

ЖТМ

ISSN 1728-3841

*НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ*

ЖТМ

МЗШ - 6,5/45

2011 №3

**ГОРНАЯ МЕХАНИКА
И МАШИНОСТРОЕНИЕ**

ГОРНАЯ МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 3 2011

Учредитель журнала:

ЗАО «Солигорский Институт проблем
ресурсосбережения с Опытным
производством»

Редакция:

Главный редактор
Щерба Владимир Яковлевич

Заместитель главного редактора
Прушак Виктор Яковлевич

Ответственный секретарь
Заяц Ирина Михайловна

Технический редактор
Барановский Анатолий Леонидович

Редакционная коллегия:

Андрейко С.С. – доктор технических наук, проф.
Белый А.В. – доктор технических наук, проф.
Богданович П.Н. – доктор технических наук, проф.
Буря А.И. – кандидат технических наук, проф.
Голуб М.В. – доктор технических наук, проф.
Губанов В.А. – доктор технических наук
Журавков М.А. – доктор физ.-техн. наук, проф.
Захаров Ю.Н. – доктор технических наук, проф.
Зубов В.П. – доктор технических наук, проф.
Кантович Л.И. – доктор технических наук, проф.
Кислов Н.В. – доктор технических наук, проф.
Петровский Б.И. – доктор технических наук
Смычник А.Д. – доктор технических наук, проф.
Струк В.А. – доктор технических наук, проф.
Стухляк П.Д. – доктор технических наук, проф.

Адрес редакции:

Республика Беларусь, 223710,
г. Солигорск, ул. Козлова, 69
Тел.: (+375 174) 263532,
(+375 174) 282107,
факс: (+375 174) 262837
E-mail: ontipr@tut.by

Свидетельство о государственной
регистрации № 1000 от 12.01.2010

Подписные индексы:

74933 (для индивидуальных подписчиков),
749332 (для организаций)

Научно-технический журнал

Издается с декабря 1998 г.

Выходит четыре раза в год

Журнал включен в Перечень научных изданий
ВАК Республики Беларусь



Подписано в печать 15.09.2011
Формат 60×84¹/₈. Бумага «Снегурочка»
А4, 80 г/м². Гарнитура Таймс.
Отпечатано на ризографе CR-1610.
Усл. печ. л. 17,17. Тираж 240 экз. Заказ 330.

СОДЕРЖАНИЕ

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

Войтенко В.С., Силков Р.А., Смычник А.Д., Шемет С.Ф. Перспективы увеличения годовых объемов добычи нефти в Беларуси.....	5
Войтенко В.С., Халявкин Ф.Г., Оника С.Г. Защита шахтных стволов и карьеров от подземных вод инъекционными противofильтрационными завесами.....	23
Новокшонов В.Н., Дешковский В.Н., Зольников Н.А., Данилова А.Ф. Изучение техногенной трещиноватости при разработке Старобинского месторождения калийных солей столбовой системной разработки.....	29
Бабец М.А., Халявкин Ф.Г. Метод защитного армирования льдом фильтров гидрогеологических скважин.....	37
Осипов С.Н., Смычник Е.А., Шваб Р.Г. Некоторые особенности процессов разрушения пород и материалов.....	43
Березовский С.Н. Оптимальные параметры внутрикарьерных усреднительных складов на предприятиях нерудной промышленности нашей страны.....	55

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Казаченко Г.В. Движение пневматического колеса по малодеформируемой опорной поверхности.....	67
Севрук П.Н. Проблемы внедрения PLC-технологии в автоматизацию горношахтного оборудования.....	78

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Овчинников Е.В., Эйсымонт Е.И., Чекан Н.М. СВЧ-модифицирование алмазоподобных покрытий	84
Михайлова Л.В. Физические принципы формирования функциональных нанокomпозиционных материалов на основе термопластичных матриц.....	94

MINE MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

№ 3 2011

Founder of the Journal:

JSC «Soligorsk Institute for Problems
of Resources Savings with Pilot
Production»

Edition:

Editor-in-Chief

Shcherba Vladimir Yakovlevich

Deputy Editor-in-Chief

Prushak Viktor Yakovlevich

Executive Secretary

Zayats Irina Mikhailovna

Technical Editor

Baranovsky Anatoly Leonidovich

Editorial Board:

Andreiko S.S. – Ph.D., Professor

Belyi A.V. – Ph.D., Professor

Bogdanovich P.N. – Ph.D., Professor

Burya A.I. – Ph.D., Professor

Golub M.V. – Ph.D., Professor

Gubanov V.A. – Ph.D.

Zhuravkov M.A. – Ph.D., Professor

Zaharov Y.N. – Ph.D., Professor

Zubov V.P. – Ph.D., Professor

Kantovich L.I. – Ph.D., Professor

Kislov N.V. – Ph.D., Professor

Petrovsky B.I. – Ph.D.

Smychnik A.D. – Ph.D., Professor

Struck V.A. – Ph.D., Professor

Stukhlyak P.D. – Ph.D., Professor

Editorial Address:

The Republic of Belarus, 223710,

Soligorsk, Kozlova Street, 69

Tel: (+375 174) 263532,

(+375 174) 282107,

Fax: (+375 174) 262837

E-mail: ontiipr@tut.by

Certificate of State Registration

No 1000 dd. 12.01.2010

Subscriptions Indexes:

74933 (for individual subscribers),

749332 (for organizations)

Scientific and Technical Journal

Published since December, 1998

Issued four times a year

The journal is included in the list of scientific
publications of Higher Attestation Commission of
the Republic of Belarus



Signed for print 15.09.2011

Format 60×841/8. Paper «Snegurochka»

A4, 80 g/m2. Times Headset.

Printed on risograph CR-1610.

Nominal printed sheets 17,17. 240 copies. Order 330.

CONTENTS

GEOTECHNOLOGY

Voitenko V.S., Silkov R.A., Smychnik A.D., Shemet S.F. Perspectives of increase in annual volumes of the oil extraction in Belarus.....	5
Voitenko V.S., Khalyavkin F.G., Onika S.G. Protection of pit shafts and quarries from underground water by injection sealing curtains.....	23
Novokshonov V.N., Deshkovsky V.N., Zolnikov N.A., Danilova A.F. Study of industrial rock jointing by development of Starobinskoye potassium salts deposit using longwall mining.....	29
Babets M.A., Khalyavkin F.G. Method of protective ice reinforcement of the water well filters.....	37
Osipov S.N., Smychnik E.A, Shvab R.G. Some features of rock breaking and material breakage processes.....	43
Berezovsky S.N. Optimal parameters of intraquarry homogenization storehouses at the enterprises of non-metal mining in our country.....	55

MACHINE-BUILDING

Kazachenko G.V. Tire motion on small deformed support surface.....	67
Sevruk P.N. Problems of PLC-technology introduction in automation of mining equipment.....	78

MATERIALS ENGINEERING

Ovchynnikov E.V., Chekan N.M., Eisymont E.I. SHF modification of diamond-like coatings.....	84
Mikhailova L.V. Physical principles of functional nanocomposites formation based on thermoplastic matrices.....	94

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 622.016.25

**ПЕРСПЕКТИВЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ГОДОВЫХ ОБЪЕМОВ
ДОБЫЧИ НЕФТИ В БЕЛАРУСИ**

Войтенко В.С. (ООО «Белорусское горное общество», г. Минск, Беларусь),
Силков Р.А. (УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск,
Беларусь), Смычник А.Д., Шемет С.Ф. (ОАО «Белгорхимпром», г. Минск, Беларусь)

Проанализировано современное состояние нефтедобычи в мире и Республике Беларусь. Показано, что наиболее перспективным направлением является освоение новых технологий поиска, разведки и добычи нефтей разных категорий. Дана характеристика методов выявления и трехмерного картирования зон открытой микротрещиноватости на глубинах до 5000 метров, воздействия на продуктивную залежь энергией ударных волн, применения колтюбинга.

Введение

Годовые уровни добычи нефти в Беларуси за последние 40 лет характеризуются следующим образом (в млн. т): 1970 – 4,2; 1975 – 7,95; 1979 – 3,0; 1983 – 2,13; 1994 – 2,0; 1998 – 1,83; 2000 – 1,84; 2005 – 1,785; 2010 – 1,7 [1].

Форсированные темпы добычи нефти в 1970-1975 годах привели к ряду отрицательных последствий: преждевременным прорывам вод к добывающим скважинам; образованию изолированных водой участков залежей; снижению пластовых давлений и прекращению фонтанной добычи нефти; необратимым изменениям свойств нефтенасыщенных коллекторов. В результате миллионы тонн нефти в недрах не могут быть извлечены при традиционных технологиях разработки месторождений.

Основу нефтедобычи в республике составляют крупные месторождения, которые эксплуатируются с 1965-1970 гг. и в настоящее время находятся в завершающей стадии разработки. Выработанность по ним составляет более 60 %, а доля воды в извлекаемой жидкости достигает 70-80 %, а в отдельных случаях и 90 %. Снижение пластовых давлений по большинству залежей явилось причиной резкого сокращения фонтанных скважин.

Следует также отметить, что в остаточных промышленных запасах доля трудно извлекаемых высоковязких (тяжелых) нефтей составляет 48,8 % и непрерывно возрастает.

Компенсация добычи нефти приростом запасов за последние годы не превышает 60 %. Причем открываемые месторождения характеризуются небольшими запасами (до 200-300 тыс. т) с преобладанием доли трудно извлекаемых нефтей, низко проницаемых коллекторов.

При традиционных технологиях поиска, разведки и разработки нефтяных месторождений все эти факторы определяют тенденцию к падению годовой добычи нефти. Для выхода из создавшейся ситуации могут быть задействованы несколько подходов.

Первый из них заключается в наращивании добычи нефти за счет форсирования работы эксплуатационного фонда скважин и повышения темпов отбора жидкости. Однако можно однозначно констатировать, что такой подход только усугубит положение

– приведет к ситуации, аналогичной 1970-1975 гг., но с еще более серьезными негативными последствиями.

Второй путь предполагает компенсацию добычи приростом промышленных запасов: при ежегодной добыче нефти в количестве 1,8 млн. т прирост должен быть также не менее 1,8 млн. т, то есть он должен превосходить сегодняшний уровень компенсации (около 1 млн. т) примерно в два раза. При традиционных решениях и применяемых ныне в Беларуси технологиях поиска и разведки, строительства геологоразведочных и эксплуатационных скважин, а также разработки месторождений потребуются огромный объем капитальных затрат и организационно-технических мероприятий.

Так, только для обеспечения дополнительного (более 1 млн. т ежегодно) прироста запасов нефти потребуются создать геологоразведочные структуры, практически равные уже существующим в республике подразделениям. А для того, чтобы поднять добычу до требуемого уровня, необходимо будет пробурить сотни добывающих и нагнетательных скважин с общим объемом проходки более полумиллиона метров горных пород. Исходя из реальной ситуации, такой подход следует оценить как неперспективный.

Наиболее реальным и эффективным является третий подход. Здесь задачу поддержания топливно-энергетического уровня Беларуси на жизненно необходимом уровне предусматривается решить на основе научно-технического прогресса – за счет разработки и промышленного освоения высоких технологий поиска, разведки и добычи нефтей разных категорий.

В этом случае будет не только предотвращено снижение уровня добычи, но и при минимальных затратах обеспечен его рентабельный подъем. Кроме того, что особенно важно, владея такими технологиями можно было бы брать на выгодных условиях в разработку в ближнем и дальнем зарубежье месторождения нефти с трудно извлекаемыми запасами (хороший пример тому Венесуэла).

С этой точки зрения полезно рассмотреть мировые проблемы и тенденции нефтедобывающей промышленности [2].

Анализ состояния нефтедобычи в мире и тенденции нефтедобывающей промышленности

Современное мировое потребление нефти составляет 1600 млн. м³ в год, что составляет 8 % от открытых и доказанных запасов, а мировая ресурсная база традиционных месторождений равна 1557000 млн. м³, нетрадиционных месторождений (нефтеносные пески) 477000 млн. м³. Причем ресурсная база определена как количество нефти с доказанными запасами в естественном залегании. Для ее оценки принята консервативная величина средневзвешенного коэффициента извлечения нефти КИН = 22 % для открытых традиционных месторождений нефти.

Касательно нетрадиционных запасов нефти можно отметить, что только в нефтяных песках Канады и Венесуэлы (двух крупнейших скоплениях) запасы оцениваются в 477000 млн. м³; доказанные запасы равны 47700 млн. м³ и соответствуют коэффициенту извлечения нефти КИН = 10 %, достигнутому в настоящее время и ожидаемому в недалеком будущем. Огромные запасы нетрадиционной нефти в сланцах открыты повсеместно в мире, однако в лучшем случае их можно учесть как потенциальные запасы, т.к. пока не подтверждена возможность ее экономически выгодного извлечения.

В перспективе целью нефтедобычи является повышение КИН до 70 % от ресурсной базы традиционных месторождений нефти (МН) и 30-50 % нетрадиционных нефтей – сверхтяжелых, высоковязких. Единственный реальный путь достижения этой цели – повышение нефтеотдачи с применением инновационных технологий.

Целью усилий при этом является каждый дополнительный процент извлечения обширных открытых запасов нефти и добычи нефти из обрабатываемых коллекторов.

Следует отметить, что надежность поставок нефти будет зависеть от продолжающейся и нарастающей разработки месторождений Среднего Востока, Северной Африки, нетрадиционных месторождений, новых месторождений на морском шельфе и труднодоступных нефтеносных бассейнов.

Насколько конкурентоспособны современные методы повышения нефтеотдачи? Экономика поиска новых месторождений в большинстве регионов мира фактически выглядит намного привлекательнее, чем «выжимание» остатков нефти из старых выработанных месторождений. Однако эта ситуация временная. Она характерна для стран-экспортеров нефти с огромными доказанными и извлекаемыми запасами (Россия, Саудовская Аравия), и, как показывает практика, экстенсивный путь развития добычи (имеется ввиду форсированная добыча – задача как можно в более короткий срок получить максимальную прибыль) не выход из ситуации, т.к. огромное количество нефти просто по причине «аппетитов» остается в пластах.

В 2006 году средние удельные мировые затраты на разведку и разработку новых МН составили 90,6 долл/м³, подскочив за год на 29 %. Дополнительные удельные затраты на разработку высокообводненных месторождений в режиме поддержания пластового давления (ППД) путем закачки в продуктивные пласты воды или газа (создание «водяной подушки» под нефтью или «газовой шапки» над нефтью) составляют от 25,1 до 37,7 долл/м³ при удельных затратах на добычу в интервале от 18,85 до 25,1 долл/м³.

Для нетрадиционных месторождений нефти затраты на разработку в последних по времени проектах по нефтяным пескам Канады и Венесуэлы лежат в пределах от 27 до 39,3 долл/м³. Затраты на добычу равны 37,7 долл/м³ для «холодных» и 107 долл/м³ для «горячих» способов закачки в коллектор водяного пара.

В то же время затраты на разработку месторождений методами повышения нефтеотдачи равны почти 12,55 долл/м³, несколько меняясь в зависимости от месторасположения месторождения, глубины скважин, количества существующих скважин, которые можно переводить из разряда добывающих (эксплуатационных) в разряд нагнетательных, источников нагнетаемой углекислоты, вибро-волнового воздействия и другие.

Но затраты на повышение нефтеотдачи сверх обычных эксплуатационных затрат могут весьма сильно зависеть от цен на химреагенты, производство пара на природном газе (около 63 долл/м³ дополнительно добытой нефти) и примерно такие же затраты на закачиваемую в нефтеносный коллектор углекислоту. Стоит отметить в данном аспекте целесообразность использования волновых технологий как наиболее экономичных и рентабельных (необходимо лишь периодическое техническое обслуживание).

Налоговые льготы на закачку в недра углекислоты (вместо выбросов ее в атмосферу) могут в дальнейшем снизить затраты на инфраструктуру, связанную с такими процедурами и доставкой углекислоты от места производства до месторождения, особенно на морском шельфе.

Сегодня нижний предел дополнительных затрат на повышение нефтеотдачи вполне конкурентоспособен с затратами на прирост запасов, которые в 2006 году составляли в среднем 81 долл/м³ дополнительно добываемой нефти.

Дальнейшая мировая добыча нефти зависит от глобально осредненного коэффициента извлечения нефти, т.е. доли технически извлекаемой нефти от всего ее количества, находящегося в недрах (таблица 1). Первый этап добычи нефти зависит от наличия, состояния и вида природной пластовой энергии в естественном залегании.

В большинстве нефтеносных коллекторов мира наиболее распространенной движущей силой процесса добычи нефти является вытеснение ее растворенным газом, которое обеспечивает извлечение до 20 % от общего объема нефти в коллекторе.

Таблица 1 – Ожидаемые коэффициенты извлечения нефти (КИН)

Этапы и способы разработки	КИН, %
Первичные методы	
Упругий режим (нефти, воды, вмещающих пород)	<5
Самовытеснение растворенным газом	<20
Вытеснение естественной газовой «шапкой»	<30
Гравитационный дренаж (сток к скважине за счет депрессии)	<40
Естественный водонапорный режим (вытеснение подземными водами, стекающими под слой нефти)	<60
Вторичные методы	
Рециркуляция газа (закачки в коллектор отделенного на поверхности от нефти газа, также дополнительно нагнетаемого газа)	<70
Принудительное заводнение (нагнетание по контуру нагнетательных скважин воды с поверхности) и др.	
Третичные методы	
Термические (паровой прогрев пласта, внутрислоевого горение, закачка горячей воды)	<80
Смесительные (закачка углекислоты, углеводородных газов, дымовых и/или выхлопных газов). Закачка химических реагентов (полимеров, ПАВ) и др.	

Этот первичный процесс добычи обычно дополняется на раннем этапе разработки методами вторичной разработки, состоящими в повторной закачке в коллектор газа (так называемый «сайклинг-процесс» или циклический процесс) и принудительном заводнении.

По приближенной оценке, треть нефтеносных коллекторов в мире эксплуатируется на естественном заводнении за счет притока в коллектор подземных вод. Когда процессы вторичного извлечения нефти применяются с начала добычи, а это ныне обычная практика разработки новых месторождений, или позднее, в период первого этапа разработки, такой технологический режим определяют как режим поддержания пластовых давлений (ППД).

Третичные методы применимы в конце второго этапа разработки месторождения. Они могут быть тепловыми, смесительными либо физико-химическими процессами, применением которых пытаются «выжать» как можно больше оставшейся в коллекторе нефти.

Самой успешной из этих технологий для добычи нефти средней и малой плотностей является вытеснение углекислотой. Тридцатилетний опыт применения в США показывает, что после принудительного заводнения удается извлечь дополнительно от 7 до 15 % нефти в зависимости от ее вязкости, проницаемости коллектора, глубины его залегания и применяемого метода повышения нефтеотдачи.

Массированные закачки в нефтеносные пласты таких веществ, как вода или газ, повышающих естественную энергию (давление) коллектора не были нормой до 1960-х

годов. Но даже теперь для применения этих методов обычно выбирают лишь крупномасштабные коллекторы.

Более того, не все технологии повышения нефтеотдачи применимы ко всем коллекторам и типам нефти. Как следствие, много нефтяных коллекторов, особенно небольших и средних по запасам, дающих около половины мировой добычи нефти, остаются без применения вторичных методов извлечения.

Как правило, коэффициент извлечения нефти КИН = 15-20 %, соответствующий механизму самовытеснения нефти растворенными или скопившимися над ее поверхностью в коллекторе углеводородными и сопутствующими им газами, обычно служит исходной оценкой возможных объемов добычи нефти для вновь открытых месторождений до тех пор, пока не будут рассмотрены другие методы добычи. Хорошим примером завышения извлекаемых запасов служит последняя сертификация открытого на шельфе Китая нефтяного месторождения Нанлу. Вначале компания Петро-Чайна установила для него КИН 40 %, но позднее понизила его до 20 %.

В литературе приводится несколько статистических оценок возможных КИН в интервале от 27 до 35 %. Мингеологии США определило средний КИН = 40 %.

Средневзвешенный КИН для шельфа Северного моря равен 46 % наивысшее в мире значение благодаря впечатляющему применению вторичных методов разработки в течение всего срока эксплуатации месторождений. Примером одного из самых лучших месторождений является Статфиорд с КИН = 66 %.

По прогнозам, на месторождении Прадхобэй на Аляске будет достигнут КИН = 47 %, благодаря рано начатым закачкам газа и воды, вслед за которыми закачивали смешивающиеся с нефтью углеводородные газы.

Опыт разработки месторождений Северного моря показал, что из коллекторов с запоздавшей программой ППД удастся извлечь на 10 % нефти меньше, чем из месторождений, на которых такая программа применена с начала разработки.

Накопленная мировая добыча нефти еще не достигла половины извлекаемых запасов, и, хотя «сливки» нефтедобычи сняты, а остаточные (худшие по условиям залегания и качеству) запасы потребуют для добычи значительно больших усилий и затрат, широкие возможности для разработок и применения новых методов, повышения нефтеотдачи сохранятся на длительную перспективу.

Приведенный краткий анализ показывает, что решение проблемы увеличения добычи нефти в Беларуси сегодня, прежде всего, должно быть связано не с компенсацией добычи приростом запасов, а с промышленным освоением технологий, позволяющих не только резко повысить эффективность геологоразведочных работ, но и увеличить КИН (коэффициент извлечения нефти), как минимум, до 70 %.

Такие технологии в настоящее время разработаны, некоторые из них, на наш взгляд наиболее перспективные для решения обозначенной проблемы, мы рассмотрим подробнее.

Выявление и трехмерное картирование в горном массиве зон открытой микротрещиноватости на глубинах до 5000 метров

Технология, решающая одну из ключевых проблем современной нефтегазовой геологии, физически основана на регистрации на поверхности земли и оценке энергии рассеянных сейсмических и акустических волн, ранее не использовавшихся в геофизике. Она используется при решении задач оптимизации поиска, разведки и разработки нефтегазовых месторождений.

Эффективность ее достаточно убедительно иллюстрируется примером, который приведен в докладе президента РАЕН О.Л. Кузнецова [3], касающимся перспектив

применения сейсмического локатора бокового обзора – СЛБО в нефтедобывающей промышленности. Продуктом СЛБО является информация о трехмерном поле индекса открытой трещиноватости геосреды.

На основании информации о пространственном распределении трещиноватости на месторождении можно значительно сократить количество скважин, так как при этом исключается бурение скважин с нулевой и нерентабельной перспективами добычи. А разработка месторождения становится более эффективной, потому что она осуществляется на основе детальных моделей неравномерного распределения фильтрационно-емкостных свойств коллектора.

