp(ik_s r)}{r} \right] - \frac{\partial^2}{\partial x_m \partial x_n} \left(\frac{\exp(ik_p r)}{r} - \frac{\exp(ik_s r)}{r} \right). \quad (11)$$

Здесь k_p и k_s – волновые числа для продольных и поперечных волн, соответственно, а $r = \|\vec{x} - \vec{x}_1\|$ – норма (длина) разности радиус-вектора \vec{x} точки наблюдения и радиус-вектора \vec{x}_1 точки источника.

Используя принцип Дюамеля [9] и учитывая (11), запишем решение неоднородного уравнения (9) в следующем виде:

$$u^i (\vec{x}) = \iiint_{V_{\text{эфф}}} \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial x_1^j} \left[\chi_0 \Delta c_{pjkl} (\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_1^k} \right] + \frac{\partial}{\partial x_1^j} \left[\chi_1 \cdot \Delta c_{pjkl}^* (\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_1^k} \right] \right] + \chi_0 (V_0) \Delta \rho (\vec{x}_1) \omega^2 u^p \right\} G_{ip} (\vec{x}, \vec{x}_1, \omega) d\vec{x}_1 + \rho^0 \iiint_{V'} f^p (\vec{x}_1) G_{ip} (\vec{x}_1, \vec{x}', \omega) d\vec{x}'. \quad (12)$$

Второе слагаемое в правой части (12) интерпретируется как решение уравнения

$$c_{ijkl}^0 \frac{\partial^2 u^l}{\partial x^j \partial x^k} + \rho^0 \omega^2 u^i = -\rho^0 f^i, \quad (13)$$

описывает распространение возмущения от источников поля, сосредоточенных в объеме V' однородной фоновой среды в отсутствие включения, и называется в теории рассеяния *падающим* или *первичным полем*. Обозначим компоненту с номером $i = 1, 2, 3$ первичного поля так:

$$u_{in}^i (\vec{x}) \stackrel{\text{def}}{=} \rho^0 \iiint_{V'} f^l (\vec{x}_1) G_{il} (\vec{x}, \vec{x}_1, \omega) d\vec{x}_1. \quad (14)$$

Наличие первого слагаемого в правой части формулы (12) обусловлено влиянием вторичных источников поля, существующим благодаря флуктуациям модулей упругости $\Delta c_{ijkl} (\vec{x}_1)$, $\Delta c_{ijkl}^* (\vec{x}_1)$ и плотности $\Delta \rho (\vec{x}_1)$, $\Delta \rho^* (\vec{x}_1)$ в объеме неоднородности $V_0 \cup V_1 \subset V_{\text{эфф}}$, и называется *рассеянным полем*:

$$u_{scat}^i (\vec{x}) \stackrel{\text{def}}{=} \iiint_{V_{\text{эфф}}} \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial x_1^j} \left[\chi_0 \Delta c_{pjkl} (\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_1^k} \right] + \frac{\partial}{\partial x_1^j} \left[\chi_1 \Delta c_{pjkl}^* (\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_1^k} \right] \right] + \right. \left. \chi_0 (V_0) \Delta \rho (\vec{x}_1) \omega^2 u^p \right\} G_{ip} (\vec{x}, \vec{x}_1, \omega) d\vec{x}_1. \quad (15)$$

$$+ \chi_0(V_0) \Delta \rho(\vec{x}_1) \omega^2 u^p + \\ + \chi_1(V_1) \Delta \rho^*(\vec{x}_1) \omega^2 u^p \} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1, \omega) d\vec{x}_1. \quad (15)$$

Интегрирование в уравнении (12) для удобства распространяется на эффективный объем среды $V_{\text{эфф}}$, что эквивалентно интегрированию по объему неоднородности $V_0 \cup V_1$ в силу соотношений (5) и (6).

Таким образом, в предположении линейности процесса рассеяния **полное волновое поле** $u^i(\vec{x})$ ($i = 1, 2, 3$) в каждой точке $\vec{x} \in V$ объема среды

$$V = C(V_{\text{эфф}}) \cup V_{\text{эфф}} \equiv C(V_{\text{эфф}}) \cup (V_0 \cup V_1)$$

представляется в виде суммы

$$u^i(\vec{x}) = u_h^i(\vec{x}) + u_{\text{scat}}^i(\vec{x}). \quad (16)$$

Отметим, что рассеянное поле в неограниченной среде должно удовлетворять **условию излучения Зоммерфельда**, состоящему в том, что на бесконечно удаленной поверхности

$$\lim_{\|\vec{x}\| \rightarrow \infty} \frac{1}{\|\vec{x}\|} u_{\text{scat}}^i(\vec{x}) = 0.$$

Уравнение (12) является линейным интегральным уравнением типа Фредгольма. Наличие слагаемых

$$\frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\chi_0 \Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} \right] + \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\chi_1 \Delta c_{ijkl}^*(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} \right]$$

в уравнении затрудняет его численное решение. Если неоднородность имеет континуальный характер, то есть выраженная граница раздела неоднородности и фоновой среды отсутствует, то наличие производных приводит только к техническим трудностям при численном решении. Если же имеется «резкая» граница раздела, на которой функции $c_{ijkl}(\vec{x})$ и $\rho(\vec{x})$ испытывают разрыв первого рода (из физических соображений можно принять, что $c_{ijkl}^*(\vec{x}_1)$ и $\rho^*(\vec{x}_1)$ непрерывным образом продолжаются нулем за границу $V_{\text{эфф}}$), производные должны выражаться через δ -функции, что совершенно неприемлемо при численном решении. Для устранения этой особенности в

работе [7] предложена предельная процедура, применение которой в рассматриваемом случае существенно отличается от простого случая, описанного в указанной работе. Описание этой процедуры приведено ниже.

Сначала заметим, что с учетом формулы дифференцирования произведения функций

$$\chi_0 \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} \right] + \chi_1 \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}^*(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} \right]$$

уравнение (12) можно представить в виде

$$u^i(\vec{x}) = \iiint_{V_{\text{эфф}}} \left\{ \chi_0(V_0) \left[\frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} \right] + \right. \right. \\ \left. \left. + \Delta \rho(\vec{x}_1) \omega^2 u^p \right] + \chi_1(V_1) \left[\frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}^*(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} \right] + \right. \right. \\ \left. \left. + \Delta \rho^*(\vec{x}_1) \omega^2 u^p \right] \right\} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1, \omega) d\vec{x}_1 + \\ + \rho^0 \iiint_{V'} f^p(\vec{x}_1) G_{ip}(\vec{x}_1, \vec{y}, \omega) d\vec{y}. \quad (17)$$

Уравнение (17) перепишем, отделив вклады в рассеянное поле от неоднородностей вещественного состава и предварительных напряжений:

$$u^i(\vec{x}) = u_{in}^i(\vec{x}) + \\ + \iiint_{V_{\text{эфф}}} \chi_0(V_0) \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} \right] + \right. \\ \left. + \Delta \rho(\vec{x}_1) \omega^2 u^p \right\} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) d\vec{x}_1 + \\ + \iiint_{V_{\text{эфф}}} \chi_1(V_1) \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}^*(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} \right] + \right. \\ \left. + \Delta \rho^*(\vec{x}_1) \omega^2 u^p \right\} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) d\vec{x}_1, \quad (18)$$

где мы обозначили

$$u_{in}^i(\vec{x}) \stackrel{\text{def}}{=} \rho^0 \iiint_{V'} f^p(\vec{x}_1) G_{ip}(\vec{x}_1, \vec{y}) d\vec{y}. \quad (19)$$

В формуле (19) $\vec{y} \in V'$ – радиус-вектор точек внешнего источника падающей волны, занимающего объем V' . Для упрощения записи было убрано обозначение зависимости от круговой частоты.

Очевидно, что в уравнении (18) в силу

свойств характеристических функций области $\chi_0(V_0)$ и $\chi_1(V_1)$ интегрирование распространяется соответственно в первом слагаемом на объем, занятый неоднородностью вещественного состава, то есть $\vec{x}_1 \in V_0$, а во втором слагаемом – на область напряженного состояния, то есть $\vec{x}_1 \in V_0 \cup V_1$. Таким образом, первое слагаемое переписывается в виде

$$\begin{aligned} u_{scat}^0 = & \iiint_{V_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} \right] + \right. \\ & \left. + \Delta \rho(\vec{x}_1) \omega^2 u^p \right\} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) d\vec{x}_1, \end{aligned} \quad (20)$$

а второе слагаемое в виде

$$\begin{aligned} u_{scat}^1 = & \iiint_{V_1} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}^*(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} \right] + \right. \\ & \left. + \Delta \rho^*(\vec{x}_1) \omega^2 u^p \right\} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) d\vec{x}_1. \end{aligned} \quad (21)$$

Теперь вместо (16) имеем

$$u^i(\vec{x}) = u_n^i(\vec{x}) + u_{scat}^0(\vec{x}) + u_{scat}^1(\vec{x}). \quad (22)$$

Обратимся к рис. 3, на котором для простоты изображено сечение исследуемого

объекта некоторой, например, координатной плоскостью. Заключим поверхности S_0 и S_1 неоднородностей вещественного состава и напряженного состояния в бесконечно тонкие слои V_0^\pm и V_1^\pm , образованные двумя не соприкасающимися с S_0 и S_1 поверхностями S_0^- , S_0^+ и S_1^- , S_1^+ соответственно. Далее предположим, что Δc_{ijkl} , $\Delta \rho$, $\frac{\partial}{\partial x^j} \left[\Delta c_{ijkl} \frac{\partial u^l}{\partial x^k} \right]$ и $\Delta \rho^*$, $\frac{\partial}{\partial x^j} \left[\Delta c_{ijkl}^* \frac{\partial u^l}{\partial x^k} \right]$ меняются непрерывно от нуля до некоторого конечного значения на поверхностях S_0^+ и S_0^- и, соответственно, на поверхностях S_1^+ и S_1^- . В конечном итоге перейдем к пределу $V_0^\pm \rightarrow 0$ и $V_1^\pm \rightarrow 0$ в первом и втором интегральном слагаемом уравнения (18). Так как преобразования для обеих поверхностей S_0 и S_1 проводятся одинаково, то проведем их, например, для поверхности S_0 . Интегральный член (20) – первое слагаемое в правой части уравнения (18), – преобразуется так:

$$\begin{aligned} u_{scat}^0 = & \iiint_{V_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} \right] + \Delta \rho(\vec{x}_1) \omega^2 u^p \right\} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) d\vec{x}_1 = \\ = & \iiint_{V_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} \right] + \Delta \rho(\vec{x}_1) \omega^2 u^p \right\} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) d\vec{x}_1 + \\ + & \lim_{V_0^\pm \rightarrow 0} \iiint_{V_0^\pm} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} \right] + \Delta \rho(\vec{x}_1) \omega^2 u^p \right\} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) d\vec{x}_1. \end{aligned} \quad (23)$$

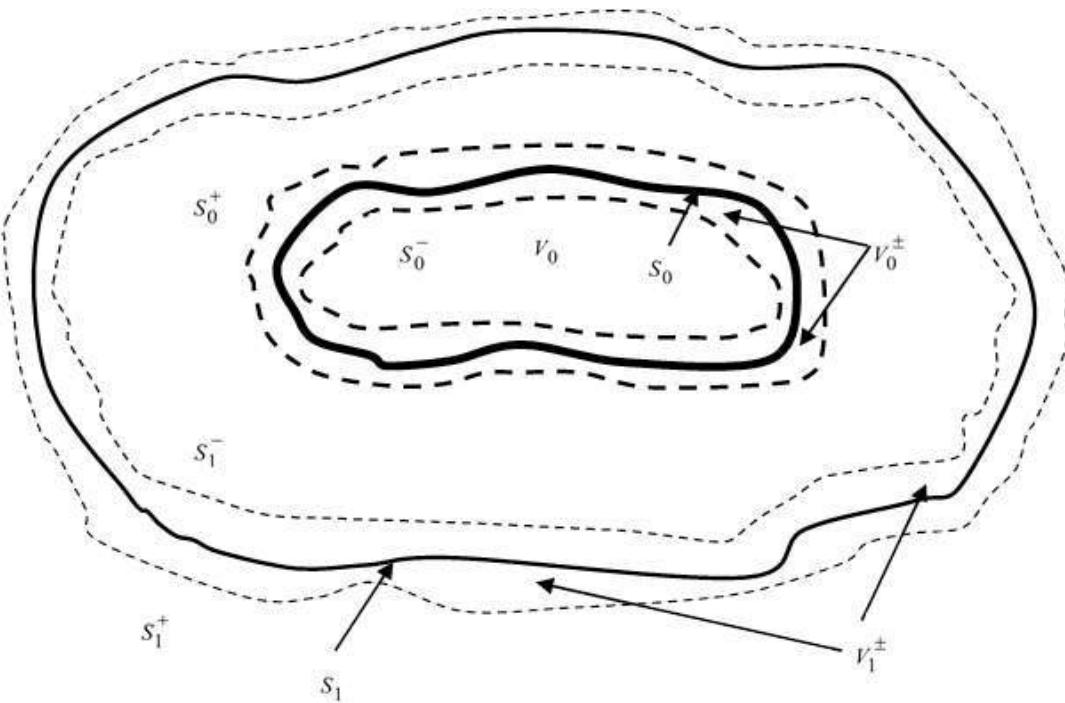


Рис. 3. Сечение исследуемого объекта некоторой плоскостью

Здесь V_0^- означает объем, ограниченный поверхностью S_0^- . Обозначим далее: V_0^+ – объем, ограниченный поверхность S_0^+ . Далее введем обозначение для приграничного слоя неоднородности: $V_0^\pm = V_0^+ - V_0^-$.

Теперь интеграл во втором слагаемом в правой части (23), содержащий производные, используя теорему дифференцирования произведения функций, преобразуем по теореме Остроградского-Гаусса в сумму двух поверхностных интегралов:

$$\begin{aligned} & \iiint_{V_0^\pm} \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k}(\vec{x}_1) \right] G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) d\vec{x}_1 = \\ &= \iiint_{V_0^\pm} \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k}(\vec{x}_1) G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) \right] d\vec{x}_1 - \\ & - \iiint_{V_0^\pm} \Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k}(\vec{x}_1) \frac{\partial}{\partial x_i^j} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) d\vec{x}_1 = \\ &= \oint_{S_0^\pm} n^j \Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) ds^\pm - \\ & - \oint_{S_0^\pm} n^j \Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) ds^\mp - \\ & - \iiint_{V_0^\pm} \Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k}(\vec{x}_1) \frac{\partial}{\partial x_i^j} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) d\vec{x}_1. \quad (24) \end{aligned}$$

Подставляя (24) в (23) и переходя к пределу при условии $V_0^\pm \rightarrow 0$ с учетом непрерывности флюктуаций Δc_{ijkl} , $\Delta \rho$ внутри и того, что на поверхности S_0^+ флюктуации Δc_{ijkl} , $\Delta \rho = 0$, получим

$$\begin{aligned} \overset{0}{u}_{scat}(\vec{x}) &= \lim_{V_0^\pm \rightarrow 0} \iiint_{V_0^\pm} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k}(\vec{x}_1) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \Delta \rho(\vec{x}_1) \omega^2 u^p(\vec{x}_1) \right\} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) d\vec{x}_1 = \\ &= \iiint_{V_0} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k}(\vec{x}_1) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \Delta \rho(\vec{x}_1) \omega^2 u^p(\vec{x}_1) G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1, \omega) \right\} d\vec{x}_1 - \\ &- \lim_{V_0^\pm \rightarrow 0} \oint_{S^\pm} n^j \Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) ds^\pm. \quad (25) \end{aligned}$$

В правой части выражения (25) поверхностный интеграл преобразуем в объемный интеграл с учетом того, что при условии

$$V_0^\pm \rightarrow 0$$

$$\begin{aligned} & \lim_{V_0^\pm \rightarrow 0} \oint_{S^\pm} n^j \Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1, \omega) ds^\pm = \\ &= \oint_{S_0} n^j \Delta c_{ijkl}(\vec{x}) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1, \omega) ds, \end{aligned}$$

получим:

$$\begin{aligned} & \oint_{S_0} n^j \Delta c_{ijkl}(\vec{x}) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1, \omega) ds = \\ &= \iiint_{V_0} \frac{\partial}{\partial x_i^j} \left\{ \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k}(\vec{x}_1) \right] G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1, \omega) \right\} d\vec{x}_1. \end{aligned}$$

Используя полученный результат в выражении (25) для поля $u_{scat}^i(\vec{x})$, рассеянного неоднородностью вещественного состава, проводя аналогичные выкладки для второго интеграла (21) и записывая аналогичное (25) равенство для поля $u_n^i(\vec{x})$, рассеянного распределением в пространстве предварительных напряжений, и, наконец, подставляя в (22), получим следующее интегральное уравнение для полного поля во всем пространстве R^3 , как внутри неоднородности, так и вне ее:

$$\begin{aligned} u^i(\vec{x}) &= u_n^i(\vec{x}) + \\ &+ \iiint_{V_0} \left\{ \left[\Delta \rho(\vec{x}_1) + \Delta \rho^*(\vec{x}_1) \right] \omega^2 u^p(\vec{x}_1) G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) - \right. \\ &\quad \left. - \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) + \Delta c_{ijkl}^*(\vec{x}_1) \right] \frac{\partial u^l}{\partial x_i^k}(\vec{x}_1) \frac{\partial}{\partial x_i^j} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) \right\} d\vec{x}_1. \quad (26) \end{aligned}$$

Интегрирование в уравнении (26) производится по эффективному объему неоднородности с учетом равенств (5) и (6) и свойств характеристических функций области.

Уравнение (26) описывает рассеяние (гармонических) упругих волн локальной предварительно напряженной неоднородностью независимо от того, ограничена ли эта неоднородность поверхностью раздела, или ее параметры меняются непрерывно в некотором переходном слое. Это уравнение является аналогом уравнения Липмана-Швингера квантово-механической теории рассеяния [2].

Решение основной задачи теории рассеяния. Основной задачей теории рассеяния является задача нахождения последова-

тельности состояний объекта исследования «предварительно напряженная неоднородность + волновое поле». Решение этой задачи на основе системы интегральных уравнений (26) для реалистичных моделей можно получить, очевидно, только путем численного решения уравнений системы, например, методом последовательных приближений:

$$u_{(n+1)}^i(\vec{x}) = u_{in}^i(\vec{x}) + \iiint_{V_{\text{эфф}}} \left\{ \left[\Delta\rho(\vec{x}_1) + \Delta\rho^*(\vec{x}_1) \right] \omega^2 u_{(n)}^p(\vec{x}_1) G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) - \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) + \Delta c_{ijkl}^*(\vec{x}_1) \right] \frac{\partial u_{in}^l}{\partial x_1^k}(\vec{x}_1) \frac{\partial}{\partial x_1^j} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) \right\} d\vec{x}_1. \quad (27)$$

В формуле (27) нижний индекс n у компоненты $u_{(n)}^p$ волнового поля означает номер итерации. Впервые результаты по численному моделированию рассеяния плоских упругих волн на основе уравнения (26) для более простого случая неоднородности вещественного состава были опубликованы в работе [8].

В случае, когда включение слабоконтрастное по вещественному составу и по предварительным напряжениям, – флуктуации плотности и упругих модулей обоих типов малы, и в (27) можно ограничиться первым приближением

$$u^i(\vec{x}) = u_{in}^i(\vec{x}) + \iiint_{V_{\text{эфф}}} \left\{ \left[\Delta\rho(\vec{x}_1) + \Delta\rho^*(\vec{x}_1) \right] \omega^2 u_{in}^p(\vec{x}_1) G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) - \left[\Delta c_{ijkl}(\vec{x}_1) + \Delta c_{ijkl}^*(\vec{x}_1) \right] \frac{\partial u_{in}^l}{\partial x_1^k}(\vec{x}_1) \frac{\partial}{\partial x_1^j} G_{ip}(\vec{x}, \vec{x}_1) \right\} d\vec{x}_1. \quad (28)$$

Приближение (28), носящее название

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. Т. 1. М.: Мир, 1981. 280 с.
2. Тейлор Дж. Теория рассеяния. Квантовая теория нерелятивистских столкновений. М.: Мир, 1975. 565 с.
3. Сурнев В. Б. О рассеянии упругих волн локализованной неоднородностью // Известия АН СССР. Физика Земли. 1988. № 2. С. 9–19.
4. Сурнев В. Б. Математическое моделирование. Непрерывные детерминированные модели. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2012. 689 с.
5. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. М.: Мир, 1982. 334 с.
6. Hudson J. A. The Scattering of Elastic Waves by Granular Media // Quart Journal Mech. and Applies Math. 1968. Vol. XXI. Pt. 4. p. 487–502.
7. Pao Y. H., Varatharajuly V. Huygens principle, radiation conditions, and integral formulas for the scattering of elastic waves // J. Acoust. Soc. Amer. 1976. Vol. 59. № 6. p. 1361–1371.
8. Сурнев В. Б. Численное решение задачи рассеяния упругих волн ограниченным телом // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 4. С. 87–93.
9. Владимиров В. С. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1981. 512 с.

Сурнев Виктор Борисович – заведующий кафедрой математики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: sournev@yandex.ru
Исламгалиев Дмитрий Владимирович – старший преподаватель кафедры математики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: dif1205@mail.ru

первого приближения Борна, позволяет с достаточной точностью описать процесс рассеяния для слабоконтрастных включений.

Присутствие частных производных от искомых функций под интегралом в уравнениях (26) приводит к определенным техническим трудностям в процессе численного моделирования. Отметим, что их наличие в интегральных уравнениях (26) связано с тем, что при получении уравнений мы исходили из системы дифференциальных уравнений (8) с частными производными второго порядка – уравнений Ламе. Иной подход к выводу интегральных уравнений задачи рассеяния акустических, упругих и электромагнитных волн описан в работе одного из авторов [3]. Распространение результатов работы [3] на рассматриваемый случай предварительно напряженной неоднородности является ближайшей задачей авторов.

Выводы. В статье разработан алгоритм решения задачи рассеяния упругих (сейсмических) волн предварительно напряженной уединённой неоднородностью вещественного состава. Модель может описывать большое число ситуаций, возникающих в динамической сейсморазведке. Собственно алгоритм разработан на основе обычной теории рассеяния без использования общей теории распространения упругих волн в предварительно напряженной среде. В ближайшее время авторы предполагают опубликовать результаты численного моделирования, которые позволят предложить конкретные рекомендации для сейсморазведки.

ТЕОРИЯ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ И ОСНОВАНИЙ. АНАЛИЗ, ХАРАКТЕРИСТИКА И КЛАССИФИКАЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА УСТОЙЧИВОСТИ ОТКОСОВ

Жабко А. В.

В работе приводится и предлагается к использованию принципиально новая теория расчета устойчивости откосов и оснований, разработанная автором и основанная на фундаментальных теоремах и принципах механики, таких как принцип возможных перемещений Лагранжа, принцип наименьшего принуждения Гаусса, теорема наименьшей потерянной работы Остроградского и т. д. Основой математического аппарата предлагаемой теории являются вариационное, дифференциальное и интегральное исчисления. С опорой на теорию разработаны методики расчета устойчивости откосов практически для условий любой сложности: однородный, неоднородный, анизотропный, обводненный откосы, откосы на слабом наклонном контакте, на слабом наклонном основании, подработанный и закартированный откосы, нагруженный откос, откос несвязных пород на различном основании.

Ключевые слова: откос; метод предельного равновесия; метод предельного напряженного состояния; условие равновесия; устойчивость; экстремум функционала; дифференциальное уравнение; поверхность скольжения; анизотропия; неоднородность; угол излома; подработанный откос; устойчивость отвалов; слабое основание; обводненность.

Проблема оценки устойчивости откосов является весьма актуальной при разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом в гидротехническом и транспортном, промышленном и гражданском строительстве, а также в других отраслях деятельности человека.

Исторически первой работой по вопросу равновесия массива, ограниченного наклонной плоскостью (откосом), является работа У. Ренкина (1857). Первый способ расчета устойчивости откосов, основанный на принципе Кулона, был предложен в 1920 г. Г. Франсе. К настоящему времени разработано более 100 способов, приемов и схем расчета устойчивости свободных откосов.

Попытки создания строгого способа расчета привели к появлению большого числа способов, приемов расчета и расчетных схем; их многообразие объясняется количеством допущений, используемых исследователями для обоснования расчетной схемы, и условиями устойчивости. Дело в том, что задача по определению параметров устойчивого откоса или несущей способности основания в любой постановке является статически неопределенной. Поэтому для определения неизвестных реакций авторами выдвигаются дополнитель-

ные условия (допущения). Например, У. Ренкин предполагает, что в каждой точке призмы смещения выполняется условие предельного кулоновского равновесия, Д. Тейлор принимает симметричный синусоидальный закон распределения нормальных реакций вдоль поверхности скольжения, большинство способов предполагают пренебрежение действием межблоковых реакций, а поверхность скольжения принимается из условия получения более простых формул. Многообразие способов расчета вызвало необходимость классифицировать их по тем или иным признакам.

В работе [1] приводится классификация способов расчета устойчивости откосов, которая, на взгляд автора, достаточно полно отражает и упорядочивает их многообразие. В табл. 1 приведена данная классификация с незначительными дополнениями.

К указанным в табл. 1 способам для различных поверхностей скольжения необходимо добавить способы Янбу, Моргенштерна и Прайса, Спенсера [2]. Эти способы достаточно похожи и дают близкие результаты. Их принципиальная разница заключается в количестве уравнений равновесия, составляемых для отдельных отсеков или для всей призмы

смещения в целом.

Способы классов A , B , B в табл. 1 разработаны для однородных откосов, а класс Γ – для анизотропных. Ни один из этих способов не является строгим, даже когда речь идет об

идеально однородных и изотропных массивах. С другой стороны, очевидно, что теория расчета анизотропных откосов должна базироваться на теории изотропных откосов, поэтому способы класса Γ исключим из анализа.

Классификация методов (способов) расчета устойчивости откосов

Таблица 1

Класс	Общий принцип определения параметров устойчивого откоса, характеризующий класс методов	Общий признак для группы способов	Основной способ группы	Расчетные способы и схемы, использующие основной метод
A	Построение контура откоса, являющегося внешней границей зоны, во всех точках которой удовлетворяется условие предельного напряженного состояния	Численный способ интегрирования дифференциальных уравнений напряженного состояния	Способ В. В. Соколовского	Таблицы И. С. Мухина и Л. И. Срагович Номограммы Н. К. Звонарева Способ А. И. Говядинова – С. В. Фальковича
				Способ А. М. Сенкова Расчетные схемы Ю. А. Соболевского Способ И. Д. Молюкова Способ Г. Л. Фисенко – В. Т. Сапожникова (выпуклый откос) Способ В. Т. Сапожникова – В. И. Пушкарева (откос криволинейный в плане) Способ Ю. Н. Малюшицкого (многослойный откос)
		Графический способ интегрирования дифференциальных уравнений предельного напряженного состояния	Способ С. С. Голушкича	
B	Построение контура откоса, вдоль которого удовлетворяется равенство угла наклона касательной углу сопротивления сдвигу	Разбивка откоса на горизонтальные слои и определение устойчивого угла наклона каждого слоя с учетом веса вышележащих пород	Способ F_p Н. Н. Маслова Способ М. Н. Троицкой	

Класс	Общий принцип определения параметров устойчивого откоса, характеризующий класс методов	Общий признак для группы способов	Основной способ группы	Расчетные способы и схемы, использующие основной метод
<i>B</i>	Построение в массиве поверхности скольжения, вдоль которой удовлетворяется условие предельного равновесия	Плоская поверхность скольжения	Способ Г. Франсе Способ О. Винклера Способ Л. Н. Бернацкого Способ П. Н. Цимбаревича Способ О. Т. Токмурзина	
		Условия равновесия всего откоса	Способ В. Феллениуса Способ Д. Тейлора (круг трения)	
			Графоаналитический метод М. Н. Гольдштейна (круг трения) Аналитический метод М.Н. Гольдштейна	Графики В. Н. Лобасова Графики Е. К. Алаторцева
			Способ М. М. Сокольского Способ А. И. Иванова Способ О. Фрелиха Способ А. Како Способ И. В. Федорова Способ М. Н. Гольдштейна (t-фактор)	Прием П. А. Ляпичева
		Условия равновесия отдельных вертикальных отсеков	Способ С. Хюльтина Способ Г. Крея – К. Терцаги Способ Р. Р. Чугаева – О.В. Вяземского Способ А. Бишопа Способ А. Л. Можевитинова Способ Г. М. Шахунянца (многоугольник сил)	Графики А. Бишопа – Н. Моргенштерна
		Поверхность скольжения в виде логарифмической спирали	Способ Л. Рендулика Способ Н. П. Пузыревского – П. И. Кожевникова Способ Ю. С. Козлова – В. А. Будкова	
		Поверхность скольжения сложной криволинейной формы	Способ Г. Л. Фисенко Способ С. Н. Никитина Способ Л. В. Савкова	
		Вариационные способы	И. Копачи Ю. И. Соловьева А. Г. Дорфмана	
		Поверхность скольжения ломаной формы	Способ А. П. Ясюнас (прислоненного откоса) Способ Н. Н. Маслова (горизонтальных сил) Способ Р. Р. Чугаева (наклонных сил)	

<i>Г</i>	Построение в массиве поверхности скольжения, вдоль которой удовлетворяется условие специального предельного равновесия	Определение сдвигающих и удерживающих сил с учетом прочностных характеристик по поверхности ослабления откоса	Способ Г. Л. Фисенко Способ Н. Н. Куваева Способ П. Н. Панюкова	
----------	--	---	---	--

Способы класса *B* базируются на допущениях о том, что во всех точках угла откоса равен углу сопротивления сдвигу, а также на внешнем сходстве между уравнением сопротивления сыпучих пород сдвигу и уравнением, связывающим высоту откоса с его заложением. Способы данного класса не имеют должного теоретического обоснования и не могут являться расчетными.