Целесообразность использования информации, получаемой с помощью «прорывной» технологии СЛБО, показана на двух примерах.

Пример первый. Сегодня компания «Славнефть» осуществляет разведку на Курумбинском месторождении (Восточная Сибирь) и бурение скважин производит только в зонах интенсивной трещиноватости, выявленных СЛБО, получая в каждой скважине притоки нефти до нескольких сотен тонн в сутки. Так, в субвертикальной зоне трещиноватости скважина № 219 дала максимальный приток нефти (около одной тысячи тонн).

Для сравнения южнее в аналогичных геологических условиях на Юрубчанском месторождении компания «ЮКОС» выполняет работы по стандартной технологии (бурение скважин по квадратной сетке 6 x 6 км). В последние годы здесь было пробурено 7 скважин (стоимостью несколько миллионов долларов каждая) и только в одной из них был получен приток нефти с дебитом ~3 т/сут.

Пример второй. В Западной Сибири на Северо-Демьяновском месторождении Тюменской нефтяной компанией целенаправленно была пробурена скважина № 30 в выявленной зоне аномально высокой трещиноватости, имеющей субвертикальную форму с корнями глубокого залегания. При этом был получен фонтанный приток нефти из баженовских отложений с дебитом ~300 т/сут, что в десятки раз превышает дебиты скважин не только на этом месторождении, но и во всем Демьяновском нефтедобывающем районе из баженовских отложений.

Эти примеры – достаточно наглядное сопоставление результатов применения «прорывной» и стандартной технологий.

Колтюбинговые технологии

В нефтегазовом комплексе к «прорывным» технологиям можно однозначно отнести и колтюбинговые, которые позволяют коренным образом изменить подходы не только к поиску, но и к добыче нефти и газа [4].

Их привлекательность обеспечивается коммерческим успехом, техническим, экономическим, экологическим и социальным эффектом.

Коммерческий успех – предопределяется многофункциональностью колтюбинговых установок, позволяющих успешно удовлетворять самые различные требования заказчика. Сегодня с их помощью в нефтегазовом комплексе можно осуществлять более сотни разнообразных операций при исследовании, капитальном ремонте и бурении скважин.

Технический эффект – обеспечивается возможностью проведения внутрискважинных работ без предварительного их глушения, исключения присущих традиционным методам трудоемких работ при СПО; возможностью выполнения различных работ в сильно искривленных скважинах и успешностью бурения на депрессии боковых, дополнительных и горизонтально-разветвленных стволов, а также закачивания скважин с сохранением коллекторских свойств нефтегазовых пластов.

Экологический эффект – заключается в уменьшении вредного воздействия на биосферу за счет обеспечения герметичности циркуляционной системы, уменьшения

объемов буровых растворов и рабочих жидкостей, резкого уменьшения опасности возникновения открытых нефтегазовых фонтанов.

Экономический эффект – убедительно иллюстрируется следующими примерами из промышленной практики.

Так, применение колтюбинговых технологий позволяет повысить в 2...10 раз производительность труда и снизить себестоимость работ на большом круге операций внутрискважинных работ. Наиболее значительный эффект наблюдается при колтюбинговом бурении. Возможность вскрытия продуктивных пластов на принципах депрессии позволяет сохранять их природные коллекторские свойства, чем обеспечивается многократное (в 5-10 и более раз) увеличение дебитов скважин.

Особенно перспективным является применение колтюбинговых агрегатов при бурении боковых и горизонтально-разветвленных дополнительных стволов при восстановлении бездействующих и малодобитных скважин на поздней стадии разработки истощенных месторождений, вовлечения в разработку трудноизвлекаемых запасов и возврата на уже отработанные нефтегазовые залежи.

По имеющейся оценке применение колтюбинговых технологий позволяет уже сегодня вовлечь в разработку значительную часть, а в перспективе – практически все забалансовые запасы углеводородов и дополнительно добывать только в России до 50 млн. тонн нефти и до 30 млрд. м³ газа ежегодно.

Еще одно весомое преимущество – зачем бурить новую скважину, если можно «реанимировать» старую, затратив при этом гораздо меньше ресурсов? То есть расконсервирование скважин и бурение из них на депрессии один из самых перспективных вариантов использования колтюбинговых технологий. При традиционных подходах в недрах на отработанных или находящихся на поздних стадиях разработки нефтяных месторождений остаются огромные (70-80 %) запасы углеводородов. По имеющейся оценке только в США количество неизвлеченной нефти из таких месторождений составляет 218 млрд. баррелей. При решении проблемы доступа к этим запасам американские ученые пришли к выводу, что наиболее выгодный путь заключается в бурении микроскважин (диаметром менее $4\frac{3}{4}$) между существующими и из стволов ранее пробуренных и отработанных скважин. Есть примеры бурения более сотни боковых стволов диаметром $2\frac{1}{2}$ из существующей многоствольной скважины с увеличением дебита нефти с 3000 до 8000-10000 баррелей в сутки.

Увеличение дебитов нефтяных скважин с использованием энергии ударных волн

Среди способов, применяемых для восстановления производительности нефтяных и увеличения приемистости нагнетательных скважин особенно привлекательны (из-за простоты применения и относительно низкой себестоимости) гидрофизические, в частности, базирующиеся на принципах использования энергии ударных волн.

Ударные волны являются частным случаем упругих волн большой амплитуды, фаза сжатия которых распространяется с большей скоростью, чем фаза растяжения. Основное свойство волн, независимо от их природы, состоит в том, что в форме (виде) волн осуществляется перенос энергии без переноса вещества. Упругая энергия (энергия звука) передается по акустическим волноводам, представляющими собой каналы с четкими границами в виде стенок, свойства которых резко отличаются от свойств внутренней и наружной сред или каналы, возникающие за счет резкой разницы свойств внешней и внутренней сред.

Во всех этих случаях поток энергии во внешнюю среду, как правило, незначителен, и им можно пренебречь. Буровая скважина является наглядным примером акустического волновода.

В скважине с зацементированной обсадной колонной распространяются те же типы волн, что и в открытом стволе. Обсадная колонна и цементное кольцо представляют собой два тонких слоя на поверхности стенки скважины, толщина которых много меньше длин продольных и поперечных волн.

Энергетической характеристикой упругих (звуковых) волн является интенсивность звука – энергия, переносимая звуковой волной через единицу поверхности, перпендикулярную направлению распространения волны в единицу времени. Интенсивность звука зависит от амплитуды звукового давления, свойств среды и формы волны.

При распространении звуковой волны в заданном направлении происходит постепенное ее затухание; то есть уменьшение интенсивности и амплитуды. При этом поглощение звука заметно возрастает с увеличением его частоты. Поэтому высокочастотный ультразвук (частота выше 20000 Гц) и гиперзвук (частота в диапазоне от 10^9 до $10^{12} - 10^{13}$ Гц) распространяются, как правило, лишь на очень малые расстояния, часто всего на несколько сантиметров.

В атмосфере, в водной среде и земной коре дальше всего распространяются низкочастотные инфразвуковые волны (частота ниже 16 Гц). Исследования подтверждают, что при воздействии низкочастотными ударными волнами импульсы давления распространяются в пласте на 500 метров, а в некоторых случаях до нескольких километров от источника излучения. Воздействие на пласт мощными ударными волнами с частотой 0,5–80 Гц перекрывает весь спектр резонансных частот практически всех типов коллекторов.

Гидроудары, согласованные по частоте повторения со скоростью ударной волны и глубиной скважины, способны раскачать столб жидкости до получения периодических перепадов давления на забое в десятки и сотни МПа. Чем больше скорость движения жидкости, ее плотность, а также скорость распространения ударной волны (больше «жесткость» волновода), тем больше величина ударного повышения давления:

$$P_{\text{удар}} = w \cdot \rho \cdot C_{\text{удар}},$$

где w – скорость жидкости до остановки;

ρ – плотность жидкости;

$C_{\text{удар}}$ – путь ударной волны за одну секунду (скорость ударной волны).

В жидкостях распространяются только продольные волны, а в твердых средах – продольные и поперечные. Их природа определяется колебаниями частиц среды относительно направления распространения волны. В продольной волне частицы колеблются в направлении распространения волны, в поперечной – перпендикулярно ему.

Так как плоскость, перпендикулярная направлению распространения волны, имеет две координаты, то поперечная волна может быть поляризована двояко. Поляризуемость волны проявляется в анизотропных средах, к которым могут быть отнесены практически все продуктивные коллекторы. Например, в трещиноватых породах скорость распространения волны и ее интенсивность больше вдоль преобладающей системы трещин (трещины гидравлического разрыва пласта) и меньше в направлении, перпендикулярном трещиноватости.

При циклическом ударном воздействии в зоне перфорационных отверстий происходит отрыв отложений от стенок поровых каналов. Волны сжатия, многократно отражаясь, трансформируются в волны растяжения, которые способствуют развитию и образованию новых трещин, а также превращению субкапиллярных пор в капиллярные.

Перепады давления при импульсном воздействии изменяются попеременно по величине и направлению, в результате чего жидкость перемещается из застойных зон и каналов в зоны активного дренирования.

Генерируемые в пласте колебания должны по возможности соответствовать частоте естественных колебаний скелета породы и насыщающих флюидов [4]. Такие колебания вызывают несколько эффектов, отражающихся на жидкостях и находящихся в пласте газах. Они снижают когезионные и адгезионные связи, значительно уменьшают проявление капиллярных сил, слипание между породой и жидкостью, способствуют стимулированию группирования нефтяных капелек в потоки, облегчая течение углеводородов в пористой среде.

Упругие волны способствуют развитию в пласте осциллирующей силы, что приводит к разным ускорениям пластовых флюидов (нефти, воды, газа) из-за различия их плотностей. Между жидкими фазами развивается поверхностное трение в связи с разными ускорениями, что способствует выделению теплоты, которая, в свою очередь, снижает их поверхностное натяжение.

Благодаря колебаниям освобождается заземленный газ, способствующий проявлению эффекта газлифта в скважине. Осциллирующая сила развивает дополнительное колебательное звуковое давление, также способствующее продвижению нефти к скважине.

Энергия, распространяющаяся в продуктивном пласте в виде упругих волн, изменяет контактный угол между жидкостями и породой, уменьшая гидравлический коэффициент трения. Тем самым облегчается их течение в направлении скважин, дебиты которых возрастают и перепады давления в призабойной зоне пласта увеличиваются.

Создание перепадов давления способствует не только очистке поровых каналов пласта, но и разрушению его скелета. Механизм разрушения может быть представлен следующим образом.

Известно, что для разрыва нетрещиноватых пород, слагающих практически все типы нефтегазовых коллекторов, необходим градиент давления примерно 20-30 кПа/м, а трещиноватых – 10-15 кПа/м. Повышение давления приводит к расширению существующих трещин коллектора и образованию новых. Спад давления сопровождается их смыканием. Повторяющиеся деформации способствуют усталостному разрушению породы и выкрашиванию фрагментов пласта, имеющих низкую проницаемость. Изменение скорости и направления движения жидкости в зоне питания скважины при изменении давления на стенки продуктивного пласта позволяет использовать радиальные и тангенциальные силы, подвергать породу пласта воздействию напряжений сжатия, растяжения, изгиба и сдвига, то есть расшатывать, выламывать и выкрашивать ее частицы. Оторванные твердые частицы в струе жидкости являются абразивом и могут выполнять функции проппанта.

Следует обратить внимание еще на одно немаловажное обстоятельство. Нефть, как и все структурированные среды, обладает свойством тиксотропии, которое заключается в том, что при встряхивании среды происходит резкое снижение ее вязкости из-за разрушения структурного каркаса. Это явление, несомненно, может быть с высокой эффективностью использовано в практике увеличения нефтеотдачи пластов. Таким образом, при одновременной обработке мощными ударными волнами определенного числа скважин, в том числе и нагнетательных, на месторождении можно достигнуть две цели: во-первых, расширить контуры питания скважин за счет увеличения проницаемости коллектора и, во-вторых, улучшить фильтрационную способность самой нефти (за счет снижения ее вязкости). В итоге, такое воздействие может привести не только к увеличению дебитов скважин, но и к повышению коэффициента извлечения нефти в целом по месторождению.

Изложенное было положено ПКФ «Недра-С» в основу рассматриваемой ниже технологии. На первом этапе ее реализации осуществляется специальный комплекс исследований, направленных на выявление реального состояния геосреды объекта волнового воздействия, с использованием приборов: ГКА (гамма-каротаж), МТА (манометр-термометр), МИД-НМА (магнитоимпульсный дефектоскоп-толщиномер), ТК ГАК (трехкомпонентный геоакустический каротаж). Следует подчеркнуть, что ТК ГАК самостоятельно или в комплексе с другими методами позволяет решать обширный круг задач при интенсификации притоков, оценке технического состояния скважин и контроле над разработкой нефтяных, газоконденсатных и газовых месторождений, что убедительно иллюстрируется данными, приведенными в таблице 2 и на рисунке 1.

Физической основой ТК ГАК являются геоакустические шумы, а именно – колебания среды в диапазоне частот 100-5000 Гц, которые генерируются при движении пластовой воды, нефти, газа или их смесей через пустоты за обсадными колоннами, перфорационные отверстия или негерметичные соединения подземного оборудования.

Колебания в диапазоне частот 100-5000 Гц проходят через сталь, газ, жидкость и упругие среды. При этом в диапазоне частот 100-500 Гц обнаруживается движение высокопластичных пород и пластовой воды. В диапазоне частот 500-5000 Гц происходит вибрация при движении углеводородов (вибрация в частотном диапазоне 500-1500 Гц соответствует движению жидких углеводородов, а в диапазоне 2500-5000 Гц – движению газа).

Из всех дополнительных геофизических методов ТК ГАК в настоящее время является наиболее информативным и позволяет решать многие геологические, технологические и технические вопросы при строительстве скважин и разработке месторождений.

Таблица 2 – Задачи, решаемые с помощью трехкомпонентного геоакустического каротажа

№ п/п	Формулировка задачи	Комплекс геофизических исследований
1	Определение характера насыщения пластов-коллекторов как в открытых, так и в обсаженных стволах	ТК ГАК, термометрия
2	Определение флюидоотдающих интервалов (профиль потока), текущего нефтегазонасыщения	ТК ГАК, термометрия
3	Определение поглощающих интервалов промывочной жидкости в открытом стволе	ТК ГАК, термометрия, манометрия
4	Определение негерметичности промежуточных и эксплуатационных колонн, их башмаков, муфт ступенчатого цементирования и других элементов подземного оборудования, а также толщин стенок колонны и дефектов (нарушений), если они имеются в наличии	ТК ГАК, магнитоимпульсная дефектоскопия-толщинометрия
5	Определение текущего местоположения контактов нефть – вода, нефть – газ, газ – вода	ТК ГАК
6	Определение интервалов активного воздействия высокопластичных пород (солей, увлажненных глин) на обсадные колонны	ТК ГАК, магнитоимпульсная дефектоскопия-толщинометрия
7	Определение интервалов заколонных и межколонных перетоков жидкостей, газов и их смеси	ТК ГАК, термометрия
8	Определение местоположения скопления углеводородов в межколонных и заколонных пространствах	ТК ГАК, термометрия

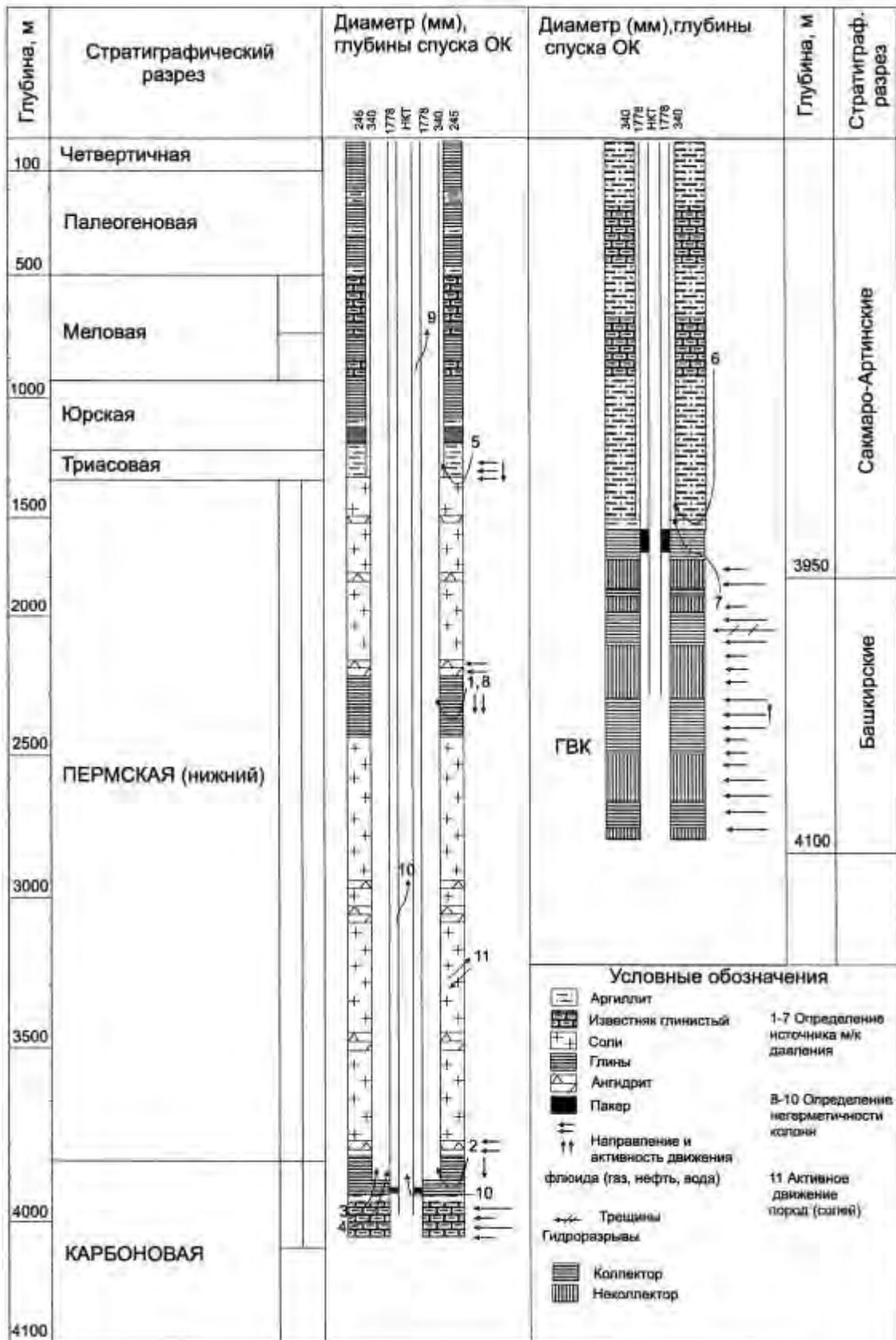


Рисунок 1 – Пример геологического разреза

Этот метод – единственный, позволяющий определять через насосно-компрессорные трубы (НКТ) и обсадные колонны (ОК) источники межколонных давлений, направление движения перетоков, проверить на герметичность ОК, НКТ, бурильные трубы и получить реальную информацию о состоянии геосреды в околоскважинной зоне.

После анализа результатов исследований по первому этапу и установлению целесообразности, приступают к волновой обработке выбранного объекта с помощью генератора силовых волн УГСВ-3 производственно-коммерческой фирмы «Недра-С», техническая характеристика которого представлена в таблице 3.

Генератор силовых волн, смонтированный на устье скважины, по волноводу (НКТ, которые позволяют создавать неразрывный поток жидкости при любых ее уровнях в скважине), заполненному технологическим раствором (рабочим агентом), посылает волну сжатия заданной направленности (рисунок 2).

Сформированная волна проходит по волноводу, разворачивается на отражателе и попадает в пласт. Она продвигается по пласту одновременно с жидкостью, которая подается ЦА-320. Обработка пласта может производиться либо снизу вверх, либо сверху вниз с интервалом (шагом) 0,5-1,5 метра.

Таблица 3 – Техническая характеристика генератора силовых волн УГСВ-3

Параметры	Описание
Мощность (кДж)	3
Энергия волны (Дж)	5-1500
Глубина залегания объекта волновой обработки (м)	До 5000
Рабочий агент	Жидкость, не кольматирующая продуктивный коллектор
Радиус действия волны (м)	До 400
Шаг обработки (м)	0,5-1,5
Интервал обработки (м)	Без ограничений
Привод генератора	Дизель+НШ-100
Привязка отражателя силовых волн к подошве продуктивного пласта	Геофизическими методами

После обработки, как правило, скважина какое-то время очищается, так как волна отслаивает продукты загрязнения из призабойной зоны и с внутренней поверхности обсадной колонны.

Хорошее акустическое согласование жидкостного волновода со спущенным отражателем и обрабатываемым коллектором способствует высокому коэффициенту полезного воздействия на продуктивный пласт. Потери на затухание волны при этом не превышают 10-12 % на километр скважины.

На третьем заключительном этапе производится анализ и оценка эффективности выполненных работ с назначением (при необходимости) дополнительных исследований.