Способы класса *A* используют одно, хотя и достаточно принципиальное допущение – в каждой точке призмы смещения выполняется условие предельного напряженного состояния (закон Кулона). Данные способы выделяют в

отдельный метод предельного напряженного состояния или дифференциальный метод.

Рассмотрим более подробно метод предельного напряженного состояния.

Родоначальником метода предельного равновесия является французский ученый Ш. О. Кулон (1736–1806 гг.), сформулировавший в 1773 г. основные положения предельного равновесия. Шотландский профессор У. Д. Ренкин (1820–1872 гг.) в 1857 г. рассмотрел предельное равновесие бесконечного массива, ограниченного наклоненной плоскостью, а также ввел понятие о поверхностях скольжения (рис. 1).

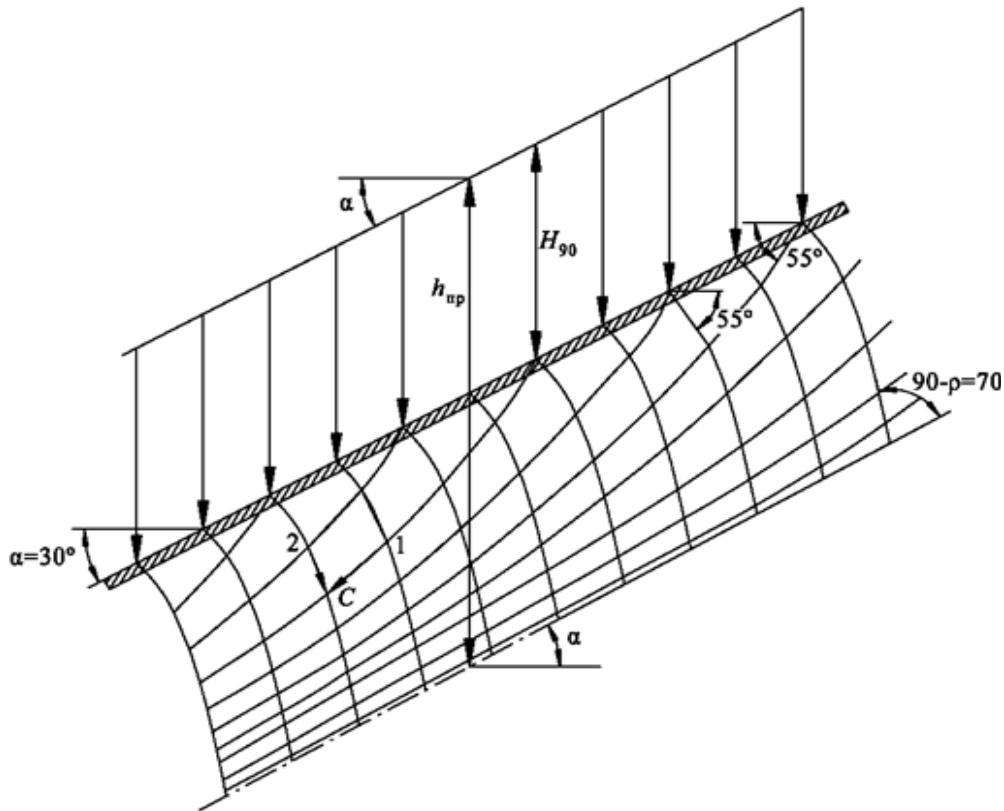


Рис. 1. Обобщенная задача Ренкина

Основой метода, подобно механике сплошных сред (теории упругости, пластичности и

т. д.), являются дифференциальные уравнения плоского равновесия:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = \gamma, \quad (1)$$

где γ – объемный вес горных пород; $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – компоненты тензора плоского напряжения.

К уравнениям равновесия Ф. Кеттер в 1903 г. добавил условие предельного кулоновского равновесия, выраженного через компоненты плоского поля напряжений:

$$\frac{1}{4}(\sigma_x - \sigma_y)^2 + \tau_{xy}^2 = \frac{\sin^2 \varphi}{4} (\sigma_x + \sigma_y + 2C \operatorname{ctg} \varphi)^2, \quad (2)$$

где C, φ – сцепление и угол внутреннего трения горных пород.

Однако не было общего подхода при решении задач плоского предельного равновесия весомой сыпучей и связной среды. Лишь в 1939 г. В. В. Соколовский [3] разработал такой метод. Введя понятие о средней величине приведенного напряжения $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 + C \operatorname{ctg} \varphi$ и выразив через нее компоненты тензора напряжений, подстановкой в уравнения равновесия В. В. Соколовский получил так называемую основную систему уравнений в симметричном виде:

$$\left[\frac{\partial \sigma}{\partial x} \mp 2\sigma \operatorname{tg} \varphi \frac{\partial \rho}{\partial x} \pm \gamma \operatorname{tg} \varphi \right] \cos(\rho \mp \varepsilon) + \\ + \left[\frac{\partial \sigma}{\partial y} \mp 2\sigma \operatorname{tg} \varphi \frac{\partial \rho}{\partial y} - \gamma \right] \sin(\rho \mp \varepsilon) = 0, \quad (3)$$

где ρ – угол между направлением наибольшего главного напряжения σ_1 и осью x ; $\varepsilon = \pi/4 - \varphi/2$ – угол между направлением σ_1 и площадками скольжения.

Система уравнений (3) по классификации уравнений и систем в частных производных относится к гиперболической (имеет два действительных различных семейства характеристик). Её решение В. В. Соколовский производит при помощи метода характеристик, известного из курса высшей математики. Не приводя достаточно сложных математических выкладок данного метода, укажем лишь на его основные положения. В плоскости решения системы уравнений xy существуют некоторые линии, полностью заполняющие область решения системы – характеристики. Характеристики не являются произвольны-

ми линиями и определяются самой же системой уравнений. Их математический смысл заключается в том, что вдоль них существует возможность получить некоторые дифференциальные соотношения, связывающие неизвестные (определяемые) функции. Для определения характеристик и упомянутых соотношений к уравнениям (3) добавляются зависимости для полных дифференциалов разыскиваемых функций

$$d\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx + \frac{\partial \sigma}{\partial y} dy; \quad d\rho = \frac{\partial \rho}{\partial x} dx + \frac{\partial \rho}{\partial y} dy. \quad (4)$$

Приведя систему уравнений (3, 4) к стандартному виду (в левых частях – уравнений суммы произведений коэффициентов на частные производные неизвестных функций, в правой – все остальное), приравняем определитель матрицы системы к нулю.

$$\det \begin{pmatrix} \cos(\rho - \varepsilon) & -2\sigma \operatorname{tg} \varphi \cos(\rho - \varepsilon) & \sin(\rho - \varepsilon) & -2\sigma \operatorname{tg} \varphi \sin(\rho - \varepsilon) \\ \cos(\rho + \varepsilon) & 2\sigma \operatorname{tg} \varphi \cos(\rho + \varepsilon) & \sin(\rho + \varepsilon) & 2\sigma \operatorname{tg} \varphi \sin(\rho + \varepsilon) \\ \frac{d\sigma}{dx} & 0 & dy & 0 \\ 0 & dx & 0 & dy \end{pmatrix} = 0. \quad (5)$$

Получим уравнения характеристик системы (3):

$$dy = \operatorname{tg}(\rho \mp \varepsilon) dx. \quad (6)$$

Из уравнения (6) ясно, что характеристики наклонены к оси x под углом $\rho \mp \varepsilon$, то есть под теми же углами, что и линии скольжения. Отсюда непосредственно следует, что характеристики на плоскости xy являются поверхностями скольжения. Через каждую точку рассматриваемой области на плоскости xy проходят две характеристики, пересекающиеся под углом $2\varepsilon = \pi/2 - \varphi$, то есть вся область (призма смещения) покрыта сеткой характеристик. Семейство характеристик, определяемое верхним знаком, называется первым (активным), нижним – вторым (пассивным).

Таким образом, из условия (5) (равенство нулю якобиана) ясно, что характеристики – это такие линии, вдоль которых разыскиваемые производные функций σ и ρ функционально зависят между собой. А конкретные уравнения, определяющие эту функциональную связь, называются соотношениями на ха-

рактеристиках.

Соотношения на характеристиках определим из условия равенства рангов матрицы системы и расширенной матрицы вдоль соответствующей характеристики, то есть требования совместности системы уравнений (система должна иметь хотя бы одно решение).

Согласно (5) определитель матрицы системы уравнений равен нулю, поэтому должен быть равен нулю определитель матрицы, составленный из произвольных четырех столбцов. Например:

$$\det \begin{pmatrix} \cos(\rho - \varepsilon) & -2\sigma \operatorname{tg}\varphi \cos(\rho - \varepsilon) & \sin(\rho - \varepsilon) & \gamma(\sin(\rho - \varepsilon) - \operatorname{tg}\varphi \cos(\rho - \varepsilon)) \\ \cos(\rho + \varepsilon) & 2\sigma \operatorname{tg}\varphi \cos(\rho + \varepsilon) & \sin(\rho + \varepsilon) & \gamma(\sin(\rho + \varepsilon) + \operatorname{tg}\varphi \cos(\rho + \varepsilon)) \\ \frac{dx}{d\rho} & 0 & \frac{dy}{d\rho} & \frac{d\sigma}{d\rho} \\ 0 & \frac{d\sigma}{d\rho} & 0 & \frac{d\rho}{d\rho} \end{pmatrix} = 0. \quad (7)$$

Таким образом, из уравнения (7) вдоль характеристик (6) имеем следующие дифференциальные соотношения:

$$d\sigma \mp 2\sigma \operatorname{tg}\varphi d\rho = \gamma(dy \mp \operatorname{tg}\varphi dx). \quad (8)$$

Решение системы уравнений (6) и (8) затруднительно, поэтому для решения конкретных задач от дифференциалов переходят к конечным разностям, в итоге получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} y - y_1 = (x - x_1) \operatorname{tg}(\rho_1 - \varepsilon) \\ \sigma - \sigma_1 = 2\sigma_1(\rho - \rho_1) \operatorname{tg}\varphi + \gamma(y - y_1) - \gamma(x - x_1) \operatorname{tg}\varphi \\ y - y_2 = (x - x_2) \operatorname{tg}(\rho_2 + \varepsilon) \\ \sigma - \sigma_2 = -2\sigma_2(\rho - \rho_2) \operatorname{tg}\varphi + \gamma(y - y_2) + \gamma(x - x_2) \operatorname{tg}\varphi. \end{cases} \quad (9)$$

Пользуясь этими уравнениями, можно определить приближенные значения x , y , σ , ρ точки С пересечения двух линий скольжения (двух характеристик разных семейств), если эти величины известны в точках 1 и 2, лежащих на этих линиях (рис. 1). Очевидно, может быть решена и обратная задача. Все вычисления и построения осуществляются в безразмерных координатах, то есть при $C = 1$, $\gamma = 1$.

Параллельно В. В. Соколовскому, С. С. Голушкиевич [4] независимо разработал графический способ интегрирования уравнений предельного напряженного состояния (статики сыпучих сред). Конечно, никакой графический способ не может быть удобнее аналитического, особенно в настоящее время, при

стремительном развитии ЭВМ.

В строгом понимании способы В. В. Соколовского и С. С. Голушкиевича правильнее назвать способами построения предельного очертания или определения предельной пригрузки откосов вогнутого профиля. Однако такой профиль откоса при открытой разработке ведет к значительному увеличению объемов вскрыши по сравнению с откосами выпуклого и плоского профилей. В этой связи В. Т. Сапожниковым [5] был разработан способ построения «равноустойчивого» откоса выпуклого профиля, основанный также на теории предельного напряженного состояния (рис. 2).

Недостатки метода предельного напряженного состояния:

1) невозможность применения в случаях произвольной формы откоса и эпюры внешней нагрузки, что является следствием допущения о выполнении условия предельного напряженного состояния в каждой точке призмы смещения (рис. 2);

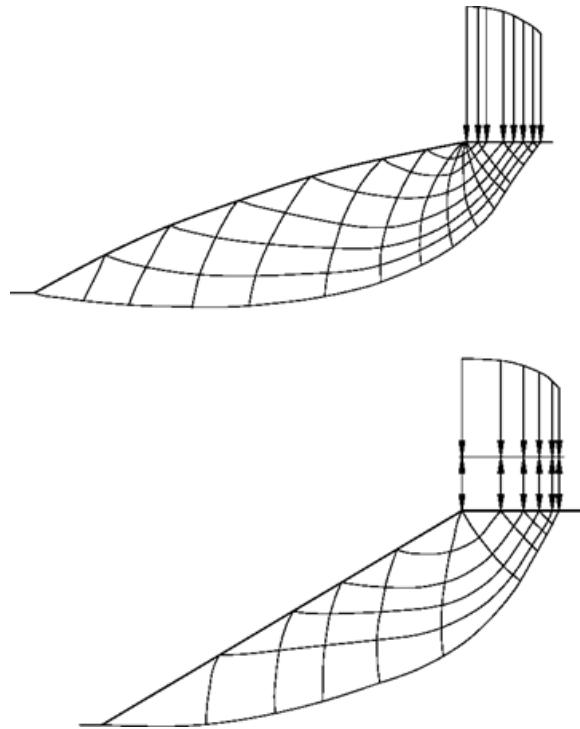


Рис. 2. Выпуклый и плоский откосы с расчетной весовой пригрузкой

2) сложность или невозможность применения в случаях наличия в массиве поверхно-

стей ослабления (контактов слоев, трещин и т. д.);

3) трудоемкость и непригодность при адаптации к сложным горно-геологическим условиям (сейсмичность, обводненность, объемная задача и т. д.).

С. С. Голушкиевич отмечает, что «случай, когда сыпучая среда находится в предельном напряженном состоянии во всех точках, следует рассматривать как иногда возможный, частный и притом крайний случай состояния предельного равновесия. Поэтому состояние предельного равновесия массива сыпучей среды лучше определять как состояние, при котором его внутренняя граница является поверхностью скольжения» [4].

Способы класса В наиболее разнообразны. Их различие состоит в геометрии используемой поверхности скольжения (круглоцилиндрическая, логарифмическая спираль и др.), а также в том, каким образом судят об устойчивости призмы смещения: по равновесию отдельных отсеков (блоков) или для всей призмы смещения.

На основании детального анализа, проведенного автором, были выделены четыре группы основных допущений, выдвигаемых исследователями для обоснования расчетной схемы, получения условий устойчивости (равновесия) призмы смещения и определения формы и положения наиболее слабой по-

верхности скольжения в откосах:

1) допущение о выполнении условия предельного напряженного состояния в каждой точке призмы смещения (метод предельного напряженного состояния – способы класса А);

2) допущения о распределении нормальных реакций вдоль поверхности скольжения (способы монолитного отсека обрушения, то есть когда рассматривают равновесие призмы смещения целиком);

3) допущения относительно соотношения касательных и нормальных реакций по боковым граням отсеков (реакция горизонтальна, наклонна или предельно отклонена);

4) допущения относительно формы и положения (геометрии) потенциальной (наиболее слабой) поверхности скольжения.

Допущение первой группы было рассмотрено выше.

В способах, рассматривающих равновесие призмы смещения как единого целого, существуют известные трудности при определении эпюры нормальных напряжений вдоль поверхности скольжения. Поэтому такие способы расчета используют допущения, зачастую малообоснованные. А если учесть, что поверхность скольжения не задана, то задача становится весьма неопределенной.

С другой стороны, если рассматривать призму смещения как единое целое (монолитный отсек) (рис. 3), а также учитывая, что для

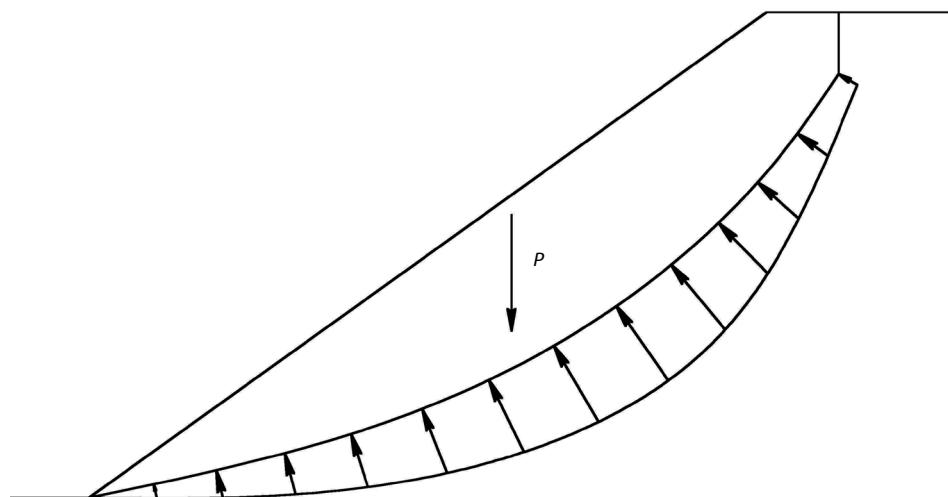


Рис. 3. Монолитный отсек обрушения

равновесия тела или системы тел необходимо и достаточно равенства нулю главного вектора

внешних сил, то задача сводится лишь к определению их вдоль поверхности сколь-

жения. Однако даже при заданной поверхности скольжения для определения реакций необходимо прибегнуть к разбиению призмы смещения, то есть к необходимости учета межблоковых реакций. Последние же также определяют значения величин внешних сил в каждой точке поверхности скольжения.

Большинство способов расчета используют допущения третьей группы. Дело в том, что задача о равновесии отсека (рис. 4) является статически неопределенной. То есть для

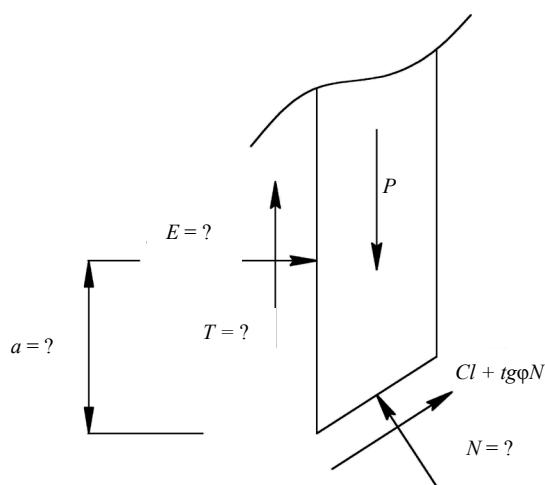


Рис. 4. Силы, действующие на отсек (блок)

выполнения плоского равновесия отсека можно составить три условия статического равновесия, а неизвестных, которые необходимо определить, – четыре (рис. 4). Соответственно для всей призмы смещения неизвестных будет столько, на сколько частей мы разобьем призму смещения. На практике часто считается, что точка приложения нормальной межблоковой реакции не важна, так как опрокидывание отсеков не наблюдается, поэтому условие моментов для отсека отбрасывается вместе с неопределенным плечом приложения нормальной межблоковой реакции. Если рассматривать элементарные отсеки, то есть отсеки с бесконечно малой шириной, то задачу по преодолению статической неопределенности можно свести к определению закона распределения полного вектора межблоковой реакции или отношения нормальной и касательной составляющих.

Таким образом, выше дано объяснение

многообразию способов расчета устойчивости откосов. То есть исследователи для обоснования недостающего условия (уравнения) выдвигают дополнительные и, зачастую, малообоснованные гипотезы о распределении межблоковых реакций. Некоторые из них:

- 1) реакция между отсеками горизонтальна (Н. М. Герсанов, Г. Крей, Р. Р. Чугаев – способ горизонтальных сил, Н. Янбу);
- 2) касательная реакция максимальна (Г. М. Шахунянц, ВНИМИ);
- 3) реакция отклонена от горизонта на величину половины угла сдвига (Р. Р. Чугаев – способ наклонных сил);
- 4) направление реакции параллельно основанию последующего отсека (Г. Л. Фисенко – алгебраическое сложение сил);
- 5) отношение касательной и нормальной составляющей – линейная функция аргумента (способ Моргенштерна и Прайса);
- 6) касательная реакция численно равна произведению сцепления на площадь боковой поверхности (Г. М. Шахунянц, 1969);
- 7) касательная реакция численно равна силе трения при предельном равновесии по боковой грани отсека (В. Т. Гузенко и др.);
- 8) касательная и нормальная реакции отсеков равны нулю (Ю. И. Соловьев, К. Терцаги, способ алгебраического сложения сил).

Заметим, что взаимодействия между отсеками присутствуют в любом случае, иначе напряжения в теле призмы смещения были бы равны нулю, а это возможно лишь в ненагруженных и невесомых средах. Однако важно установить степень их влияния на устойчивость. Так как условие равновесия определяется лишь действием внешних сил (сил, действующих на призму смещения в целом), то внутренние силы (межблоковые реакции) в критерий устойчивости в явном виде входить не будут. То есть внутренние силы должны выражаться в виде функции внешних сил.

Допущения четвертой группы используют все способы класса В, кроме вариационных. Дело в том, что форма и положение поверхности скольжения в массиве определяют и сам критерий устойчивости. Например, при плоской поверхности скольжения нет необходи-

ности рассматривать межблоковые реакции, задача становится статически определимой, а условием равновесия (критерием устойчивости) выступает сумма проекций внешних сил на плоскость поверхности скольжения (брюсок на наклонной плоскости). Круглоцилиндрическая поверхность скольжения (Петтерсон, 1916) позволяет достаточно просто оценить сумму моментов сил, действующих на призму смещения, а логарифмическая спираль (Рендулик, 1935) обладает тем свойством, что всякая нормаль к этой кривой образует постоянный угол с соответствующим радиус-вектором. Этим достигается простота расчетных схем и получаемых при этом результатов, то есть используемые в расчетах поверхности скольжения приняты для упрощения или просто для реализации расчетных схем и не имеют обоснования.

Существующие вариационные способы (табл. 1) для обоснования геометрии потенциальных поверхностей скольжения используют статически необоснованные критерии устойчивости, то есть функционалы, полученные с использованием допущения о распределении межблоковых реакций, и поэтому определенная из данного критерия поверхность скольжения не будет являться истинной.

Таким образом, делаем вывод о том, что все существующие методы (способы) в силу статической неопределенности задачи в любой ее постановке для получения условия равновесия призмы смещения используют те или иные допущения. В этом смысле ни один из рассмотренных способов не является строгим. О степени обоснованности каждого из допущений судить весьма сложно ввиду отсутствия эталонного способа расчета.

Часто в литературе можно встретить ошибочное мнение о том, что метод предельного напряженного состояния является строгим, а способы метода предельного равновесия являются инженерными (приближенными) и что необходимо производить их совершенствование и корректировку (например, многоугольник сил по ВНИМИ), используя метод предельного напряженного состояния. Одна-

ко, как показано выше, оба метода и включающие в себя способы несовершены, кроме того, рассматриваемые два метода ни в коем случае нельзя сравнивать и уж тем более осуществлять их симбиоз.

В заключение отметим принципиальные различия между двумя основными методами расчета (оценки) устойчивости откосов и основные положения каждого из них.

В методе предельного напряженного состояния (класс А) условие предельного равновесия выполняется в каждой точке призмы смещения, в том числе на поверхности откоса и вдоль поверхности скольжения. Это в частности означает, что направление линии действия наибольшего главного напряжения отклонено от площадок скольжения каждого из семейств поверхностей скольжения на угол $\pi/4 - \phi/2$. На площадках с такой ориентировкой действует максимальная разность сдвигающих и удерживающих сил, т. е. они являются наиболее опасными в рассматриваемой точке.

В методе предельного равновесия и во всех его способах (класс В) условие предельного равновесия (условие пластичности, прочности) выполняется только вдоль поверхности скольжения, причем ориентировка площадок определяется из условия опасности (экстремальности) поверхности скольжения в целом, а не в каждой ее точке. То есть площадки среза (скольжения) не обязательно будут отклонены от направления первого главного напряжения на угол $\pi/4 - \phi/2$.

Рассмотрим пример. В точке выхода поверхности скольжения в откос линия действия первого главного напряжения совпадает с ним, т. к. по поверхности откоса отсутствуют касательные напряжения. Поэтому угол выхода поверхности скольжения в откос по методу предельного напряженного состояния составляет $\varepsilon = \pi/4 - \phi/2$. Используя данный факт и проведя аналогию между рассматриваемыми методами, Г. Л. Фисенко установил граничные условия для круглоцилиндрической поверхности скольжения в методе предельного равновесия. Ошибочность такого подхода достаточно просто показать на примере сыпу-

чих (не связных) горных пород. Как известно, наиболее опасная поверхность скольжения в откосе не связных пород будет совпадать с ним. Поверхность же, построенная с использованием вышеуказанных граничных условий, будет всегда иметь некоторый запас устойчивости. Данный факт объясняется тем, что угол выхода поверхности скольжения в откос, равно как и форма (геометрия) поверхности скольжения в методе предельного равновесия, должны определяться не только углом внутреннего трения, но также и углом откоса. Это обстоятельство впервые доказано автором в диссертации [6], а во всех рассмотренных выше схемах и способах отражения не нашло.

Рассмотрим теперь точку выхода предельно напряженной поверхности скольжения в откос. Если угол выхода поверхности скольжения отличен от $\varepsilon = \pi/4 - \phi/2$, и на этой площадке выполняется условие предельного равновесия, то оно тем более будет выполняться на площадке с углом выхода ε . По-видимому, в призме смещения откоса произвольной формы (то есть в таком откосе, который по форме и нагрузке не удовлетворяет уравнениям теории предельного напряженного состояния) существуют площадки, где удовлетворяется условие предельного равновесия, которые объединяются в небольшие по протяженности поверхности или же в пластические области. Такие области можно наблюдать при разрушении реальных откосов или моделей из эквивалентных материалов в виде трещин, напоминающих второе семейство поверхностей скольжения. Однако эти области локальны и не заполняют всего пространства призмы смещения (разрывные решения), а зачатки таких поверхностей скольжения не формируют генеральную поверхность, по которой произойдет общее нарушение устойчивости откоса.

Еще одним достаточно показательным примером некорректного отождествления методов является то, что призма смещения в методе предельного равновесия должна раз-

биваться на отсеки линиями, подобными второму семейству поверхностей скольжения в методе предельного напряженного состояния (ВНИМИ). Однако заметим, что, во-первых, линии второго семейства в методе предельного напряженного состояния – это реально существующие предельно напряженные поверхности скольжения. При произвольной форме ненагруженного откоса они отсутствуют, т. к. не выполняются дифференциальные уравнения предельного напряженного состояния. Во-вторых, в откосах разбивку призмы смещения на отсеки можно производить любыми криволинейными или прямолинейными условными границами, но отбрасываемая часть должна быть заменена заведомо неизвестными реакциями (принцип освобождаемости от действия связей), а именно неизвестными вектором сил и моментом сил. В этом случае законы механики не нарушаются. То есть, если призма смещения находится в предельном равновесии по некоторой поверхности скольжения, то расположение границ между отсеками не принципиально (в случае отсеков с элементарной длиной дуги поверхности скольжения). Это объясняется свойством внутренних сил: главный вектор внутренних сил равен нулю.

Таким образом, несмотря на некоторые сходства методов предельного напряженного состояния и предельного равновесия, их сравнение необходимо производить с осторожностью.

В принципе, метод предельного напряженного состояния необходимо использовать для предупреждения обрушений, т. е. изучения формы откосов и внешней нагрузки, при которых возможно обрушение, а метод предельного равновесия – оползней.

После проведения анализа автором была создана классификация способов расчета устойчивости откосов по принципу используемых допущений (ошибочности) при выведении условий равновесия призмы смещения и обоснования геометрии наиболее слабой поверхности скольжения (табл. 2).

Таблица 2

**Классификация методов (способов) расчета устойчивости откосов
по типу используемого допущения**

Методы и способы расчета	Поверхность скольжения	Допущения			
		1	2	3	4
		о выполнении условий предельного напряженного состояния в каждой точке призмы смещения	о форме и положении потенциальной поверхности скольжения	о распределении нормальных реакций вдоль поверхности скольжения (способы монолитного отсека обрушения)	о соотношении касательных и нормальных реакций по боковым граням отсеков (реакция горизонтальна, наклонна или предельно отклонена)
Метод предельного равновесия					
Способ Франце, Винклера, Бернацкого	Плоская	—	+	—	—
Способ Цимбаревича		—	+	—	—
Способ Орнатского		—	+	—	—
Способ Хеннеса		—	+	—	—
Способ Токмурзина		—	+	—	—
Способ кругло-цилиндрической поверхности скольжения (Терцаги, Крея, Гультина, Иванова-Тейлора)	Кругло-цилиндрическая	—	+	—	+
Способ Феллениуса		—	+	—	+
Способ круга трения (прием Гольдштейна)		—	+	+	—
Способ Бишопа		—	+	—	+
Способ Фрелиха		—	+	+	—
Способ Како		—	+	+	—
Способ Чугаева-Вяземского		—	+	—	+
Способ Ломизе (нахождение потенциально опасной поверхности скольжения)		—	-/+	—	+
Графоаналитический способ Шахунянца		—	+	—	+
Способ Янбу		—	+	—	+
Способ Моргенштерна-Прайса	Логарифмическая	—	+	—	+
Способ Спенсера		—	+	—	+
Способ GLE		—	+	—	+
Способ Рендулика		—	+		
Способ Пузыревского-Кожевникова		—	+		
Способ Козлова		—	+		
Способ Никитина		—	+		
Способ Галустьяна		—	+		

Методы и способы расчета	Поверхность скольжения	Допущения			
		1	2	3	4
		о выполнении условий предельного напряженного состояния в каждой точке призмы смещения	о форме и положении потенциальной поверхности скольжения	о распределении нормальных реакций вдоль поверхности скольжения (способы монолитного отсека обрушения)	о соотношении касательных и нормальных реакций по боковым граням отсеков (реакция горизонтальная, наклонна или предельно отклонена)
Способ Гордеева (нахождение потенциально опасной поверхности скольжения)	Кубический сплайн	–	+/-	–	+
Способ Ясионаса	Ломаная	–	+	–	+
Способ горизонтальных сил (Маслова-Берера)		–	+	–	+
Способ касательных сил (Шахунянца)		–	+	–	+
Способы Чугаева		–	+	–	+
Графостатический способ Перковского		–	+	–	+
Способ блока и призм		–	+	–	+
Способ Копачи	Сложной формы (определяется методами вариационного исчисления)	–	–	–	+
Способ Соловьева		–	–	–	+
Способ Дорфмана		–	–	–	+
Способ Жабко		–	–	–	–
<i>Метод предельного напряженного состояния</i>					
Способ Соколовского	Определяется построением	+	–	–	–
Способ Голушкича		+	–	–	–
Способ Гольдштейна (упрощение уравнения Кеттера-Массо)	Кругло-цилиндрическая	+	+	–	–
Способ Бурмейстера (упрощение способа Соколовского)	Определяется форма поверхности равноустойчивого откоса	+	–	–	–
Способ Сенкова (упрощение способа Соколовского)		+	–	–	–
Способ Голованова (упрощение способа Соколовского)		+	–	–	–

Знак «+» означает, что допущение используется данным способом, а знак «–» – не используется. Отсутствие знака в графе означает, что в способе данный вопрос не рассматривался, например, в способе Козлова обосновывалась только поверхность скольжения, без вывода условия равновесия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машанов А. Ж., Певзнер М. Е., Бекбасаров Ш. С. Устойчивость уступов и бортов карьеров бассейна Карагатау. Алма-Ата: «Наука» КазССР, 1981. 120 с.
2. Хуан Я. Х. Устойчивость земляных откосов / под ред. В. Г. Мельника. М.: Стройиздат, 1988. 240 с.
3. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.
4. Голушкевич С. С. Статика предельных состояний грунтовых масс. М.: Гос. изд-во техн-теор. лит-ры, 1957. 288 с.
5. Сапожников В. Т. Определение равноустойчивого откоса выпуклого профиля: сб. трудов ВНИМИ. 1968. Вып. 64. С. 249–266.
6. Жабко А. В. Исследование закономерностей, определяющих геометрию поверхности скольжения в откосах и расчетные характеристики, в изотропных горных массивах: дис. канд. техн. наук. Екатеринбург: УГГУ, 2009. 152 с.

Жабко Андрей Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: zhabkoav@mail.ru

УДК 622.75

РАЗДЕЛЕНИЕ БЕДНЫХ СУЛЬФИДНЫХ РУД МЕТОДОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ

Афанасьев А. И., Паньков С. А., Потапов В. Я.,
Симисинов Д. И., Угольников А. В.

Рассмотрен электротермический процесс рудоподготовки кусков бедных сульфидных руд крупностью до 100 мм к последующему измельчению методом, основанным на разрушении горных пород под воздействием энергии электромагнитных волн электрического поля. Результаты расчетов подтверждены экспериментальными исследованиями. Полученные зависимости позволяют сделать вывод, что электрообработка бедных сульфидных руд позволяет существенно сократить объемы переработки горной массы, снизить энергоемкость измельчения, повысить концентрацию полезного ископаемого.

Ключевые слова: электропроводность; электрическое разупрочнение руд; ударное разрушение; сульфидная руда; бедная руда; измельчение.

Совершенствование технологии и экономики обогащения в последние годы связывается с введением в рудоподготовительный передел операций предварительного разделения горной массы, позволяющих после первых стадий дробления удалить из процесса породные фракции. В настоящее время около 40–50 % всех энергетических затрат обогатительных фабрик относятся к этапу подготовки сульфидных руд к глубокому обогащению, которое предполагает многостадийное дробление и последующее тонкое измельчение руд.

Интерес представляют работы, связанные с новыми методами снижения энергетических затрат на рудоподготовку, основанными на ослаблении связей между частицами минералов в кусках горных пород, в которых применяется невзрывное и немеханическое воздействие на породу [1, 2].

Изменение физического состояния и химических свойств минеральных веществ при их диспергировании представляет определенный научно-практический интерес для снижения энергетических затрат на первых стадиях рудоподготовки и активации минералов при их измельчении.

В данной работе рассмотрен электротермический процесс рудоподготовки кусков сульфидных руд крупностью до 100 мм к по-

следующему измельчению. Метод основан на разрушении горных пород под воздействием энергии электромагнитных волн электрического поля. В результате определенные объемы сульфидов нагреваются, их объем увеличивается, и в породе появляются растягивающие напряжения, которые приводят к разрушению куска породы по границам связей между частицами минералов [1].

При электротермических способах разрушения горная порода выступает в качестве преобразователя энергии – электромагнитной в тепловую, а тепловой – в механическую, являясь инструментом, производящим разрушение [1].

Поглощение электромагнитной энергии W породой определяется ее электропроводностью для низких частот электромагнитного поля. Количество выделившейся в породе тепловой энергии определяется законом Джоуля–Ленца [1, 3]:

$$W = \int_0^{t_k} q_n E^2 V_1 dt,$$

где q_n – электропроводность породы, Ом^{-1} ; E – напряженность электрического поля, $\text{A}/\text{м}$; V_1 – объем породы, занятый полем, м^3 ; t_k – время действия электрического поля в породе, с.

В результате воздействия электрического поля возникает тепловой пробой – процесс

перехода диэлектрика или полупроводника в проводник за счет потери изоляционных свойств твердых тел.

Рассмотрим процесс разрушения горных пород с использованием установки, разработанной в Уральском государственном горном университете (рис. 1).

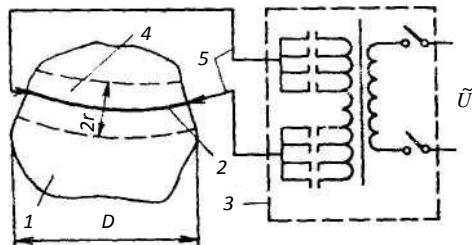


Рис. 1. Схема разрушения породы электрическим пробоем:

1 – кусок породы; 2 – канал пробоя; 3 – энергетическая установка; 4 – рабочее место; 5 – подводящие кабели

Установка представляет собой полуавтомат, в котором напряжение, подаваемое на электроды, автоматически регулируется по величине тока так, что энергия, вводимая в канал пробоя, поддерживается на заданном уровне, как правило, равной номинальной. Максимальное напряжение на электродах в этих установках – 6 кВ.



Рис. 2. Схема установки электродов на куске

Установка работает следующим образом: электроды устанавливают на кусок породы с противоположных сторон (рис. 2), на электроды подается напряжение. Затем в точках контакта последних с породой возникает дуга и происходит оплавление породы (рис. 3) с по-

следующим её разрушением (рис. 4).



Рис. 3. Зоны пробоя куска при воздействии электрического заряда



Рис. 4. Разрушение куска при воздействии электрического заряда

Для оценки влияния степени разрушения кусков после теплового пробоя было произведено их дробление ударом. Энергия удара изменялась от 75 до 200 Дж, в зависимости от их крупности. На рис. 5 представлены образцы после ударного разрушения.

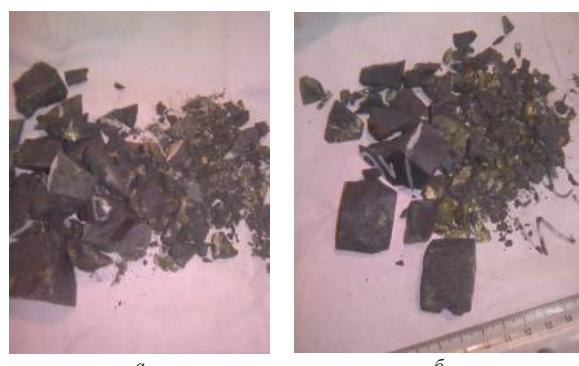


Рис. 5. Результаты разрушения кусков:
а – образец, не подвергаемый тепловой обработке; б – образец, подвергаемый тепловой обработке

Гранулометрические характеристики на основе ситового анализа представлены на рис. 6.

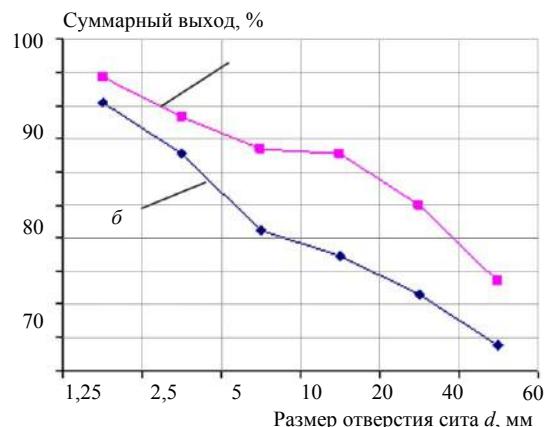


Рис. 6. Суммарные характеристики сульфидной руды:
а – образец, не подвергаемый электрообработке; б – образец, подвергаемый электрообработке

В результате исследования установлено, что электрообработка сульфидной руды позволяет разрушать куски с образованием

большого количества кусков мелких классов крупности (см. рис. 6, б) по сравнению с кусками, не подвергнутыми электрообработке (рис. 6, а). Установлено, что основная концентрация свободных сульфидов находится в классе $-10\dots+0$ мм. Параметры процесса разрушения бедной медно-цинковой руды приведены в таблице.

На рис. 7 приведена зависимость относительной энергии разрушения от энергии удара.

В результате электрической обработки установлено, что энергия разрушения кусков сульфидной руды снижается по сравнению с кусками необработанной руды. На рис. 7 видно, что чем больше степень дробления, тем больше удельные затраты энергии. Поэтому, по нашему мнению, эффективность процесса дробления целесообразно оценивать отноше-

Параметры процесса разрушения бедной медно-цинковой руды

Средневзвешенный размер кусков до дробления, d_1 , мм	Степень дробления, i	Энергия удара, E , кДж	Относительная энергия разрушения, E_y / i , кДж/кг
33	3,75	75	0,45
41	3,6	104	0,39
49	3,8	139	0,29
56	3,1	184	0,25

нием удельной энергии разрушения к степени дробления, т. е. относительной энергии разрушения. Чем меньше относительная энергия

разрушения, тем совершеннее в конструктивном исполнении установка и эффективнее процесс.

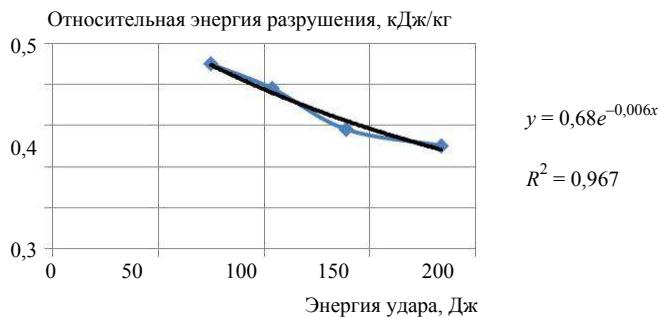


Рис. 7. Зависимость относительной энергии разрушения от энергии удара

Использование данного метода позволит значительно снизить последующие энергетические затраты на измельчение в результате разрушения при контакктной зоны сростков

сульфидов, что позволяет при разработке технологической схемы выделять сульфиды в отдельные продукты и перерабатывать по различным схемам измельчения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Новые методы разрушения горных пород: учеб. пособие для вузов / М. А. Емелин [и др.]. М.: Недра, 1990. 240 с.
- Молчанов В. И., Селезнева О. Г., Жирнов Е. Н. Активизация минералов при измельчении. М.: Недра,

1988, 208 с.

3. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. М.: Недра, 1978. 359 с.
4. Математическая модель разделительного аппарата для бедных сульфидных руд / А. И. Афанасьев [и др.] // Изв. вузов. Горный журнал. № 2. 2014. С. 63–68.

Афанасьев Анатолий Ильич – доктор технических наук, профессор кафедры технической механики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: gmf.tm@ursmu.ru

Паньков Сергей Александрович – аспирант. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева 30. E-mail: ser_pankov@list.ru

Потапов Валентин Яковлевич – доктор технических наук, профессор кафедры горной механики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: 2c1@inbox.ru

Симисинов Денис Иванович – кандидат технических наук, доцент кафедры эксплуатации горного оборудования. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: 7sinov@mail.ru

Угольников Александр Владимирович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой электро-техники. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: aleksandr.ugolnikov@m.ursmu.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ГЛУБИНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОДООТЛИВНЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ ЗАВЫШЕННОГО НАПОРА НАСОСОВ

Петровых Л. В., Марченко А. Ю., Иващенко Е. П., Марченко М. Ю.,
Салтанов С. Н., Баринов И. М., Викулов Е. А.

Рассмотрены вопросы снижения энергетических затрат на рудничных водоотливных установках за счет снижения избыточного напора насосов до некоторых допустимых значений. Изложен подход к определению необходимой глубины регулирования насосов при различных способах изменения подачи и напора насосных агрегатов. Получены зависимости диаметра рабочего колеса насоса, плотности воздуховодяной смеси и частоты электрической сети в функции избыточного напора насосов.

Ключевые слова: водоотливные установки; избыточная напорность насосов; определение; глубина регулирования.

Необходимым условием устойчивой работы насосов шахтного водоотлива на трубопроводную сеть является наличие у них избыточной по отношению к высоте водоподъёма напорности. Численно она определяется как разность фактического (по режиму работы) манометрического напора насоса и геометрической (геодезической) высоты нагнетания. Избыточная напорность насоса расходуется на перемещение воды по трубопроводной сети и преодоление её сопротивления. Необходимый уровень воды в практике эксплуатации насосных агрегатов шахтного водоотлива довольно часто превышен, что связано с непроизводительными энергетическими затратами. Это превышение чаще всего закладывается ещё на стадии проектирования водоотливных установок, когда выбираются насосы с ближайшим большим количеством рабочих колес. Поскольку у современных шахтных насосов номинальный напор на одно рабочее колесо составляет 80–180 м, то избыточная напорность насоса может быть весьма значительна, что влечет за собой соответствующие непроизводительные затраты электроэнергии.

Среди возможных способов снижения избыточного напора центробежных шахтных насосов в первую очередь следует выделить наиболее эффективные и приемлемые с точки зрения практической реализации: замена или подрезка рабочих колес, выпуск воздуха на всасе в насос, изменение частоты электрической сети.

Для реализации этих способов в первую очередь необходимо определение требуемой глубины уменьшения диаметра рабочего колеса D'_2 (при его замене или подрезке), плотности воздуховодяной смеси ρ_{cm} и частоты питающей электрической сети f' . Отсюда вытекает необходимость получения зависимостей указанных параметров в функции избыточной напорности насосов.

Излишний запас избыточного напора насоса $H_{изб.3}$ определяется как разность между напорами, соответствующими фактическому режиму работы насоса H_p и его допустимому значению $H_{p.d}$, т. е. излишний запас напора насоса $H_{изб.3} = H_p - H_{p.d}$ и есть тот запас, который требуется устраниить. В существующей технической литературе при рекомендации допустимых величин запаса избыточного напора насосов (например, 5–15 % в работах [1, 2]) не указывается, относительно какого значения напорности ведется расчет этого процента. Очевидно, что здесь возможно его вычисление либо относительно высоты водоподъема H_p , либо относительно величины $H_{p.d}$.

При установлении зависимостей $D'_2 \rho_{cm}$ и $f' = f(H_{изб.3})$ будем рассматривать значения избыточной напорности насосов относительно величины H_p , при этом $\bar{H}_{изб.3} = H_{изб.3}/H_p$. Тогда на основе законов пропорциональности турбомашин требуемый диаметр рабочего колеса (заменного или подрезанного), соответствующий минимально допустимой напорной характеристике насоса (с режимным значением напора $H_{p.d}$)

$$D'_2 = D_2 \sqrt{\frac{H_{p,d}}{H_p}}, \quad (1)$$

где значение $H_{p,d} = H_p - H_{изб.3}$.

С учетом этого диаметр $D'_2 = f(\bar{H}_{изб.3})$,

$$D'_2 = D_2 \sqrt{\frac{H_p - H_{изб.3}}{H_p}} = D_2 \sqrt{1 - \bar{H}_{изб.3}}. \quad (2)$$

Следовательно, достоверность определения величины D'_2 зависит, в основном, от точности обоснования излишнего запаса напора насоса, т. е. от величины $\bar{H}_{изб.3}$.

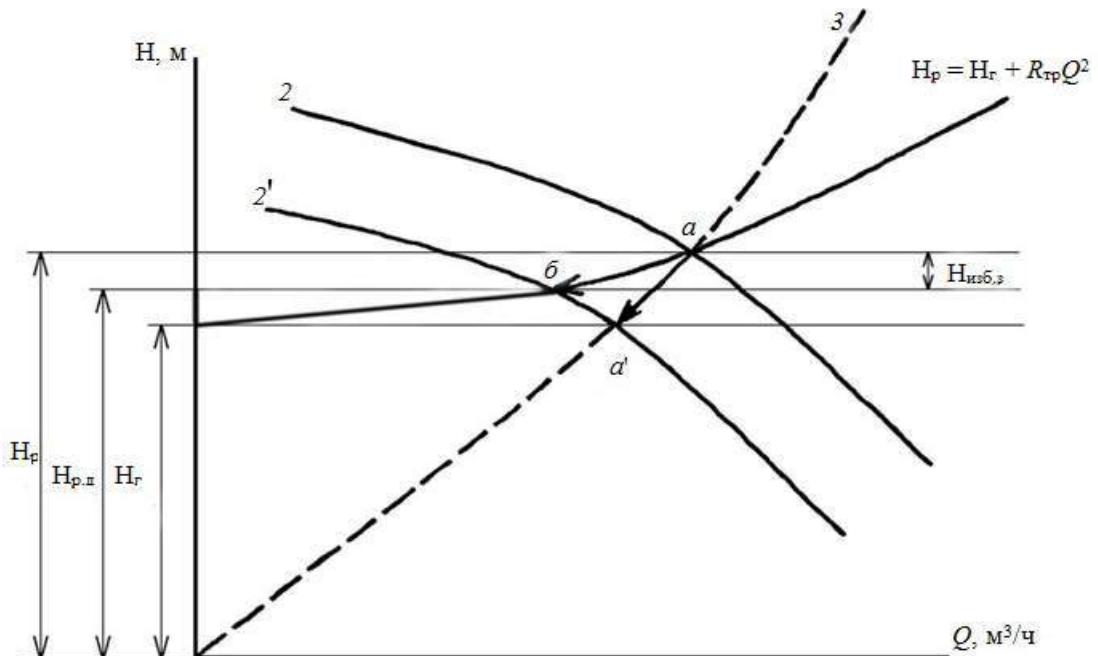


Рис. 1. Иллюстрация процедуры перевода режима работы насосной установки при подрезке рабочего колеса насоса:
2, 2' – характеристики насоса с неподрезанным и подрезанным рабочим колесом; 3 – гипотетическая характеристика сети, выходящая из начала координат

её работы следует определять графоаналитическим способом или посредством решения системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} H_p &= H_r + R_{mp}Q^2; \\ H_p &= H_0 + a'_1 Q - a'_2 Q^2, \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

где a'_1, a'_2 – коэффициенты, соответствующие напорной характеристике насоса с диаметром рабочего колеса D'_2 ; H_0 – напор насоса при нулевой подаче.

На рис. 1 показана процедура перемещения режима работы насоса из точки a с завышенным запасом напорности в точку b ,

После определения устанавливаются напорная характеристика насоса и режим его работы, соответствующие этому диаметру. Пересчет характеристики насоса с диаметром D_2 на D'_2 осуществляется по зависимости (рис. 1)

$$H'_2/H_2 = (D'_2/D_2)^2. \quad (3)$$

Так как характеристика сети водоотливной установки не представляет собой параболу, выходящую из начала координат, режим

в которой насос работает с минимально допустимым запасом избыточного напора $H_{p,d} = H_p - H_{изб.3}$, т. е. в наиболее выгодном с энергетической точки зрения режиме.

Вопросы практической реализации рассматриваемого способа снижения $H_{изб.3}$ достаточно подробно изложены в технической литературе и потому здесь не приводятся. Регулирование центробежных насосов впуском воздуха во всасывающую линию до сих пор было менее распространенным способом регулирования напорности шахтных водоотливных установок, чем, например, способ дросселирования, однако в последние годы

он находит все более широкое применение в связи с хорошими экономическими показателями. Достоинства этого способа – относительная простота и небольшая трудоемкость реализации.

Регулирование насоса впуском воздуха на всасывающем трубопроводе может быть произведено с помощью управляемого вентиля игольчатого типа. Для насосов, работающих с положительной высотой всасывания, дозирование воздуха осуществляется из окружающей среды за счет разрежения, создаваемого

насосом; для насосов, работающих с подпором, – от шахтной пневмосети.

При регулировании подачи центробежного насоса впуском воздуха во всасывающую линию напорная характеристика трубопровода 3 остается неизменной, а характеристика насоса 2 снижается по давлению и трансформируется в характеристику 2'. Рабочий режим водоотливной установки перемещается из точки *a* в точку *b* по характеристике трубопровода 3 при снижении напора и подачи насоса (рис. 2).

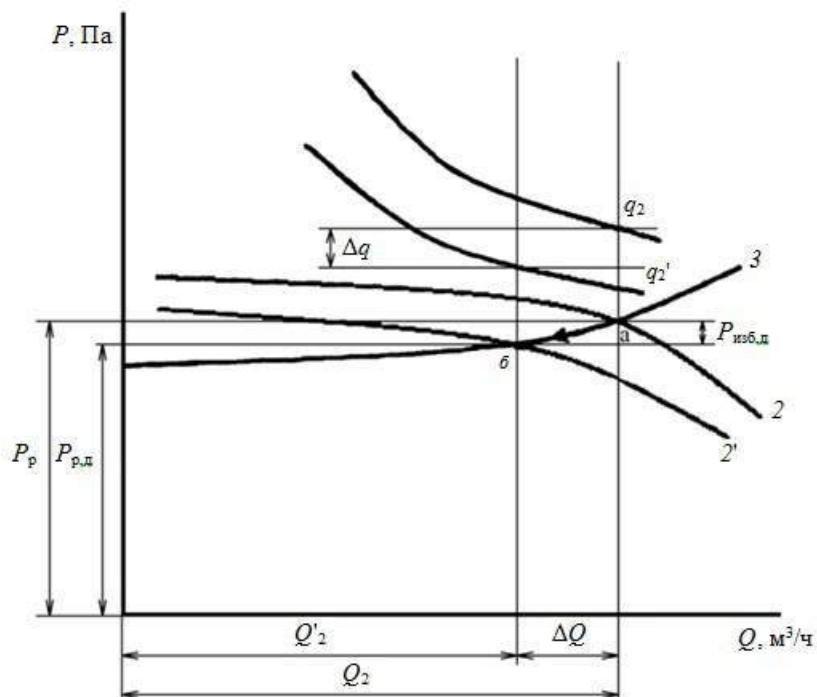


Рис. 2. Снижение избыточного напора насоса впуском воздуха на всасе

Во избежание необходимости пересчета характеристик насоса на разные плотности текущих сред (воды ρ и воздуховодяной смеси $\rho_{\text{см}}$) в данном случае удобнее оценивать насосную установку не по напору, а по развиваемому ею давлению. Следовательно, на основе теории турбомашин запишем

$$\frac{P_{\text{п.д}}}{P_p} = \frac{\rho_{\text{см}}}{\rho}. \quad (5)$$

С учетом этой записи требуемая плотность смеси

$$\rho_{\text{см}} = \rho \frac{P_{\text{п.д}}}{P_p} = \rho \frac{\rho_p - P_{\text{изб.з}}}{P_p} = \rho (1 - \bar{P}_{\text{изб.з}}). \quad (6)$$

Расход дозируемого воздуха определится на основе расчета по этой формуле необходимой плотности смеси $\rho_{\text{см}}$; соответствующая ей напорная характеристика насоса обеспечит режим его работы с напором $H_{\text{п.д.}}$.

Снижение подачи насоса от Q_2 до Q'_2 на величину ΔQ (при снижении давления насоса от P_p до $P_{\text{п.д.}}$) (рис. 2):

$$(Q'_2 / Q_2)^2 = \frac{R(S+1)}{R/S + (1 + q_0)^2}, \quad (7)$$

где $q_0 = Q_{\text{в.о}}/Q_2$ – относительный расход воздуха при введении его в трубопровод к условиям входа воды в первое рабочее колесо; S – коэффициент напорной характеристики на-

соса ($S = (H - H_0)/Q^2$); R – постоянная трубопровода.

Изменение при этом удельных энергозатрат от q_2 до q'_2 на величину Δq (при снижении давления насоса от P_p до $P_{p,d}$):

$$\frac{q_2}{q'_2} = \bar{\rho}_{cm} \left\{ 1 + \left[\frac{Q_2}{Q'_2} (2 - 1/\bar{\rho}_{cm}) - 1 \right] \left[1 - \frac{q_m}{q'_2} \right] \right\}, \quad (8)$$

где q_m – коэффициент, представляющий минимальные удельные энергозатраты насосной установки [4]; ρ_{cm} – относительная средневзвешенная плотность водовоздушной смеси

$$\bar{\rho}_{cm} = 1 - \frac{q_0}{\varepsilon} \ln \frac{\varepsilon}{1 + q_0}, \quad (9)$$

где ε – степень сжатия воздуха, равная отношению P_h/P_0 (давлений в нагнетательном и во всасывающем патрубках насоса).

Так как $\rho_{cm} < \rho$, то из анализа приведенных зависимостей следует, что рассматриваемый способ снижения избыточной напорности насосной установки достаточно экономичен. По данным работы [4] экономия расхода электроэнергии при этом способе регулирования

насосов составляет 2–3 %.

Однако наиболее экономичным способом снижения избыточного напора центробежных насосов до минимально обоснованных (допустимых) значений является частотный, предполагающий наличие в системе управления приводом насосных агрегатов частотных преобразователей (ПЧ), которые находят в настоящее время всё большее применение для регулирования насосов, вентиляторов и компрессоров в самых различных отраслях промышленности. Приводы с ПЧ обеспечивают плавное и глубокое экономичное регулирование подачи и напора вентиляторов, насосов и компрессоров. К недостаткам ПЧ следует отнести их относительно высокую стоимость, которая, однако, имеет постоянную тенденцию к снижению.