К преимуществам метода воздействия силовыми волнами можно отнести следующее:

- Простота оборудования
- Несложность монтажа из-за размещения оборудования на устье скважины

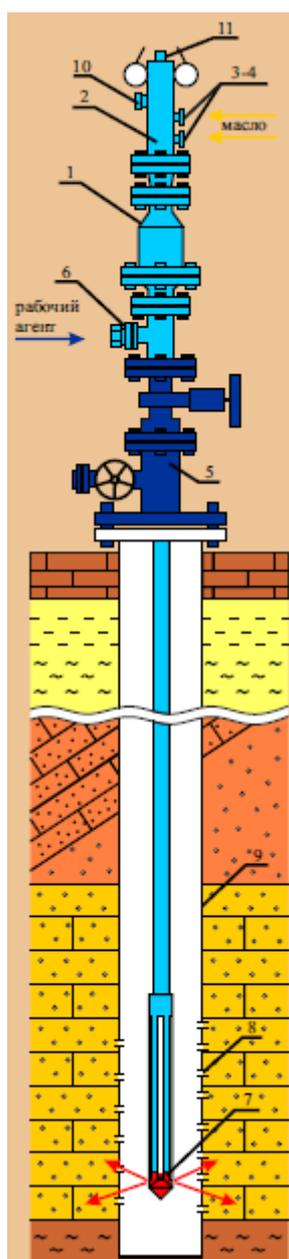


Рисунок 2 – Схема обработки продуктивного пласта направленными силовыми (ударными) волнами

- Противофонтанная безопасность (оборудование можно монтировать на ПВО (противовыбросовое оборудование) или на перфорационную задвижку)
- Увеличение приемистости и улучшение свойств коллекторов в несколько раз, что приводит к увеличению дебитов флюидов
- Возможность ввода скважины в эксплуатацию сразу после обработки пласта, не извлекая отражатель
- Равномерная обработка волнами всего коллектора, а при работах по интенсификации притока кислотами и т.д., обеспечение их проникновения во все участки интервала перфорации (в отличие от гидроразрыва)
- Очистка внутренней поверхности НКТ волнами Релея во время обработки, в результате этого хорошее прохождение приборов ГИС (геофизических исследований) при контроле над разработкой месторождений
- Отсутствие высоких давлений в скважине и нежелательных побочных явлений
- Возможность (в отличие от всех других способов) включения «в работу» всей толщи продуктивного пласта

Спецификация:

- 1 – корпус генератора
- 2 – гидромолот (пневмомолот)
- 3-4 – подача/сброс масла, воздуха со станции управления
- 5 – устье скважины
- 6 – подача рабочего агента от ЦА-320; ЦН-10
- 7 – контейнер-отражатель
- 8 – зона перфорации
- 9 – волновод (НКТ)
- 10 – подача масла со станции управления
- 11 – подача воздуха со станции управления

В качестве генератора силовых волн используется УГСВ-1 и УГСВ-3 (устьевой генератор силовых волн). Отличие УГСВ-3 от УГСВ-1 в мощности и виде привода, привод УГСВ-1 пневматический, меньшей мощности, но она достаточная для работы в водозаборных скважинах. Кроме того, привод от компрессора позволяет производить очистку пласта сразу после обработки.

Традиционные методы увеличения дебита скважин хорошо известны: гидроразрыв пласта, бурение горизонтальных скважин и т.д., однако эти методы имеют или высокую стоимость и сложную технологию, или предъявляют высокие требования к объекту воздействия.

Сравнение эффективности горизонтальных скважин с волновым разуплотнением пласта в различных регионах России показало, что стоимость горизонтальных скважин многократно выше стоимости волнового воздействия, а добыча с их помощью увеличивалась в 1,5-2 раза, в то время как после волнового воздействия – в 3,5-4 раза.

Всего обработке ударными волнами были подвергнуты продуктивные пласты более чем в 200 скважинах. Работы проводились на предприятиях ОАО «Нижневартовскнефтегаз», ОАО «Татнефть», ОАО «Пурнефтегазгеология», ОАО «Роснефть» и др.

Необходимо подчеркнуть, что при проведении этих испытаний не было отмечено ни одного случая нарушения обсадных и насосно-компрессорных труб. Видимо, при скорости ударной волны 1350-1550 м/с трубы не успевают деформироваться и не разрушаются даже при очень высоких величинах импульсного давления.

Таким образом, технология увеличения дебитов нефтяных скважин с использованием энергии ударных волн высокоэффективна и может быть рекомендована для широкого промышленного освоения. Особое внимание следует обратить на ее очевидную перспективность в решении проблемы резкого повышения коэффициента извлечения нефти (КИН).

Технология увеличения КИН с использованием энергии направленных упругих волн

Известны способы добычи нефти и повышения нефтеотдачи продуктивных пластов, заключающиеся в поддержании пластовых давлений законтурным, приконтурным и внутриконтурным заводнениями [5].

Их эффективность резко падает при пониженной природной проницаемости нефтяного пласта или с ее уменьшением в процессе разработки месторождения, что сопровождается резким снижением поглотительной способности законтурных и внутриконтурных скважин.

Данное явление может быть обусловлено повышением карбонатности пород в определенных частях нефтяной залежи, что, видимо, связано со вторичными процессами в результате химического взаимодействия нефти и пластовых вод или закачиваемых в залежь вод в зоне водонефтяного контакта. Кроме того, вода, закачиваемая для поддержания пластового давления, может выщелачивать некоторые компоненты пород, слагающих нефтяной пласт с переотложением солей впереди фронта вытеснения нефти и образованием практически непроницаемых геохимических барьеров. При этом не обеспечивается равномерное продвижение внутреннего и внешнего контуров нефтеносности. В комплексе эти процессы приводят к образованию застойных зон в нефтяном пласте, с оставлением в них значительных объемов промышленных запасов нефти.

Цель увеличения нефтеотдачи продуктивных пластов в рассмотренной ниже технологии достигается тем, что в способе разработки нефтяного месторождения, включающем вскрытие продуктивного пласта в соответствии с принятой системой разработки расчетным количеством эксплуатационных и нагнетательных скважин, их обсадку коррозионностойкими колоннами обсадных труб, оборудование скважин фильтрами, фонтанной арматурой и насосно-компрессорными трубами, выбор типа рабочей жидкости, обеспечивающей наиболее полное вытеснение нефти из пласта, закачку подобранной рабочей жидкости в нефтяной пласт через нагнетательные скважины и откачку нефти через эксплуатационные скважины, нагнетательные скважины оборудуют волновым излучателем, волновым отражателем и пакером. Через нагнетательные скважины в нефтяной пласт за контуры нефтеносности подают рабочую жидкость с одновременным наложением упругих волн с частотой от 0,5 до 80 Гц, волноводом для кото-

рых служит рабочая жидкость, движущаяся в насосно-компрессорных трубах. При этом упругие волны ориентируют волновыми отражателями в направлении эксплуатационных скважин по всему периметру контуров нефтеносности, тем самым формируют равномерную проницаемость нефтяного пласта, разрушая при этом геохимические барьеры и закольматированные зоны, предупреждают образование языков обводнения и захваченных водой целиков нефти, обеспечивая равномерное продвижение контуров нефтеносности к эксплуатационным скважинам, а также снижают вязкость нефти, облегчая ее продвижение к эксплуатационным скважинам.

На рисунке 3 приведена в плане схема разработки нефтяного пласта при нагнетании рабочей жидкости одновременно за внутренний и внешний контуры нефтеносности, а на рисунке 4 показана схема волнового воздействия на нефтяной пласт через нагнетательную скважину.

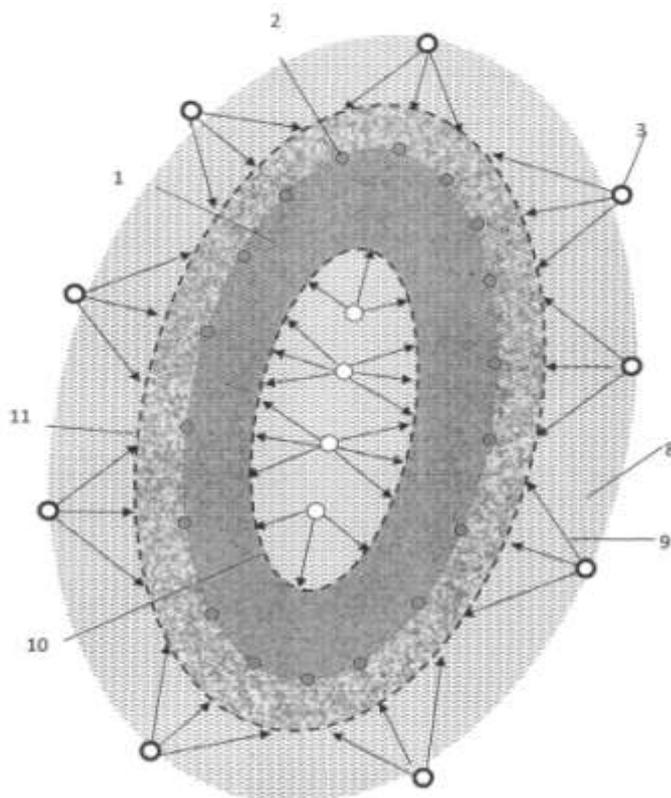


Рисунок 3 – Схема разработки нефтяного месторождения

Технология реализуется следующим образом. Нефтяной (продуктивный) пласт 1 вскрывают в соответствии с принятой системой разработки расчетным количеством эксплуатационных 2 и нагнетательных 3 скважин, обсаживают их коррозионностойкими колоннами обсадных труб, забойную часть скважин оборудуют фильтрами, а устье – фонтанной арматурой (на рисунках не показаны). Нагнетательные скважины 3 также оборудуют насосно-компрессорными трубами 4, волновыми излучателями 5, волновыми отражателями 6 и пакерами 7. Предварительно выбранной рабочей жидкостью 8, обеспечивающей наиболее полное вытеснение нефти из нефтяного пласта 1, заполняют насосно-компрессорные трубы 4 нагнетательных скважин 3. В простейшем случае в качестве рабочей жидкости 8 может использоваться пластовая или техническая вода. Затем включают нагнетательные насосы (на рисунках не показаны) и волновые излучатели 5. Под действием давления нагнетания и наложенных упругих волн 9 частотой от 0,5

до 80 Гц, рабочую жидкость закачивают в нефтяной пласт 1 за внутренний 10 и внешний 11 контуры нефтеносности. При этом движущуюся в насосно-компрессорных трубах 4 рабочая жидкость 8, выполняет также функцию волновода, а установленные на уровне нефтяного пласта 1 волновые отражатели 6 обеспечивают преломление упругих волн 9 в межконтурное пространство нефтяного пласта 1 в направлении эксплуатационных скважин 2. Закачка рабочей жидкости 8 и волновое воздействие на зону нефтеносности нефтяного пласта 1 осуществляется по всему периметру внешнего и внутреннего контуров нефтеносности. В результате закачки рабочей жидкости за внутренний 10 и внешний 11 контуры нефтеносности обеспечивается продавливание нефти в эксплуатационные скважины 2. Волновое воздействие, в свою очередь, обеспечивает равномерность продвижения внутреннего 10 и внешнего 11 контуров нефтеносности за счет создания проницаемости в геохимических барьерах и закольцованных зонах нефтяного пласта 1, а также предупреждает образование языков обводнения и целиков нефти, захваченных водой и/или рабочей жидкостью 8. При этом формируется равномерная проницаемость в межконтурном пространстве нефтяного пласта 1 с высвобождением и обеспечением продвижения к эксплуатационным скважинам 2 объемов нефти, экранированных в застойных зонах. Кроме того, за счет снижения вязкости подвергаемой волновой обработке нефти, облегчается ее продвижение к эксплуатационным скважинам 2.

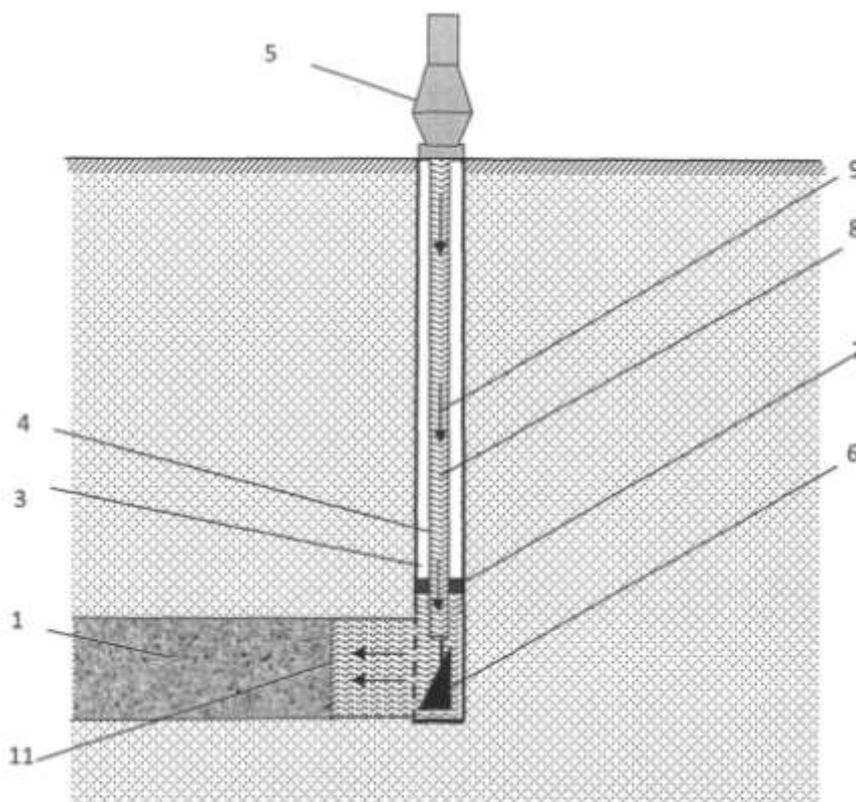


Рисунок 4 – Схема волнового воздействия на нефтяной пласт через нагнетательную скважину

Изложенная технология в комплексе с методами гидрофобизации и водоизоляции призабойных зон продуктивных пластов [6, 7] позволит не только увеличить дебиты нефтяных и приемистость нагнетательных скважин, но и резко повысить КИН при разработке месторождений как традиционных, так и высоковязких тяжелых нефтей.

Выводы

Форсированные темпы добычи нефти в Беларуси в 1970-1975 годах привели к ряду отрицательных последствий: преждевременным прорывам вод к добывающим скважинам; образованию изолированных водой участков залежей; снижению пластовых давлений и прекращению фонтанной добычи нефти; необратимым изменениям свойств нефтенасыщенных коллекторов. В результате в недрах оказались погребенными миллионы тонн нефти, которые не могут быть извлеченными при традиционных подходах к разработке месторождений.

Решение проблемы наращивания объемов добычи нефти в Беларуси за счет форсирования работы эксплуатационного фонда скважин и компенсации добычи приростом промышленных запасов – малоперспективно и нерентабельно.

Мировой опыт показывает, что в связи с дефицитом крупных резервных мощностей, ограниченностью и труднодоступностью ресурсов нефти, а также постоянно растущим опережением потребления нефти возможных ее поставок уже сегодня насущной задачей нефтедобычи является повышение КИН до 70 % от ресурсной базы традиционных месторождений нефти и 30-50 % для нетрадиционных нефтей – сверхтяжелых и высоковязких.

Увеличение объемов добычи нефти в Беларуси должно базироваться, прежде всего, на широком промышленном освоении технологий, позволяющих не только резко повысить эффективность геологоразведочных работ, но и увеличить КИН, как минимум, до 70 %. Приведенная в статье оценка возможностей некоторых из таких «прорывных» технологий показывает, что эта задача вполне разрешима.

Список использованных источников

1. **Богатов, Б.А.** Перспективы скважинной добычи полезных ископаемых в Беларуси / Б.А. Богатов, В.С. Войтенко, А.М. Киреев. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 258 с.
 2. **Сильвестров, Л.К.** Мировые запасы нефти и коэффициенты ее извлечения / Л.К. Сильвестров // Энергия: экономика, техника, экология. – 2008. – № 10.
 3. **Кузнецов, О.Л.** Интеллектуальные и природные ресурсы России как основа инновационной экономики страны / О.Л. Кузнецов // Вестник Российской академии естественных наук. Общественно-научный журнал. – М.: Издание РАЕН, 2004. – Том 4, № 2. – С. 5-10.
 4. Колтюбинг: основы и практика применения в горном деле / В.С. Войтенко [и др.]. – Минск: Юнипак, 2007. – 584 с.
 5. **Жданов, М.А.** Нефтегазопромысловая геология / М.А. Жданов. – М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горнотопливной литературы, 1962. – 535 с.
 6. Повышение эффективности ремонтно-изоляционных работ на скважинах Уренгойского месторождения / Г.А. Ланчаков [и др.]. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2005. – 104 с.
 7. Способ ограничения подошвенных вод и заколонных перетоков в эксплуатационных скважинах: пат. 2172825 Российская Федерация, МПК 7 E 21 B 43/32 / Г.М. Гаджибеков, П.В. Бурмистров, Р.А. Хасаев, О.А. Белопипецкая; заявитель Г.М. Гаджибеков. – № 2000129223/03; заявл. 23.11.2000; опубл. 27.08.2001.
-

Voitenko V.S., Silkov R.A., Smychnik A.D., Shemet S.F.

Perspectives of increase in annual volumes of the oil extraction in Belarus

The current situation of oil production in the world and in the Republic of Belarus is analysed. It is shown that the most advanced trend is development of new technologies for finding, prospecting and extraction of different oil categories. The characteristic of methods for detecting and three-dimensional open microfracturing zones mapping at depths up to 5000 meters, as well as influence on productive oil pool by shock waves energy and coil tubing applications are given.

Поступила в редакцию 26.07.2011 г.

УДК 622.693.2.004.4

ЗАЩИТА ШАХТНЫХ СТВОЛОВ И КАРЬЕРОВ ОТ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ИНЪЕКЦИОННЫМИ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫМИ ЗАВЕСАМИ

Войтенко В.С., Халявкин Ф.Г., Оника С.Г. (УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск, Беларусь)

В статье рассматривается инъекционный способ создания противofильтрационных завес для защиты шахтных стволов и карьеров от притока подземных вод. Приводится методика их расчета.

Введение

Применение противofильтрационных завес в горной промышленности для защиты шахтных стволов и карьеров берет начало в 60-ые годы прошлого столетия. В начале данный способ защиты применялся на месторождениях полезных ископаемых с неглубоким залеганием водоносных горизонтов, характеризующихся высокими фильтрационными свойствами, а также на месторождениях, где динамические запасы подземных вод преобладали над статическими запасами. В дальнейшем было установлено, что применение противofильтрационных завес технически возможно и экономически целесообразно и на более крупных карьерах с глубоким залеганием водоносных горизонтов [1, 2].

В зависимости от технологии сооружения и применяемого материала различают следующие типы противofильтрационных завес: инфузионные (засыпные или заливные), инъекционные (нагнетательные) и криогенные (ледопородные). Каждый из этих типов имеет свою технологию изготовления, свои условия применения и назначения, свои преимущества и недостатки.

При проходке шахтных стволов, защите карьеров, в гидротехническом строительстве широкое применение нашел инъекционный тип завес. Его сооружают путем нагнетания в водоносный слой специальных закрепляющих растворов, которые, заполняя поры и полости в породах, образуют прочные водонепроницаемые соединения. Нагнетание растворов в водонасыщенные породы производится через специально пробуренные скважины, расположенные на небольшом расстоянии друг от друга вдоль проектной линии завесы. Давление нагнетания должно в 2-3 раза превышать гидростатическое давление подземных вод.

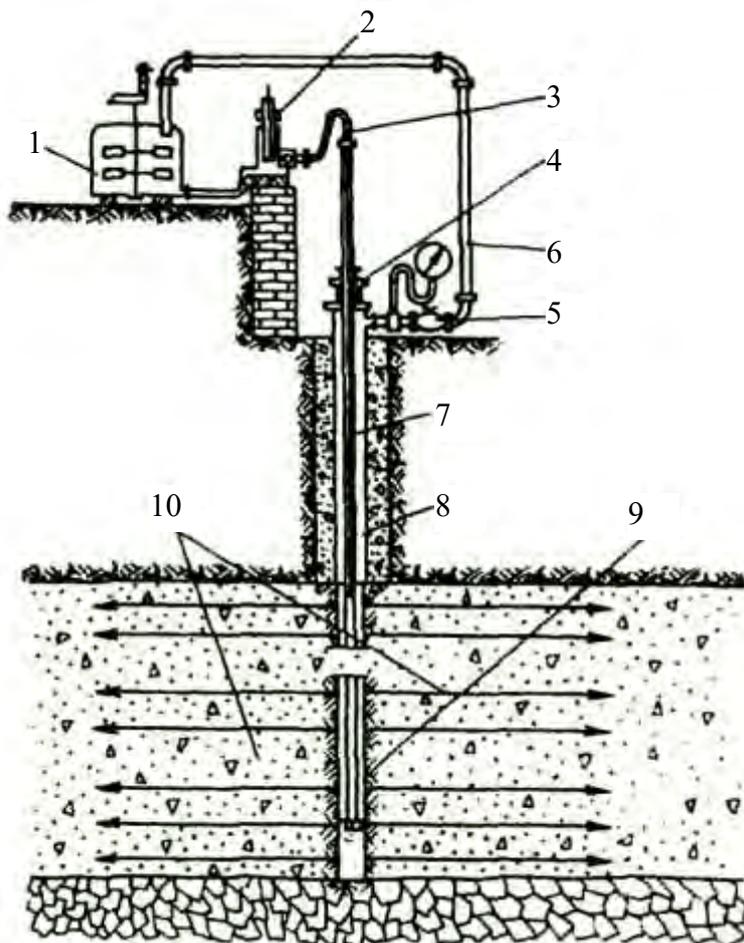
Результаты исследований

Эффективность действия инъекционных противofильтрационных завес зависит во многом от размера трещин и пор закрепляемых горных пород, а также скорости фильтрации грунтовых вод и их химического состава. Поэтому на одном и том же объекте для создания надежной защиты часто приходится применять несколько видов тампонажных растворов, позволяющих обрабатывать разного рода грунты, входящие в зону создаваемой преграды.

При организации работ по созданию завес инъекционным методом преимущественное распространение получила схема бокового нагнетания (рисунок 1). В этой схеме известны два варианта нагнетания: бесциркулярный и циркулярный. При первом варианте инъекционный раствор не может совершать обратного движения между скважи-

ной и резервуаром установки 1 для приготовления раствора, из которого он засасывается нагнетательным насосом 2. Находясь под большим давлением в иньекторе 7, раствор проникает в трещины и пустоты через боковую поверхность скважины. Данный способ нагнетания рекомендуется применять при тонкой трещиноватости горных пород.

При циркуляционном нагнетании часть нагнетаемой жидкости, не поглощенной горной породой, возвращается обратно в резервуар, откуда снова засасывается нагнетательным насосом 2 и направляется в скважину 9. Благодаря этому создается циркуляция в скважине и предотвращается осаждение раствора. Циркуляционный способ нагнетания применяется в основном для заполнения крупных трещин.



- 1 – установка для приготовления раствора; 2 – насос; 3 – гибкий шланг;
 4 – сальник; 5 – кран; 6 – направляющая трубка; 7 – иньектор;
 8 – направляющие трубы; 9 – скважина; 10 – зона иньекции

Рисунок 1 – Схема бокового нагнетания

Независимо от способов циркуляции раствора в скважине, для организации тампонажа по схеме бокового нагнетания необходимо выполнение следующих работ:

- пробурить скважины для направляющих труб;
- в скважинах посредством заливки цементного раствора укрепить направляющие трубы 8;
- через направляющие трубы пробурить скважины 9 для нагнетания;
- через сальник 4 на верхнем конце каждой направляющей трубы ввести иньектор 7 и по нему под давлением подать нагнетаемый раствор к забою скважины.