Зависимость частоты f' или частоты вращения ротора насоса ω' от величины избыточной напорности насоса при пересчете его напорных характеристик может быть также установлена на основе законов пропорциональности (рис. 3):

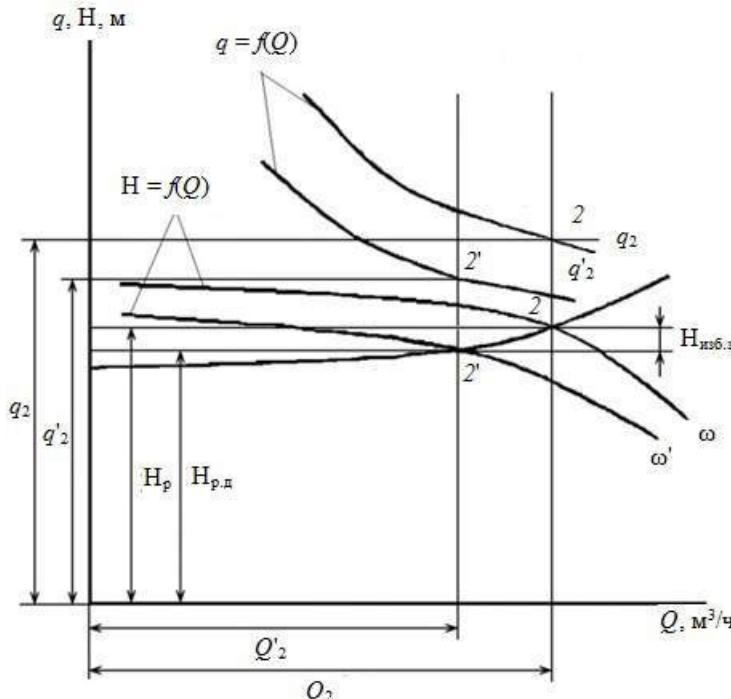


Рис. 3. Изменение характеристик насоса при изменении частоты вращения (для снижения $H_{изб}$)

$$H_{p,d}/H_p = (\omega'/\omega)^2 = (f'/f)^2. \quad (10)$$

Откуда $\omega' = \omega \sqrt{1 - H_{изб,2}}$; $f' = f \sqrt{1 - H_{изб,2}}. \quad (11)$

Изменение при этом удельных энергозатрат

$$\frac{q_2}{q'_2} = (\omega'/\omega)^2 \left[1 + \left(\frac{Q_2}{Q'_2} \omega'/\omega - 1 \right) \right] \left[1 - \frac{q_m}{q'_2} \right]. \quad (12)$$

Анализ этого выражения показывает, что при снижении частоты вращения удельные энергозатраты снижаются и, наоборот, при увеличении, они повышаются.

Техническая реализация частотного регулирования насосных агрегатов в самых различных отраслях промышленности в настоящее время достаточно подробно проработана и поэтому здесь она не приводится. То же самое можно сказать об использовании дросселирования на всасывающей линии насосов для снижения величины .

Следует также подчеркнуть, что в каждом конкретном случае окончательный выбор способа и обоснование технического решения для его реализации следует осуществлять на основе соответствующих экономических расчетов. Отдельно при этом следует остановиться на многоступенчатых схемах шахтного водоотлива, характерных для глубоких шахт [5]. Наиболее перспективными схемами главного водоотлива являются схемы с последовательно включенными насосами, расположеннымми на разных горизонтах – «из насоса в насос». Капитальные и эксплуатационные затраты на схемы «из насоса в насос» значительно меньше, чем затраты на схемы с промежуточным водосборником. Отрицательной стороной этой технологической схе-

мы водоотлива является жесткая связь между насосами разных горизонтов. В связи с этим изменения режимов работы насосов одного горизонта оказывает влияние на работу насосов другого горизонта, что и необходимо учитывать при решении вопросов снижения избыточной напорности многоступенчатых водоотливных установок.

Решать эту задачу можно отдельно по каждой ступени вышеизложенными способами, устанавливая при этом запас избыточной напорности предыдущего насоса, соизмеримым с допустимой величиной подпора на всасе последующего насоса. Однако при значительных запасах избыточной напорности обоих последовательно соединенных насосов может появиться реальная возможность уменьшения числа рабочих колес последующего насоса. Действительно, если суммарный запас избыточной напорности будет устойчиво больше, чем напор на одно колесо (секционного насоса), то снятие одного колеса последующего насоса значительно снизит энергозатраты всего ступенчатого каскада водоотливной установки без ущерба для его стабильного функционирования. Конечно, в каждом конкретном случае такие решения следует принимать после соответствующего анализа и расчета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Веселов А. И. Рудничный водоотлив. Свердловск: Металлургиздат, 1956. 524 с.
2. Веселов А. И. Рудничные турбомашины. Свердловск: Металлургиздат, 1956. 685 с.
3. Тимухин С. А., Петровых Л. В. Оценка энергозатратности избыточной напорности водоотливных установок. Изв. вузов. Горный журнал. 2011. № 5. С. 82–86.
4. Попов В. М. Шахтные насосы (теория, расчет и эксплуатация): справ. пособие. М.: Недра, 1993. 224 с.
5. Водоотлив глубоких шахт. М.: Недра, ИГМ и ТК М. М. Федорова. 1967. 155 с.

Петровых Любовь Вячеславовна – ассистент кафедры общей электротехники УГГУ. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.

Иващенко Евгений Петрович – главный инженер, эксперт. 620028, г. Екатеринбург, ул. Татищева, 94, ЗАО Центр диагностики и экспертизы «Цветметналадка». E-mail: diagnos.cmn@gmail.com, diagnos@mail.ur.ru

Марченко Андрей Юрьевич – начальник лаборатории неразрушающего контроля, эксперт. 620028, г. Екатеринбург, ул. Татищева, 94, ЗАО Центр диагностики и экспертизы «Цветметналадка».

Марченко Михаил Юрьевич – ведущий инженер, эксперт. 620028, г. Екатеринбург, ул. Татищева, 94, ЗАО Центр диагностики и экспертизы «Цветметналадка».

Салтанов Семен Николаевич – ведущий инженер, эксперт. 620028, г. Екатеринбург, ул. Татищева, 94, ЗАО Центр диагностики и экспертизы «Цветметналадка».

Баринов Игорь Михайлович – ведущий инженер, эксперт. 620028, г. Екатеринбург, ул. Татищева, 94, ЗАО Центр диагностики и экспертизы «Цветметналадка».

Викулов Евгений Александрович – инженер, эксперт. 620028, г. Екатеринбург, ул. Татищева, 94, ЗАО Центр диагностики и экспертизы «Цветметналадка».

О НЕОБХОДИМОСТИ БОЛЕЕ ПОЛНОГО УЧЕТА МАКСИМАЛЬНЫХ ПРИТОКОВ ВОДЫ В ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЯХ КОМПЛЕКСОВ ГЛАВНОГО ВОДООТЛИВА

(в порядке обсуждения)

**Тимухин С. А., Иващенко Е. П., Марченко А. Ю., Марченко М. Ю.,
Салтанов С. Н., Баринов И. М., Викулов Е. А.**

В статье рассмотрены вопросы более полного, чем в настоящее время, учета максимальных притоков воды в горные выработки в проектных решениях комплексов главного водоотлива обводненных глубоких горизонтов шахт и рудников. Приведены сведения по фактическим (нормальным и максимальным) притокам воды на глубоких горизонтах шахт ОАО «Севуралбокситруда». Рассмотрены особенности принятия проектных решений, учитывающих максимальные притоки и повышающих, в конечном итоге, эффективность комплексов шахтного водоотлива.

Ключевые слова: главные водоотливные установки; максимальные притоки; более полный учет; внепиковое электропотребление; повышение эффективности.

В сложившейся практике проектирование комплексов главного шахтного водоотлива, согласно требованиям правил безопасности, ведется по нормальному притоку воды в горные выработки $Q_{\text{норм}}$. При этом величина максимального притока воды Q_{max} играет второстепенную роль: от её значения может зависеть, главным образом, только количество резервных насосов.

Между тем максимальный приток мо-

жет действовать не два месяца в году, как обычно принимается при проектировании, а три–пять и более месяцев и в разы превышать величину нормального притока. Особенно это касается глубоких горизонтов обводненных месторождений. В качестве примера приведем данные гидрогеологии глубоких горизонтов некоторых шахт ОАО «Севуралбокситруда» по состоянию на 2014 г. (табл.).

Фактические притоки воды на шахтах ОАО «СУБР»

№ п/п	Горизонт, м	Нормальный приток, м ³ /ч	Максимальный приток, м ³ /ч	Превышение максимального притока над нормальным
Шахта № 14, «Восточная залежь»				
1	-140 м	567	1224	2,15
2	-500 м	557	1214	2,17
3	-740 м	197	421	2,13
4	-950 м	96	354	3,68
Шахта № 15, Участок «2-ой Северный»				
5	-140 м	664	1454	2,19
6	-455 м	659	1444	2,19
7	-860 м	249	603	2,42
Шахта № 16, «Южный участок»				
8	-155 м	1320	3500	2,65
9	-290 м	940	1600	1,70

Анализ таблицы показывает, что среднее значение превышения максимального прито-

ка над нормальным по рассматриваемым водоотливным горизонтам шахт ОАО «СУБР»

составляет 2,32 раза при значительном времени действия максимального притока. Очевидно, что без соответствующего учета максимальных притоков воды проектные решения по таким водоотливным установкам вряд ли будут достаточно обоснованы. Под обоснованным решением в нашем случае будем понимать полное обеспечение водоотливом своих функций при минимально возможных приведенных годовых затратах по всему комплексу водоотливной установки.

Анализ особенностей гидрогеологии обводненных месторождений показывает, что при характерных для них соотношениях максимальных и нормальных притоков проектирование основного насосного оборудования по нормальному притоку приводит к выбору большого количества небольших по подаче насосных агрегатов, включаемых на параллельную работу при откачке максимального притока. Это приводит, во-первых, к увеличению объемов насосных камер, количества нагнетательных и всасывающих трубопроводов с соответствующей арматурой, что связано с увеличением капитальных затрат; во-вторых, к увеличению расходов на текущее обслуживание и ремонты из-за большого количества насосных агрегатов и в-третьих, к заниженным объемам водосборников, исключающим реализацию внепикового электропотребления на шахтном водоотливе, особенно в период действия максимальных притоков. Однако проектирование комплексов водоотлива по максимальным притокам неприемлемо, поскольку неизбежно приведет к необоснованному увеличению гидравлических мощностей оборудования и объемов водосборных ёмкостей. Следовательно, принятие оптимизационных решений (критерий оптимальности – приведенные годовые расходы) при проектировании комплексов шахтного водоотлива должно базироваться на новых подходах, альтернативных существующим.

Одним из таких альтернативных подходов может быть проектирование комплексов по устойчивому максимуму притоков воды в горные выработки $Q_{\text{умп}}$ (притоки, превышающие $Q_{\text{норм}}$, но меньше Q_{max} , т. е. $Q_{\text{норм}} < Q_{\text{умп}} <$

Q_{max}). Определение $Q_{\text{умп}}$ может осуществляться на основе статических данных по притокам за предшествующий, достаточно длительный период. Такое определение $Q_{\text{умп}}$ указано, например, в [1]. Поскольку $Q_{\text{умп}}$ всегда больше значений нормального притока, подобный подход не противоречит требованиям правил безопасности. Вместе с тем для условий глубоких горизонтов обводненных месторождений он может обеспечить принятие эффективных обоснованных решений по всему комплексу водоотлива, включая в том числе и реализацию внепикового электропотребления, необходимость которого становится всё более актуальной в связи с постоянным удешевлением энергоносителей.

В этом случае необходимый объем рабочей (регулировочной) емкости водосборника

$$V_{\text{раб}} = Q_{\text{умп}} t_{\text{мн}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{мн}}$ – время действия максимума нагрузки в электроэнергосистеме (ЭЭС).

Зависимость изменения уровня воды в водосборнике $H_{(t)}$ при его заполнении может быть выражена следующим уравнением

$$H(t) = C_0 + C_1 Q_{\text{умп}} t + C_2 (Q_{\text{умп}} t)^2, \quad (2)$$

где C_0, C_1, C_2 – величины постоянные для конкретного воздухосборника; t – текущее время.

Аналогичная зависимость при откачке воды из водосборника

$$H_{(t)} = C'_0 + C'_1 [(Q_n - Q_{\text{умп}})] t - C'_2 [(Q_n - Q_{\text{умп}}) t]^2, \quad (3)$$

где C'_0, C'_1, C'_2 – постоянные для конкретного водосборника величины; Q_n – подача насосных агрегатов (одного или нескольких, включенных на параллельную работу).

В сложившейся практике создания и эксплуатации систем автоматического управления (САУ) шахтными водоотливными установками основой является непрерывно контролируемый уровень воды в водосборнике, от величины которого осуществляется включение и отключение насосных агрегатов

(НА). Независимо от электрической части САУ для этих целей обычно используются электродные датчики уровня: нижнего H_n , верхнего H_b и аварийного H_a .

Многолетняя практика создания и эксплуатации таких систем (от релейно-контактных в прошлом до современных бесконтактных) показала их высокую надежность и простоту реализации, поэтому реализация внепикового электропотребления водоотлива также должна осуществляться на этой основе при использовании для этой цели уравнений (2) и (3). Так при включении насосного агрегата (одного или нескольких) в работу в начальный момент времени ($t = 0$) значение постоянной C'_0 должно быть равно H_b , т. е. $H_{(t=0)} = H_b$ (должно соответствовать уровню верхнего датчика). А в начальный момент заполнения водосборника значение C_0 должно быть равным H_n , т. е. должно соответствовать уровню нижнего датчика и т. д.

При построении САУ насосными агрегатами значения $C_0, C_1, C_2, C'_0, C'_1, C'_2$ определяются тарировочным путем на основе фиксированных значений $H_r, H_n, H_b, H, Q_{\text{умп}}, t$ и др. и вводятся в блок задания системы для реализации в ней управления насосными агрегатами, реализующего внепиковое электропотребление.

Графическая интерпретация такого управления представлена на рисунке: (уравнение (2) – (\bar{b} – \bar{e}); (\bar{e} – \bar{d}); (\bar{e} – $\bar{ж}$); (\bar{z} – \bar{u})) и уравнение (3) – (a – \bar{b}); (\bar{v} – \bar{z}); (\bar{d} – \bar{e}); ($\bar{ж}$ – \bar{z}); (\bar{u} – \bar{a}), на котором представлена также графическая иллюстрация процесса суточного внепикового электропотребления на шахтном водоотливе в функции уровня воды в водосборнике при двух максимумах нагрузки в энергосистеме – $T_{\text{мн}(1)}$ и $T_{\text{мн}(2)}$. Как следует из этого, САУ шахтными водоотливными установками должна обеспечивать реализацию внепикового электропотребления на основе соответствующего изменения уровня воды в водосборнике (линия a – \bar{b} – v – \bar{z} – \bar{d} – \bar{e} – $\bar{ж}$ – \bar{z} – \bar{u} – \bar{a}) в течение суток при условии $Q_{\text{умп}} = \text{const}$ и полного освобождения рабочей емкости водосборника от воды к началу максимума нагрузки в энергосистеме.

Главным при этом является установление момента включения насосных агрегатов (одного или нескольких, в зависимости от потребности) в предпиковый период электроЭнергосистемы.

Основой для этого является уравнение (3) и постоянно контролируемый уровень воды $H_{(t)}$, введенные в программу САУ. На рисунке $H_{(t)}$ при работающих НА представлена линиями v' – \bar{v} – \bar{z} и $\bar{ж}'$ – $\bar{ж}$ – \bar{z} .

Если совместить концы этих линий с началом периода максимума ЭЭС (точки 2 и 3), то при любом текущем значении $H_{(t)}$ решение уравнения (3) позволит определить необходимый момент включения НА в работу (на рисунке это моменты $t_{\text{вк}(1)}$ и $t_{\text{вк}(2)}$). Необходимое время работы НА определится как разность начального времени пика в ЭЭС и времени включения агрегатов, т. е. $t_{\text{раб}} = T_{\text{мн}} - t_{\text{вк}}$. При этом время цикла водоотлива в предпиковый период составит $T_{\text{ц}} = T_{\text{з}} + t_{\text{раб}}$ ($T_{\text{ц}}'' = T_{\text{з}}'' + t_{\text{раб}}''$).

Объем удаленной за время $t_{\text{раб}}$ воды из водосборника

$$V_{\text{уд}} = Q_h(T_{\text{мн}} - t_{\text{вк}}) = \int_{t_{\text{вк}}}^{T_{\text{мн}}} Q_{\text{умп}} dt + V_{\text{вк}} - V_{\text{доп}}, \quad (4)$$

где $V_{\text{вк}}$ – объем воды в рабочей емкости водосборника, соответствующий моменту включения НА; $V_{\text{доп}}$ – минимально допустимый объем воды в водосборнике в начале периода максимума нагрузки в ЭЭС.

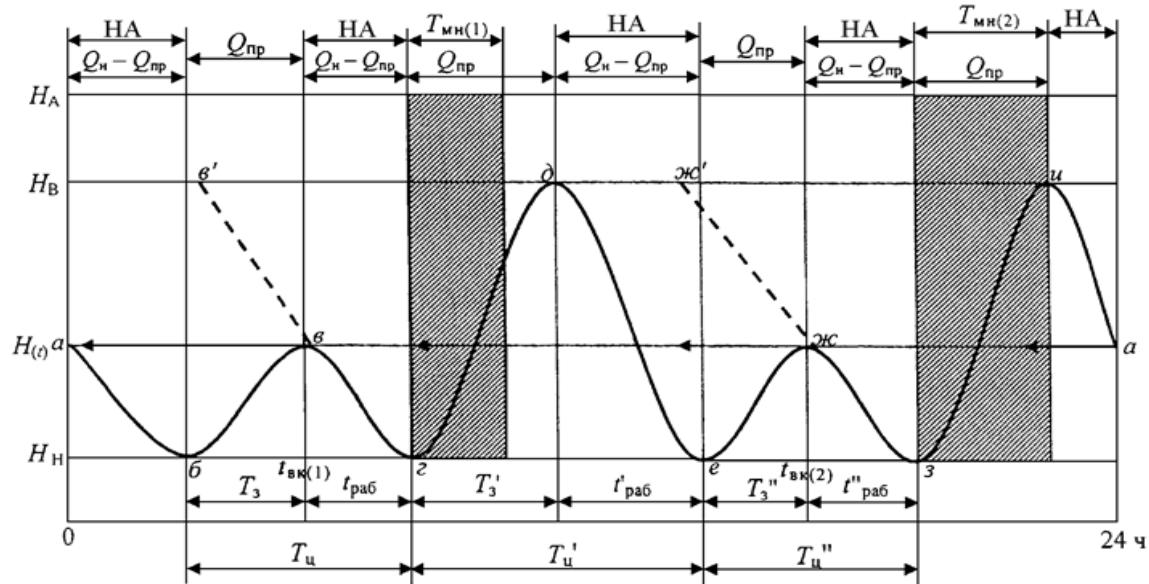
Приведенные соображения справедливы для условия постоянства величины внутри принятого цикла работы водоотлива (суточного, недельного, месячного и др.). При переменном притоке в систему автоматического управления должны вноситься соответствующие корректизы. Для этого может быть использован коэффициент K , численно равный отношению времени рабочего цикла $T_{\text{ц}}$ к времени заполнения рабочей емкости водосборника $T_{\text{з}}$, т. е.

$$K = T_{\text{ц}}/T_{\text{з}} = \frac{V_{\text{раб}}/Q_{\text{умп}} + V_{\text{раб}}/(Q_h - Q_{\text{умп}})}{V_{\text{раб}}/Q_{\text{умп}}}. \quad (5)$$

Очевидно, что с изменением величины $Q_{\text{умп}}$ будет изменяться и величина K и соот-

что и должно входить в задачу отслеживания САУ. Поэтому при переменном притоке на водоотлив перед каждым периодом максимума нагрузок в ЭЭС в САУ должна поступать информация о средней величине $Q_{\text{умп}}$ для расчета коэффициента K .

Таким образом, уравнения (1–5) могут быть положены в основу построения САУ насосными агрегатами шахтного водоотлива в функции уровня воды в водосборнике, что создаст условия для наиболее простой и эффективной реализации внепикового электропотребления.



Изменение уровня воды в водосборнике в течение суток при реализации внепикового электропотребления

потребления. Как показывает практика, для достижения этого результата (при проектировании комплексов по нормальному притоку) необходимо еще наличие избыточных гидравлических мощностей, в том числе и насосного оборудования (т. е. установка завышенного числа насосных агрегатов или увеличение их единичной мощности по сравнению с требованиями правил безопасности).

Однако во многих случаях сам подход к проектированию комплексов водоотлива по величине устойчивого максимума притоков может обеспечить в достаточно полном объеме реализацию внепикового электропотребления и, следовательно, минимизацию затрат на электрическую энергию, что особенно важно для глубокозалегающих обводненных месторождений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимухин С. А., Угольников А. В., Долганов А. В. Проблемы проектирования и эксплуатации комплексов шахтного водоотлива // Изв. УГГУ. № 3(35). 2014. С. 68–72.

Тимухин Сергей Андреевич – доктор технических наук, профессор кафедры горной механики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.

Иващенко Евгений Петрович – главный инженер, эксперт. 620028, г. Екатеринбург, ул. Татищева, 94, ЗАО Центр диагностики и экспертизы «Цветметналадка». E-mail: diagnos.cmn@gmail.com, diagnos@mail.ur.ru

Марченко Андрей Юрьевич – начальник лаборатории неразрушающего контроля, эксперт. 620028, г. Екатеринбург, ул. Татищева, 94, ЗАО Центр диагностики и экспертизы «Цветметналадка».

Марченко Михаил Юрьевич – ведущий инженер, эксперт. 620028, г. Екатеринбург, ул. Татищева, 94, ЗАО Центр диагностики и экспертизы «Цветметналадка».

Салтанов Семен Николаевич – ведущий инженер, эксперт. 620028, г. Екатеринбург, ул. Татищева, 94, ЗАО Центр диагностики и экспертизы «Цветметналадка».

Баринов Игорь Михайлович – ведущий инженер, эксперт. 620028, г. Екатеринбург, ул. Татищева, 94, ЗАО Центр диагностики и экспертизы «Цветметналадка».

Викулов Евгений Александрович – инженер, эксперт. 620028, г. Екатеринбург, ул. Татищева, 94, ЗАО Центр диагностики и экспертизы «Цветметналадка».

ВЫЯВЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЭНЕРГО-МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЭКСКАВАТОРОВ ТИПА ДРАГЛАЙН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Герике П. Б.

В статье приведены результаты анализа вибрационных характеристик, формирующихся при работе оборудования экскаваторов типа драглайн и классификация дефектов их энерго-механического оборудования, на базе которой обосновывается использование методов вибродиагностики и неразрушающего контроля. Проведенные исследования позволили создать комплекс из более чем 60 диагностических правил для автоматизированного выявления основных повреждений оборудования на основе селективных групп предупреждающих частот для систем интеллектуального обслуживания горных машин. Обоснована эффективность применения комплексного диагностического подхода для оценки технического состояния механизмов по параметрам генерируемой ими вибрации. Показано, что только с широким использованием современных методов вибрационной диагностики и неразрушающего контроля предоставляется возможность своевременного выявления дефектов агрегатов карьерных экскаваторов. Выполненные исследования позволили выявить основные закономерности изменения технического состояния динамического оборудования экскаваторов типа драглайн по результатам анализа параметров механических колебаний. Результаты проведенных исследований безапелляционно доказывают необходимость перехода ремонтных и обслуживающих подразделений промышленных предприятий на систему обслуживания техники по её фактическому техническому состоянию, платформой для реализации базовых элементов концепции которой послужит разработанный комплекс диагностических правил выявления дефектов по результатам анализа параметров механических колебаний.

Ключевые слова: вибродиагностика; карьерный экскаватор; энерго-механическое оборудование; спектральный анализ; управление техническим обслуживанием.

В настоящее время на базе Института угля Сибирского отделения РАН осуществляется цикл исследований по определению предельных характеристик допустимого состояния экскаваторного парка Кузбасса, созданию математических моделей развития типовых повреждений узлов и агрегатов горной техники, а также разработке специализированного комплекса диагностических правил для выявления дефектов уникального оборудования угольной промышленности. Для выполнения задач, сформулированных в настоящем исследовании, наилучшим образом подходит метод контроля по параметрам механических колебаний, как наиболее эффективный из всех существующих методов неразрушающего контроля и функциональной диагностики для выполнения оценки и прогнозирования изменения технического состояния динамических машинных агрегатов [1, 2, 3].

Поиск основных закономерностей изменения технического состояния оборудования

электрических карьерных экскаваторов по результатам анализа генерируемой при его работе вибрации и совершенствование на их основе подходов к нормированию параметров механических колебаний являются неотъемлемой составляющей данного исследования.

На примере анализа параметров вибрационных волн, формирующихся при работе энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов типа драглайн в настоящей работе рассмотрены вопросы совершенствования методологии нормирования параметров механических колебаний.

Автоматизированное выявление дефектов динамического оборудования с помощью так называемых «селективных групп информативных предупреждающих частот», применяемых в системах интеллектуального обслуживания горной техники, является наиболее перспективным направлением развития диагностических методов и систем контроля [4, 5]. Поиск основных закономерностей из-

менения технического состояния оборудования электрических карьерных экскаваторов потребует создания комплекса диагностических признаков и правил для выполнения анализа и совершенствования нормирования параметров вибрации, для чего необходимо рассмотреть всю совокупность признаков в области вибранализа отдельно для каждого из основных дефектов, соответствующих этому типу машинных агрегатов.

Так, например, динамическому оборудованию драглайнов присущи следующие основные типы дефектов: дисбаланс ротора электродвигателя/генератора; расцентровка валопровода в различных узлах и механизмах; дефекты подшипниковых узлов (перекосы, ослабления посадок, увеличение зазоров, износы беговых дорожек, тел качения и сепараторов, нарушение режима смазки); дефекты элементов соединительных муфт; износ зубчатых зацеплений, нарушение соосности и перекосы валов в редукторах; различные дефекты двигателей

электромагнитного происхождения (магнитная асимметрия якоря, перекос фаз, смещение в магнитном поле и т. д.); нарушение жесткости системы, структурный резонанс.

Типы диагностируемых неисправностей и дефектов энерго-механического оборудования идентичны для разных моделей драглайнов (ЭШ 6/45, ЭШ 13/50, ЭШ 10/70, ЭШ 20/90 и т. д.), однако соответствующие им характерные диагностические признаки могут существенно отличаться. Объяснение данного факта заключается в различной кинематике механизмов разных моделей карьерных шагающих экскаваторов, и вследствие этого частоты проявления дефектов энерго-механического оборудования могут быть различны.

Среди дефектов динамического оборудования карьерных экскаваторов – драглайнов наиболее всего распространено нарушение жесткости системы (рис. 1), в некоторых случаях можно наблюдать такое явление как структурный резонанс.

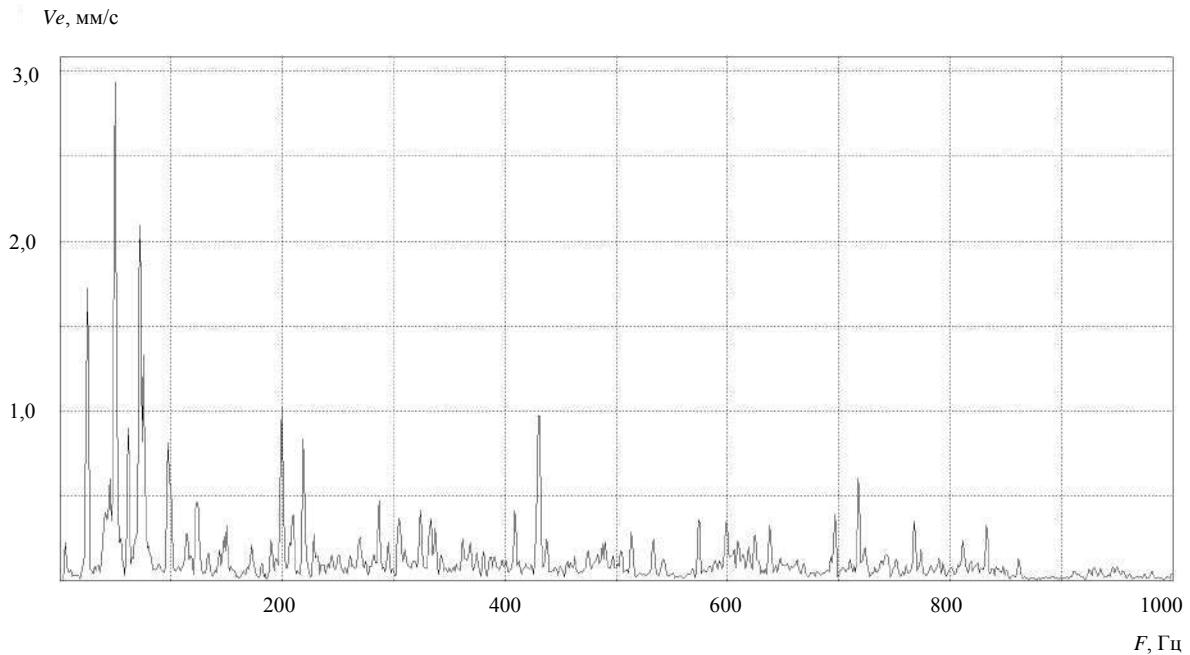


Рис. 1. Нарушение жесткости системы. Сетевой двигатель экскаватора ЭШ 11/70

На сегодняшний день formalизовано более 16 признаков выявления нарушения жесткости при помощи методов контроля по параметрам механических колебаний (спектральный анализ, временная реализация, траектория движения ротора, контурная характеристика), абсолютное большинство кото-

рых сосредоточено в области спектрального анализа виброакустических характеристик [6]. На практике, в дополнение к результатам вибродиагностики, часто используют метод визуально-измерительного контроля, который предоставляет возможность быстро выявить дефекты крепежа узлов и агрегатов

горной техники. Такое сочетание методов неразрушающего контроля является очень эффективным для выявления дефектов этого типа, т. к. признаки нарушения жесткости системы в частотной плоскости часто численно совпадают с другими значащими гармониками, отвечающими за наличие повреждений совершенно иной природы (например, повреждения элементов соединительных муфт, нарушение соосности агрегатов или дефекты подшипников).

Очевидно, что только результаты комплексного анализа параметров полигармонической волны позволяют сформулировать искомую совокупность диагностических правил, в полной мере отвечающую адекватному представлению о наличии тех или иных дефектов динамического оборудования карьерных экскаваторов типа драглайн. Кроме того, многие процессы необходимо рассматривать в динамике их развития по причине значительной флюктуации амплитуд значащих гармоник.

Вопросы нормирования вклада отдельных спектральных составляющих, причина возникновения которых обусловлена наруше-

нием жесткости системы, в общий уровень вибрационного сигнала в настоящее время изучены недостаточно [7, 8]. Различные подходы к нормированию параметров механических колебаний либо оценивают, в основном, общий уровень сигнала в стандартной полосе частот, либо ориентированы на оценку довольно узких частотных полос спектра. Значащие гармоники могут изменяться не только по амплитуде, но и по частоте (это явление может быть вызвано изменением нагрузки, частоты питающей сети, частоты вращения и тому подобными причинами). Таким образом, становится очевидным, что подходы и методы нормирования параметров вибрации необходимо совершенствовать: осуществлять нормирование не только уровней в частотных полосах, но и большого числа отдельных составляющих спектра с учетом их флюктуации. Так, представленное на рис. 2 сравнение спектров иллюстрирует значительную флюктуацию амплитуд гармоник обратной частоты, а также уровня шумов при ослаблении крепежа генератора подъема экскаватора ЭШ 13/50.

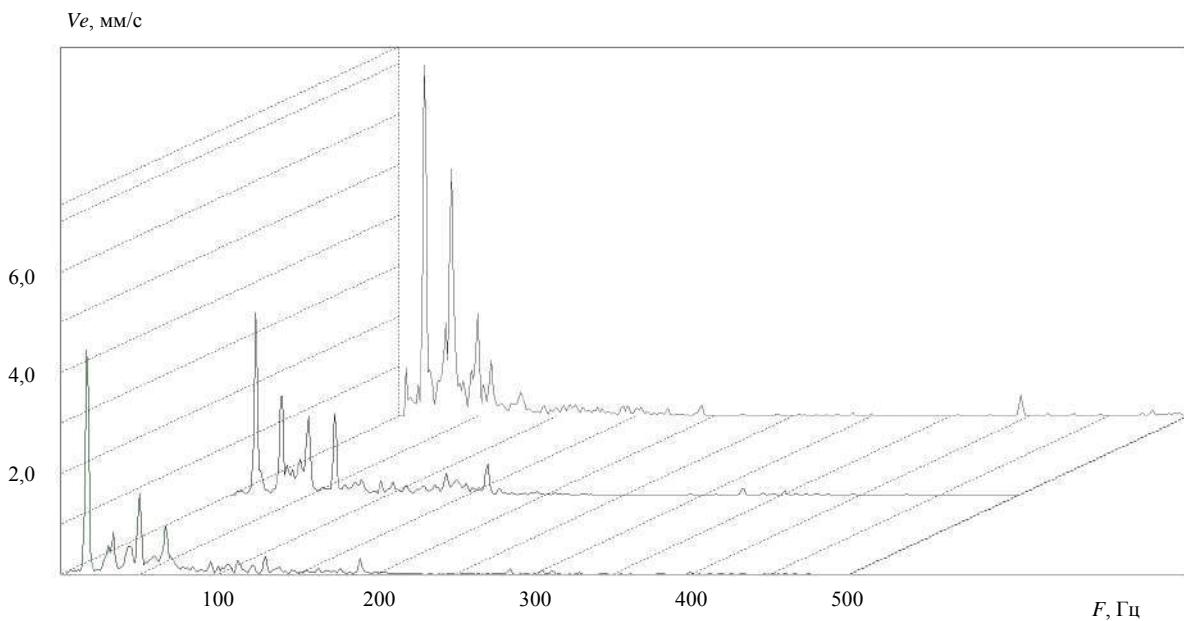


Рис. 2. Флюктуация амплитуд значащих гармоник и уровня шумов при нарушении жесткости системы

Индивидуальные спектральные маски, разработанные в рамках выполнения настоящего исследования для большого числа моделей одноковшовых карьерных экскаваторов,

обладают значительной степенью детализации и могут быть использованы для оценки технического состояния энерго-механического оборудования. Кроме того, с их помощью

могут быть определены момент изменения технического состояния сложной механической системы и главенствующая причина возникновения такого момента. Такая информация может быть очень полезна для выявления закономерностей изменения технического состояния динамического оборудования по результатам анализа параметров механических колебаний, однако главный недостаток такого подхода к нормированию вибрации заключается в некоторой затрудненности получения качественных адекватных результатов нормирования, вызываемой ограничениями, накладываемыми на область применения разработанных спектральных масок. Существует два основных типа таких ограничений. Во-первых, изменяющиеся при работе агрегата частоты проявления дефектов могут выходить за границы частотных полос спектральной маски, или же ширина этих полос должна выбираться чрезмерно большой, что сводит на нет информативность получаемых характеристик. Во-вторых, спектральные маски обладают высокой степенью индивидуализации и не могут быть унифицированы. Таким образом, при смене типа (или хотя бы марки, модели) диагностируемого оборудования работу по созданию масок необходимо начинать заново.

Кроме того, высоту полос спектральных масок необходимо выбирать с учетом флюктуации значащих гармоник, которая может достигать в некоторых случаях до 300 % от амплитуды гармоники базовой несущей частоты [9]. Таким образом, информативность индивидуальных частотных полос спектральных масок заметно падает, что не позволяет эффективно провести нормирование спектральных компонент. В этом случае при оценке параметров механических колебаний необходимо определить природу флюктуации, причину возникновения дефектов и степень их развития, что позволит пренебречь флюктуирующими составляющими при проведении дальнейшего анализа (по крайней мере, до определенной степени развития этого процесса). Если причиной флюктуации гармоник является нарушение жесткости опорной системы, такое как ослабление или отсутствие

внешнего крепежа агрегата, которое может быть установлено при помощи метода визуально-измерительного контроля (ВИК), то имеет смысл перед проведением полномасштабного вибродиагностического исследования по результатам проведенного ВИК установить состояние крепежа конструкции, что позволит значительно упростить дальнейший анализ параметров виброакустической волны, использовать высокоточные спектральные маски с индивидуальными границами частотных полос.

Таким образом, для осуществления эффективного выявления основных закономерностей изменения технического состояния машинных агрегатов по результатам анализа параметров механических колебаний, выполняемого на основе диагностики динамического оборудования экскаваторов типа драглайн, в рамках настоящего исследования предлагается использовать следующий алгоритм действий:

1. Оценка степени вклада отдельных составляющих спектра в общий уровень сигнала при помощи индивидуальных спектральных масок, разработанных для широкого типового и модельного ряда горной техники.

2. Использование комплексного диагностического подхода, состоящего как минимум из трех вибродиагностических методов (прямой спектральный анализ, анализ огибающей и эксцесс) и визуально-измерительного контроля.

3. Применение автоматизированного контроля, основанного на результатах обработки полигармонических волн с использованием более чем 60 диагностических правил для выявления базовых дефектов.

4. Разработка и внедрение единых диагностических критериев (ЕДК) для оценки и прогнозирования изменения параметров технического состояния сложного динамического оборудования.

Результаты автоматизированного контроля параметров вибрации наиболее эффективным образом могут быть использованы для выявления неисправностей и повреждений узлов и механизмов, работающих с по-

стоянными частотами вращения (например, дефекты генераторных групп экскаваторов-драглайнов, рис. 3).

Однако реализация и практическое применение алгоритмов автоматизированного контроля требует наличия представительных

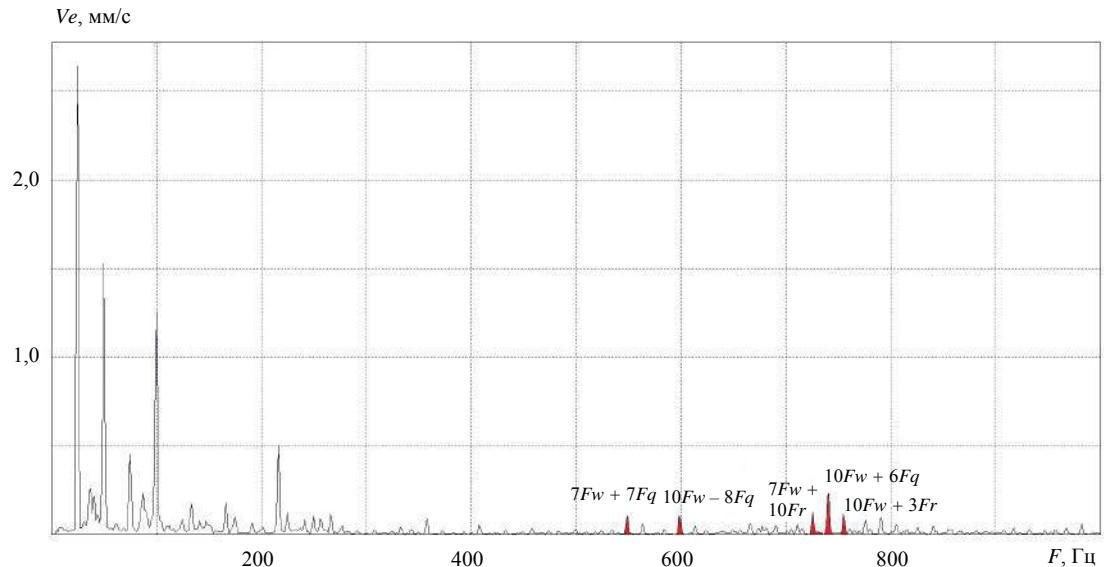


Рис. 3. Множественные дефекты подшипника генератора собственных нужд малой генераторной группы экскаватора ЭШ 10/70

баз данных по параметрам вибрационного сигнала и дефектам конкретного однотипного оборудования. Эффективность и точность данного метода, помимо прочего, сильно зависит от характера исследуемых полигармонических волн, точного соблюдения методологии сбора диагностических данных, наличия шумов и/или искажений исходного сигнала [10].

Так, спектр на рис. 3 иллюстрирует наличие множественных дефектов подшипника малой генераторной группы, выявленных при помощи автоматизированного контроля параметров вибрационной волны, основанного на применении разработанных в ходе выполнения настоящей работы диагностических правил (развитие трещины сепаратора и изменение формы тел качения подшипника).

Разработка универсальных ЕДК, пригодных для выполнения оценки технического состояния динамического оборудования по параметрам генерируемой при его работе вибрации является актуальной научной задачей. Набор диагностических критериев, необходимый для разработки ЕДК каждого из элементов конструкции экскаватора, будет уни-

кален из-за существенной ограниченности возможностей применения каждого из методов вибрационного анализа. Единый диагностический критерий, подходящий для оценки состояния идентичных объектов диагностирования, наиболее эффективно может быть описан в многомерном пространстве диагностических признаков с помощью алгоритмов скаляризации [11] при обязательном использовании принципа разделения объектов на различные группы, в зависимости от стадии развития присутствующих дефектов. Задача настоящего исследования усложняется тем, что таких критериев должно быть рассчитано несколько, по одному на каждую группу дефектов диагностируемого оборудования.

Если рассматривать весь комплекс динамического оборудования карьерных экскаваторов, то встаёт вопрос о необходимости разработки ЕДК для оценки и построения адекватного прогноза изменения технического состояния зубчатых передач редукторов переборного и планетарного типов, дефектов, связанных с искривлением валопровода и проявлениями дисбалансов (в том числе тепловых), дефектов соединительных муфт и

т. д. В настоящее время область применения существующих ЕДК ограничена, преимущественно, подшипниками качения, как наиболее изученным с точки зрения виброанализа элементом динамически работающих машинных агрегатов.

Для разработки ЕДК для каждого из дефектов, присущих энерго-механическому оборудованию горных машин, необходимо удалить из спектра «лишнюю» информацию обо всех физических явлениях иной природы, т. е. осуществить процедуру клиппирования. Результатом расчетов с использованием подходов адаптивного моделирования и единых диагностических критериев станет графи-

ческое представление математической прогнозной модели изменения технического состояния объекта, при помощи которой можно определить гарантированный минимальный период безаварийной работы агрегата и должным образом скорректировать ремонтные мероприятия.

Одним из основных типов неисправностей, оказывающих наиболее заметное влияние на характер вибрационной активности агрегата, являются повреждения зубчатых передач [12, 13] в составе редукторов подъемных и тяговых лебедок (рис. 4), а также механизмов поворота карьерных экскаваторов. Двадцать семь основных диагностических правил

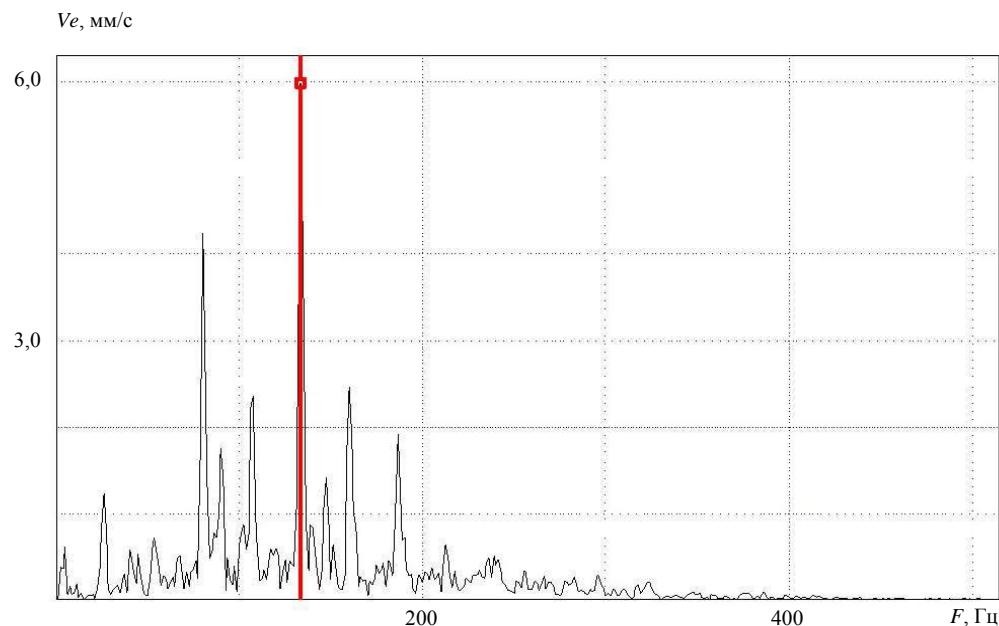


Рис. 4. Основной диагностический признак развития абразивного износа зубчатых зацеплений редуктора тяговой лебедки экскаватора ЭШ 20/90

выявления дефектов зубчатых передач по результатам анализа параметров вибрации в большинстве своём сосредоточены в области прямого частотного анализа. Интенсивное развитие абразивного износа зубчатых пар редукторов подъемной и тяговой лебедок экскаваторов типа драглайн нередко сочетается с нарушением соосности или перекосом валов в этих редукторах, что и является одной из основных причин возникновения дефектов зубчатых зацеплений, для эффективного обнаружения которых необходимо проводить детектирование модуляционных частот пересечения зубьев. Поскольку даже заведомо

исправная зубчатая пара обладает заметной виброактивностью, становится очевидным, что оценка степени развития повреждений является весьма актуальной задачей.

Наибольшие затруднения при анализе параметров вибрации зубчатых пар вызывают изменяющиеся в процессе работы оборудования информативные частоты [14]. Частоты проявления дефектов могут изменяться на сотни герц в зависимости от режима работы лебедок, выбранного положения командконтроллера, момента проведения измерения, степени развития дефекта, изменения нагрузки (например, цикл подъема/опускания

ковша) и т. п., что крайне затрудняет использование автоматизированной диагностики подобных физических процессов. Существующее программное обеспечение для контроля дефектов зубчатых передач по параметрам вибрации (как отечественное, так и зарубежное) является крайне малоэффективным и в большинстве случаев не позволяет своевременно выявлять дефекты, присущие данному объекту диагностирования.

Результаты проведенных исследований позволили автору статьи разработать специализированный комплекс диагностических правил для выявления дефектов оборудования одноковшовых карьерных электрических экскаваторов по параметрам вибрации, для чего описано и формализовано более 60 признаков для диагностики шести основных групп дефектов, присущих рассматриваемому типу оборудования. Большинство диагностических признаков находится в области частотного анализа, что значительно упрощает разработку специализированного комплекса для оперативной оценки технического состояния машинных агрегатов. Формализации подверглись как признаки в области прямого спектрального анализа, так и результаты обработки параметров исходных виброакустических волн методами ударных импульсов, экссцесса, вейвлет-преобразования

ния и кепстрального анализа. Кроме того, удалось разработать и сформулировать новые совокупности диагностических правил для автоматизированного анализа параметров сигнала. В настоящее время активно ведется работа над созданием прогностических моделей развития дефектов технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах, совершенствованием методологии нормирования параметров механических колебаний с использованием индивидуальных спектральных масок и разрабатываемых единых диагностических критериев оценки технического состояния.

Угольная промышленность является источником повышенной опасности, и, как следствие этого, безопасности проведения горных работ должно уделяться особое внимание [15]. Результаты настоящих исследований убедительно доказали, что только комплексный системный подход к применению современных диагностических методов предоставит возможность для создания базовой платформы системы обслуживания техники по её фактическому состоянию, что в свою очередь позволит повысить безопасность горных работ и полностью избежать несчастных случаев на производстве, причиной которых является недопустимое техническое состояние эксплуатируемых горных машин и оборудования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диагностика горных машин и оборудования: учеб. пособие / Б. Л. Герике [и др.]. М., 2012. 400 с.
2. Неразрушающий контроль: справ. в 7 тт. под ред. В. В. Клюева. Т. 7. Москва, 2005. 828 с.
3. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knaxville, TN 37923, USA.
4. Ещеркин П. В. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2012. 18 с.
5. Кравченко В. М., Сидоров В. А., Буцкин В. В. Повреждения подшипников качения в результате износа // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 2. С. 45–47.
6. Герике П. Б. Вибродиагностика оборудования угольной и горнорудной промышленности // Отд. вып. ГИАБ: Ин-т угля СО РАН. М.: Изд-во «Горная книга», 2013. № ОВ 6. С. 440–446.
7. Tse P., Peng Y., Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis – Their Effectiveness and Flexibilities. Journal of Vibration and Acoustics. 2001. Vol. 123. pp. 303–310. DOI: 10.1115/1.1379745.
8. Bently D. E., Hatch C. T. Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics. Bently Pressurized Press, 2002. P. 726.
9. Balducci F., Arghir M., Gaudillere S. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings. Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014. 2014. Düsseldorf, Germany.
10. Барков А. В., Баркова Н. А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГМТУ, 2004. 156 с.
11. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизиро-

- ванной диагностики сложных систем: дис. ... канд. техн. наук. М.: МИФИ, 2007. 170 с.
12. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. *Journal of Mechanical Design*. 2008. Vol. 130. pp. 121402/1 – 121402-13. DOI: 10.1115/1.2976803.
 13. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М., 1996. 276 с.
 14. Лукьянов А. В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1999. 230 с.
 15. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений / В. И. Клишин [и др.]. Новосибирск, 2011. 524 с.

Герике Павел Борисович – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории средств механизации отработки угольных пластов. 650065, г. Кемерово, пр-т Ленинградский, 10, Институт угля СО РАН. E-mail: am_besten@mail.ru

ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ ВЕНТИЛЯТОРЫ МЕСТНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

Макаров Н. В., Солдатенко А. А., Лаврёнов Н. Е., Макаров В. Н.

В статье описано конструктивное исполнение принципиально нового устройства регулирования центробежных вентиляторов – энергетического регулятора (ЭР). Получены критерии подобия системы поток-вентилятор с ЭР, а так же выражения для КПД и качества ЭР в составе вентилятора.

Ключевые слова: вентилятор; энергетический регулятор; аэродинамика; поток.

Оценка значений показателей технического уровня показывает, что шахтные вентиляторы главного проветривания отличаются низкой фактической экономичностью в эксплуатации. Основные причины данного явления связаны с особенностями работы установок: переменными параметрами вентиляционных сетей и режимов вентиляции, а также обеспечением вентиляторных установок главного проветривания, представляющих собой ограниченный параметрический ряд перекрытия полей шахтных вентиляционных режимов с учетом дискретности по отдельным шахтам. Поскольку в производстве находится ограниченное количество типоразмеров установок со строго определенными областями экономичной эксплуатации, а параметры шахтных вентиляционных режимов являются случайными величинами, то они не совпадают с определенными параметрами вентиляторных установок главного проветривания.

Анализ глубины изменения расчетных вентиляционных режимов и необходимой глубины регулирования показал, что они имеют различные распределения статистической вероятности. Поэтому для обеспечения экономичной работы вентиляторной установки, даже при неизменном режиме, её необходимо регулировать. Таким образом, глубина регулирования вентиляторной установки должна превышать глубину изменения вентиляционного режима.

Используемые в настоящее время регулирующие устройства могут быть условно отнесены к механическим средствам регу-

лирования, поскольку их действие основано на механической трансформации геометрии проточной части вентилятора. Большие потенциальные возможности в плане увеличения глубины экономичного регулирования заложены в активных (энергетических) методах управления аэrodинамическими процессами в проточной части вентилятора. Их реализация позволяет создать принципиально новое средство регулирования режима работы центробежного вентилятора – энергетический регулятор (ЭР). На рис. 1 приведена схема центробежного вентилятора местного проветривания с ЭР, включающая: 1 – ЭР с входными окнами (каналами) 2, находящийся в модуле 3 на входе в полость высокого давления 4 с рабочим колесом 6, при этом поток воздуха засасывается в вентилятор через входной коллектор 5.

Действие ЭР основано на изменении кинетического момента потока на входе в рабочее колесо за счет энергии вращения управляющего (циркуляционного) потока, являющегося частью потока полости высокого давления корпуса вентилятора, поступающего через входные окна (каналы) ЭР (рис. 2) на вход в рабочее колесо. Изменение подачи управляющего потока позволяет регулировать закрутку суммарного потока, представляющего собой совокупность транзитного и управляющего потоков, и тем самым регулировать режим работы вентилятора [1]. Наличие продольной и поперечной циркуляции протока в полости корпуса позволяет рациональным способом, спрофилировав по линиям тока форму входного коллектора и направляющего экрана, ис-

пользовать энергию кинетического момента управляющего потока для закрутки транзитного потока с минимальными потерями энергии на дросселирование.

Эффективность регулируемости вентилятора с ЭР определяется экономичностью рабочего колеса, внешней и внутренней аэrodинамикой аппарата. Внутренняя аэrodинамика

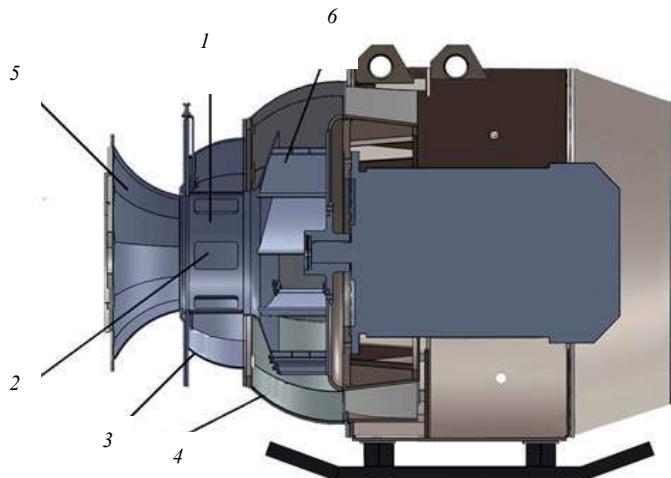


Рис. 1. Схема центробежного вентилятора с ЭР

характеризует уровень потерь энергии при формировании управляющего потока в ЭР. Внешняя аэродинамика определяет эффективность взаимодействия циркуляционного и транзитного потоков. В литературе отсутствуют данные по системному исследованию регулируемости вентиляторов аппаратами такого типа. Рассмотрим способы построения аэродинамических характеристик и основы методики расчета аэродинамической схемы ЭР.

Параметры потока полости корпуса вентилятора, являющегося носителем энергии

управления, определяются режимом работы вентилятора. На аэродинамические процессы, протекающие в ЭР от входа в него до зоны взаимодействия циркуляционного и транзитного потоков, существенное влияние оказывают его геометрические параметры: диаметры входного коллектора D_k , направляющего экрана D_s , регулирующего патрубка D_p ; ширины входного сечения b_1 , выходного сечения b_2 и регулирующей заслонки b_p .

В зависимости от формы ЭР (рис. 2) [2] и величины геометрических параметров изме-



Рис. 2. Схема модуля вентилятора местного проветривания с ЭР при различных положениях регулирующих окон (каналов):

a – полное открытие; *б* – частичное открытие; *в* – полное закрытие (номинальный режим работы вентилятора)

няется эффективность взаимодействия циркуляционного и транзитного потока, что приводит к изменению его КПД и коэффициента

качества. В связи с этим необходимо определить критерии подобия системы поток–вентилятор с ЭР, чтобы впоследствии в рамках

задач о внешней и внутренней аэродинамике ЭР установить зависимости для оптимальных значений указанных выше геометрических параметров с точки зрения наименьших потерь энергии управляющего потока.

Основные параметры, характеризующие динамические процессы, протекающие в системе поток–вентилятор с ЭР: Q_y – подача управляющего потока; P_y – давление управляющего потока; Q – подача вентилятора; ω – частота вращения рабочего колеса; μ, ρ – вязкость и плотность воздуха, соответственно; D_2 – диаметр рабочего колеса.