Расчеты инъекционных противофильтрационных завес

Нагнетаемые в грунт при создании инъекционных завес материалы на основе цемента, глин, битума, жидкого стекла, смол являются дисперсными, т.е. состоящими из жидкой среды и твердой фазы. Законы движения дисперсных жидкостей отличаются от законов истинных жидкостей и это обусловлено их механическими свойствами. Движение истинных жидкостей подчиняется закону Ньютона:

$$\tau = \mu \frac{du}{dn},$$

в то время как движение дисперсных жидкостей подчиняется закону Шведова-Бингама:

$$\tau = \mu \frac{du}{dn} + \tau_0,$$

где τ – касательное напряжение в жидкости;

τ_0 – начало текучести или предельное напряжение сдвига;

μ – структурная или пластическая вязкость;

$\frac{du}{dn}$ – градиент скорости.

При движении по порам и пустотам грунта структурные жидкости быстрее переходят из ламинарного в турбулентный режим фильтрации. В результате их движение происходит с малыми скоростями даже в крупных порах и трещинах горных пород.

Коэффициент фильтрации k структурных жидкостей для трещиноватых горных пород можно определить по формуле:

$$k = \alpha \cdot K_{\text{пр}} \frac{v}{\mu(1 + B \cdot C \frac{1}{\omega})}$$

где α – коэффициент, равный отношению $K'_{\text{пр}} / K_{\text{пр}}$;

$K_{\text{пр}}$ – коэффициент фильтрации трещиноватой среды;

$K'_{\text{пр}}$ – проницаемость структурной жидкости;

v – вязкость структурной жидкости;

B – реологическая константа, равная τ_0 / μ ;

C – геометрическая константа, равная $\frac{m - \delta}{2}$;

m – пористость грунта;

δ – средний размер трещин;

ω – скорость фильтрации структурного потока.

В расчетах инъекционных завес определяют в первую очередь величину забойного давления P_0 при нагнетании структурной жидкости в водоносный горизонт, расход нагнетания Q и максимальный радиус инъекции R_{max} . В крупнозернистых грунтах эти величины составят:

$$P_0 = \frac{A\mu}{E} \left[\frac{Q}{2\pi d_0} \ln \frac{R}{r} + B \cdot C(R-r) + P_{II} \right];$$

$$Q = \frac{[E(P_0 - P_{II}) - B \cdot C \cdot R] \cdot 2\pi d_0}{\ln R - \ln r_0};$$

$$R_{\max} = \frac{2,66 \cdot m^{0,4}}{A} \cdot d_0 \cdot \left(\frac{P_0 - P_{II}}{\tau_0} \right),$$

где A – число, характеризующее коэффициент гидравлического сопротивления;
 R – радиус инъекции;

E – число, определяемое по формуле $E = \frac{m^{0,1} \cdot d_0^4}{1,2 \cdot D_0^2}$;

d_0 – диаметр поры грунта;

D_0 – диаметр частиц грунта;

r_0 – радиус скважины;

r – расстояние до источника нагнетания;

$P_0 - P_{II}$ – перепад давлений;

R_{\max} – максимальный радиус инъекции.

В трещиноватых горных породах величины k , P_0 , Q и R_{\max} определяются по формулам:

$$k = \frac{\alpha \cdot K_{\text{пр}} \cdot v}{\mu(1 + B \cdot C \frac{2\pi\alpha r}{Q})};$$

$$P_0 = \frac{\mu}{\alpha \cdot K_{\text{пр}}} \left(\frac{Q}{2\pi\alpha} \cdot \ln \frac{R}{r} + B \cdot C \cdot R \right) + P_{II};$$

$$Q = \frac{\left[\frac{\alpha \cdot K_{\text{пр}} \cdot (P_0 - P_{II})}{\mu} - B \cdot C \cdot R \right] \cdot 2\pi\alpha}{\ln R - \ln r_0};$$

$$R_{\max} = \frac{2 \cdot \alpha \cdot K_{\text{пр}} \cdot (P_0 - P_{II})}{m \cdot \delta \cdot \tau_0}.$$

Приведенные формулы учитывают дисперсную структуру тампонажных материалов, что позволяет более обоснованно и правильно определять расчетные элементы при проектировании и строительстве противофильтрационных завес в зернистых и прочных трещиноватых горных породах. На рисунке 2 показана зависимость максимального радиуса нагнетания цементной суспензии трех составов В:Ц = 4 (при $\tau_0 = 1,77 \text{ Н/м}^2$); В:Ц = 2 (при $\tau_0 = 2,1 \text{ Н/м}^2$); В:Ц = 1 (при $\tau_0 = 3,93 \text{ Н/м}^2$) в

однородный гравий с диаметром зерен $D_0 = 0,02$ м, пористостью $m = 0,4$, $k = 2$ м/с. Перепад давлений $(P_0 - P_{II}) = 98 \cdot 10^4$ Н/м².

Из графика видно, что наиболее интенсивно увеличивается радиус нагнетания до 100 м при соотношении В:Ц от 1:1 до 4:1. Дальнейшее увеличение соотношения В:Ц не оказывает существенного влияния на увеличение R_{\max} .

На рисунке 3 показан график зависимости радиуса инъекции R трещиноватой горной породы мощностью 5 м от коэффициента фильтрации $K_{пр}$. Состав цементной суспензии В:Ц = 2 (при $\tau_0 = 1,47$ Н/м²). Напор нагнетания постоянный в течение 1 часа, равный $78,48 \cdot 10^4$ Н/м².

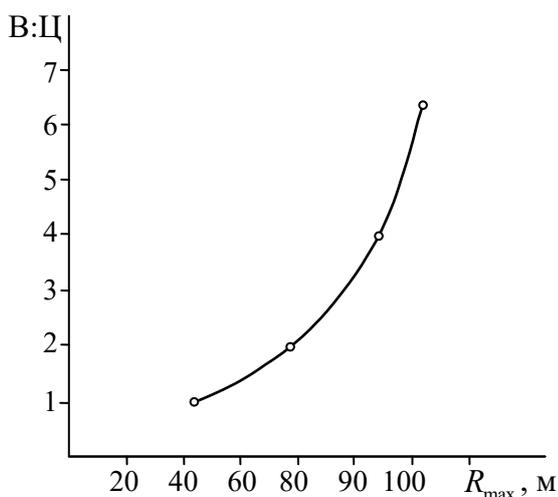


Рисунок 2 – График зависимости максимального радиуса нагнетания R_{\max} цементной суспензии от соотношения В:Ц (вода-цемент)

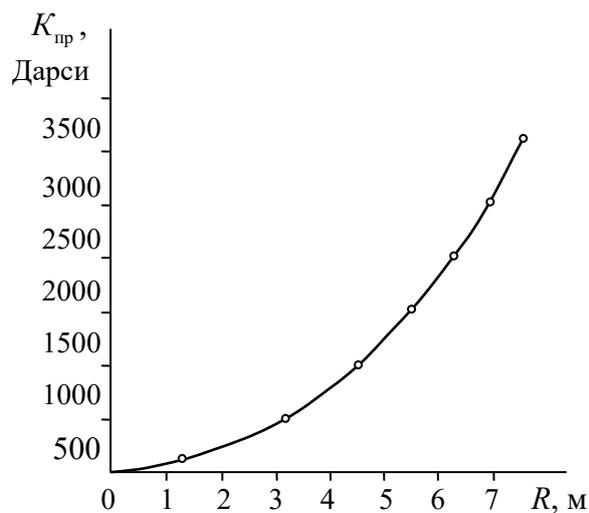


Рисунок 3 – График зависимости радиуса инъекции R от коэффициента фильтрации $K_{пр}$ трещиноватой горной породы

Как следует из графика, с увеличением проницаемости трещиноватой горной породы по параболическому закону увеличивается радиус инъекции цементной суспензии в грунт. Причем, наибольшее увеличение радиуса R до 8 м происходит с возрастанием проницаемости горной породы до 3500 Дарси. При дальнейшем увеличении проницаемости грунта увеличение радиуса инъекции замедляется.

Заключение

Для защиты карьеров, шахтных стволов и в гидротехническом строительстве широко применяются инъекционные противофильтрационные завесы. Из всех разработанных видов инъекционных завес наибольшее применение нашли глинизация и цементация, как более дешевые, надежные и не требующие дефицитных материалов.

Наибольшего радиуса нагнетания цементной суспензии до 50 м можно достичь в крупнозернистых песчаных и гравелистых породах, а чтобы достичь этих величин в прочных трещиноватых породах, необходимо разрабатывать способы и технологию увеличения трещиноватости, а следовательно, и проницаемости горной породы.

Список использованных источников

1. **Лев, М.А.** Устройство противofiltrационных завес и ограждений в водоносных породах / М.А. Лев // Шахтное строительство. – 1960. – № 3. – 95 с.
 2. Защита карьеров от воды / Абрамов С.К. [и др.]. – М.: Недра, 1970. – 215 с.
-

Voitenko V.S., Khalyavkin F.G., Onika S.G.

Protection of pit shafts and quarries from underground water by injection sealing curtains

The injection method of making sealing curtains to protect pit shafts and quarries from underground water is examined in the article. The calculation procedure is presented.

Поступила в редакцию 10.05.2011 г.

УДК 622.834:622.363.2

ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОГЕННОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ СТОЛБОВОЙ СИСТЕМОЙ РАЗРАБОТКИ

Новокшенов В.Н., Дешковский В.Н., Зольников Н.А., Данилова А.Ф. (ОАО «Белгорхимпром», г. Солигорск, Беларусь)

Представлены результаты исследования процессов сдвижения и деформирования подработанного массива горных пород при ведении горных работ столбовой системой разработки в условиях Старобинского месторождения калийных солей.

Введение

При разработке подземным способом месторождений калийных и других легкорастворимых солей, весьма актуальными становятся вопросы безопасности производства горных работ и защиты рудников от проникновения воды и рассолов в горные выработки из вышележащих водоносных горизонтов в результате ведения очистных работ.

Предотвращение проникновения вод в горные выработки осуществляется за счет сохранения водоупорной защитной потолочины, в которую не должны проникать водопроводящие трещины от выработанного пространства.

Высота распространения зоны водопроводящих трещин (ЗВТ) не должна достигать зоны активного водообмена в массиве пород. Несоблюдение этого условия может привести к затоплению рудника.

На Старобинском месторождении калийных солей в течение нескольких десятков лет специализированные научно-исследовательские организации (ВНИИГ, ВНИМИ, ОАО «Белгорхимпром», БГУ) совместно с недропользователем (ОАО «Беларуськалий») занимаются вопросами изучения техногенной трещиноватости в натуральных, лабораторных условиях, на математических моделях. Наиболее значимые результаты исследований стали получать в условиях применения столбовых систем разработки калийных пластов. При управлении кровлей полным обрушением процесс сдвижения подработанного массива протекает с большими скоростями за сравнительно короткое время по сравнению с камерной системой разработки. Это дает возможность изучения процессов деформирования и трещинообразования в различных стадиях.

В связи с появлением новых условий отработки пластов, недостаточной изученностью отдельных вопросов в теории распространения техногенных водопроводящих трещин и с целью подготовки исходных данных для корректировки нормативного документа [1], на Старобинском месторождении с 2008 года проводятся комплексные исследования по данному направлению, включающие:

- теоретические расчеты высоты ЗВТ;
- определение фактической высоты ЗВТ путем бурения специальных скважин и проведения в них исследований (видеозондирование, гидро- и аэрокаротаж);
- маркшейдерские исследования;
- геофизические исследования;
- геологические и гидрогеологические исследования;
- математическое моделирование;
- определение физико-механических свойств толщи пород;

– исследования напряженно-деформированного состояния толщи пород.

В статье кратко представлены некоторые из достигнутых результатов натурных исследований последних лет по изучению техногенной трещиноватости при разработке Старобинского месторождения калийных солей столбовой системой разработки. Исследования по данному направлению продолжаются.

Результаты исследований

Основными задачами проводимых исследований являются: определение деформаций в разных зонах мульды сдвижения в шахтных условиях и на земной поверхности; установление зон максимальной техногенной трещиноватости относительно границ выработанных пространств в шахтных условиях; определение высоты распространения ЗВТ в подработанном массиве пород.

Исследования проводятся в натуральных условиях посредством проведения исследовательских выработок в подработанном массиве, производства инструментальных измерений на наблюдательных станциях как внутри массива, так и на земной поверхности, бурения специальных скважин из горных выработок и проведения исследований в них [2-4].

В зоне влияния горных работ нижележащих горизонтов внутри подработанного массива происходит перераспределение напряжений под действием сил гравитации и формируется напряженно-деформированное состояние (НДС), вызванное подработкой.

В границах мульды сдвижения внутри подработанного массива образуются зоны повышенного опорного давления, расположенные над целиком и зоны разгрузки напряжений непосредственно над выработанным пространством. Исследования, проводимые на различных участках шахтных полей 1 и 3 РУ ОАО «Беларуськалий», показали, что распределение деформаций внутри массива и на земной поверхности происходит одновременно, но с разными величинами. При этом горизонтальные деформации растяжений и вертикальные деформации положительной кривизны располагаются в зоне опорного давления, а деформации сжатия и отрицательной кривизны – в зоне разгрузки напряжений.

На шахтном поле 1 РУ в исследовательской выработке Первого калийного горизонта, пройденной навстречу подрабатывающей лаве № 6 Второго калийного горизонта, при глубине подработки 65 м, в зоне опорного давления визуально прослеживались секущие трещины по отдельным слоям массива с раскрытием менее 1 мм. При этом деформации растяжений впереди забоя лавы достигли величины 0,6-0,9 мм/м на интервале 10 м. В зоне разгрузки напряжений внутри слоистого массива появились трещины расслоений по плоскостям напластований с раскрытием до 7 мм.

При посадке основной кровли лавы № 6, в зоне разгрузки напряжений произошло резкое смещение с разломом пород. В массиве, на высоте 65 м над выработанным пространством лавы № 6 амплитуда смещения пород в зоне разлома достигла 629 мм при вынимаемой мощности в лаве 2,4 м. Ширина зоны разлома пород, расположенной под углом 64°, составила около 4 м с раскрытием трещин расслоения до 50 мм по плоскостям напластования (рисунок 1). В результате прогиба слоистого породного массива в зоне разлома пород, в отдельных слоях пород появились секущие трещины с раскрытием до 10-15 мм, ограничивающие зону разлома с обеих сторон. Величина горизонтальных деформаций растяжения в зоне разлома составила 3,5-4 мм/м.

Следует отметить, что посадке основной кровли в лаве № 6 Второго калийного горизонта предшествовал период длительной остановки ее забоя (около 1 месяца.). Это

явилось причиной резкого оседания подработанных пород с образованием техногенных трещин.

На другом участке исследований горизонта каменной соли 1 РУ в исследовательской выработке, пройденной в подработанном массиве на высоте 133 м над лавой № 68 Третьего калийного горизонта с вынимаемой мощностью 2,22 м, визуально не обнаружено техногенных трещин. На профильной линии реперов над целиком были определены деформации растяжений величиной до 1 мм/м.



Рисунок 1 – Зона сдвижения толщи пород с образованием техногенных трещин, наблюдаемая по стенке исследовательской выработки Первого калийного горизонта на высоте 65 м над выработанным пространством лавы № 6 Второго калийного горизонта (фото 1989 г.)

Анализ результатов наблюдений внутри подработанного массива и на земной поверхности в одном вертикальном створе, расположенном перпендикулярно подвиганию лавы № 68 показал, что максимальная скорость оседания пород над серединой лавы на глубине 445 м достигла 16 мм в сутки, в то время как на земной поверхности она составила всего 6,5 мм в сутки.

В мульде сдвижения на земной поверхности и на глубине 445 м оседание подработанного массива происходит с разными скоростями. В начальный период активной стадии процесса сдвижения в зоне разгрузки напряжений (над серединой лавы), внутри массива при меньшей глубине подработки величина оседания пород значительно превышает величину оседания земной поверхности. Разность этих величин постоянно увеличивается в период роста скоростей оседания и затем уменьшается, по мере снижения скорости при переходе процесса сдвижения к стадии затухания. Уменьшение разности оседаний говорит о закрытии трещин расслоения в слоистом массиве, образовавшихся в начале активной стадии процесса сдвижения.

В то же время в зоне опорного давления над массивом у границы выработанного пространства лавы уменьшения разностей оседаний не наблюдается. Это свидетельствует о том, что в мульде сдвижения пород над массивом трещины расслоений по плос-

костям напластований отсутствуют, а имеющиеся мелкие секущие трещины не соединяются с выработанным пространством [4].

Выполненные наблюдения показали, что в массиве пород мощностью 445 м от земной поверхности за первые пять месяцев общее закрытие трещин расслоения составило 50 мм, а через три года оно достигло 120 мм.

На данном участке выполнено бурение трех нисходящих скважин. По результатам гидрокаротажа скважин установлена фактическая высота ЗВТ (рисунок 2).

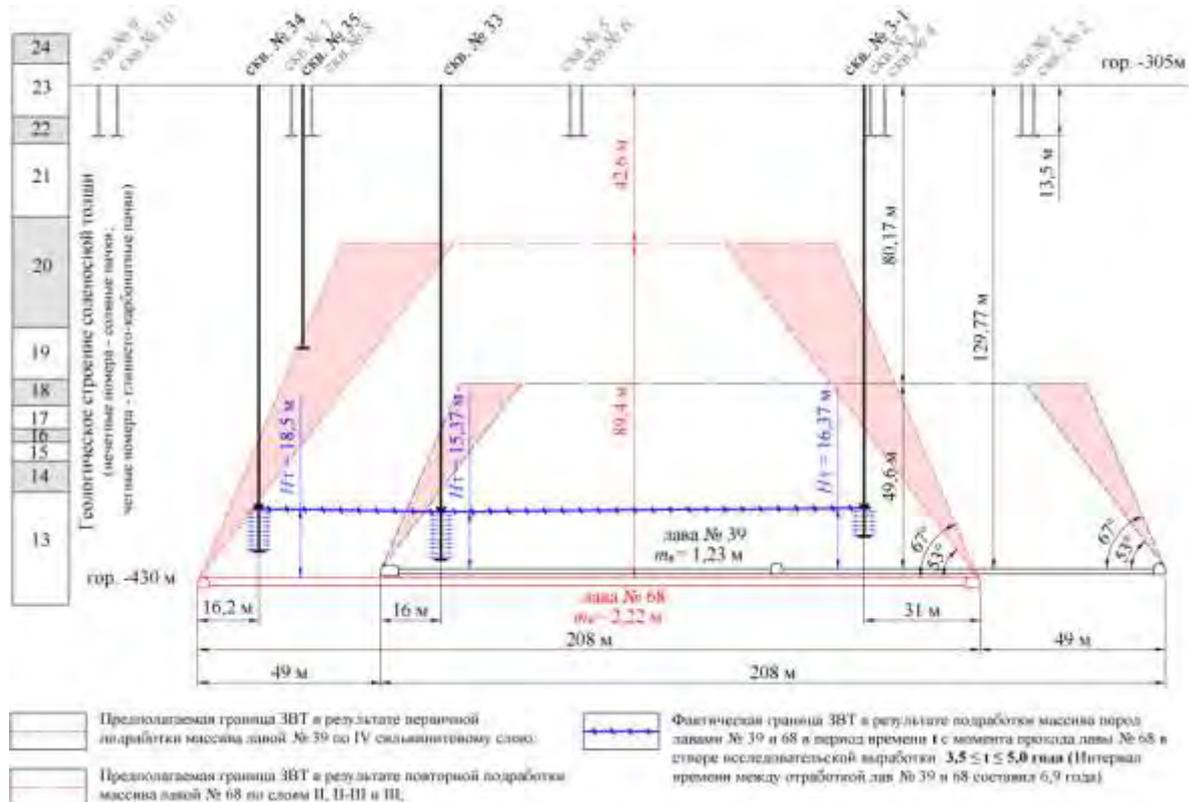


Рисунок 2 – Расчетная и фактическая высота распространения ЗВТ над лавами № 39 и 68 Третьего калийного пласта по результатам гидрокаротажа скважин

Высота ЗВТ над лавой № 39 гор. -430 м, определенная в натуральных условиях путем бурения одной специальной скважины № 33 и проведения исследований в ней с учетом фактора времени, составляет $H_T = 15,37$ м над кровлей IV сильвинитового слоя Третьего калийного горизонта. Расчетное значение высоты ЗВТ, определенное по методике [1], составляет $H_T = 49,6$ м. Отклонение фактической высоты ЗВТ от теоретического значения составляет 34,23 м. Время, прошедшее с момента первичной подработки массива лавой № 39 по IV сильвинитовому слою, составляет 11,7 года, а с момента повторной подработки массива лавой № 68 по слоям II, II-III и III – 4,8 года.

Высота ЗВТ над лавой № 68 гор. -430 м, определенная в натуральных условиях путем бурения двух специальных скважин № 3-1 и 34 и проведения исследований в них с учетом фактора времени, составляет $H_T = 18,5 \div 18,7$ м над кровлей III сильвинитового слоя Третьего калийного горизонта. Расчетное значение высоты ЗВТ, определенное по методике [1], составляет $H_T = 89,4$ м. Отклонение фактической высоты ЗВТ от теоретического значения составляет 70,8 м. Время, прошедшее с момента первичной подработки массива лавой № 39 по IV сильвинитовому слою, составляет 10,5 года, а с момента

повторной подработки массива лавой № 68 по слоям II, II-III и III – 3,5 года (относительно времени окончания бурения скважины № 3-1).

На другом участке исследований гор. -305 м рудника 1 РУ в активную стадию процесса сдвижения определена высота распространения ЗВТ у границы столба лавы № 79, отработанной по слою IV Третьего калийного пласта мощностью 1,05 м, с управлением кровлей полным обрушением (рисунок 3).