В соответствии со второй теоремой подобия, согласно которой члены уравнений, описывающих физические явления, имеют одинаковую размерность, можно принять, что математическая модель течения потока в вентиляторе с ЭР гомогенна. Учитывая параметры, характеризующие динамические процессы, протекающие в системе поток–вентилятор с ЭР, на базе следствия первого дополнительного положения В. А. Веникова о подобии сложных систем, согласно которому системы остаются подобными после любых упрощений, если они проведены в системах одинаково [3], получим для рассматриваемой задачи следующие критерии подобия:

$$-\text{коэффициент подачи управляющего потока } \varphi_y = \frac{8Q_y}{\pi D_2^3 \omega};$$

$$-\text{коэффициент давления управляющего потока } \Psi_y = \frac{8P_y}{\rho D_2^2 \omega^2};$$

$$-\text{коэффициент подачи вентилятора } \varphi = \frac{8Q}{\pi D_2^3 \omega};$$

$$-\text{число Рейнольдса, учитывающее влияние вязкости воздуха } Re = \frac{\omega D_2^2 \rho}{2\mu}.$$

В рамках задачи о внутренней аэrodинамике ЭР установим зависимость между полученными критериями подобия и геометрическими параметрами аппарата, для чего запишем уравнение энергии по линии тока [2]:

$$\frac{\zeta \rho u_{1y,ab}^2}{2} + \frac{\zeta_T \rho u_{1y,ok}^2}{2} + \eta_r P_t =$$

$$= \frac{\rho(u_{2y,ab} - u_{1y,ab})^2}{2} + \frac{\rho u_{2y,ok}^2}{2}, \quad (1)$$

где ζ, ζ_m – коэффициенты полных потерь и потерь на трение, соответственно; $u_{1y,ab}$, $u_{2y,ab}$ и $u_{1y,ok}$, $u_{2y,ok}$ – абсолютные и окружные скорости управляющего потока; индексы 1, 2 – значения кинематических и геометрических параметров на входе и выходе ЭР, соответственно (рис. 1); η_r – гидравлический КПД вентилятора; P_m – полное теоретическое давление вентилятора.

После преобразования (1) с учетом критерии подобия получим:

$$\begin{aligned} \Psi_T \eta_r &= \Psi_y + a \Psi_y^2 + \\ &+ \zeta_m \bar{u}_{y,ok}^2 \left(1 + \frac{16}{\pi} \bar{u}_{y,ok} \left(\bar{D}_k^2 + \bar{D}_s^2 - \bar{D}_p^2 \right) \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где Ψ_m – коэффициент теоретического давления вентилятора [4]; a – коэффициент, определяемый из выражения:

$$a = \frac{\bar{b}_p}{4(\bar{b}_1 - \bar{b}_p)^4 (\bar{D}_s + \bar{D}_k)^2} + \\ + \zeta \cos \left(\arctg \frac{\bar{D}_k - \bar{D}_s}{2(\bar{b}_1 - \bar{b}_p)} \right) \frac{1}{4(\bar{b}_1 - \bar{b}_p)^2 (\bar{D}_s + \bar{D}_k)^2}, \quad (3)$$

где $\bar{b}_1, \bar{b}_p, \bar{D}_s, \bar{D}_k$ – относительные значения соответствующих кинематических и геометрических параметров (кинематические параметры отнесены к окружной скорости вращения колеса, геометрические параметры отнесены к диаметру рабочего колеса).

Коэффициент давления управляющего потока определяется выражением:

$$\Psi_y = k^2 \left(\frac{\Phi_y}{2(\bar{b}_1 - \bar{b}_p)(\bar{D}_s + \bar{D}_k)} - \frac{\Phi}{k \bar{D}_p^2} \right)^2 + k_q \bar{u}_y^2, \quad (4)$$

где k – конфузорность канала ЭР, определяемая отношением площадей входного и выходного сечения ЭР: $k = F_1/F_2$; κ – коэффициент диагональности ЭР: $\kappa = \bar{D}_k^2 / \bar{D}_p^2$.

Учитывая зависимость между параметрами Φ_y и Ψ_y , принимая $D_s = D_k$ и начальное положение $b_p = 0$, получим:

$$\kappa = \frac{\sqrt{\Psi_y - k_q \bar{u}_y^2} + \frac{\Phi}{\bar{D}_p^2}}{\sqrt{\Psi_T \eta_r - \Psi_y - 32 \zeta \bar{u}_y^3 (\bar{D}_k^2 - \bar{D}_p^2)}} \sqrt{\zeta}, \quad (5)$$

$$\bar{F}_1 = \frac{\Phi_y \left(\frac{\eta_s \Phi}{\bar{D}_p^2} + \sqrt{\eta_s \cdot \frac{\Phi^2}{\bar{D}_p^2 + E_y}} \right)}{\eta_s E_y}, \quad (6)$$

где η_s – статический КПД ЭР (КПД при $\Phi = 0$): $\eta_s = k^2 / k^2 + \zeta$, E_y – энергетический параметр, определяемый по формуле:

$$E_y = \psi_r \eta_r - k_q \bar{u}_y^2 \cdot \frac{\Phi^2}{\bar{D}_p^2} + \frac{16 \zeta_r \bar{u}_y^3 \cdot (\bar{D}_k^2 + \bar{D}_s^2 - 2\bar{D}_p^2)}{\pi \Phi}. \quad (7)$$

Полный КПД ЭР представлен в виде $\eta = \psi_y / \psi_r \eta_r$, откуда получим:

$$\eta = \left(\frac{\bar{D}_p^2 E_y \eta_s}{\sqrt{\psi_r \eta_r} \cdot \left(\Phi \eta_s + \bar{D}_p \sqrt{\eta_s (\Phi^2 + \bar{D}_p^2 E_y)} \right)} - \frac{A}{0,38 \bar{D}_p^2} \right) + k_q (1 - \omega_y), \quad (8)$$

где A – эквивалентное отверстие вентиляционного режима; ω_y – степень реактивности управляющего потока.

Качество ЭР, как величина полезной энергии закрутки ЭР на единицу потерь, может быть представлено в виде:

$$K_a = \frac{k_q \bar{u}_y^2}{\frac{\zeta \Phi_y^2}{16 b^2 \bar{D}_k^2} + \frac{32 \zeta_r \bar{u}_y^3 (\bar{D}_k^2 - \bar{D}_p^2)}{\pi \Phi}}. \quad (9)$$

Таким образом, уравнения (6), (7) устанавливают математическую зависимость между геометрическими параметрами ЭР и его энергетическими характеристиками, являющимися при этом критериями подобия (Φ_y, ψ_y, Φ) [4]. Уравнения (9), (10) восстанавливают соотношения между параметрами, характеризующими эффективность работы энергетического регулятора устройства, его геометрическими параметрами и режимом работы вентилятора.

Ввиду сложности процесса взаимодействия управляющего и основного потоков исследование внешней аэrodинамики ЭР

было проведено экспериментальным путем. Исследование проводилось на установке для аэродинамических испытаний вентиляторов на всасывание, выполненной в соответствии с ГОСТ 10921-90 [5]. Для определения последовательности эксперимента был применен статистический метод линейного планирования. В качестве плана использована дробная реплика с генерирующим соотношением, обеспечивающим её максимальную разрешающую способность [6].

Обработка экспериментального материала проводилась с использованием критериев Кохрена для проверки однородности дисперсий параллельных опытов, Стьюдента – для проверки значимости коэффициентов регрессии, Фишера – для проверки адекватности полученной модели при уровне значимости 2,5 %.

Из условия обеспечения максимального коэффициента качества энергетического регулятора для вентилятора Ц76-16 были получены следующие оптимальные значения геометрических параметров энергетического регулятора: $\bar{D}_k = 0,96$; $\bar{D}_p = 0,84$; $\bar{D}_s = \bar{D}_p$; $k_q = 1,3$. При этом ЭР обеспечивает удельное энергопотребление вентилятора Ц76-16 на уровне 1,31, глубину регулирования по давлению – 0,63. При этом с осевым направляющим аппаратом, являющимся на сегодня наиболее совершенным механическим устройством регулирования центробежных вентиляторов, Ц76-16 имеет удельное энергопотребление 1,42, а глубину регулирования по давлению – 0,55.

Оптимальные значения геометрических параметров ЭР зависят от геометрических параметров рабочего колеса центробежного вентилятора. Применение ЭР для повышения адаптивности центробежных вентиляторов местного проветривания способствует снижению их удельного энергопотребления на 8 % и увеличению глубины регулирования по давлению на 15 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Макаров Н. В. Расчет критериев аэродинамического подобия системы вентилятор–энергетический направляющий аппарат / Н. В. Макаров [и др.] // Изв. вузов. Горный журнал. 2008. № 5. С. 66–69.
- Макаров Н. В., Белов С. В., Макаров В. Н. Расчет параметров энергетических регуляторов шахтных вентиляторов // ГИАБ. 2012. № 7. С. 203–206.

3. Веников В. А. Теория подобия и моделирование применительно к задачам электроэнергетики. М.: Высшая школа, 1966. 487 с.
4. Ляпцев С. А., Потапов В. Я. Математическое описание поведения рудных частиц в воздушном потоке разделения частиц в воздушном потоке разделительных аппаратов // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 1. С. 178.
5. ГОСТ 10921–74. Вентиляторы радиальные (центробежные) и осевые. Методы аэродинамических испытаний. М.: Госстандарт, 1974. 15 с.
6. Тиме В. А. Оптимизация технико-экономических параметров гидротурбин. Л.: Машиностроение, 1976. 271 с.

Макаров Николай Владимирович – кандидат технических наук, доцент. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.

Солдатенко Андрей Алексеевич – студент. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.

Лаврёнов Никита Евгеньевич – студент. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.

Макаров Владимир Николаевич – доктор технических наук, доцент. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.

УДК (338.2:622):330.15

УКРУПНЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОГНОЗИРУЕМОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА ПРИ ОСВОЕНИИ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Игнатьева М. Н., Логинов В. Г., Литвинова А. А., Балашенко В. В.,
Цейтлин Е. М.

В статье предлагается методический подход к оценке усредненной величины экономического ущерба, обусловленного воздействием антропогенной деятельности на окружающую среду при освоении ресурсов недр. Рекомендуется обращение к экономической ценности природно-ресурсного потенциала типовых ландшафтных районов, снижению этой ценности в рамках формируемых экологических зон, усредненной величине срока восстановления природных ресурсов и срока изъятия. Величина экологического ущерба корректируется с использованием поправочного коэффициента, отражающего ценность экосистемных услуг, величина которого составляет 1,7–4,0.

Ключевые слова: экономический ущерб; снижение ценности; восстановление; экологические зоны.

При оценке вариантов освоения природного потенциала территории непременно возникает вопрос прогноза социальных и экологических последствий антропогенной деятельности, связанной с разработкой месторождений полезных ископаемых. Естественно, что на предпроектном этапе подобная прогнозная оценка предполагает получение весьма усредненных оценочных показателей. В условиях северных, малоосвоенных районов, отличающихся наличием хрупких, неустойчивых экосистем особую значимость приобретает проблема прогноза экологических последствий и, соответственно, прогнозируемого экономического ущерба, обусловленного загрязнением (нарушением) последних.

Укрупненная оценка экономического ущерба требует наличия информации об экономической ценности природных ресурсов в рамках того типового ландшафтного района, где предполагается местоположение объекта, оказывающего отрицательное воздействие на окружающую среду. К числу факторов, учитываемых при выделении ландшафтных районов, относятся:

– приуроченность ландшафтов к различ-

ным видам угодий (болотные, лесные, пригодные и непригодные для сельскохозяйственного использования и другой хозяйственной деятельности и т. д.);

– приуроченность угодий к мезорельефу, характеризующему наиболее важные производственно-технологические признаки и свойства;

– положение в пределах водосборного бассейна с учетом высоты местности, глубины и густоты расчлененности и других геоморфологических признаков.

Для условий Березовского района ХМАО-Югры, например, рекомендуется выделение семи типов ландшафтных районов.

Тип ландшафта I, подразделяется на:

1.1. Болотные угодья, присетевые (в приподнятой пойме), приводораздельные (расположенные между присетевыми и водораздельными), водораздельные, которые могут использоваться под оленьи пастбища, угодья сбора дикоросов, низинные. Высота от относительной отметки водотока до 150 м.

1.2. Болотные угодья низинные, торфяные, которые могут использоваться только для сбора дикоросов (с учетом пониженной

урожайности и непроходимости, используются для сбора на 20 %. При урожайности ягод ниже 50 кг/га не используются). Высота от относительной отметки водотока до 30 м.

Тип ландшафта 2, подразделяется на:

2.1. Лесные малопродуктивные угодья, расположенные непосредственно в пойме рек, водоемов, присетевых, водораздельных, предгорных и низкогорных участках. Угодья имеют в основном природоохранные функции. Используются для сбора дикоросов, охоты, под олени пастища, любительский лов рыбы.

2.2. Лесные продуктивные угодья, присетевые, приводораздельные и водораздельные. Относятся к эксплуатационным лесам, северная граница проходит по широте 62° с. ш. Используется также для сбора дикоросов, охоты, под олени пастища.

Тип ландшафта 3: земли, пригодные для сельскохозяйственного назначения (под сено-косы, пастища, пашню).

Тип ландшафта 4: прочие земли, не-

пригодные для хозяйственной деятельности (кроме рекреационной деятельности – эстетически привлекательные участки) – гольцы, осьпи, скальные участки и т. п.

Тип ландшафта 5: продуктивные водные угодья.

Тип ландшафта 6: земли застройки и под дорогами.

Тип ландшафта 7: особо охраняемые территории.

Типы ландшафтов 1.2, 4 и 6 в текущей оценке не участвуют в силу явной инвестиционной непривлекательности. Заповедные территории 7-го типа ландшафта в районировании рассматриваются как запретные для освоения и, соответственно, для инвестиционной деятельности.

Согласно выполненным расчетам удельные показатели экономической оценки природно-ресурсного потенциала этих ландшафтных районов составляют 1,64–6,03 тыс. руб./га (табл. 1).

Таблица 1
Экономическая оценка природного потенциала типовых ландшафтных районов

Ландшафтный район	Удельный показатель экономической оценки природно-ресурсного потенциала, тыс. руб./га
Тип ландшафта 1.1 (олени пастища, дикоросы, охотничьи ресурсы, водные угодья)	1,64
Тип ландшафта 2.1 (олени пастища, дикоросы, охотничьи ресурсы, рыбные ресурсы)	1,65
Тип ландшафта 2.2 (лесные ресурсы, дикоросы, охотничьи ресурсы, рыбные ресурсы)	6,03
Тип ландшафта 3 (земли сельскохозяйственного назначения промышленного значения не имеют)	–
Тип ландшафта 5 (рыбные ресурсы, охотничьи ресурсы)	3,33

В табл. 2 приведены структурные составляющие экономической оценки природно-ресурсного потенциала, из которой следует, что основную долю его ценности (за исключени-

ем водных угодий) формируют дикоросы. Правочные коэффициенты, отражающие учет экосистемных услуг, составляют соответственно: 4,0; 3,5; 1,7 и 2,0.

Таблица 2
Структурные составляющие экономической оценки природно-ресурсного потенциала ландшафтных районов

Тип ландшафта	Земельные		Лесные ресурсы		Дикоросы		Охотничьи		Рыбные	
	тыс. руб.	%	тыс. руб.	%	тыс. руб.	%	тыс. руб.	%	тыс. руб.	%
Болотные угодья, приподнятые	27,1	0,34	–	–	7821,0	99,2	33,6	0,46	–	–
Лесные малопродуктивные угодья	6,35	0,16	–	–	3910,5	99,0	33,6	0,84	–	–

Лесные продуктивные угодья	–	–	19283	21,0	7169,3	78,3	61,6	0,7	–	–
Продуктивные водные угодья	–	–	–	–	–	–	3339,6	2,2	149733	97,8

Экономическая ценность природных ресурсов под влиянием антропогенного воздействия, сопровождающего освоение ресурсов недр, снижается в связи с их загрязнением, нарушением целостности, повреждением и т. д. При этом степень изменения экономиче-

ской ценности меняется в зависимости в первую очередь от удаленности источника воздействия (экологической зоны) [1, 2]. Значения коэффициентов снижения экономической ценности природных ресурсов отражены в табл. 3.

Таблица 3

Значение коэффициента снижения экономической ценности природных ресурсов μ

Виды ресурсов	Степень нарушенности земель			
	4 зона	3 зона	2 зона	1 зона
	слабая (удовлетворительная)	умеренная (условно- удовлетворительная)	сильная (кризис)	очень сильная (катастрофическая)
Лесные ресурсы, олены пастища, охотничьи ресурсы, дикоросы, рыбные ресурсы	0,10–0,30	0,31–0,65	0,66–0,85	0,86–1,00

Коэффициент снижения экономической ценности природных ресурсов по экологическим зонам принят в расчетах для 1-й зоны равным 1,0; для 2-й зоны – 0,85; для 3-й зоны – 0,65; для 4-й зоны – 0,10.

Естественно, что различная продолжительность отличает и периоды восстановления природных ресурсов по экологическим зонам [3, 4]. Оценка прогнозируемого ущерба может быть определена по формуле:

$$Y_{\text{год}} = Y_{\text{год}} T_{\text{востр.ср}} + O_{\text{ср}} S T_{\text{из}}, \quad (1)$$

где $Y_{\text{год}}$ – экономический ущерб, обусловленный антропогенным воздействием на природные ресурсы, тыс. руб.; $Y_{\text{год}}$ – годовой экономический ущерб, обусловленный антропогенным воздействием на природные ресурсы, тыс. руб.; $T_{\text{востр.ср.}}$ – усредненный период восстановления природных ресурсов на участке типового ландшафтного района, подтвержденных антропогенному воздействию, лет; $O_{\text{ср}}$ – годовая экономическая оценка природно-ресурсного потенциала типового ландшафтного района, в рамках которого расположен участок, тыс. руб./га; S – площадь участка в рамках типового ландшафтного района, га; $T_{\text{из}}$ – период изъятия площади участка типового ландшафтного района для промышленных целей, лет.

$$Y_{\text{год}} = O_{\text{ср}} S \mu_{\text{ср}}, \quad (2)$$

где $\mu_{\text{ср}}$ – усредненный коэффициент снижения экономической ценности природных ресурсов, дол. ед.

$$\mu_{\text{ср}} = \frac{S_1 \mu_1 + S_2 \mu_2 + S_3 \mu_3 + S_4 \mu_4}{S}, \quad (3)$$

где S_1, S_2, S_3, S_4 – площади первой, второй, третьей и четвертой экологической зоны, га; $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ – коэффициент снижения экономической ценности в первой, второй, третьей и четвертой экологической зоне, дол. ед. (табл. 3).

Большие сложности связаны с обоснованием $T_{\text{востр.ср.}}$, т. к. это требует информации о восстановлении каждого вида природного ресурса по экологическим зонам:

$$T_{\text{востр.ср.}} = \frac{T_{\text{востр.ср1}} S_1 + T_{\text{востр.ср2}} S_2 + T_{\text{востр.ср3}} S_3 + T_{\text{востр.ср4}} S_4}{S}, \quad (4)$$

где $T_{\text{востр.ср1}}, T_{\text{востр.ср2}}, T_{\text{востр.ср3}}, T_{\text{востр.ср4}}$ – усредненный срок восстановления природных ресурсов в первой, второй, третьей и четвертой зонах, лет.

$$T_{\text{востр.ср1}} = \sum_{i=1}^n O_i T_{i_1} / O_{\text{ср}}, \quad (5)$$

где O_i – годовая экономическая оценка i -го природного ресурса или ее доля в общей величине $O_{\text{ср}}$, %; T_{i_1} – срок восстановления i -го

природного ресурса в первой зоне, лет; i – вид природного ресурса ($i = 1 \dots n$);

$$T_{\text{востр cp2}} = \sum_{i=1}^n O_i T_{i_2} / O_{cp}, \quad (6)$$

где T_{i_2} – срок восстановления i -го природного ресурса во второй зоне, лет;

$$T_{\text{востр cp3}} = \sum_{i=1}^n O_i T_{i_3} / O_{cp}, \quad (7)$$

где T_{i_3} – срок восстановления i -го природного ресурса в третьей зоне, лет;

$$T_{\text{востр cp4}} = \sum_{i=1}^n O_i T_{i_4} / O_{cp}, \quad (8)$$

где T_{i_4} – срок восстановления i -го природного ресурса в четвертой зоне, лет.

При отсутствии данных о сроках восстановления природных ресурсов по экологическим зонам $T_{\text{востр cp}}$ определяется как:

$$T_{\text{востр cp}} = \sum_{i=1}^n (O_i T_i / O_{cp}) \mu_{cp}, \quad (9)$$

где T_i – полный срок восстановления i -го природного ресурса, лет.

Тогда Y_s определяется по формуле:

$$Y_s = \sum_{i=1}^n O_i T_i S \mu_{cp}^2 + O_{cp} S T_{iz} = S \left(\sum_{i=1}^n O_i T_i \mu_{cp}^2 + O_{cp} T_{iz} \right). \quad (10)$$

Величина ущерба возрастает при учете нарушений в потоке поступления экологических услуг. Как следует из табл. 2, основную ценность в природно-ресурсном потенциале составляют дикоросы, что предполагает изъятие природных ресурсов при одновременной потере потока экологических услуг. Подобное предположение требует применения поправочного коэффициента к Y_s , соответствующего типу ландшафтного района.

В целом предлагаемый методический подход может рассматриваться в качестве приемлемого инструмента укрупненной оценки прогнозируемого экономического ущерба, обусловленного нанесением вреда природным ресурсам в процессе освоения минерально-сырьевой базы северных территорий.

Статья подготовлена в рамках и при финансовой поддержке РНФ № 14-18-00456 «Обоснование геоэкосоциоэкономического подхода к оценке и использованию стратегического природно-ресурсного потенциала северных малоизученных территорий в рамках инвестиционного проекта «Арктика-Центральная Азия».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Игнатьева М. Н., Логинов В. Г., Литвинова А. А., Морозова Л. М., Эктова С. Н. Экономическая оценка вреда, причиняемого арктическими экосистемами при освоении нефтегазовых ресурсов // Экономика региона 2014. № 1. С. 102–111.
- Косолапов О. В., Игнатьева М. Н., Литвинова А. А. Формирование экологического ущерба, обусловленного последствиями воздействия горнопромышленного комплекса на окружающую среду // Экономика региона. 2013. № 1 (33). С. 158–166.
- Логинов В. Г. Социально-экономическая оценка развития природно-ресурсных районов Севера. Екатеринбург. ИЭУрОРАН, 2007. 311 с.
- Игнатьева М. Н., Литвинова А. А., Логинов В. Г. Методический инструментарий экономической оценки последствий воздействия горнопромышленных комплексов на окружающую среду. Екатеринбург: ИЭ УрО РАН, 2010. 168 с.

Игнатьева Маргарита Николаевна – доктор экономических наук, ведущий научный сотрудник Центра природопользования и геоэкономики. 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29, Институт экономики УрО РАН. E-mail: rinis@mail.ru

Логинов Владимир Григорьевич – доктор экономических наук, доцент, зав. сектором Центра природопользования и геоэкономики. 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29, Институт экономики УрО РАН. E-mail: log-wg@rambler.ru

Литвинова Альбина Аркадьевна – кандидат экономических наук, старший научный сотрудник сектора регионального природопользования и геоэкологии. 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29, Институт экономики УрО РАН. E-mail: albalit2012@yandex.ru

Балашенко Валерий Васильевич – кандидат экономических наук, научный сотрудник Центра природопользования и геоэкономики. 660014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29, Институт экономики УрО РАН. E-mail: Bala10@mail.ru

Цейтлин Евгений Михайлович – кандидат геолого-минералогических наук, доцент. 620144, г. Екатеринбург, Куйбышева 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: tseitlin.e.m@gmail.com

ИНСТИТУЦИОНАЛЬНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В МИРОВОМ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕМ СЕКТОРЕ: НЕКОТОРЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

Душин А. В., Соколова О. Г.

Период неблагоприятной экономической конъюнктуры ведущие мировые горнодобывающие компании используют как «передышку» для проведения запланированных структурных модернизаций, введения и наладки новых технологий с целью повышения эффективности бизнеса. Одними из характеристик текущего момента являются устойчивая тенденция по усилению роли возобновляемой, в том числе альтернативной энергетики в балансе энергопотребления горнодобывающих компаний и повышение доли замкнутых технологий использования водных ресурсов.

Ключевые слова: горнодобывающие компании; институциональные изменения; альтернативная энергетика; технологическое развитие.

Согласно ключевым документам стратегического развития России, таким как Концепция развития России, Энергетическая стратегия России и др., дальнейшее развитие страны связывается с инновационным сценарием, однако, как отмечают эксперты, характерной особенностью настоящего момента развития экономической системы России является то, что инновационная политика в значительной степени исчерпала свои возможности и не может реально обеспечить кардинального изменения ситуации. Можно предположить, что центральным вопросом в повестке дня современной России становится не столько инновационная политика, сколько технологическая, промышленная политика. Россия заимствовала и адаптировала возможные и отработанные зарубежные схемы инновационного развития, но сама экономика при этом изменилась незначительно, структурные реформы национальной экономики так и не были проведены. Если наблюдается инжиниринговый провал, доминируют устаревшие технические регламенты и высокие ставки по кредитам, то никакие важнейшие решения по инновационному развитию экономики не помогут диверсифицировать национальное хозяйство и стимулировать его инновационное развитие [1]. Если в этом плане рассмотреть современный мировой минерально-сырьевой комплекс как, казалось бы, один из наименее инновационно-активных, то в его развитии

можно отметить примечательные тенденции.

С начала 2011 г. на мировых сырьевых рынках наблюдается падение цен (за исключением нефти и газа). В условиях ухудшения ожиданий от развивающихся рынков, снижения спроса на большинство видов минерального сырья и продуктов их передела производители пытаются сохранить или минимизировать сокращение объемов производства. Компании отрасли вошли в период структурной перестройки, направленной на повышение производительности труда, снижение издержек и создание ценности для инвесторов. Вместе с тем в развитии крупнейших международных горнодобывающих компаний наблюдаются тенденции, определяемые отличными от неблагоприятной конъюнктуры факторами, связанными с институциональными изменениями последних лет.

В качестве ключевых целей международные горнодобывающие компании декларируют наряду с повышением финансовой дисциплины и снижением издержек стремление создать позитивное наследие и приверженность этическому ведению бизнеса, большое внимание стало уделяться корректировкам стратегий в части установок новых ориентиров по снижению эмиссии CO₂ в атмосферу, применения замкнутых технологий в потреблении воды. Указанные цели в значительной степени обусловлены институциональными изменениями последних лет в русле

концепции устойчивого развития. Одним из документов, закрепляющих новые «правила игры», является Копенгагенское соглашение [2], которое представляет собой итоговый документ, принятый 18 декабря 2009 г. делегатами 15-й сессии конференции сторон рамочной конвенции ООН об изменении климата [3]. Соглашение, подготовленное США, а также Китаем, Индией, ЮАР и Бразилией, которое пришло на смену Киотскому протоколу, увязывает динамику потепления с эмиссией CO₂ в атмосферу. Несмотря на то, что Копенгагенское соглашение не имеет обязательной юридической силы, большинство транснациональных горнодобывающих компаний в своих стратегиях нашли возможность учесть постепенное снижение эмиссии CO₂ за счет трансформации энергетических мощностей и преобразований по основным производственным процессам. Кроме того, декларируемые европейской энергетической программой цели по замещению угольной, ядерной и газовой энергетики альтернативной энергетикой на основе возобновляемых источников к настоящему времени удается успешно достигать. В этой связи интересно рассмотреть некоторые современные свидетельства серьезных технологических преобразований в горнодобывающем секторе вследствие институциональных изменений.

По экспертным оценкам, в среднем около 15 % операционных затрат горнодобывающего производства представляют собой затраты на электроэнергию, и эта доля со временем будет только увеличиваться в связи со снижением качества запасов и ухудшением горнотехнических условий. В этой связи многие горнодобывающие компании делают ставку на диверсификацию источников энергии и увеличение доли возобновляемых источников энергии в структуре потребления.

Компания *Rio Tinto* – крупнейший мировой производитель алюминия – занимает довольно консервативную политику в части обеспечения энергетической безопасности, являясь к тому же одним из крупнейших мировых производителей энергетического угля и урана. Вместе с тем в 2014 г. 67 % потребляемой

электроэнергии получено из возобновляемых источников, из них более 65 % приходится на гидроэлектростанции. В 2014 г. компания совместно с правительством Австралии начала реализацию проекта по строительству солнечной фотоэлектрической электростанции для бокситового рудника в *Weipa* мощностью 1,7 МВт. За последние 15 лет компания инвестировала более 100 млн долл. в исследования и разработки, направленные на развитие технологий повышения эффективности и уменьшения выбросов угольных тепловых электростанций. Доля рециклируемой воды для технологических нужд составляет в 2014 г. 32 %.

Компания *BHP Billiton* за период 2007–2014 гг. включительно инвестировала более 400 млн долл. США в исследования, разработку и внедрение технологий с низким уровнем выбросов. Компания делает ставку на технологии, имеющие потенциал для сокращения выбросов от основной деятельности и в цепях поставок, но они в настоящее время еще недоступны в коммерческих масштабах. Компания сосредоточила усилия на работе с технологиями по улавливанию и хранению углерода (CCS), технологией для уменьшения неорганизованных выбросов при добывче угля и нефти, технологиями высокой эффективности и низкой эмиссии (HELE).