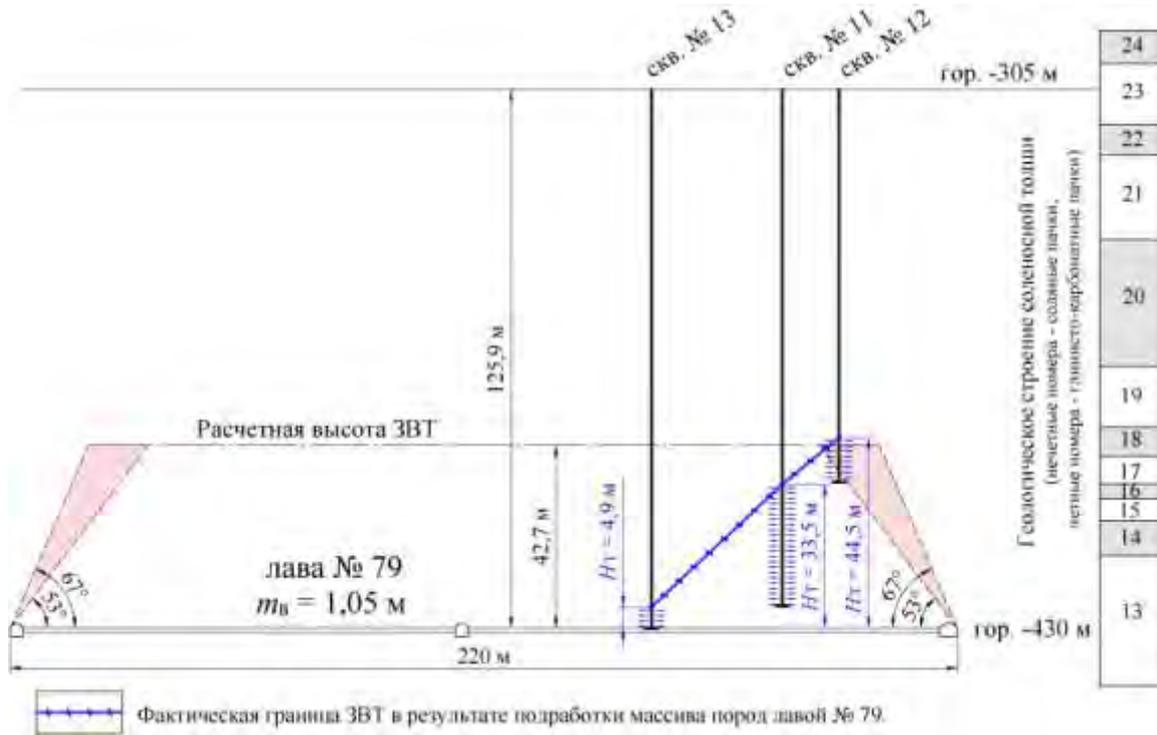


Рисунок 3 – Расчетная и фактическая высота распространения ЗВТ над лавой № 79 Третьего калийного пласта по результатам гидрокаротажа скважин

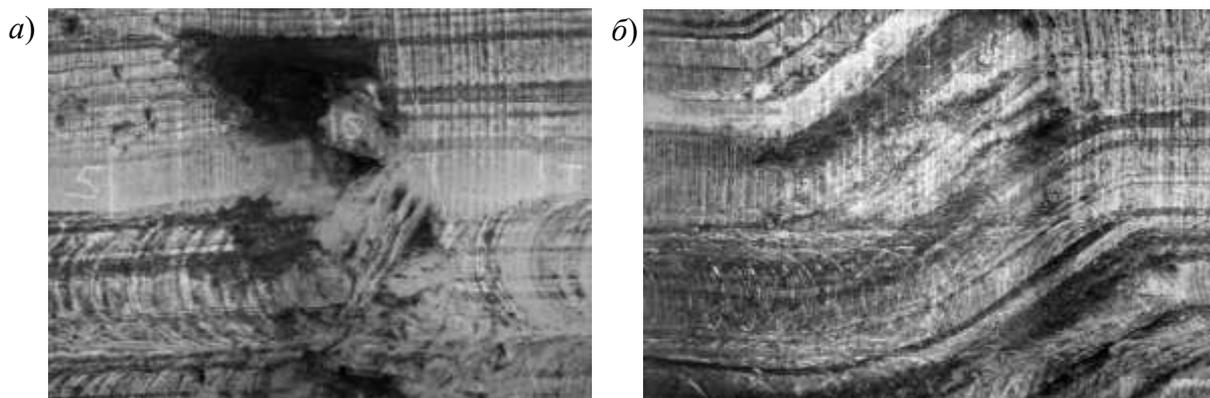
Скважиной № 12 вскрыта ЗВТ на высоте 44,5 м над выработанным пространством, что составляет 42,4 вынимаемых мощностей и практически соответствует расчетному значению. В плоской части мульды сдвижения высота ЗВТ составляет около 4,7 вынимаемых мощностей, спустя 13 месяцев с момента отработки лавы № 79.

В результате выполненных исследований установлено, что в мульде сдвижения подработанного слоистого массива водопродводящие каналы образуются в зоне резкого смещения и разлома пород над выработанным пространством.

Водопродводящие каналы наибольшей высоты расположены в зоне разлома слоев ограниченной углами 53 и 67 градусов в сторону выработанного пространства от границы лавы, что соответствует углу полных сдвижений пород. Величина наибольшего угла соответствует неподвижной границе лавы с максимальным опорным давлением. Амплитуда смещения пород в зоне разлома зависит от глубины подработки, величины вынимаемой мощности и физико-механических свойств пород подработанного слоистого массива.

Гидрокаротаж является экспресс-методом и не дает полного представления о проницаемости нарушенного массива, поскольку выполняется в течение короткого промежутка времени (20-30 мин). Для уточнения фактической высоты распространения ЗВТ специалистами ОАО «Белгорхимпром» проводятся гидрогеологические исследования в пробуренных скважинах.

В 2010 году на шахтном поле 3 РУ две исследовательские выработки № 2.1 и 2.2 вскрыли зону разлома пород над отработанной в 2004 г. лавой № 1 гор. -420 м, на глубинах подработки 3 и 5 м соответственно [2]. Спустя 6 лет после отработки лавы № 1 в исследовательской выработке № 2.1, обнаружено большое количество трещин расслоения и секущего характера, а также большое количество открытых полостей. Зона разлома расположена под углом около 53° в сторону выработанного пространства на расстоянии около 5 м от целика. В то же время в исследовательской выработке № 2.2 трещин расслоения и секущих трещин не обнаружено визуально. Зона разлома пород шириной около 3 м располагается под углом 53° на расстоянии 8-10 м от целика. При вынимаемой мощности в лаве 2,4 м амплитуда смещения пород в зоне разлома составляет 0,9 м и имеет плавную форму (рисунок 4).



а – стенка выработки, пройденной с потолочины 3 м над лавой;

б – стенка выработки, пройденной с потолочины 5 м над лавой

Рисунок 4 – Зоны разрывов и прогиба породных слоев над границей выработанного пространства лавы № 1 гор. -420 м рудника ЗРУ

Определение механизма сдвижения подработанного горного массива, разработка методов его расчета, изучение характера образования техногенных водопроводящих трещин в зоне влияния горных работ нижележащих горизонтов является одной из основных задач горной геомеханики.

Сложность и разнообразие напряженно-деформированного состояния подработанного массива, зависящего как от природных условий, так и от технологических факторов, не позволяет в настоящее время разработать единую теорию деформирования пород для всех условий, однако не исключает возможности разработки аналитических решений для определения деформаций в отдельных зонах.

Механизм формирования и развития техногенных трещин в подработанном слоистом массиве на угольных месторождениях подробно рассмотрен в современной литературе [5, 6].

Выполненные к настоящему времени исследования на шахтных полях 1 и 3 РУ ОАО «Беларуськалий» по изучению техногенной трещиноватости в условиях Старобинского месторождения калийных солей позволяют сформулировать следующие утверждения.

В зоне опорного давления над массивом, в мульде сдвижения трещины расслоений по плоскостям напластований отсутствуют. В то же время, при наличии деформаций растяжения в зоне опорного давления, в зажатой среде образуются мелкие секущие трещины, которые не соединяются с выработанным пространством.

В начальной фазе активной стадии процесса сдвижения, когда скорость оседания пород активно возрастает, в зоне разгрузки напряжений в подработанном слоистом массиве по плоскостям напластований образуются трещины расслоений.

В результате прогиба слоев на отдельных участках над выработанным пространством в них появляются растягивающие напряжения. По мере увеличения оседаний в мульде сдвижения, в местах наибольшего изгиба слоев подработанного массива, при определенной величине растягивающие напряжения достигают предела прочности пород на разрыв и в слоях появляются секущие трещины. Дальнейшее увеличение оседаний и изгиба слоев с увеличением растягивающих напряжений ведет к развитию секущих трещин на краях зоны разлома в породном массиве.

В результате техногенного воздействия в массиве горных пород образуются две системы трещин: трещины расслоений и секущие трещины. Этот факт можно рассматривать как один из вариантов механизма формирования и развития техногенных водопроводящих трещин.

При наличии в подработанном массиве двух систем трещин, при определенных условиях секущие трещины, развиваясь выше зоны обрушения пород, достигают трещин расслоения и создается водопроводящий канал, соединяющийся с выработанным пространством. Образуются так называемые зоны разрыва слоев. Такая зона образовалась на высоте 65 м над лавой № 6, наблюдаемая в исследовательской выработке гор. -200 м рудника 1 РУ (рисунок 5).



Зона разрыва слоев, характеризующаяся как водопроводящий канал, в подработанном массиве располагается в зоне разгрузки напряжений у границы очистной выработки под углом 64° к горизонту от забоя лавы в сторону выработанного пространства.

В зоне разлома наибольший угол 67° , вскрытый в разведочной выработке № 5 гор. -200 м на высоте 60 м над лавой № 6 гор. -264 м, сформировался у неподвижной границы очистной выработки, определяемой положением монтажного штрека лавы. У бортовых (конвейерный и транспортный) штреков лавы зоны разрыва слоев формируются под углом около 55° .

Рисунок 5 – Водопроводящий канал на высоте 65 м над лавой № 6 (гор. -264 м рудника 1 РУ), наблюдаемый в исследовательской выработке гор. -200 м

Выводы

1. При отработке запасов Старобинского месторождения калийных солей столбовой системой разработки с управлением кровлей полным обрушением, неравномерное подвигание фронта очистного забоя, сопровождающееся его остановками на срок около 1 месяца, способствует зависанию пород основной кровли. Возобновление движения очистного забоя приводит к резкому оседанию подрабатываемых пород и образованию субвертикальных секущих трещин и трещин расслоения.

2. Высота распространения ЗВТ в первично подработанном массиве, в условиях применения столбовой системы разработки с вынимаемой мощностью до 1,05 м и управлением кровлей полным обрушением, на Старобинском месторождении находится в пределах расчетных значений согласно [1].

3. Фактор времени существенно влияет на изменение проницаемости подработанного массива пород. Необходимо выполнить его всестороннюю детальную оценку с целью учета в методике расчета высоты распространения ЗВТ [1].

4. Водопротящие каналы наибольшей высоты расположены над границами выработанного пространства лав и приурочены к зонам разрыва слоев. Зоны разрыва слоев ограничены углами 53 и 67 градусов и имеют наклон в сторону выработанного пространства лавы (рисунки 2 и 3).

5. На основании выявленных техногенных нарушений (субвертикальных секущих трещин, расслоений, зон разрыва, изгиба породных слоев) при бурении скважин и проходке исследовательских выработок сформирована качественная модель развития техногенных трещин при отработке одиночного пласта столбовой системой разработки в условиях Старобинского месторождения [3].

Список использованных источников

1. Правила по защите рудников от затопления в условиях Старобинского месторождения: согл. Проматомнадзором РБ 11.10.2006 г. – Минск, 2006. – 104 с.

2. **Смычник, А.Д.** Натурные исследования по определению высоты формирования зоны техногенных водопротящих трещин над разрабатываемыми пластами Старобинского месторождения калийных солей Республики Беларусь / А.Д. Смычник, И.С. Невельсон, В.Н. Дешковский // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – 2009. – № 5 (частина I) – С. 92-99.

3. Исследования условий образования и высоты распространения водопротящих трещин при разработке Старобинского месторождения / В.Э. Зейтц [и др.] // Горный журнал. – 2010. – № 8. – С. 23-25.

4. Некоторые особенности развития техногенной трещиноватости внутри повторно подработанного массива горных пород / В.Н. Новокшонов [и др.] // Маркшейдерский вестник. – 2011. – № 2. – С. 53-55.

5. **Гусев, В.Н.** Геомеханика техногенных водопротящих трещин / В.Н. Гусев. – СПб.: СПГГИ, 1999. – 156 с.

6. **Певзнер, М.Е.** Геомеханика / М.Е. Певзнер, М.А. Иофис, В.Н. Попов. – М.: МГГУ, 2005. – 438 с.

Novokshonov V.N., Dshkovsky V.N., Zolnikov N.A., Danilova A.F.

Study of industrial rock jointing by development of Starobinskoye potassium salts deposit using longwall mining

Results of rock massif strata movement and undermine strata deformations by longwall mining in conditions of Starobinskoye potassium salts deposit are presented.

Поступила в редакцию 26.07.2011 г.

УДК 622.253.35(476)

МЕТОД ЗАЩИТНОГО АРМИРОВАНИЯ ЛЬДОМ ФИЛЬТРОВ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН

Бабец М.А., Халявкин Ф.Г. (УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск, Беларусь)

Рассматривается метод защиты фильтров гидрогеологических скважин от кольматации намораживанием льда. Приводятся результаты исследований скорости таяния льда в зависимости от условий установки фильтра в скважину. Указываются возможности применения метода в производственных условиях.

Введение

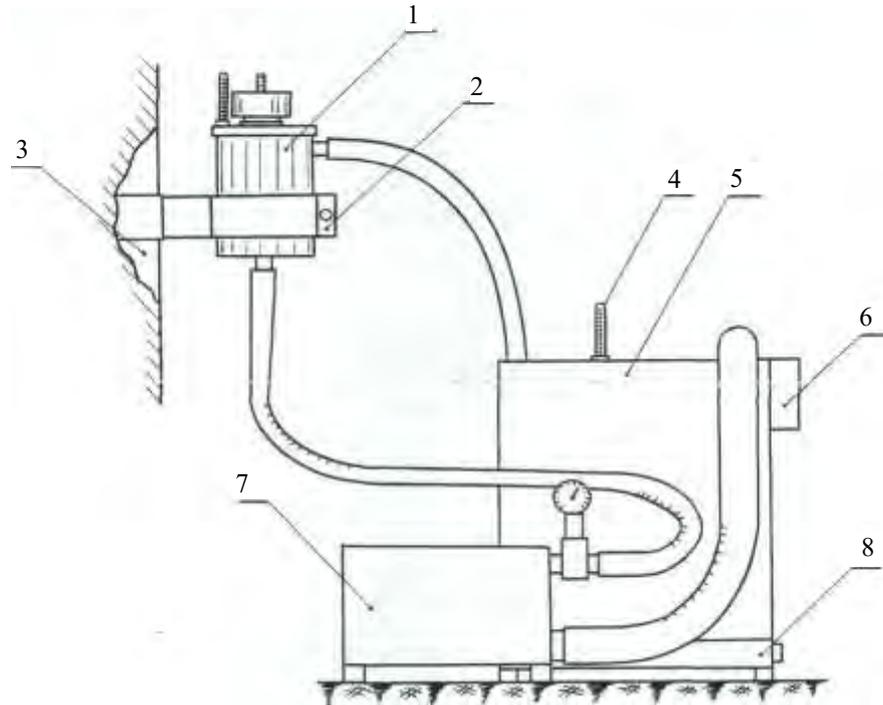
Фильтр гидрогеологической скважины является одним из наиболее важных элементов погружного оборудования. В случае нарушения целостности фильтрующей оболочки или ее загрязнения при транспортировке фильтра к скважине и установке в водоносный горизонт, качество оценки параметров пласта, как и эксплуатационные показатели скважины, ухудшается. Для предотвращения повреждений и загрязнений фильтры упаковывают при транспортировке, закрывают защитными кожухами или покрывают растворимыми пастами [1]. Эти мероприятия требуют существенных затрат труда и материалов.

Результаты исследований

Разработанный метод защиты фильтров гидрогеологических скважин намораживанием льда предусматривает заполнение фильтрующего элемента водой с ее последующим замораживанием под действием естественных отрицательных температур воздуха в зимний период и с применением специальных средств (твердой углекислоты) в теплое время года. Полученное таким образом армирование позволяет предотвратить повреждение и загрязнение фильтра при транспортировке и установке в скважину. В теплое время года намораживание льда производится непосредственно перед спуском фильтра в скважину, в которой происходит постепенное таяние льда и восстановление проницаемости фильтра.

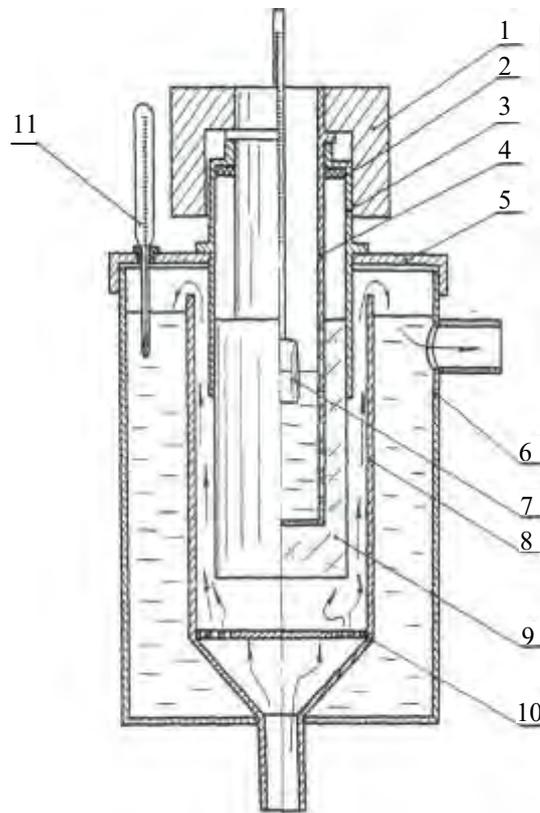
С целью определения стойкости ледяного армирования и уточнения области применения метода проведены исследования на специальном стенде (рисунок 1). В состав стенда вошла циркуляционная система, система регулирования температуры промывочной жидкости и узел крепления исследуемых моделей фильтров (рисунок 2).

Исследованы зависимости скорости таяния ледяного армирования от температуры промывочной жидкости (воды) и скорости потока воды около фильтра, содержания в ледяном армировании различных добавок. Предварительно готовились модели фильтров. С этой целью в кассету 3 (рисунок 2) вводилось перфорированное трубчатое основание 4, полость которого изнутри герметизировалась резиновым тампоном. Затем кассета переворачивалась, заливалась водой или водным раствором реагентов и охлаждалась до полного замерзания воды при естественных отрицательных температурах окружающей среды в зимний период в диапазоне от -5 до -10 °С.



1 – узел крепления моделей; 2 – хомут; 3 – стойка; 4 – термометр;
5 – циркуляционная емкость; 6 – терморегулятор; 7 – насос; 8 – нагреватель

Рисунок 1 – Стенд для исследования защитного армирования фильтров гидрогеологических скважин методом намораживания

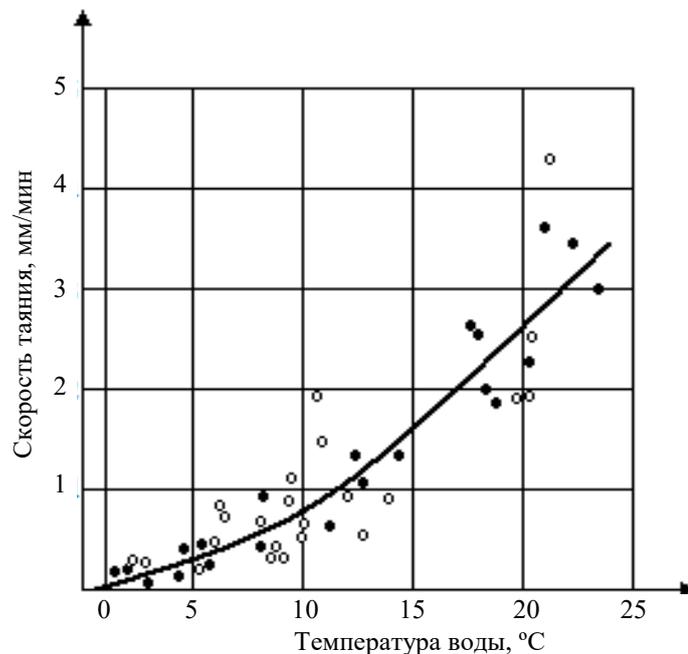


1 – груз; 2 – манжета; 3 – кассета; 4 – трубчатое основание; 5 – крышка; 6 – емкость;
7 – поплавок; 8 – циркуляционная ячейка; 9 – лед; 10 – диафрагма; 11 – термометр

Рисунок 2 – Узел крепления моделей для исследования защитного армирования фильтров гидрогеологических скважин методом намораживания

По окончании армирования трубчатого основания 4 льдом 9, кассета 3 прогревалась электронагревателем для нарушения сцепления льда с внутренними поверхностями кассеты, модель фильтра выдвигалась из кассеты на необходимую длину и вторично охлаждалась до возникновения прочного сцепления ледяного армирования с кассетой и фиксации фильтра в заданном положении. Модель вставлялась в отверстие крышки 5 узла крепления и прижималась к ней грузом 1. В циркуляционную ячейку 8 снизу подавалась промывочная жидкость с заданными параметрами. Периодически модель извлекалась из циркуляционной ячейки для контроля линейных размеров ледяного армирования. Скорость потока промывочной жидкости определялась замером расхода воды и расчетным путем по мере таяния льда, а момент разгерметизации полости трубчатого основания – по моменту всплытия поплавка 7. Расход промывочной воды при этом поддерживался постоянным.

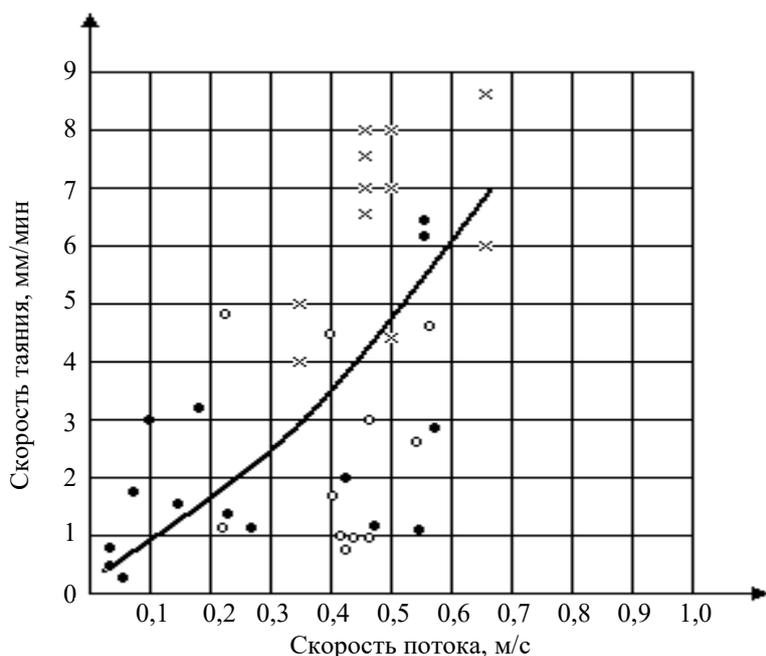
На рисунках 3 и 4 представлены полученные зависимости скорости таяния ледяного армирования от температуры и скорости потока жидкости. Из графиков видно, что стаивание льда ускоряется по параболической зависимости с ростом значений указанных параметров.