Компания *Vale* – один из крупнейших производителей железорудного сырья; в 2014 г. возобновляемые источники энергии составляли в балансе энергопотребления компании 21 %, их основу составляли гидроэлектростанции. На развитие гидроэнергетики в 2014 г. компания инвестировала более 117 млн долл.

Компания *Codelco* – мировой лидер в производстве меди. В целях развития энергетики от возобновляемых источников, а также для снижения выбросов и эмиссии углерода в атмосферу направила свои усилия: на включение и широкое развитие солнечной энергии в электролитическом процессе на заводах в дивизионах *Gabriela Mistral* и *Chuquicamata*; генерацию солнечной энергии, генерацию энергии, получаемой от транспортировки

хвостов в Эль-Теньенте; использование в целях производства энергии воды из вытяжной системы в Сан-Педро; использование биомассы в подразделении Андина для системы отопления. Компания в 2015 г. строит завод *Pampa Elvira Solar Thermal Plant*, который будет поставлять в дивизион *Gabriela Mistral* «чистую» энергию с целью повышения энергоэффективности. Завод обеспечит 54 ГВт ч/год, что позволит дивизиону *Gabriela Mistral* заменить 85 % ископаемого топлива при производстве катодов. Это позволит ощутимо сократить затраты на транспорт. В пустыне Атакама для повышения энергоэффективности дивизиона *Chuquicamata* реализуется проект *Calama Solar 3* – фотоэлектрической электростанции, перерабатывающей солнечную энергию, проектная мощность которой составляет 2,69 ГВт ч/год. Кроме того, в индустриальной зоне *Mejillones* реализуется проект строительства газотурбинной электростанции с комбинированным циклом. Компания *Codelco* в 2014 г. сократила потребление водных ресурсов на 1,2 %, при этом 76 % объема потребления составляет вода, реализуемая по замкнутым системам, а по отдельным проектам *Chuquicamata* и *Radomiro Tomic* рециркуляция воды достигает 90 %.

Группа компаний *Antofagasta* – один из крупнейших производителей меди (704,8 тыс. т меди в 2014 г.). Суммарная потребность группы компаний в электроэнергии на 5 % обеспечивается возобновляемыми источниками, при этом по отдельным проектам в 2014 г. до 20 % электроэнергии реализуется за счет энергии ветра. За 2016 г. компания рассчитывает увеличить долю энергии, получаемую от возобновляемых источников до 50 % по проекту *Los Pelambres* и к концу 2018 г. довести её долю до 80 %. Для этого группа компаний стала владельцем 30 % акций *El Arrayán* – крупнейшей в Чили компании по производству ветровой энергии. Кроме того, группа компаний *Antofagasta* заключила соглашение о поставках энергии с двух строящихся фотоэлектрических солнечных станций в Чили, а также выступает инвестором проекта *AltoMaipo* – гидроэлектростанции

на 110 МВт (владеет 40 %), которая, согласно контракту, начнет работу к концу 2018 г. Группа использует в ряде своих проектов морскую воду (44 % суммарной потребности), которую необходимо закачивать на высоту более 1000 м над уровнем моря, что увеличивает расход энергии на тонну руды.

Freeport Mc Moran за период 2010–2014 гг. увеличил долю рециклируемой воды с 66 до 79 %. В 2014 г. 23 % потребляемой энергии было получено из возобновляемых источников, в том числе с гидроэлектростанций – 19 %, солнечных, ветряных и биоэнергетических электростанций – 4 %. Для нужд добычи полезных ископаемых компания располагает в Аризоне комбинированными мощностями солнечной генерации в объеме 20 МВт; развернута фирменная альтернативная технология анодирования для уменьшения энергии, необходимой в производстве меди; используется избыточное технологическое тепло от серных горелок на шахте в Саффорде (Аризона), таким образом генерируется до 15 МВт мощности для технологических нужд в шахте.

Кроме того, в ответ на вызовы, возникающие в связи с увеличением расходов на проведение геологоразведочных работ, ухудшением первичных характеристик пород, снижением качества руды, институциональными изменениями, обусловленными уже стечением экологических требований в результате внедрения концепции устойчивого развития и растущим беспокойством по поводу ужесточения норм гигиены и безопасности труда рабочих, горнодобывающими компаниями активно исследуются, разрабатываются и внедряются методы и технологии добычи и извлечения, которые отвечают этим требованиям, а также улучшают экономические ожидания от разработки минерального ресурса. Горнодобывающие компании делают ставку на развитие малолюдных автоматических модульных систем непрерывной добычи, обеспечивающих упрощение строительства и эксплуатации рудников. Ключевыми аспектами таких технологий являются:

– интенсивное развитие методов повышения техногенной трещиноватости пород;

- увеличение скорости добычи и извлечения, обеспечение одновременной добычи из разных точек;
- использование более стабильной конфигурации добычи руды;
- полная автоматизация и широкое развитие систем телеуправления;
- реализация схем, упрощающих планирование, строительство и эксплуатацию производственной инфраструктуры и горных выработок.

Вместе с тем отмеченные тенденции в развитии крупнейших горнодобывающих компаний практически не находят отражение в деятельности российских компаний. Главными причинами этого являются: «мягкая» экологическая политика РФ (по сравнению, например, с Европейским Союзом), проявляющаяся в преимущественно декларативном характере реализации принципов устойчивого развития; отсутствие мотивации у горнодобывающих компаний для приведения операционной деятельности в соответствии с целевыми ориентирами по устойчивому развитию; принципиально иная структура топливно-энергетического баланса РФ, устанавливаемая в том числе посредством Энергетической стратегии России [4, 5]; подчиненный характер отечественных горнодобывающих предприятий в цепочках создания добавленной стоимости [6].

Россия находится еще только в начале пути по развитию возобновляемых источников энергии. В ноябре 2015 г. правительством РФ подготовлены документы на производство О мерах по стимулированию использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности». Постановление от 10 ноября 2015 года №1210 и соответствующее распоряжение от 10 ноября 2015 года №2279-р направлены на повышение инвестиционной привлекательности проектов по строительству генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии.

Правила определения цены на мощность генерирующих объектов, функционирующих на основе возобновляемых источников энергии, были утверждены ранее постановлением Правительства от 28 мая 2013 года №449. По сути, новые документы прописывают механизмы повышение инвестиционной привлекательности реализации проектов возобновляемых источников энергии, минимизации рисков, связанных с изменениями валютного курса при расчёте цены на мощность функционирующих на основе возобновляемых источников энергии генерирующих объектов на оптовом рынке электрической энергии и мощности. Уже сейчас понятно, что действие данных документов будет очень локальным. Согласно новой Энергетической стратегии России до 2030 г. наибольшие мощности по возобновляемым источникам энергии предполагается создать к 2030 г. в Крыму (до 9000 МВт. Таким образом, на потребности добывающего комплекса РФ это не отразится.

Такого спада спроса, цен и интереса инвесторов к горно-металлургическому сектору не было почти 20 лет. Это непростое время ведущие мировые горнодобывающие компании используют как «передышку» для проведения запланированных структурных модернизаций, введения и наладки новых технологий с целью повышения эффективности бизнеса. Одними из характеристик текущего момента являются устойчивая тенденция по усилению роли возобновляемой, в том числе альтернативной энергетики в балансе энергопотребления горнодобывающих компаний и повышение доли замкнутых технологий использования водных ресурсов, однако для отечественных компаний отмеченные тенденции пока не приняли значимый характер, и если горные технологии в России развиваются с незначительным отставанием от передовых в этом отношении стран, то отечественной экологической политике следовало бы развиваться более активно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Романова О. А. Инновационное развитие промышленного региона в контексте новой индустриализации // Шумпетеровские чтения. 2013. № 1. С. 145–149.
2. Copenhagen Accord. U. N. Framework Convention on Climate Change. United Nations. 18 December 2009.

Retrieved 15 February 2013.

3. Rudd K. Paris Can't Be Another Copenhagen. New York Times. Retrieved 26 May 2015.
4. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. URL: <http://www.minenergo.gov.ru/aboutminen/energostrategy>
5. Энергетическая стратегия России на период до 2035 г. Проект. URL: <http://www.minenergo.gov.ru>
6. Душин А. В. Теоретико-методологические основы воспроизведения минерально-сырьевой базы. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 2013. 312 с.

Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта РГНФ №13-32-01258 «Оценка потенциала новой индустриализации в регионах России».

Душин Алексей Владимирович – доктор экономических наук, доцент, старший научный сотрудник Центра природопользования и геоэкономики. 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29, Институт экономики УрО РАН. E-mail: dushin.a@list.ru

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОГНОЗА ЭКОНОМИЧЕСКОГО УЩЕРБА ПРИ ОСВОЕНИИ РЕСУРСОВ НЕДР

Косолапов О. В., Власова Л. В.

В статье обосновывается необходимость оценки устойчивости ландшафтов к антропогенным воздействиям и экологической опасности предприятий, оказывающих воздействия, в целях повышения достоверности прогноза последствий, а, следовательно, и экономического ущерба, учитываемых при принятии управлеченческих решений относительно освоения ресурсов недр. осуществляется отбор факторов, характеризующих экологическую опасность горного предприятия при открытой разработке месторождений полезных ископаемых. В процессе математической обработки материала экспериментального опроса из первоначального числа, определяемого 17 факторами, отсеивается 5 факторов. Оставшиеся 12 факторов рекомендуются к использованию, как наиболее согласованные, по результатам экспериментального опроса.

Ключевые слова: экономический ущерб; воздействия; последствия; экологическая опасность; факторы.

В современных условиях при переходе к устойчивому развитию выбор варианта освоения минерально-сырьевого потенциала во многом зависит от формирующихся при эксплуатации месторождений социальных и экологических последствий. В свою очередь характер экологических последствий определяется устойчивостью ландшафтов к антропогенным воздействиям и экологической опасностью предприятий, в процессе производственной деятельности которых формируются воздействия.

Горнoprомышленный комплекс – это один из крупнейших источников негативного воздействия на окружающую среду [1]. По временному интервалу выделяют *постоянные и временные воздействия*. Постоянные воздействия проявляются безостановочно (без перерыва), временные – через определенные промежутки. По характеру обратимости воздействия подразделяются на *обратимые и необратимые*. Обратимые воздействия предполагают возможность самовосстановления и самоочищения, необратимые вызывают разрушение экосистемы с необратимыми последствиями. По направленности воздействия могут быть *стихийные и целенаправленные*. К числу целенаправленных воздействий относятся те, которые заранее определены проектными решениями, стихийные воздей-

ствия обычно не предсказуемы и возникают в процессе эксплуатации объекта. Целенаправленные воздействия, как правило, носят эволюционный характер, сопровождают производственный процесс в течение всего временного периода и приводят к постепенному изменению качества окружающей среды. Стихийные воздействия имеют место при аварийных ситуациях, вызывающих резкое и внезапное ухудшение качества окружающей среды.

Горнoprомышленный комплекс оказывает практически на все элементы окружающей среды (литосферу, гидросферу, атмосферу) существенные негативные воздействия, которые распространяются на значительные территории. Естественно, что в каждом конкретном случае воздействия отличаются друг от друга видом, силой, продолжительностью, и в конечном итоге – величиной (силой) последствий. Как следует из результатов исследования, открытый способ разработки оказывает наибольшее техногенное воздействие на окружающую среду по сравнению с подземным способом разработки.

При открытых работах наиболее значимые воздействия на землю оказываются карьерным пространством, отвалами вскрытых пород и шламохранилищами, при подземном способе отработки – зонами обрушения. На

недра при открытых работах воздействие оказывается в виде нарушения ландшафта местности чашами карьеров, при подземном способе – образованием пустот в недрах. Загрязнение атмосферы при открытых работах вызывается в первую очередь взрывными работами, технологическим газообразованием и пылеуносом с отвалов, при подземных работах – выделением газов при отработке и технологическом газообразовании. Загрязнение водного бассейна в основном вызывают дренажные и шахтные воды, при этом для обоих способов разработки характерно нарушение гидродинамического режима вод. В целом при открытом способе разработки наиболее значимым воздействием является загрязнение атмосферы и нарушение земной поверхности, при подземном способе разработки – нарушение напряженно-деформированного состояния горного массива и загрязнение подземных вод.

Геохимическое воздействие горнодобывающих комплексов на окружающую среду связано в первую очередь с загрязнением тяжелыми металлами, потоки которых поступают в окружающую среду с пылевыми выбросами, со сбросами сточных вод, с атмогенными и гидрогенными потоками от техногенно-минеральных образований [2, 3]. Виды металлов обусловлены главным образом содержанием металлов в рудном сырье, а в конечном итоге – ассоциацией металлов в геологических и рудных формациях разрабатываемых месторождений. Так, для территории Урала, например, выделяются формации месторождений железа, меднорудных и золоторудных месторождений, а также формации экзогенных месторождений. Существенная роль в оказании воздействия на окружающую среду принадлежит отходам (техногенно-минеральные образования).

Прогноз возможных воздействий позволяет оценивать прогнозируемые последствия и экономический ущерб [4–6], обусловленный экономическими, экологическими и социальными последствиями. Достоверность прогнозируемых воздействий, наносящих вред окружающей среде, здоровью населения

и материальным объектам, оказывается тем выше, чем полнее информация об объекте воздействия. Оценка экологической опасности объекта, в лице которого выступает горное или горно-обогатительное предприятие, требует обоснования системы факторов, характеризующих это предприятие. Первоначальный состав факторов для условий открытой разработки месторождения включает в себя:

- тип транспортных средств;
- тип взрывных веществ;
- физическое состояние отходов;
- интенсивность взрывных работ;
- протяженность транспортировки;
- тип погрузочных средств;
- площадь размещения отходов;
- тип полезного ископаемого;
- глубина залегания подземных вод;
- водоёмкость;
- землёмкость;
- рельеф местности;
- степень обводнённости;
- глубина карьера;
- скорость распространения колебаний в недрах;
- крепость вмещающих пород;
- производственная мощность карьера.

В оценке значимости вышеперечисленных факторов приняли участие 20 экспертов. Факторы оценивались по пятибалльной шкале; наиболее значимые факторы получили оценку «1», наименее значимые – «5». Согласно полученным данным были определены средние значения баллов для каждого показателя \bar{x}_i , а также средние абсолютные отклонения $\Delta|\bar{x}_i|$, что позволило оценить согласованность оценок экспертов по каждому признаку и выделить наиболее важные факторы с точки зрения данных экспертов. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

По приведенным данным была рассчитана мера согласованности (E_n) оценок 20 экспертов на заданной шкале оценок $[q, Q]$:

$$E_n = 1 - \frac{2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |x_{ij} - \bar{x}_i|}{mn(Q-q)}, \quad (1)$$

где m – число экспертов; n – число оцениваемых факторов; x_{ij} – оценка i -го фактора j -м

экспертом в баллах; $q = 1$, $Q = 5$. Если $E_n = 1$, значит эксперты единодушны в своих оценках [7].

Мера согласованности оценок 20 экспертов была вычислена по формуле (1) как для всех 17 показателей, так и для меньшего

Таблица 1

Анализ экспертных оценок 20 экспертов

Показатели	Среднее значение оценки фактора \bar{x}_i , баллов	Среднее абсолютное отклонение фактора $\Delta \bar{x}_i $	Место показателя по согласованности оценок экспертов	Место фактора по его значимости
Тип транспортных средств	1,50	0,55	7	3
Тип взрывчатых веществ	3,10	1,02	14	14
Физическое состояние отходов	3,35	0,89	13	16
Интенсивность взрывных работ	1,75	0,60	9	7
Протяженность транспортировки	1,55	0,61	10	4
Тип погрузочных средств	3,00	1,10	16–17	13
Площадь размещения отходов	1,95	0,38	1–2	8–9
Тип полезного ископаемого	1,35	0,46	3	1
Глубина залегания подземных вод	1,70	0,49	4	6
Водоемкость	3,40	1,10	16–17	17
Землеемкость	2,30	0,62	11	11
Рельеф местности	1,60	0,72	12	5
Степень обводненности	2,65	0,59	8	12
Глубина карьера	1,45	0,50	5–6	2
Скорость распространения колебаний в недрах	1,95	0,38	1–2	8–9
Крепость вмещающих пород	3,25	1,08	15	15
Производственная мощность карьера	2,20	0,50	5–6	10

их числа, при этом показатели отбрасывались в соответствии с их местом по согласованности оценок экспертов, т. е. оставлялись наиболее согласованные факторы. Результаты расчетов приведены в табл. 2 и представлены на

рис. 1. Как и ожидалось, мера согласованности оценок довольно быстро уменьшается с ростом числа оцениваемых показателей, при этом зависимость E_n от n оказалась близка к линейной.

Таблица 2

Мера согласованности оценок 20 экспертов в зависимости от числа факторов

Число факторов n	2	4	6	8	10	12	14	16	17
Мера согласованности E_n	0,81	0,787	0,775	0,760	0,748	0,734	0,704	0,673	0,66

Далее было проанализировано изменение средних значений и средних абсолютных отклонений, а, следовательно, и согласованности оценок по признаку, а также рейтинга важности факторов в зависимости от числа экспертов, участвующих в экспер-

тизме.

Для этого были найдены средние значения абсолютных отклонений по всем 17 показателям для j -го эксперта $|\Delta\bar{x}_j|$. Результаты этих расчетов и рейтинг каждого эксперта по согласованности представлены в табл. 3.

Таблица 3

Рейтинг экспертов по согласованности их оценок друг с другом

Номер эксперта	Среднее значение абсолютных отклонений для j -го эксперта	Место j -го эксперта по согласованности с остальными экспертами
1	0,391	1
2	0,462	3
3	0,915	19–20

Номер эксперта	Среднее значение абсолютных отклонений для j -го эксперта	Место j -го эксперта по согласованности с остальными экспертами
4	0,615	5
5	0,679	12–13
6	0,662	9
7	0,621	6
8	0,556	4
9	0,803	15
10	0,809	16–17
11	0,909	18
12	0,674	11
13	0,403	2
14	0,650	8
15	0,809	16–17
16	0,915	19–20
17	0,750	14
18	0,632	7
19	0,668	10
20	0,679	12–13

В соответствии с рейтингом были оставлены оценки наиболее согласованных друг с другом 17, 14, а затем 7 экспертов. Были выполнены те же расчеты, что и для всех 20 экспертов, и опре-

делена мера согласованности оценок данного числа экспертов (по всем 17 факторам) по формуле (1). Результаты расчетов меры согласованности оценок приведены в табл. 4 и на рис. 2.

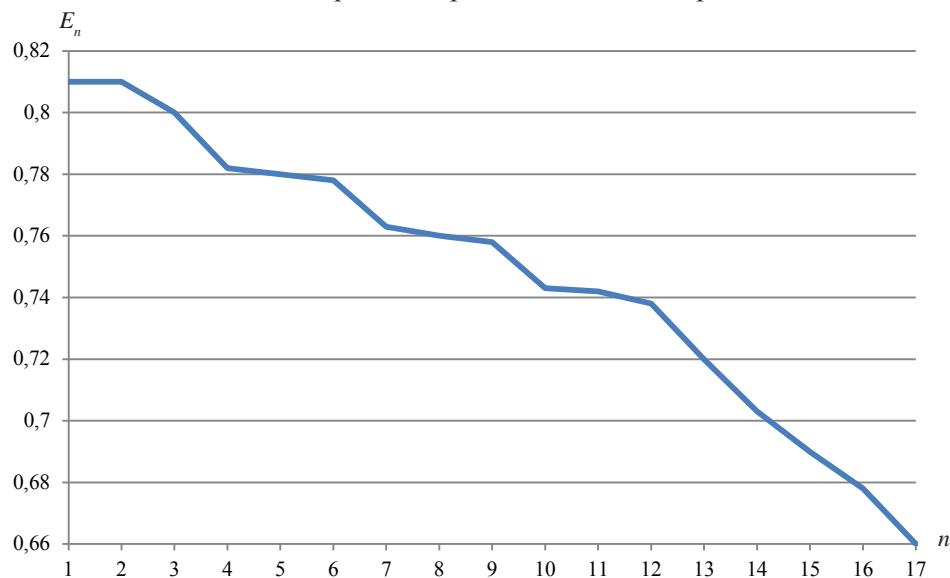


Рис. 1. Зависимость меры согласованности оценок 20 экспертов от числа наиболее согласованных оцениваемых факторов

Таблица 4

Мера согласованности оценок 17 показателей в зависимости от числа экспертов

Число экспертов m	1	7	14	17	20
Мера согласованности E_m	1	0,764	0,703	0,683	0,660

Падение меры согласованности оценок с увеличением числа экспертов происходит примерно по экспоненциальной кривой, т. е.

сначала (при малом числе экспертов) добавление каждого следующего эксперта очень резко снижает меру согласованности оценок,

а с увеличением общего числа экспертов добавление следующего эксперта гораздо меньше влияет на меру согласованности оценок.

В табл. 5–6 приведены рейтинги показа-

телей по согласованности их оценок и по их значимости соответственно для различного числа наиболее согласованных между собой экспертов.

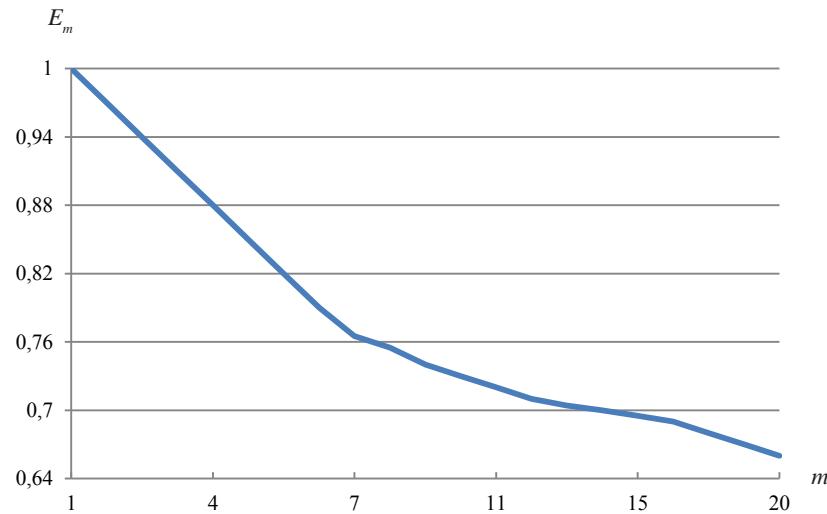


Рис. 2. Зависимость меры согласованности оценок 17 факторов от числа наиболее согласованных друг с другом экспертов

Таблица 5

Рейтинг факторов по согласованности их оценок экспертами

Число экспертов, участвовавших в опросе	20	17	14
Факторы в порядке убывания согласованности их оценок экспертами	7, 15 8 9 14 17 1 13, 14 4 5 11 12 3 2 16 6, 10	7 15 8 9 8 9 13, 14 1, 4 11 5 12 2 3 10 16 6	1, 5 9 5 8 4, 13, 14 17 1 11 12 16 3, 6 2 2 16 6

Таблица 6

Рейтинг факторов по их значимости, оцененной экспертами

Число экспертов, участвовавших в опросе	20	17	14
Факторы в порядке убывания их значимости по оценкам экспертов	8 14 1 5 12 9 4 7, 15 17 11 13 6 2 16 3 10	8 1 14 5 4, 12 9 7 15 17 11 13 6 2 16 10 3	8 5 14 1 4, 12 9 7 17 11 13 6 2, 10, 16 3

Как следует из табл. 5–6, с достаточной достоверностью можно считать наименее важными факторы 2, 3, 6, 10 и 16, которые могут не рассматриваться далее. Отбор наиболее значимых факторов и их использование

при оценке степени экологической опасности объектов антропогенного воздействия на окружающую среду позволяет повысить обоснованность результатов оценочных работ и снизить трудоёмкость их выполнения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семячков А. И., Игнатьева М. Н., Литвинова А. А. Вывявление и типология последствий воздействия горнопромышленных комплексов на окружающую среду. Екатеринбург: ИЭУрОРАН, 2008. 90 с.
2. Воин М. И. Геохимическая составляющая экологии горнорудных районов. М: Геоинформарк, 1992. 44 с.
3. Емлин Э. Ф. Техногенез колчеданных месторождений Урала. Свердловск: Изд-во Урал. ун-та, 1991. 253 с.
4. Косолапов О. В., Игнатьева М. Н., Литвинова А. А. Формирование экономического ущерба, обусловленного последствиями воздействия горнопромышленного комплекса на окружающую среду // Экономика региона. 2013. № 33. С. 158–166.
5. Игнатьева М. Н., Литвинова А. А., Косолапов О. В. К методическому обеспечению прогнозирования

экологических последствий воздействия добычи нефти и газа в северных регионах // Изв. вузов. Горный журнал. 2011. № 7. С. 70–76.

6. Экономическая оценка вреда, причиняемого арктическим экосистемам при освоении нефтегазовых ресурсов / М. Н. Игнатьева [и др.] // Экономика региона. 2014. № 1. С. 102–111.

7. Экспертные оценки в социологических исследованиях / С. Б. Крымский [и др.]. Киев: Наукова Думка, 1990. 320 с.

Косолапов Олег Вениаминович – кандидат экономических наук, руководитель Управления Росприроднадзора по Республике Хакасия. 655012, Республика Хакасия, г. Абакан, ул. Хакасская, 21. E-mail: nedra1958@mail.ru

Власова Людмила Витальевна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет.

СОЦИОЭКОСИСТЕМНЫЙ ПОДХОД КАК ОТРАЖЕНИЕ СПЕЦИФИКИ ОСВОЕНИЯ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ

Логинов В. Г., Игнатьева М. Н., Душин А. В., Полянская И. Г.

В статье раскрывается сущность социоэкосистемного подхода, базирующегося на наиболее полных знаниях об экосистемах и этносе, населяющем арктические территории. Обосновывается перечень основополагающих принципов, отражающих условия его реализации. Доказывается наличие тесной взаимосвязи с геоэкологическим и социально-экономическим подходами, а также целесообразность рассмотрения данного подхода в качестве одного из инструментов равновесного природопользования.

Ключевые слова: экосистемы; коренное малочисленное население Севера; освоение; баланс интересов.

Угроза экологического кризиса при расширении масштабов промышленно-транспортного освоения арктических территорий, последствия которого в первую очередь окажут негативное влияние на жизнедеятельность коренного малочисленного населения Севера (КМНС), предопределяет изменение отношения к учету экологического фактора с позиции защиты традиционного природопользования, т. е. дополнения экосистемного подхода (ориентированного на сохранение продуктивного потенциала экосистем, снижение темпов утраты биологического разнообразия [1]) социальным, признания неизбежности социализации, заключающейся в обогащении экологической деятельности социальными качествами и целями.

Проявлением отрицательных последствий, связанных с техногенным освоением территории, являются:

- захламление, затопление и подтопление земельных участков;
- активизация криогенных процессов;
- деградация естественных кормовых угодий;
- истощение охотничьих и рыбных ресурсов;
- химическое загрязнение окружающей среды, дополнение «прошлого экологического ущерба» постоянным текущим поступлением загрязнителей;
- снижение прироста лесных массивов и т. д.

Эти последствия представляют прямую угрозу для КМНС в силу снижения природно-ресурсного потенциала традиционной сферы природопользования, сужения поля деятельности традиционных отраслей, роста числа неработающих в силу подрыва стимулов к участию в трудовой деятельности, роста темпов миграции из-за вынужденного переселения с земель в случае их изъятия для промышленных нужд и др. Ухудшается качество жизни КМНС, растет число заболеваний и смертности, размываются культурные традиции, ухудшается структура досуга [2–4]. Охрана «здоровья» экосистем должна рассматриваться в совокупности с проблемой обеспечения необходимых условий для дальнейшего хозяйства и культуры.

Социоэкосистемный подход предлагается рассматривать как средство управления антропогенной деятельностью по освоению природных ресурсов территории и её социально-экономическому развитию, основанное на наиболее полезных знаниях об экосистемах и этносе, населяющем арктические территории, с целью обеспечения долгосрочного сохранения «здоровья» и устойчивости экосистем, а также сохранения традиционного природопользования и жизнедеятельности КМНС. В схематичном виде сущность социоэкосистемного подхода представлена на рис. 1.