• – боковая поверхность образца; ○ – нижняя плоскость образца

Рисунок 3 – Изменение скорости таяния льда при изменении температуры воды без принудительной циркуляции

Введение в ледяное армирование эмульгирующей пасты на основе жировых отходов существенно уменьшает скорость стаивания армирования (кривая 1, рисунок 5). На меньшую величину снижается скорость стаивания при введении в армирование инертных наполнителей (кривая 1, рисунок 6). Механизм действия таких добавок связан, по-видимому, с уменьшением теплопроводности армирования, а также с образованием по мере таяния льда у поверхности армирования защитного слоя эмульгатора или наполнителя.



- — модель диаметром 85 мм; × — модель диаметром 34 мм без диафрагмы;
- — модель диаметром 34 мм с диафрагмой

Рисунок 4 – Изменение скорости таяния льда при изменении скорости потока воды с температурой 9,5 °С

При удалении из циркуляционной ячейки диафрагмы 10 (рисунок 2) модель промывалась струей воды. Скорость стаивания льда после промывания существенно возросла (рисунок 5).

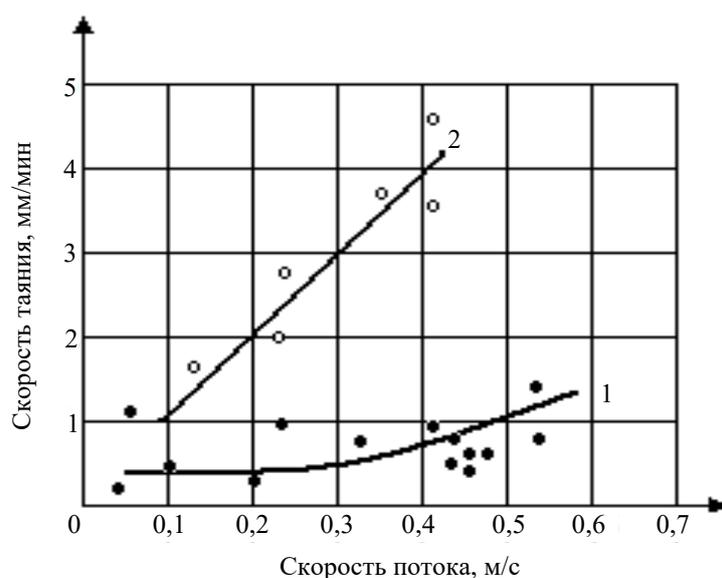
Увеличение скорости таяния льда также происходило при введении в него в процессе намораживания на фильтр (в % к объему) 40 % наполнителя в виде шелухи пшеничных зерен, 15 % жидкого стекла или 15 % поверхностно-активного вещества ОП-10 (рисунок 6).

Армирование льдом может применяться для проволочных и сетчатых фильтров. Теоретически оно не противопоказано и для корзинчатых, кожуховых фильтров и фильтров с упругими пластиковыми фильтрующими элементами.

Для намораживания армировки на проволочные фильтры в производственных условиях могут использоваться простейшие приспособления типа желобов из жести или других материалов. На армирование одного фильтра требуется от 2 до 24 часов, что зависит от температуры охлаждающего воздуха. Чем ниже температура, тем меньше время намораживания.

Присоединительные резьбы фильтра освобождают ото льда скалыванием или оттаиванием с помощью паяльной лампы. Наружный диаметр армирования калибруется под диаметр скважины с учетом кольцевого зазора.

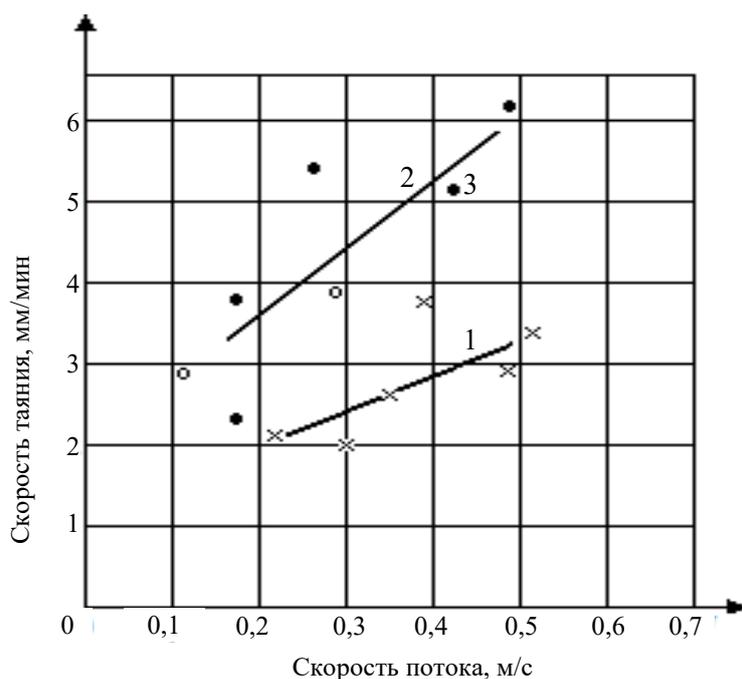
Эффективность действия ледяного армирования по предотвращению динамической кольматации фильтра определяется скоростью таяния льда в скважине. Для диаметров бурения 93, 112, 132 мм глубина спуска фильтра до момента начала восстановления проницаемости фильтрующего элемента составляет, в среднем, от 50 до 360 м при снижении температуры жидкости в скважине с 15 до 5 °С соответственно. Скорость армирования может возрастать при более низкой температуре льда, а также при температуре воздуха от -20 до -30 °С и ниже.



• – с диафрагмой; ○ – без диафрагмы;

1 – с диафрагмой; 2 – без диафрагмы

Рисунок 5 – Изменение скорости таяния льда с добавкой 6 % (весовых) натриевых солей жирных кислот при изменении скорости потока воды с температурой 8,5 °C



× – шелуха пшеничного зерна; • – жидкое стекло; ○ – ПАВ ОП-10

**Рисунок 6 – Изменение скорости таяния льда с содержанием (по объему):
1 – 40 % наполнителя (шелуха пшеничного зерна); 2 – 15 % жидкого стекла (Na_2SiO_3);
3 – 15 % ОП-10 при изменении скорости потока воды с температурой 8 °C**

Стойкость ледяного армирования можно увеличить введением добавок в виде эмульгаторов и наполнителей, а также установкой защитных резиновых манжет в нижней части фильтра. Манжеты препятствуют поступлению жидкости в кольцевой зазор между фильтром и стенками скважины при спуске фильтра на забой. При этом снижа-

ется скорость потока в кольцевом пространстве и тем самым замедляется стаивание льда с внешней поверхности фильтра.

Существенное увеличение стойкости армирования происходит при применении опережающего массивного ледяного «буфера» ниже башмака фильтра, а также промывка скважин перед посадкой фильтра предварительно охлажденной в поверхностных емкостях водой.

Защитное армирование льдом при использовании естественного намораживания более экономично по сравнению с применением для этих целей защитных упаковок, кожухов или водорастворимых пленок. Менее экономичной и экологичной является технология искусственного намораживания с использованием сухой углекислоты, особенно при бурении водозаборных скважин.

Заключение

В статье излагается метод защиты фильтров гидрогеологических скважин от кольтации намораживанием льда. Приводятся результаты исследований скорости таяния льда в зависимости от условий установки фильтра в скважину и введение в ледяное армирование различных эмульгаторов и наполнителей. Указаны пути увеличения стойкости ледяного армирования и возможности применения метода при бурении скважин различного назначения.

Список использованных источников

1. **Федоров, Ю.С.** Предупреждение кольтации фильтров гидрогеологических скважин / Ю.С. Федоров, А.А. Петров // Разведка и охрана недр. – 1974. – № 7. – С. 56-58.

Babets M.A., Khalyavkin F.G.

Method of protective ice reinforcement of the water well filters

Method of protection of water well filters from colmatation by means of ice freezing is examined. The results of investigation of ice dissolution rate depending on filter installation conditions into the water well are presented. Application possibilities of this method in the working conditions are mentioned.

Поступила в редакцию 26.07.2011 г.

УДК 539.4.015

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ ПОРОД И МАТЕРИАЛОВ

Осипов С.Н., Смычник Е.А., Шваб Р.Г. (ОАО «Белгорхимпром», г. Минск, Беларусь)

Показано многообразие процессов разрушения пород и материалов в зависимости от их структуры, физико-механических свойств и воздействия внешних нагрузок. При этом существенное значение имеют величина и динамика изменения полей различных видов напряжений с учетом изменения во времени и пространстве.

Введение

При подземной разработке полезных ископаемых важнейшей проблемой является защита горных выработок от затопления из расположенных над ними водоносных пластов или расположенных на земной поверхности водоемов. Продолжающиеся случаи затопления рудников в различных регионах земного шара и, в частности, Верхнекамском месторождении калийных солей свидетельствуют о недостаточном познании процессов и закономерностей трещинообразования в породах водозащитной толщи (ВЗТ), деформируемых в результате ведения горных работ.

Проблеме трещинообразования и разрушения различных материалов, к которым относятся горные породы, за последние 100 лет посвящены тысячи опубликованных научных статей и сотни монографий, в которых предложено несколько механизмов разрушения. Однако до сих пор некоторые особенности процессов трещинообразования и разрушения многих материалов при сложных переменных режимах нагрузка – разгрузка остаются недостаточно изученными.

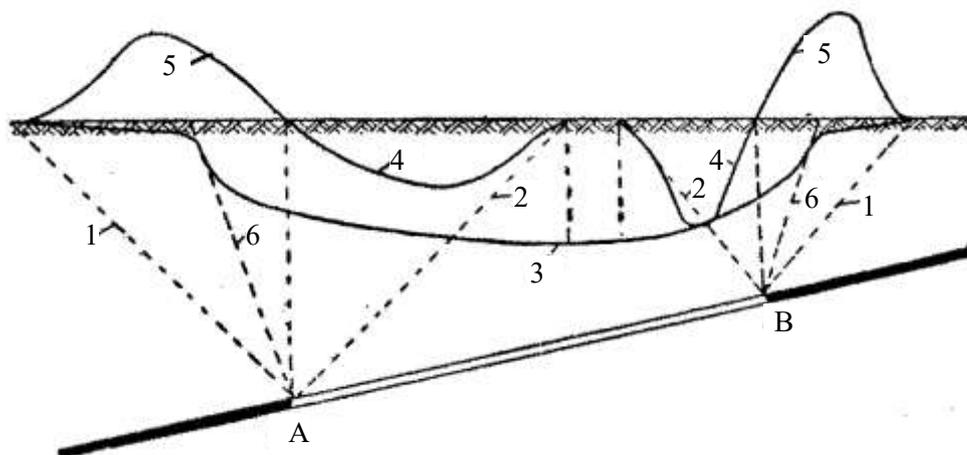
Необходимо иметь в виду, что при разработке многих месторождений полезных ископаемых пластовой формы залегания приходится отрабатывать несколько расположенных на разных глубинах пластов. При этом воздействие выработанных пространств нескольких отрабатываемых пластов может в различных сочетаниях, в том числе и последовательно, воздействовать на вышележащие породные пласты, создавая режимы многостадийного воздействия. Такое многорежимное воздействие на процессы трещинообразования еще мало изучено. Кроме того, сложная динамика изменения объемного напряженного состояния пород в зоне влияния подработки с учетом слоистости отложений с пластами пород, имеющих разные физические характеристики (от хрупких до пластичных) и разные показатели анизотропии, делает чрезвычайно сложным не только аналитическое описание процессов трещинообразования, но и объяснение физических процессов. Поэтому новые попытки научного анализа процессов трещинообразования могут представлять определенный интерес.

Анализ наблюдений и экспериментальных исследований

После разработки около 100 лет назад профессором М.М. Протодяконовым (старшим) теории свода естественного равновесия над горной выработкой ограниченной ширины (первые десятки метров) образование такого свода в различных модификациях было приурочено к выработанному пространству длинных очистных забоев (лав), особенно при управлении кровлей полным обрушением.

Одновременно развернулись работы по изучению закономерностей сдвижений и деформаций вокруг горных выработок. Основываясь на результатах наблюдений за относительно плавным деформированием земной поверхности, профессор С.Г. Авершин предложил [1] аналитическую зависимость для расчета вертикальных сдвижений земной поверхности при отработке пластов пологого залегания. Здесь [1] также приведены схемы сдвижения пород над выработанным пространством.

В этом отношении весьма характерной является работа профессора Р. Зельденрата [2], в которой приведена схема оседания земной поверхности (рисунок 1) над выработанным пространством длинного очистного забоя (лавы). Эти схемы, предложенные около 60-ти лет назад, полностью соответствует современным представлениям [5] опускания пород.



- 1 – первая граничная плоскость влияния; 2 – вторая граничная плоскость влияния;
3 – линия оседания; 4 – сжимающие напряжения; 5 – растягивающие напряжения;
6 – плоскость разлома

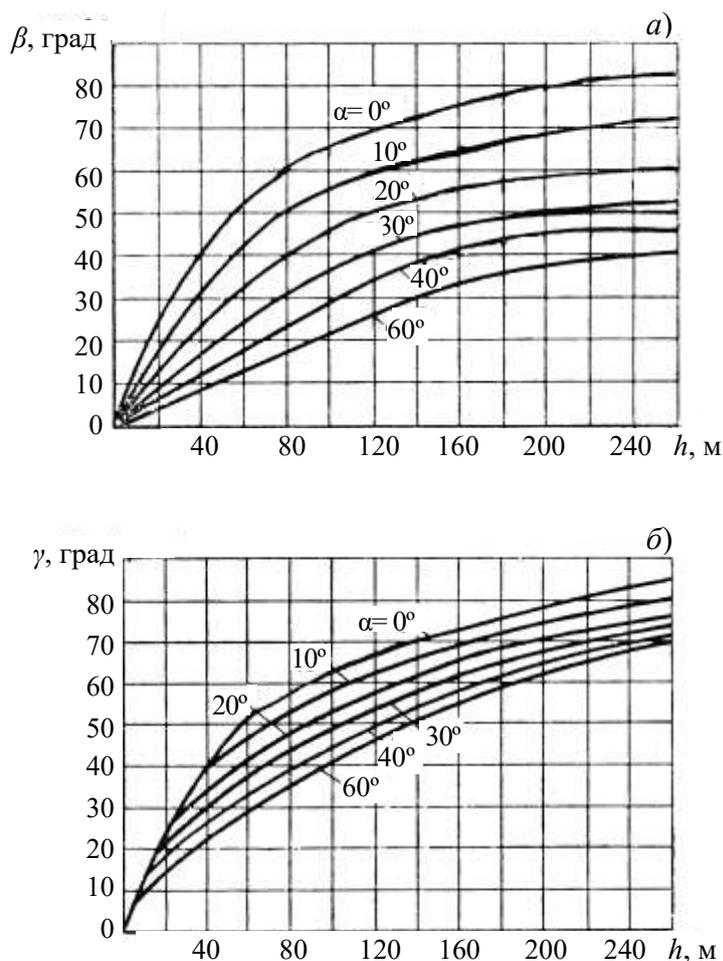
Рисунок 1 – Схема оседания земной поверхности

Однако в соответствии с этой схемой величины граничных углов влияния подработки на границы полностью сформированных во времени зон влияния не зависят от углов падения и вертикальных расстояний на разрезе вкрест простирания от отработанного пласта.

Еще в 1959 г. для условий Донецкого бассейна на базе обширных наблюдений и расчетов были предложены [6] приведенные на рисунке 2 зависимости величины граничных углов на разрезе вкрест простирания от угла падения и вертикального расстояния h горных работ.

Использование этих зависимостей приводит [7] к несколько иным (криволинейной вместо прямолинейной) граничным плоскостям влияния подработки вышерасположенных пластов (рисунок 3), что особенно важно при оценке необходимой мощности ВЗТ, которая обычно должна составлять 200÷300 м [8], где деформация краевых зон в примыкающих к выработанному пространству целиках особенно заметна.

Как отмечено в [2], плоскость разлома пород кровли прослеживалась на расстоянии 80 м выше отработываемого пласта под углом падения на выработанное пространство 67-72° к горизонту. В Бельгийских шахтах установлено, что сильные обрушения (посадка основной) кровли при глубине разработки до 300 м отражаются на земной поверхности уже через 24 часа.



a – по падению пласта; *б* – по восстанию пласта

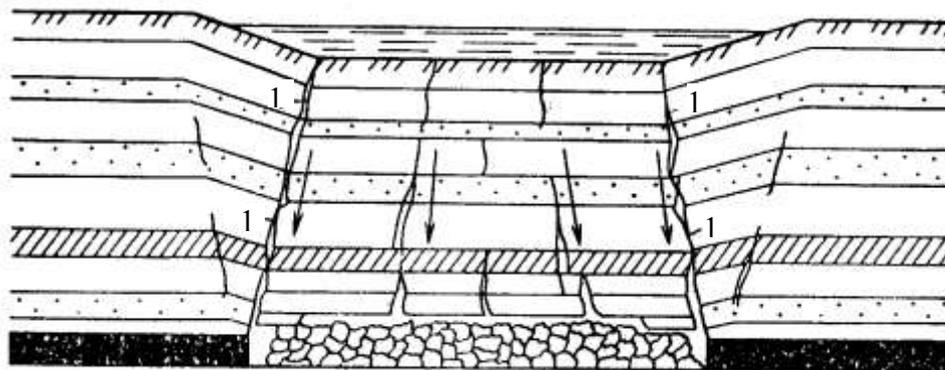
Рисунок 2 – Зависимость величины граничных углов на разрезе вкрест простирания от угла падения и вертикального расстояния от границы горных работ



1, 2, 3 – нижележащий, сближенный и вышележащий пласты соответственно;
 I-I – граница зоны, расположенной непосредственно над выработанным пространством;
 II-II – граница зоны влияния горных работ по падению и восстанию от границ выемочного участка;
 l' и l'' – зоны влияния горных работ на сближенный пласт 2 соответственно по восстанию и падению разрабатываемого пласта

Рисунок 3 – Влияние прямого порядка отработки выемочного поля на образование зон деформации пород над угольными целиками

Приведенная в [9] схема возможного прорыва воды в выработанное пространство (рисунок 4) полностью соответствует образованию плоскости разлома подработанных пород. При этом плоскости разлома наклонены к выработанному пространству и вблизи последнего соответствуют начальной стадии образования свода естественного равновесия, который не мог сформироваться вследствие большой длины основания свода и преобладанию слоистой структуры пород.



1 – зона главного разлома покрывающих пород

Рисунок 4 – Схема возможного прорыва воды через зону сплошной трещиноватости

Как указывал П. Стассен [3], К. Кегель, А. Уинстенли и А. Лабасс рассматривают породы кровли пласта как отложения слоев различной жесткости, которые более или менее изгибаются, отслаиваясь один от другого. Пустые пространства между слоями могут достигать нескольких сантиметров. Они облегчают каптаж метана и объясняют причину прорывов воды из вышележащих пород. Последнее, по-видимому, связано с тем, что эти полости (пустые пространства) создают гидравлическую связь между различными системами примерно вертикальных трещин в налегающих породных пластах с различными горно-геологическими и физико-механическими характеристиками, которые могут являться итогом не только эндогенных (природных), но и экзогенных (техногенных) процессов.

В таблице, заимствованной у Ф. Шпрута [3], приведены результаты теоретических расчетов возможного прогиба консольного слоя породы длиной 8 м, из которых первые 3 м от точки зажатия расположены на упругой подложке (угольном пласте) толщиной 1,5 м.

Таблица – Расчетные значения стрелы прогиба консольного слоя породы длиной 8 м при упругой заделке первых 3 м

Породы	Толщина пласта, см	Теоретически возможная стрела прогиба, см		$K_{пл}$
		в пределах упругости	до разрыва	
Песчаник (предел прочности на изгиб 10 МПа, модуль упругости $2 \cdot 10^4$ МПа)	150	1,8	2,3	1,28
	100	2,6	3,3	1,27
	50	5,4	6,7	1,24
Глинистый сланец (предел прочности на изгиб 15 МПа, модуль упругости $4,5 \cdot 10^4$ МПа)	150	1,5		
	100	2,2		
	50	4,4		

Как видно из этих данных, увеличение толщины пласта породы в 3 раза (с 50 до 150 см) приводит к уменьшению стрелы прогиба также примерно в 3 раза. Учет пластических свойств песчаника, характеризуемый коэффициентом $K_{пл}$, увеличивает возможную стрелу прогиба примерно на четверть. Следует отметить, что прочностные характеристики песчаника на изгиб больше таковых для соляных пластов. Поэтому при последовательном опускании даже одинаковых по механическим свойствам отдельных пластов более тонкие из них при недостаточной спайности будут отделяться от вышерасположенной толщи, создавая водопроводящие каналы между системами трещин разрыва, параллельных краям целиков или не вынутого массива полезного ископаемого. Такая же, но более проработанная схема разлома и расслоения подработанной слоистой толщи пород по краям целиков или массива приведена профессором А.А. Борисовым [10].

Исходя из приведенных в таблице данных, параметры опускания и разлома подработанной толщи пород определяются наиболее мощными и прочными пластами, характеризующимися минимальными величинами стрелы прогиба до разлома. Поэтому в пределах образования существенных плоскостей разлома пересекающих ВЗТ и доходящих до водоносных горизонтов весьма вероятен пульсирующий режим последовательного опускания восходящих слоев пород. Влияние определенного сейсмического воздействия на ускоренное первичное опускание породной толщи мощностью до 300 м, отмеченное Р. Зельденратом [1] на земной поверхности через 24 ч после сильного обрушения кровли в очистном забое, свидетельствует о возможном существенном влиянии динамических характеристик сдвижения пород на их режим опускания.