Социоэкосистемный подход служит отражением специфических условий северных территорий («хрупкие» экосистемы, слабо

устойчивые к антропогенному воздействию, и КМНС, образ жизни которого очень тесно связан с природой и невозможен без сохранения природной базы традиционных

промышленств). Он предполагает равновесие природопользования, сбалансированность природоёмкости техносфера (производства) территории и экологической техноМкости

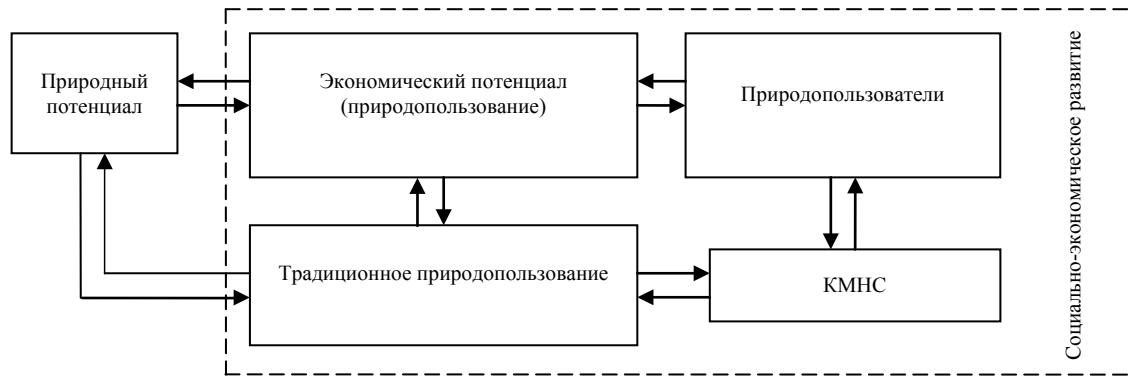


Рис. 1. Структурная схема социоэкосистемного подхода

(обобщенная характеристика территории, отражающая самовосстановительный потенциал природной системы) [5]. При оценке природоёмкости учету подлежит и антропогенное воздействие, связанное с традиционным природопользованием, которое, по сути, является равновесным, согласующимся с концепцией биосферосовместимости в общей стратегии экосистемно-ориентированного природопользования.

Использование природного потенциала осуществляется в процессе хозяйственного освоения и традиционного природопользования, целевая направленность которых различается. При хозяйственном освоении природного потенциала природопользователи нацелены на максимизацию прибыли, что зачастую сопровождается нерациональным хищническим использованием природных ресурсов и ассимиляционного потенциала территории, нарушением традиционного образа жизни КМНС, сужением области их трудовой деятельности, снижением продолжительности жизни и т. д. В то же время целью традиционного природопользования является удовлетворение потребности КМНС в продуктах потребления, что исключается нарушением экологического равновесия. Обязательным условием реализации социо-экосистемного подхода является согласование интересов КМНС и природопользователей в

части освоения природных ресурсов. Интересы субъектов заключаются с одной стороны в удовлетворении потребностей с помощью получаемых благ, с другой стороны – в справедливом распределении благ. Структурная схема понятия «интерес» отражена на рис. 2.

Формирование интереса включает совокупность приемов, операций, процедур, выполнение которых обеспечивает равновесное природопользование, сохранность биоразнообразия, создание условий для жизнедеятельности КМНС. Обеспечение баланса интересов природопользователей и КМНС – специфическая особенность северных, арктических территорий. Оно требует:

- выявления интересов природопользователей (хозяйственников) и КМНС;
- обоснования способов (вариантов) удовлетворения интересов, стоимостной оценки каждого из рассматриваемых вариантов;
- оценки результативности достижения баланса интересов.

Основополагающие принципы социоэкосистемного подхода, отражающие специфику функционирования «хрупких» экосистем Севера и коренных сообществ в арктических условиях, сводятся к следующим:

- выявление, оценка и анализ всех возможных последствий, в т. ч. долгосрочных, принятия управленических решений по вмешательству в экосистемы территории;

– тщательное изучение взаимосвязей экосистем (ландшафтов) и выяснение «слабых мест» в их структуре, т. е. оценка устойчивости экосистем к внешним воздействиям;

– ориентация на предотвращение или снижение ущербов, причиняемых биоразно-

образию хозяйственной деятельности при одновременном сохранении или создании благоприятных условий для жизнедеятельности человека, в т. ч. КМНС;

– учет сопряженности экосистем с учетом того, что воздействие, направленное на дан-

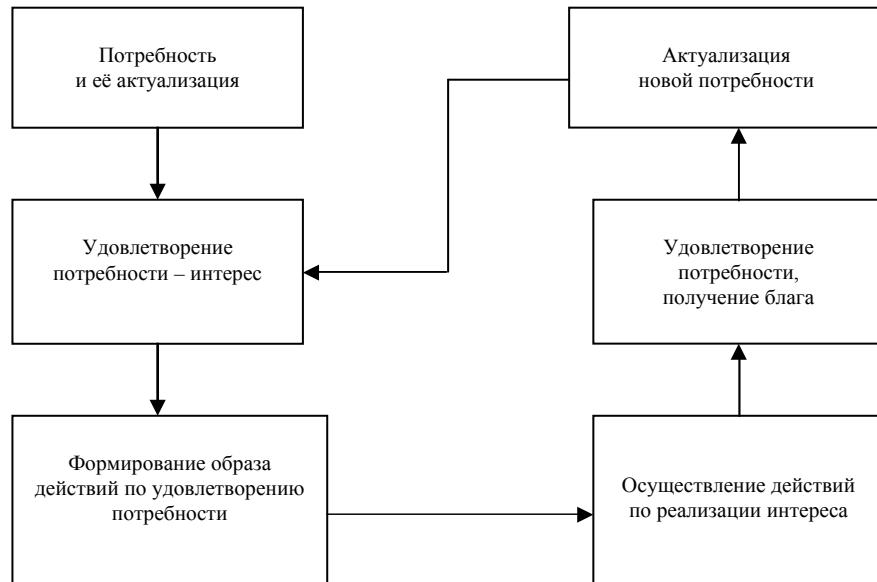


Рис. 2. Структурная схема понятия «интерес»

ный природный объект, не замыкается в его пределах, и этот объект выступает как «вход» в экосистему более высокого ранга, что требует исследования цепных реакций в экосистемах;

– признание приоритетности для существования КМНС традиционного природопользования, удовлетворяющего в первую очередь его потребность в предметах потребления;

– рассмотрение вопросов использования компонентов биологического разнообразия в тесной увязке с вопросами их охраны через систему создания особо охраняемых природных территорий;

– многокритериальность при выборе окончательного управленческого решения в части природопользования, предполагающая учет экономической, экологической и социальной целевых установок, при выделении из числа социальных установок – этнических, имеющих самостоятельную значимость и отражающих интересы КМНС;

– интеграция с другими методологическими подходами по сохранению и использо-

ванию природного капитала, в т. ч. в рамках этнических территорий [6, 7];

– соблюдение баланса интересов между КМНС и пользователями природных ресурсов в границах территорий, которые являются родовым местом проживания последних.

Реализация основополагающих принципов социоэкосистемного подхода требует выполнения ряда обязательных условий, связанных, во-первых, с изучением экосистем территории, выявлением их «узких мест», определяемых устойчивостью последних к антропогенному воздействию, что предполагает обращение к геоэкологическому подходу, предусматривающему изучение взаимоотношений целостных объемов (геосистем) с материальной средой и отдельным процессом этой среды в интересах устойчивого развития общества. Комплексные геоэкологические исследования нацелены обычно на получение информации, необходимой для предотвращения, минимизации или ликвидации неблагоприятных последствий антропогенной деятельности [8, 9]. Второй аспект – это наличие

взаимосвязей с социально-экономическим подходом, который допускает получение экономического выигрыша лишь при соблюдении социальных стандартов жизни общества и экологических ограничений, обеспечивающих экологическое равновесие, что требует учета всего спектра последствий освоения природных ресурсов и многокритериального подхода к выбору управленческих решений [10].

Как следует из вышесказанного, рассматриваемый подход позволяет добиться консенсуса в части природопользования между природопользователями и КМНС, что обес-

печивает выполнение условия устойчивого равновесного природопользования в отношении справедливого распределения получаемых благ и поддержания условий для нормальной жизнедеятельности населения. В то же время данный подход нацелен на сохранение целостности экосистем, биологического разнообразия, обеспечивающего их устойчивость, экобаланса территории, что становится возможным лишь при равновесном природопользовании. С этих позиций он может рассматриваться в качестве одного из инструментов равновесного природопользования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перелет Р. А. Экосистемный подход для управления природопользованием и природоохранной деятельностью // Экономика природопользования. 2006. № 3. С. 3–19.
2. Логинов В. Г. Социально-экономическая оценка развития природно-ресурсных районов Севера. Екатеринбург: ИЭУрОРАН, 2007. 311 с.
3. Логинов В. Г., Балашенко В. В. Природно-ресурсный и рекреационный потенциал Уральского Севера: оценка и последствия освоения. Екатеринбург: ИЭУрОРАН, 2013. 232 с.
4. Логинов С. В. Оценка социально-экономических последствий освоения минеральных ресурсов в ареалах проживания малочисленных народов Севера: автореф. ... канд. экон. наук. Екатеринбург, 1999. 25 с.
5. Акимова Т. А., Хаскин В. В. Экология. Человек–экономика–биота–среда. М.: ЮНИТИ, 2006. 495 с.
6. Татаркин А. И., Игнатьева М. Н. Геоэкоциоэкономическая модель системного освоения природных ресурсов // Проблемы теории и практики управления. 2015. № 9. С. 8–16.
7. Экологические границы освоения природно-ресурсного потенциала Арктической зоны Российской Федерации в социально-экономическом развитии / А. И. Татаркин [и др.] // Современные производительные силы. 2015. № 3 (спецвып.: Арктика. Стратегия и приоритеты развития). С. 143–163.
8. Казаков Л. К. Ландшафтovedение. М.: Изд. центр «Академия», 2011. 336 с.
9. Комарова Н. Г. Геэкология и природопользование. М.: Изд. центр «Академия», 2010. 256 с.
10. Козаков Е. М., Пахомов В. П., Игнатьева М. Н. Социально-экономическое обоснование освоения минеральных ресурсов. Екатеринбург: ИЭ УрО РАН, 1992. 112 с.

Статья подготовлена в рамках и при финансовой поддержке проекта № 15-14-7-13 «Сценарные подходы к реализации уральского вектора освоения и развития российской Арктики в условиях мировой нестабильности», выполняемому в рамках программы Уральского отделения РАН № 14 (распоряжение УрО РАН от 03.11.2015 г. № 52).

Логинов Владимир Григорьевич – доктор экономических наук, доцент, зав. сектором Центра природопользования и геоэкономики. 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29, Институт экономики УрО РАН. E-mail: log-wg@rambler.ru

Игнатьева Маргарита Николаевна – доктор экономических наук, ведущий научный сотрудник Центра природопользования и геоэкономики. 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29, Институт экономики УрО РАН. E-mail: rinis@mail.ru

Душин Алексей Владимирович – доктор экономических наук, доцент, старший научный сотрудник Центра природопользования и геоэкономики. 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29, Институт экономики УрО РАН. E-mail: dushin.a@list.ru

Полянская Ирина Геннадьевна – кандидат экономических наук, доцент, зав. сектором Центра природопользования и геоэкономики. 620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29, Институт экономики УрО РАН. E-mail: Irina-pol2004@mail.ru

ABSTRACTS AND REFERENCES

EARTH SCIENCES

Natural-technical systems as the universal systems of interaction of engineering structures and natural environment / Gryaznov O. N.

Universal system of interaction of engineering structures and natural environment illustrated by natural-technical systems in Ekaterinburg (Sverdlovsk region, Russia): deposit of solid minerals and mining enterprise; geological environment and high building.

Keywords: *natural-technical system; natural environment; engineering construction; the interaction region; conditions; components; options.*

Gryaznov O. N. – Ural State Mining University. Ekaterinburg, Russia.

Remediation of contaminated soils with using modified peat ameliorants / Grevtsev N. V., Shamparov A. G., Yakupov D. R.

The main question of the article is the remediation of oil-contaminated waterlogged soils using a modified peat soil ameliorant. The using of peat and sewage sludge in remediation of oil-contaminated soil is substantiated. Investigated are researches of sorption properties and destructive abilities of ameliorants to hydrocarbon oil in various compositions of upland and lowland peat with the addition of different ratios of sewage sludge. To obtain the necessary technological properties we used a granulation method. In the process of granulation we got the homogeneous mixture of peat and sewage sludge, impacting on the stable operation of the screw granulator and using as reinforcing the finished product. Upon completion of the destruction of oil hydrocarbons we investigated researches for heavy metal content in the green mass of inoculated rye.

Keywords: *remediation; peat; sewage sludge; peat ameliorant; oil pollution.*

Grevtsev N. V. – Ural State Mining University. Ekaterinburg, Russia.

Shamparov A. G. – JSC «Uralgiprotorf». Ekaterinburg, Russia.

Yakupov D. R. – Labour protection Research Institute. Ekaterinburg, Russia.

Using of metals and mining industrial wastes for the environmental management / Bobrova Z. M., Ilyina O. Yu., Hohryakov A. V., Tseitlin E. M.

There are analysed formation and way to use wastes in large metallurgical enterprises of Russia. It is seems irrational to use wastes only as packing material for the remediation of waste pits. There is given an example of foreign experience in this area. The directions of use of metallurgical slags are given.

Keywords: *metallurgical wastes; environmental management; remediation of waste dumps; impact on the environment; the use of metallurgical slags.*

Bobrova Z. M., Ilyina O. Yu. – Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia.

Hohryakov A. V., Tseitlin E. M. – Ural State Mining University. Ekaterinburg, Russia.

Ecological consequences of long-term storage of technogenic objects like “Dumps of the

Allarechensk field” (the Pechengsk area of Murmansk region) / Boltrov V. B., Seleznyov S. G., Storozhenko L. A.

The environmental pollution spread from the wastes of mining enterprises in places of their accumulation is illustrated by technogenic object on Allarechenskoe deposit (the Pechengsky region of Murmansk region, Russia). Described are processes of change of chemical and mineralogical composition of the ores, bringing not only to environmental degradation, but also to considerable depreciation of technogenic object as a source of mineral resources.

Keywords: *technogenic object; mining waste; copper-nickel sulphide ores; technogenic strain; ecosystem degradation; reserves inflation.*

Boltrov V. B., Seleznyov S. G., Storozhenko L. A. – Ural State Mining University. Ekaterinburg, Russia.

Scattering of pressure waves by limited subject with internal stresses / Sournev V. B., Islamgaliev D. V.

The article describes the mathematical model of scattering of pressure (seismic) waves by prestressed limited heterogeneity. We derived the integral equations that generalize known equations of the scattering theory of pressure waves in the case of prestressed heterogeneity, without using the general wave theory in a prestressed area. The algorithm for the numerical simulation of elastic waves scattering implements to obtained integral equations.

Keywords: *heterogeneous medium; scattering theory; elastic waves; integral equations; prestresses.*

Sournev V. B., Islamgaliev D. V. – Ural State Mining University. Ekaterinburg, Russia.

Theory of calculation of slopes and grounds stability. Analysis, characterization and classification of existing methods for calculating the slopes stability / Zhabko A. V.

The paper presents and offers to the use of a fundamentally new theory for calculating the stability of slopes and grounds, designed by the author and based on fundamental theorems and principles of mechanics, such as the principle of possible movements by Lagrange, the principle of least constraint by Gauss, the theorem of smallest lost job by Ostrogradsky and so on. The basis of mathematical apparatus of our theory are variative, differential and integral calculations. Drawing on a theory there are developed methodics for calculating the stability of slopes for almost conditions of any complexity: homogeneous, heterogeneous, anisotropic, watered slopes, slopes on weak oblique contact, on gently sloping ground undermined and karst slopes, laden slope, slope of disconnected rocks on a different basis.

Keywords: *slope; limit equilibrium method; method of limiting stress state; the equilibrium condition; sustainability; extremum of the functional; differential equation; sliding surface; anisotropy; heterogeneity; angle fracture; undermined slope; stability of waste dumps; weak ground; watering.*

Zhabko A. V. – Ural State Mining University. Ekaterinburg, Russia.

TECHNICAL SCIENCES

Separation of poor sulphide ores by electrical breakdown / Afanasiev A. I., Pankov S. A., Potapov V. Ya., Simisinov D. I., Ugolnikov A. V.

There is considered the electrothermal process of preparation of poor sulfide ores pieces size up to 100 mm for the subsequent grinding by method based on the rock destruction under the influence of

electromagnetic wave energy of electric field. The calculation results are confirmed by experimental studies. The obtained dependences allow us to conclude that the electroprocessing of poor sulfide ores can significantly reduce the amount of processing of the rock mass, to reduce energy milling, to increase the concentration of minerals.

Keywords: electrical conductivity; electric softening ores; impact fracture; sulfide ore; poor ore; grinding.

Afanasiev A. I., Pankov S. A., Potapov V. Ya., Simisinov D. I., Ugolnikov A. V. – Ural State Mining University. Ekaterinburg, Russia.

Determining of necessary depth to control drainage installations in conditions of high pressure of pumps / Petrovykh L. V., Marchenko A. Yu., Ivashenko E. P., Marchenko M. Yu., Saltanov S. N., Barinov I. M., Vikulov E. A.

Described are the problems of reducing of energy costs for mine dewatering constructions by reducing the excess pump pressure to certain tolerances. There is setting out an approach to determining of the required depth regulation of pumps at various ways of changing of supply and pressure of pumping units. Given are the dependences of the diameter of the impeller, the density of air-water mixture and the electric grid frequency in function of the excess pressure pump.

Keywords: dewatering constructions; excess pressure of pumps; determination; depth regulation.

Petrovykh L. V. – Ural State Mining University. Ekaterinburg, Russia.

Ivashenko E. P., Marchenko A. Yu., Marchenko M. Yu., Saltanov S. N., Barinov I. M., Vikulov E. A. – SJSC "Tsvetmetnaladka" (non-ferrous metals tuning). Ekaterinburg, Russia.

About the need of better accommodate the maximum water flows in project solutions of main drainage systems / Timukhin S. A., Ivashenko E. P., Marchenko A. Yu., Marchenko M. Yu., Saltanov S. N., Barinov I. M., Vikulov E. A.

The paper tells about problems connected with more full consideration of the maximum flow of water into the mine excavations in project solutions of complexes of the main drainage of flooded deep horizons of mines. Given is the data about the actual (normal and maximum) water flows in the deep horizons of mines of "Sevuralboksitruda" (Severouralsk, Sverdlovsk region, Russia). Described are the features of making project solutions that take into account the maximum inflows and increase in the end, the effectiveness of complexes of mine water outflow.

Keywords: main dewatering constructions; maximum inflows; more responsive; off-peak electricity consumption; efficiency.

Timukhin S. A. – Ural State Mining University. Ekaterinburg, Russia.

Ivashenko E. P., Marchenko A. Yu., Marchenko M. Yu., Saltanov S. N., Barinov I. M., Vikulov E. A. – SJSC "Tsvetmetnaladka" (non-ferrous metals tuning). Ekaterinburg, Russia.

Identification of basic laws of changes in the technical state of dynamic equipment such as draglines from the analysis of parameters of mechanical vibrations / Gericke P. B.

This paper presents results of analysis characteristics of vibroacoustic waves of the dynamic equipment of mining shovels and classification of defects of rotating equipment on which is substantiated the use of methods of vibration control and non-destructive testing. A set of more than 60 diagnostic rules for automated detection of major damage to property on the basis of selective frequency bands warning

systems for predictive maintenance of mining machines. The efficiency of an integrated diagnostic approach for evaluating the technical condition of the mechanisms in the parameters of mechanical vibrations. It is proved that only the widespread use of modern methods of vibration diagnostics and non-destructive testing allows early detection of equipment defects of mining shovels. This research revealed the basic laws of the changes in the technical state of the dynamic equipment such as draglines from the analysis of parameters of mechanical vibrations. The results of these researches demonstrate the need to move categorically repair and maintenance departments of industrial enterprises in the service system technology on its actual technical condition, a platform for the implementation of the basic elements of the concept which will serve as a designed complex of diagnostic rules detecting defects on the analysis of the parameters of mechanical vibrations.

Keywords: *vibration analysis; mining shovel; dynamic equipment; spectral analysis; maintenance management.*

Gericke P. B. – Institute of Coal of the Siberian Branch of the RAS, Kemerovo region, Kemerovo, Russia.

Centrifugal fans of local ventilation with energetic regulators / Makarov N. V., Soldatenko A. A., Lavryonov N. E., Makarov V. N.

The article describes the design of fundamentally new control device for centrifugal fans – energetic regulator. Given are the criteria for the similarity of the flow-fan system with energetic regulator, as well as the expression for efficiency and quality of the energetic regulator as part of the fan.

Keywords: *fan; energetic regulator; aerodynamics; flow.*

Makarov N. V., Soldatenko A. A., Lavryonov N. E., Makarov V. N. – Ural State Mining University. Ekaterinburg, Russia.

ECONOMIC SCIENCES

Integrated evaluation of projected economic losses at development the mineral resource base of northern territories / Ignatieva M. N., Loginov V. G., Litvinova A. A., Balashenko V. V., Tseitlin E. M.

The article offers a methodological approach to the evaluation of the average value of economic damage caused by the impact of human activities on the environment during the development of subsoil resources. It is recommended the appeal to the economic value of the natural resource potential of typical landscape areas, reduction of the value within generated ecological zones, the average value of the term restoration of natural resources and the period of withdrawal. The amount of environmental damage is corrected using a correction factor that reflects the value of ecosystem services, the value of which is 1,7–4,0.

Keywords: *economic damage; decrease in value; recovery; ecological zones.*

Ignatieva M. N., Loginov V. G., Litvinova A. A., Balashenko V. V. – Institute of economics, Ural branch of the Russian academy of sciences, Ekaterinburg, Russia.

Tseitlin E. M. – Ural State Mining University. Ekaterinburg, Russia.

Some results of institutional changes in the global mining industry / Dushin A. V., Sokolova O. G.

The period of adverse economic conditions, the world's leading mining companies use as to conduct the planned structural reforms and upgrades, to adjust new technologies for improving business

performance. One of the current situation characteristics is a stable tendency for strengthening the role of renewable energy including alternative energy in the energy consumption mining companies balance and the increased part of technologies of water recycling.

Keywords: mining companies; institutional change; alternative energy; technological development.

Dushin A. V., Sokolova O. G. – Ural State Mining University. Ekaterinburg, Russia.

Improving the forecast of economic damage during the development of subsoil resources /
Kosolapov O. V., Vlasova L. V.

The article explains the need to assess the stability of landscapes to anthropogenic influences and environmental hazards of companies providing exposure to enhance the reliability of the forecast consequences, and, consequently, economic losses taken into account in decision-making regarding the development of subsoil resources. Selects factors characterizing the environmental risk of a mining enterprise in the open development of mineral deposits. During mathematical processing of the material expert survey of the initial number determined 17 factors, 5 factors are eliminated. The remaining 12 factors are recommended for use as the most consistent, the results of the expert survey.

Keywords: economic damage; impacts; effects; environmental hazards; factors.

Kosolapov O. V. – Russian Environmental Control Service. Abakan, Khakassia, Russia.

Vlasova L. V. – Ural State Mining University. Ekaterinburg, Russia.

Socio-ecosystem approach as a reflection of specific development of Arctic territories /
Loginov V. G., Ignatieva M. N., Dushin A. V., Polyanskaya I. G.

The article reveals the essence of socio-ecosystem approach, based on the most comprehensive knowledge about ecosystems and ethnic groups living in the arctic territory. Substantiates the list of fundamental principles that reflect the conditions for its implementation. We prove the existence of a close relationship with the geo-ecological and socio-economic approach, as well as consideration of the feasibility of this approach as one of the tools of the equilibrium of nature.

Keywords: ecosystems; small indigenous population of the North; development; the balance of interests.

Loginov V. G., Ignatieva M. N., Dushin A. V., Polyanskaya I. G. – Institute of economics, Ural branch of the Russian academy of sciences, Ekaterinburg, Russia.

ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСЯМ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В ЖУРНАЛ «ИЗВЕСТИЯ УГГУ»

Уважаемые авторы!

Журнал «Известия УГГУ» предназначен для публикации результатов научных исследований сотрудников, аспирантов, студентов УГГУ и лиц сторонних организаций.

В редакцию необходимо предоставить:

1. Текст статьи на русском языке в электронном и печатном виде. Текст должен быть идентичен в обеих версиях. Необходимо указывать номер УДК.

2. Библиографический список. Ссылки на источники должны идти в тексте по порядку – 1, 2, 3). В тексте ссылки заключаются в квадратные скобки. Количество ссылок в тексте должно соответствовать количеству источников литературы в библиографическом списке. Упоминания ГОСТ, СНиП, правил безопасности, нормативных, законодательных и других документов рекомендуется приводить в тексте статьи, не вынося в библиографический список.

3. Аннотацию и ключевые слова. Объем аннотации должен составлять не менее 100–150 слов.

4. Сведения об авторах. Необходимо указать ФИО, должность, ученую степень и звание, место работы (учебы) с указанием полного почтового адреса, контактный e-mail, контактный телефон.

5. Рекомендацию кафедры, или члена редколлегии, или редактора по разделу (если автор статьи не имеет ученой степени).

6. Экспертное заключение о возможности опубликования.

Название статьи, аннотация, ключевые слова должны быть переведены на английский язык. Также необходима транслитерация фамилии, имени, отчества, которую Вы обычно используете.

Объем статей вместе с иллюстрациями не должен превышать 10 стр.

Оформление статей

1. Текст статьи набирается в редакторе Microsoft Word, поля документа: левое 3 см, остальные – 2,5 см. Шрифт Times New Roman, 11 кегль, одинарный интервал, абзацный отступ 0,63 см. Страницы нумеруются.

2. В тексте допускаются только общепринятые сокращения слов. Все сокращения в тексте, рисунках, таблицах должны быть расшифрованы.

3. Формулы должны быть набраны в редакторе Microsoft Equation и пронумерованы, если в тексте имеются ссылки на них.

4. При наборе формул и текста латинские буквы выделяют курсивом, а русские, греческие и цифры – прямым шрифтом.

5. Тригонометрические знаки (sin, cos, tg, arcsin и т. д.), знаки гиперболических функций (sh, ch, th, cth и т. д.), обозначения химических элементов (Al, Cu, Na и т. д.), некоторые математические термины (lim, ln, arg, grad, const и т. д.), числа или критерии (Re – Рейнольдса и т. д.), названия температурных шкал ($^{\circ}\text{C}$ – градусы Цельсия и т. д.) набирают прямым шрифтом.

6. Физические единицы приводятся в системе СИ.

Графический материал

Рисунки, карты, чертежи предоставляются в электронном и бумажном виде, в цветном и/или черно-белом исполнении. Изображения должны быть четкими, контрастными. Таблицы и схемы должны быть пригодными для правки. Таблицы и схемы, скани-

рованные как изображения, не принимаются.

На картах обязательно указывается масштаб. На чертежах, разрезах, картах должно быть отражено минимальное количество буквенных и цифровых обозначений, а их объяснение – в подрисуночных подписях. Ксерокопии и сканированные ксерокопии фотографий не принимаются. Рисунки с нечитаемыми или плохо читаемыми надписями, с подписями «от руки», слишком тонкими линиями не принимаются.

Текст в рисунках, картах, схемах, таблицах должен быть набран шрифтом Times New Roman.

Подрисуночная подпись должна быть набрана 9 кеглем и шрифтом Times New Roman, экспликация – 8 кеглем, шрифт тот же.

Основной текст в таблице набирается 9 кеглем, шрифт «Times New Roman», шапка таблицы – 8 кеглем, шрифт Times New Roman.

Внимание!

В целях поддержки развития журнала «Известия УГГУ» призываем авторов покупать бумажную версию номера журнала со своими публикациями (кроме членов редакционной коллегии журнала):

- для сотрудников УГГУ: 1 экземпляр для каждого автора публикации;
- для сотрудников сторонних организаций: 3 экземпляра для каждого автора публикации.

Цена журнала (по себестоимости) – 250 рублей.

Редакция журнала

Главный редактор Косарев Н. П.
Зам. главного редактора Грязнов О. Н.
Ответственный секретарь Шорина Э. В.
Редактор Шорин А. Г.

Подписано в печать 17.12.2015. Формат 60 × 84 1/8. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 12,5. Уч.-изд. л. 11,9. Тираж 500. Заказ № 15.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-55055

Адрес редакции: 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30,
Уральский государственный горный университет, комн. 3142.

Тел.: (343)251-15-95

E-mail: iuggu@66.ru

<http://www.ursmu.ru/science/izdatelskaya-deyatelnost/izvestiya-uggu.html>

Отпечатано в типографии
ООО Универсальная Типография «Альфа Принт»
620030, г. Екатеринбург, ул. Карьерная, д. 14