Как указывает А. Лабасс [4], слои породы оказываются тем более жесткими, чем меньше в них трещин, то есть чем прочнее порода и меньше глубина залегания. Слои сланцев проявляют жесткость вблизи земной поверхности, а слои песчаника становятся гибкими на большой глубине. Степень изгиба, которая может проявиться в этих слоях, зависит не только от их жесткости, величины пролета и нагрузки, но и от времени. Жесткий слой, имеющий меньший изгиб, должен нести на себе вес находящихся над ним гибких слоев. Если жесткий слой находится над гибкими слоями, то последние могут отделяться от него с образованием пустот, проводящих газ и воду.

Основываясь на теории обволакивающих поверхностей ослабленных подработкой пород, А. Лабасс [4] считает, что расстояние между крайними трещинами, определяющими возможности разлома, в двух соседних пластах зависит от прочности пород – чем больше различие, тем больше расстояние между этими трещинами. Если трещиноватость дойдет до очень гибкого слоя или до зоны, где трещины произошли ранее в связи со старыми работами, то здесь явление отслаивания пород может не происходить, но явления изгиба еще продолжаются.

Процессы трещинообразования при изгибе породных пластов в реальных условиях в значительной мере зависят не только от природных физико-механических свойств этих пород, но и от их напряженно-деформированного состояния, которое скорее всего является объемным неравнокомпонентным. Так, согласно исследованиям В.В. Виноградова [11], при осесимметричном сжатии геоматериалы изменяют тип своего запредельного поведения, приближаясь по мере роста бокового давления $P = \sigma_2 = \sigma_3$ к псевдопластичным и пластичным материалам. Испытания горных пород при трехосном неравнокомпонентном сжатии показали, что тип запредельного поведения определяется в основном величиной минимальной компоненты напряжений σ_3 , что приводит к переходу от механизма хрупкого и псевдохрупкого разрушения к прерывистому скольжению, псевдопластическому и пластическому течению. Поэтому по

характеру перехода к разрушению горные породы могут подразделяться на геоматериалы с хрупким и псевдохрупким разрушением, прерывистым скольжением, псевдопластическим и пластическим течением. Эти результаты [11] получены при неравнокомпонентном объемном сжатии образцов горных пород, но случай растяжения в одном направлении (например, σ_2) и неравнокомпонентного сжатия в двух остальных (σ_1 и σ_3) совершенно не изучен, хотя именно такое поле напряжений возникает и возможно сохраняется в течение какого-то времени в зонах растяжений при сдвигении пород в краевых зонах мульды.

Учитывая заметные пластические свойства пород ВЗТ Старобинского месторождения калийных солей, необходимо использовать исследования [11], которые показали, что для пород с прерывистым скольжением потеря несущей способности происходит при чередовании актов хрупкого разрушения и псевдопластического течения. Для пород, склонных к пластическому течению, разупрочнение, если происходит, то с модулем спада, отношение которого к модулю упругости $M/E < 1$. Поперечные деформации на этой стадии деформирования пород развиваются в 3-10 раз интенсивнее продольных, что важно учитывать при оценке возможности залечивания трещин.

Для хрупких и псевдохрупких материалов при боковых давлениях $P \geq (0,1 \div 0,2) \cdot \sigma_{сж}$ проявляется режим прерывистого скольжения, а при $P \geq (0,4 \div 0,5) \cdot \sigma_{сж}$ – псевдопластического течения. Для пород с прерывистым скольжением при одноосном сжатии псевдопластическое течение возникает при $P \geq (0,3 \div 0,4) \cdot \sigma_{сж}$. В отличие от существующих представлений развитие поперечных деформаций ε_2 и ε_3 в условиях осесимметричного сжатия происходит неравномерно как по значению, так и по направлению [11]. Для пород, склонных к хрупкому разрушению, уже на стадии разупрочнения преимущественное развитие поперечная деформация получает в одном из направлений.

При трехосном неравнокомпонентном сжатии развитие процесса микроуплотнения происходит неравномерно по объему, что ведет еще на допредельных стадиях формирования зон повышенных концентраций напряжений и разрыву внутренних связей. Остаточная несущая способность весьма чувствительна к боковому давлению (при неравнокомпонентном сжатии к σ_3), а изменение бокового давления на 1 МПа ведет к изменению несущей способности нарушенного материала на 5÷10 МПа, что в несколько раз выше, чем для не нарушенного материала. После цикла нагружения практически стабилизировавшееся значение остаточной прочности существенно снижается по сравнению с начальной величиной.

Используя достижения математики и механики, Гриффитс и Орован разработали теорию трещинообразования под действием возникающих напряжений в твердых телах. Основные положения этой теории используются до сих пор при описании процессов разрушения в результате развития трещин. Согласно теории Гриффитса и Орована, для развития трещины необходимо наличие зародыша, в качестве которого могут служить микротрещина или точка неоднородности свойств материала, возникшая в результате структурной или прочностной (композитные материалы) неоднородности.

Как указывает У.Д. Кингери [12], теоретическое напряжение разрушения при действии нормального растягивающего напряжения в направлении главной оси трещины в определенных границах обратно пропорциональна корню квадратному из длины главной оси трещины. Поэтому рост трещин в итоге приводит к разрушению твердого тела.

Известно много попыток разработать статистическую теорию прочности твердых тел. При этом использовалось предположение, что количество опасных трещин в образце связано с его объемом и площадью поверхности.

Анализ прямых наблюдений за трещинами [13] и степенью поврежденности грунта [14], способными привести к разрушению, показывают, что это количество меняется от одного материала к другому [12-14] и, по-видимому, существенно зависит от свойств материала (хрупкость, пластичность, термостойкость и т.п.), условий эксплуатации (переменные нагрузки, существенно нестационарный температурно-влажностный режим, агрессивность среды и т.п.), качества обработки и покрытия поверхностей. Однако до сих пор общей статистической теории нет. Одной из наиболее известных статистических теорий прочности является теория, развитая Вейбуллом еще в 1939 г.

Существенный рост расчетных возможностей ЭВМ в последние годы с одной стороны позволил производить расчеты все более крупных, сложных и многозвенных строительных конструкций, а с другой стороны повысил вероятность и размер возможных итоговых погрешностей. Как известно, уже при выводе фундаментальных дифференциальных уравнений строительной механики отбрасываются многие величины низших порядков малости. При обычных расчетах такой прием не оказывает заметного влияния на погрешность конечного результата, но при расчете многозвенных (несколько тысяч) конструкций результат может быть иным. Кроме того, требования к устойчивости решения возрастают с увеличением последовательных шагов расчета на ЭВМ, т.к. каждый последовательный шаг расчета вносит хотя и очень малую, но определенную погрешность аналогично методу смены стационарных состояний. Кроме того, часто аналитические решения дифференциальных уравнений по разным причинам получаются в виде, которому при определенных значениях параметров свойственна осцилляция и даже сингулярность. С подобной проблемой столкнулся автор при теоретическом исследовании газодинамики угленосных отложений еще 40 лет назад, когда возможности ЭВМ были несравнимо меньше чем теперь. Только использование определенных аналитических приемов и ЭВМ БЭСМ-4 позволили решить возникшие проблемы.

Еще одной причиной существенных отклонений расчетных параметров строительной конструкции от фактических, что может привести к резкому снижению надежности, может являться значительное влияние пластичности материалов, которое не учитывается или учитывается недостаточно при расчете. Особенно важно учитывать пластичность при нагрузках близких к пределу упругости и при обеспечении долговечности, что необходимо при расчете устойчивости фундаментов на достаточно слабых грунтах.

Как указывает С.С. Вялов [14], многие осадочные породы, находящиеся под нагрузкой, с течением времени существенно теряют свои прочностные свойства, что связано с пластическими и вязкими свойствами. У пластичных глинистых грунтов, которые зачастую являются основой ВЗТ, прочность при одноосном сжатии снижается сравнительно быстро, а отношение прочностей при τ_{∞} и τ_0 (здесь τ – время воздействия нагрузки, а индекс «о» обозначает разрушение образца при обычном испытании в лабораторных условиях в течение 1 минуты и менее) колеблется в пределах от 0,2 до 0,6. У плотных глин это отношение повышается до 0,5-0,8 и даже доходит до 0,9. У скальных и полускальных пород в зависимости от вязких свойств, как цементационных связей, так и самих кристаллов, отношение прочностей варьируется преимущественно в пределах 0,6-0,8. Для сильвинита это отношение составляет около 0,5-0,6. Многие металлы также обладают подобными свойствами, но с меньшей потерей прочности. Кривые ползучести грунта и длительной прочности для иллюстрации методики определения τ_0 и τ_{∞} приведены на рисунке 5.

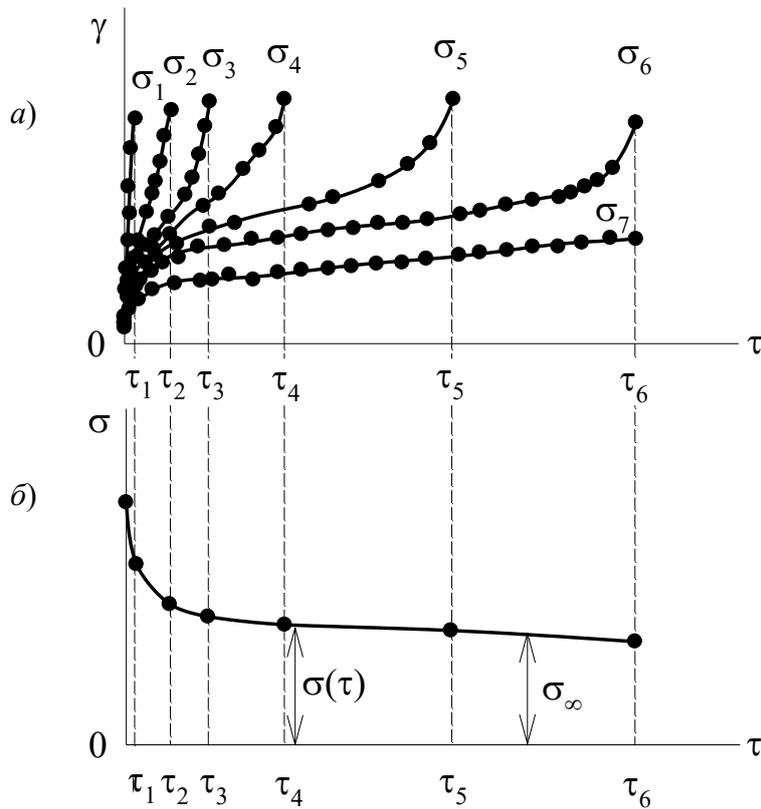


Рисунок 5 – Кривые ползучести материала (а) при различных одноосных сжимающих напряжениях ($\sigma_1 \div \sigma_7$) и кривая длительной прочности (б)

Снижение прочностных свойств материалов происходит за счет образования и развития трещин, а также поврежденности внутренней структуры материала в процессе деформирования.

Как показала обработка результатов испытаний на сжатие сильвинита, проведенных А.Н. Ставрогиным [17], а также известняка, песчаника и сланца (изгиб), проведенных В.С. Артемьевым и В.Л. Водопьяновым [18], наилучшей формой аппроксимации (рисунок 5б) является уравнение:

$$\sigma_\tau = \sigma_0 [\alpha_1 + \alpha_2 \exp(-c\tau)], \quad (1)$$

где σ_τ – прочность породы на сжатие (изгиб) через время τ пребывания в напряженном состоянии, МПа;

σ_0 – прочность породы на сжатие (изгиб) при весьма кратковременном действии напряжения, МПа;

α_1 – доля прочности при весьма длительном ($\tau \rightarrow \infty$) действии напряжений;

α_2 – доля прочности, зависящая от времени действия напряжений;

c – эмпирический коэффициент показателя степени, сут⁻¹;

τ – промежуток времени действия напряжения, сут.

Например, для сильвинита выражение (1) аппроксимирует экспериментальные точки с корреляционным отношением 0,99 и относительным коэффициентом вариации $K_{в.о} = 0,42\%$ при $\sigma_0 = 32$ МПа, $\alpha_1 = 0,6$; $\alpha_2 \approx 0,4$ и $c = 0,3235$ сут⁻¹. Результаты экспери-

ментов со скальными и полускальными породами также хорошо аппроксимируются приведенным выражением.

Дальнейшему развитию теории Гриффитса-Орвана посвящены сотни научных работ, анализ которых и результаты новых исследований приведены в изданной недавно монографии С.Н. Леоновича [19], посвященной трещиностойкости и долговечности бетонных и железобетонных элементов.

Однако, несмотря на многочисленные исследования, до сих пор проблемы расчета долговечности строительных конструкций не получили достаточно законченного решения. Последнее в первую очередь относится к описанию закономерностей вероятностной составляющей природы разрушения. Поэтому работа Б.Г. Холодарь [13] представляет особый интерес.

Хотя основные кинетические уравнения получены около 30 лет назад, но их дальнейший анализ и интерпретация и теперь представляют теоретический и практический интерес, особенно в связи с возникшей проблемой контроля прочности бетона [20].

Новая интерпретация результатов испытаний на долговечность образцов из поликристаллического цинка [21, 22] позволила Б.Г. Холодарь получить [13] новые интересные результаты. К таковым в первую очередь следует отнести распределение плотности вероятности разрушения образцов во времени при постоянной нагрузке $dP/d\tau$ и исходной поврежденности $dP/d\omega_0$, плотность вероятности которой представляет большой интерес. Форма этой плотности вероятности (рисунок 6) больше напоминает логнормальное распределение, а не распределение Вейбулла [23], чего можно было ожидать. Однако в этой работе [13] рассматривается статистическая вероятность разрушения образцов с начальным и неизменным во времени распределением повреждений, приводящим к различным вероятностям и моментам разрушений в зависимости от величины и режима нагружения.

Как пишет автор работы [13] в ее заключительной части: «Поскольку частотный параметр ν в уравнении (2)* рассматривался выше как некоторая константа материала, то само уравнение при этом не описывает режимов зарождения и размножения дефектов структуры, появляющихся в материале в процессе его активного нагружения, например, циклического. В этом смысле сделанный выше вывод о применимости критерия Бейли фактически относится к случаю медленноменяющихся нагрузок, для которых непосредственно вызываемая ими (наведенная в материале) поврежденность составляет некоторую достаточно малую долю от исходной «технологической» поврежденности». Однако, как видно из [13, рисунок 5], уровень нагруженности ($x = 4; 16; 32$) не влияет на изменение максимального уровня начальной поврежденности материала ($\omega_0 \approx 0,22$), что противоречит физике процесса подготовки разрушения, т.к. разрушение 25 % образцов (12 из 48) происходит уже при $x = 8$. Последнее также видно из рисунка 6, заимствованного из [13]. Здесь также необходимо отметить, что практикой установлена особая опасность превышения расчетной нагрузки различных элементов строительной конструкции (дополнительная нагрузка на кровлю в результате укладки новых слоев кровельных материалов без удаления старых [24], превышения снеговой нагрузки расчетной, обледенения и т.п.).

Интересно отметить, что при повторном нагружении образцов (рисунок 6) произошел сдвиг по времени кривой вероятности разрушения образцов по сравнению с непрерывным нагружением. Повторное нагружение образцов производилось после первого

* Уравнение (2) в [13] описывает скорость изменения меры поврежденности ω во времени при одноосном растяжении. Уравнения (1) в [13] описывают изменение меры поврежденности за счет гидростатической и девиаторной (сдвиговой) компонент.

нагрузки при $\sigma = 8$ кгс/мм² в течение времени $T_0 = 3000$ с в результате чего из 48 образцов разрушилось 12 (25 %). Оставшиеся 36 образцов кратковременно «отдохнули» и были нагружены повторно при $\sigma = 8$ кгс/мм² (рисунок 6, кривая 2). Новая кривая вероятности разрушения проходит существенно выше таковой при непрерывном нагружении (кривая 1). Необходимо отметить, что если провести уровень $P = 0,75$ (пунктир 3), то есть вычесть использованный при первичном нагружении уровень вероятности 0,25 (25 %), до кривой 1 и перенести точку пересечения на кривую 2 (точка 4), то уровень достигнутой вероятности практически приближается к 1. Таким образом, первичная нагрузка в течение $T_0 = 3000$ с уменьшила завершение процесса разрушения всех образцов с 20000 с до примерно 10000 с. Первичная нагрузка в течение 3000 с оказалась эквивалентной конечной части процесса разрушения в 10000 с. Поэтому при переменном режиме нагрузки даже с одинаковой предельной нагрузкой интенсивность процесса разрушения не остается постоянно соответствующей режиму непрерывного нагружения.

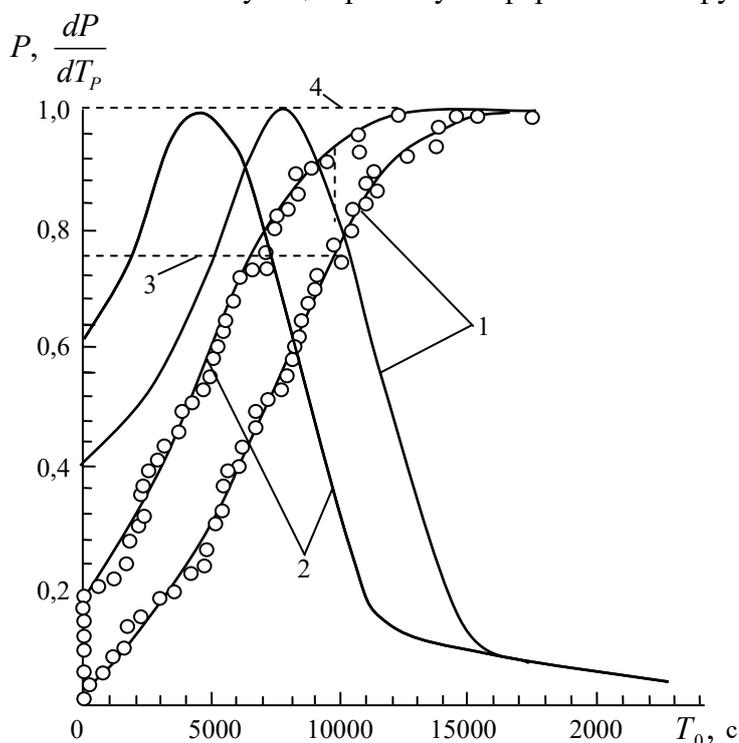


Рисунок 6 – Вероятность разрушения и плотность ее распределения при непрерывном нагружении (кривые 1) и нагружении с прерыванием (кривые 2). Пунктирная линия 3 – уровень вероятности разрушения 0,75; 4 – время почти полного разрушения всех образцов при повторном нагружении

Заключение

Многолетние исследования процессов разрушения пород и материалов показали решающее значение их структуры, свойств образующих минералов и связей между ними, определяющими возможную пластичность, а также влияние видов полей напряжений и динамики их воздействия во времени и пространстве. Сам процесс разрушения может быть описан сочетанием детерминированных и стохастических закономерностей.

Список использованных источников

1. **Авершин, С.Г.** Сдвигение горных пород при подземных разработках / С.Г. Авершин. – М.: Углетехиздат, 1947. – 245 с.
2. **Зельденрат, Р.** Являются ли породы каменноугольных отложений сыпучими телами и можно ли применить к ним законы механики грунтов / Р. Зельденрат // материалы Междунар. конф. по горному давлению, Льеж, 1951. – М.: Углетехиздат, 1957. – С. 80-88.
3. **Стассен, П.** Обзорный доклад подсекции / П. Стассен // материалы Междунар. конф. по горному давлению, Льеж, 1951. – М.: Углетехиздат, 1957. – С. 157-170.
4. **Лабас А.** Давление и сдвигение пород / А. Лабас // материалы Междунар. конф. по горному давлению, Льеж, 1951. – М.: Углетехиздат, 1957. – С. 23-27.
5. **Турчанинов, И.А.** Основы механики горных пород / И.А. Турчанинов, М.А. Иофис, Э.В. Каспарьян. – Л-д: Недра, 1977. – 368 с.
6. **Прокофьев, В.П.** Рациональные способы подготовки и системы разработки сближенных пластов / В.П. Прокофьев, К.П. Заика. – М.: Углетехиздат, 1959. – 234 с.
7. **Осипов, С.Н.** Метановыделение при разработке пологих угольных пластов / С.Н. Осипов. – М.: Недра, 1964. – 256 с.
8. Месторождения калийных солей Беларуси / под ред. Э.А. Высоцкого и А.Д. Смычника. – Мн.: БГУ, 2003 – 264 с.
9. **Проскураков, Н.М.** Управление состоянием массива горных пород / Н.М. Проскураков. – М.: Недра, 1991. – 368 с.
10. **Борисов, А.А.** Расчеты горного давления в лавах пологих пластов / А.А. Борисов. – М.: Недра, 1964. – 278 с.
11. **Виноградов, В.В.** Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок / В.В. Виноградов. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
12. **Кингери, У.П.** Введение в керамику / У.П. Кингери. – М.: Изд. лит. по строительству, 1967. – 500 с.
13. **Холодарь, Б.Г.** Связь долговечности материала с уровнем его исходной поврежденности / Б.Г. Холодарь // Строительство и архитектура (Вестник Брестского государственного технического университета). – 2005. – № 1. – С. 40-46.
14. **Вялов, С.С.** Реологические основы механики грунтов / С.С. Вялов. – М.: Высшая школа, 1978. – 448 с.
15. **Черепанов, Г.П.** Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
16. **Панасюк, В.В.** Предельное равновесие хрупких тел с трещинами / В.В. Панасюк. – Киев: Наукова думка, 1968. – 246 с.
17. **Ставрогин, А.И.** Исследование реологических свойств грунтов / А.И. Ставрогин. – М.: Энергия. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 38, 1968.
18. **Артемьев, В.Г.** О длительной прочности горных пород / В.Г. Артемьев, М.М. Водопьянов // Проблемы реологии горных пород. – Киев: Наукова думка, 1970.
19. **Леонович, С.Н.** Трещиностойкость и долговечность бетонных и железобетонных элементов / С.Н. Леонович. – Минск: Тыздзень, 1996. – 266 с.
20. **Блещик, Н.П.** К вопросу о контроле прочности бетона в свете требований ГОСТ 18105-86 и общеевропейского стандарта EN206-1:2001 / Н.П. Блещик, В.В. Тур, В.К. Кравченко // Строительная наука и техника. – 2005. – № 1.
21. **Регель, В.Р.** Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.И. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560с.

22. **Бобоев, Т.Б.** Статистический разброс значений долговечности при механическом испытании и необратимость разрушения твердых тел / Т.Б. Бобоев, В.Р. Регель, А.И. Слуцкер // Проблемы прочности. – 1974. – № 3. – С. 40-44.

23. **Хастингс, Н.** Справочник по статистическим распределениям / Н. Хастингс, Дж. Пикок. – М.: Статистика, 1980. – 96 с.

24. **Лапчинский, А.К.** Эксплуатационная надежность железобетонных безраскосных ферм / А.К. Лапчинский // Архитектура и строительство. – 2005. – № 2. – С. 114-116.

Osipov S.N., Smychnik E.A, Shvab R.G.

Some features of rock breaking and material breakage processes

Variety of rock breaking and material breakage processes depending on their structure, physical and mechanical properties and external loads is presented. The magnitude and dynamics of changes in fields with different types of stresses taking into account temporal changes and space variation are essential.

Поступила в редакцию 04.08.2011 г.

УДК 622.7.05:622.3.012.3(476)

ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВНУТРИКАРЬЕРНЫХ УСРЕДНИТЕЛЬНЫХ СКЛАДОВ НА ПРЕДПРИЯТИЯХ НЕРУДНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ НАШЕЙ СТРАНЫ

Березовский С.Н. (ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», г. Могилев, Беларусь)

В статье рассматриваются рациональные подходы к переработке нерудных строительных материалов, обеспечивающих энерго- и ресурсосбережение. В частности, рассматривается необходимость устройства на предприятиях нерудной промышленности нашей страны усреднительных складов, на которых добываются содержания гравия в валунно-гравийно-песчаной смеси в диапазоне 40-50 %. Подавая на переработку сырье после усреднительного склада с таким содержанием гравия, можно достичь минимальной себестоимости переработки 1 м³ валунно-гравийно-песчаной смеси и снижения удельных приведенных затрат, а также повысить коэффициент загрузки дробильно-сортировочного оборудования и уменьшить износ дробилок за счет равномерности их загрузки. Полученное уравнение регрессии при помощи математического планирования эксперимента позволяет установить оптимальные параметры усреднительного склада нерудных строительных материалов, формирование штабеля на складе и направление загрузки автосамосвалов на складе.

Введение

Для дробильно-сортировочных заводов (ДСЗ) очень важным фактором являются характеристики поступающего минерального сырья, в частности, насколько они отличаются от проектных. Установлено, что, если перерабатываемая гравийно-песчаная смесь (ГПС) содержит на 10 % больше или меньше гравия, чем предусмотрено в проекте, производительность ДСЗ уменьшается значительно больше, чем на 10 %. При поставке минерального сырья, качество которого не соответствует технологическому регламенту, не только уменьшается производительность оборудования, но ухудшается и качество разных видов продукции, повышается удельный расход сырья, увеличиваются затраты на переработку. Следовательно, состав минерального сырья, доставляемого из карьера на переработку, нужно регулировать. То есть, нужна система управления качеством по всем процессам производства, как в карьере, так и на перерабатывающем комплексе [1].

Одним из приемов, создающих условия для поставки горной массы заданного состава, является селективная выемка разносортного сырья и его усреднение. Селективная выемка применяется на некоторых карьерах нашей страны, а усреднение ГПС в карьерах не применяется вообще. Такое положение сложилось из-за стремления экономить средства за счет строительства усреднительных сооружений, хотя затраты на их устройство не такие уж и большие, особенно на склады полузакрытого типа. На зарубежных карьерах усреднительные склады между отделениями первичного и вторичного дробления получили распространение еще 50 лет назад. Это способствовало увеличению чистого времени работы, поскольку разрывалась жесткая связь между карьером и ДСЗ и образовывалась гибкая связь «карьер – усреднительный склад – дробильно-сортировочный завод». Среди поставленных на учет и эксплуатируемых месторождений нашей страны средняя мощность вскрыши и коэффициент вскрыши в последнее

время несколько возрастают, сокращается количество месторождений с высоким качеством сырья. В связи с тем, что, как правило, характеристики полезного ископаемого в пределах контура запасов изменяются в широких пределах по площади и мощности залежи, для большинства карьеров актуальна проблема поставки на дробильно-сортировочные заводы сырья с заданными характеристиками.

Оптимальные параметры внутрикарьерных усреднительных складов

Нами выполнены расчеты по определению загрузки перерабатывающего оборудования при поступлении на ДСЗ «Крапужино» Минской области и ДСЗ «Дубровка» Могилевской области сырья различного качества. Выполненные по полученным данным экономические расчеты позволили установить приближение величины себестоимости переработки и удельных приведенных затрат, отражающие влияние содержания гравия и валунов (рисунки 1, 2). Из зависимостей видно, что наименьшая себестоимость переработки и наименьшие приведенные затраты обеспечиваются при переработке валунно-гравийно-песчаной смеси с содержанием гравия и валунов в диапазоне 40-50 %. Это подтверждает необходимость устройства усреднительных складов с целью поставки на ДСЗ сырья с таким диапазоном содержания гравия и валунов.

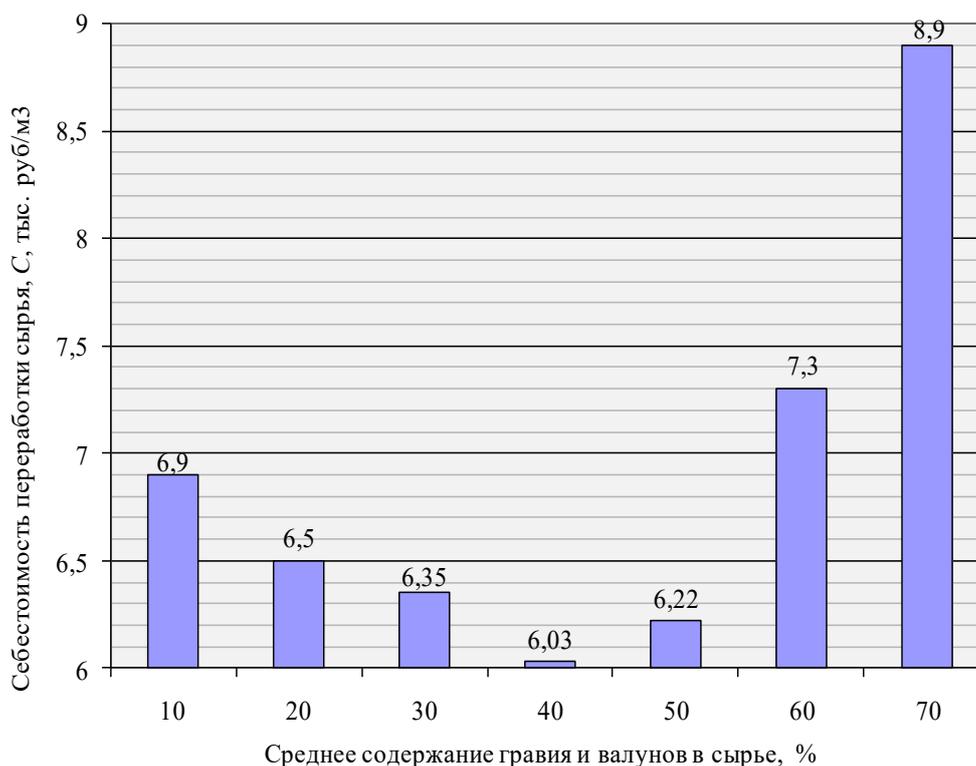


Рисунок 1 – Зависимость себестоимости переработки сырья от среднего содержания фракций гравия и валунов по ДСЗ «Дубровка» Могилевской области

Из рисунка 1 видно, что, подавая на переработку материал с содержанием гравия 40-50 %, предприятие экономит на 1 м³ сырья до 1 тыс. руб., чем в сравнении с подачей материала с содержанием гравия 30 или 60 %. При годовой производительности предприятия 500 тыс. м³ экономия составит до 500 млн. руб.

Организация промежуточного склада может увеличить мощность и экономичность работы предприятия за счет: увеличения чистого времени работы комплекса добычного оборудования и ДСЗ; обеспечения равномерной и по возможности максималь-

ной загрузки технологического оборудования ДСЗ; возможности усреднения качества поставляемого на ДСЗ сырья (должно быть 40-50 % гравия и валунов в сырье); концентрации горных работ во времени, введения двухсменного, а в ряде случаев односменного режима работ в карьере с увеличением единичной мощности горнотранспортного оборудования. На целесообразность организации промежуточных складов указывает опыт российских и зарубежных предприятий нерудной промышленности, а также смежных отраслей горнодобывающей промышленности. Вместимость и тип промежуточного склада зависят от производительности ДСЗ [2].

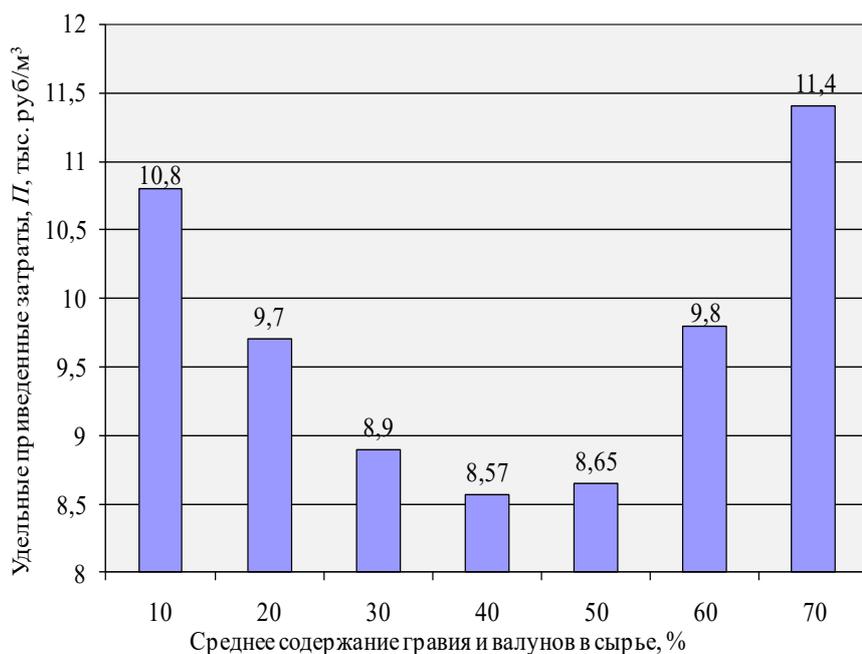


Рисунок 2 – Зависимость удельных приведенных затрат от среднего содержания фракций гравия и валунов по ДСЗ «Дубровка» Могилевской области

При расчете вместимости промежуточного склада необходимо принимать следующие допущения и предположения: длительность непрерывной работы и длительность простоев комплексов добычного оборудования (КДО) распределены по экспоненциальному закону; последовательные интервалы времени, в течение которых КДО работает и простаивает, независимы; в период работы комплекса перерабатывающего оборудования (ДСЗ) при полном заполнении промсклада КДО работает с производительностью, соответствующей производительности ДСЗ, т.е. с производительностью несколько ниже уровня своей максимальной мощности. Предполагается, что:

$$Q_{\text{кдо}} > Q_{\text{дсз}},$$

где $Q_{\text{кдо}}$ и $Q_{\text{дсз}}$ – технические производительности КДО и ДСЗ соответственно, м³/ч.

Правильность предположения об экспоненциальном распределении длительности простоев КДО подтверждена данными хронометражных наблюдений. Экспоненциальность распределения длительности периодов непрерывной работы КДО обуславливается тем, что отказы оборудования КДО происходят в случайные моменты времени и распределены по закону Пуассона. Обычное применение распределения Пуассона состоит в предсказании количества событий, происходящих за определенное время, например, количество машин, появляющихся на площади за 1 минуту. В нашем случае

определяется вероятность пустого склада P_0 в момент окончания перерыва в работе и вероятность того, что в течение какого-то времени склад полон при известной интенсивности расходования и поступления сырья (μ и λ соответственно) на промсклад и объема сырья V на промскладе:

$$P_0 = \frac{(\mu - \lambda)e^{-\lambda V}}{\mu e^{\mu V} \lambda e^{\lambda V}}. \quad (1)$$

Результаты расчета вместимости промежуточного склада сырья при мощности ДСЗ от 400 до 1000 тыс. м³/год, при содержании гравия и валунов до 60 % приведены в таблице 1, при содержании гравия и валунов свыше 60 % – в таблице 2. Данные таблиц 1 и 2 показывают, что при содержании гравия и валунов до 60 % и **трехсменном** режиме работы добычного комплекса полезный объем (объем рабочей зоны) промежуточного склада находится в пределах от 4,1 до 7,4, а **при двухсменном** режиме работы – от 4,4 до 7,8 объема часового потребления сырья ДСЗ. При содержании гравия и валунов свыше 60 % и трехсменном режиме работы добычного комплекса полезный объем промежуточного склада находится в пределах от 5,3 до 9,4, а при двухсменном режиме работы – от 5,7 до 10,0 объема часового потребления сырья ДСЗ. Так, если производительность ДСЗ 500 м³/ч, то вместимость склада должна быть до 5000 м³.

Таблица 1 – Вместимость промежуточного склада сырья при содержании гравийно-валунных фракций в сырье до 60 %

Мощность ДСЗ, тыс. м ³ /год	Расстояние транспортирования сырья, км	Коэффициент использования обо- рудования завода	Полезный объем склада		Общая вместимость склада, тыс. м ³
			часы	тыс. м ³	
400	1,5	0,88/0,93	4,3/4,6	0,4/0,6	1,0/1,5
400	3	0,88/0,93	5,9/6,3	0,5/0,8	1,4/2,1
700	1,5	0,85/0,90	4,3/4,6	0,7/1,1	1,7/2,6
700	3	0,88/0,93	5,9/5,3	0,9/1,4	2,3/3,6
1000	1,5	0,82/0,87	4,1/4,4	1,0/1,4	2,5/3,6
1000	3	0,83/0,88	5,8/6,1	1,4/2,0	3,4/5,1
1000	4,4	0,85/0,90	7,4/7,8	1,7/2,6	4,4/6,4

Примечание: В числителе – при трехсменном режиме работы комплекса добычного оборудования, в знаменателе – при двухсменном.

Таблица 2 – Вместимость промежуточного склада сырья при содержании гравийно-валунных фракций в сырье более 60 %

Мощность ДСЗ, тыс. м ³ /год	Расстояние транспортирования сырья, км	Коэффициент использования обо- рудования завода	Полезный объем склада		Общая вместимость склада, тыс. м ³
			часы	тыс. м ³	
400	1,5	0,85/0,90	5,5/5,9	0,5/0,8	1,3/2,0
400	3	0,85/0,90	7,7/8,1	0,7/1,1	1,8/2,8
700	1,5	0,82/0,87	5,5/5,9	0,9/1,4	2,3/2,5
700	3	0,85/0,90	7,7/8,1	1,3/1,9	3,2/4,8
1000	1,5	0,76/0,81	5,3/5,7	1,3/1,9	3,2/4,8
1000	3	0,77/0,82	7,4/7,8	1,8/2,7	4,5/5,8
1000	4,4	0,79/0,84	9,4/10,0	2,9/3,4	5,7/8,5

Примечание: В числителе – при трехсменном режиме работы комплекса добычного оборудования, в знаменателе – при двухсменном.

Для решения задач управления потоком нерудного сырья и оптимизации параметров внутрикарьерных складов нами были разработаны две модели: M_1 и M_2 . Модель склада M_1 предназначена для решения задачи управления качеством валунно-гравийно-песчаной смеси, проходящей усреднительный склад, модель M_2 – для определения оптимальных параметров самого склада. Задача управления потоком требует решения в реальном времени, тогда как задача оптимизации параметров склада относится к классу инженерно-расчетных и не имеет жесткой временной увязки.

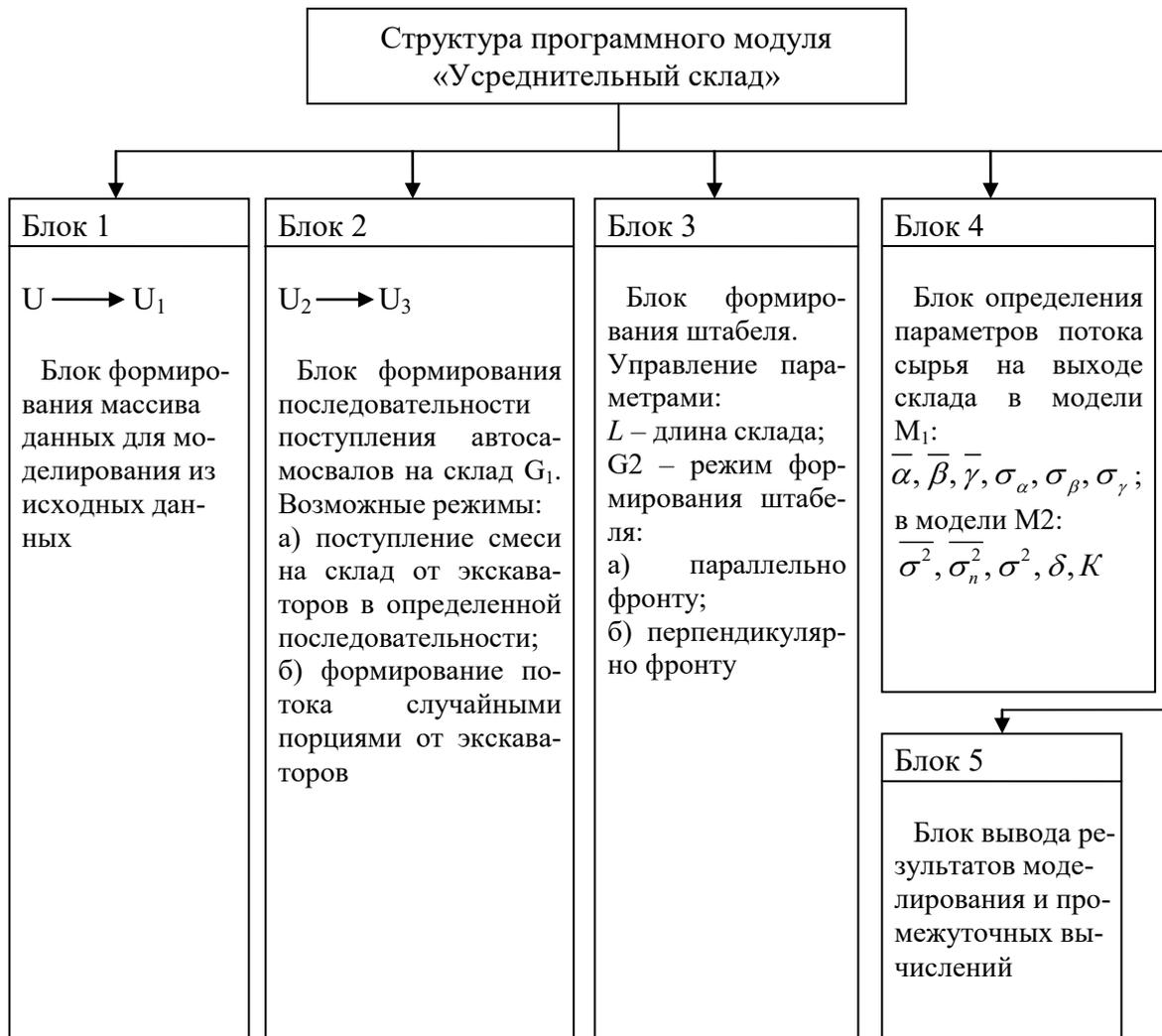


Рисунок 3 – Структура программного модуля «Модель усреднительного склада»

Блок 1 представляет собой набор процедур, формирующих из исходных данных последовательность выемочных блоков, обрабатываемых одновременно несколькими экскаваторами, находящимися в состоянии добычи в моделируемом периоде.

Блок 2 представляет собой совокупность процедур, осуществляющих формирование непрерывной последовательности поступления автосамосвалов на усреднительный склад.

Блок 3 включает процедуры, моделирующие формирование усреднительного штабеля. Содержание блока различно для моделей M_1 и M_2 . В модели M_1 штабель представлен трехмерным массивом, состоящим из элементов, представляющих порцию валунно-гравийно-песчаной смеси объемом $0,1 \text{ м}^3$. Каждому элементу массива присваива-

ется идентификатор блока смеси одного из работающих добычных экскаваторов, выгруженной из автосамосвала на склад. Идентификаторы блоков извлекаются из последовательности поступления автосамосвалов на склад, сформированной процедурами блока 2. Размерность массива $M-N-P$, характеризующего усреднительный штабель, определяется:

$$M = L/d; N = b/d; P = h/d, \quad (2)$$

где L – длина штабеля, м;

b – ширина штабеля ($b < 30$ м);

h – высота штабеля ($h = 7$ м);

d – размеры порции смеси, принимаемой за элементарный объем (элемент массива) с постоянным качеством ($d = 0,1$ м).

В модели M_2 , предназначенной для оптимизации параметров склада, штабель представлен матрицей, где каждый элемент характеризуется объемом и качеством порции смеси, доставленной автосамосвалом от добычного экскаватора, а каждый столбец – объемом и качеством смеси в отгружаемом со склада автосамосвале. Блок 4 объединяет набор процедур, осуществляющих расчет контролируемых выходных параметров вектора Y . Блок 5 включает процедуры: отображения последовательности поступления автосамосвалов на входе склада, сформированного штабеля в сечениях, функции качества по длине склада. Таким образом, разработанные модели усреднительного склада M_1 и M_2 представляют собой инструмент для постановки активного эксперимента с целью исследования закономерностей процесса штабельного усреднения и установления зависимости качественных характеристик подаваемой на переработку валунно-гравийно-песчаной смеси от проектных параметров внутрикарьерных усреднительных складов при оперативном управлении потоком нерудного сырья.

Далее произведены оценка корректности моделей, планирование и постановка эксперимента по определению рациональных параметров внутрикарьерных усреднительных складов для условий разработки месторождений валунно-гравийно-песчаной смеси Крапужино Логойского района Минской области и Дубровка Шкловского района Могилевской области. Постановка задачи, решаемой моделью M_1 (управление потоком) выглядит следующим образом: имеются геологические данные об объемах и качестве планируемых к добыче выемочных блоков (недельно-суточный график) и объем формируемого штабеля (длина штабеля). Требуется определить общее содержание гравия в штабеле, его ситовых характеристик и дисперсию качества в отгружаемых порциях за период моделирования. В качестве исходных данных для моделирования, характеризующих параметры потока на входе склада, использован массив геологических показателей за полгода: с 1 января по 1 июля 2009 года. В результате экспериментов установлено, что модель M_1 , используемая в задачах управления потоком, адекватна технологическому процессу и имеет высокую точность. Ошибка при подсчете объемов составляет $0,37-0,5 \cdot 10^{-2}$ %, ошибка при подсчете гравия общего содержания, второго и третьего сит – соответственно $0,25-0,7 \cdot 10^{-3}$ %, $0,02-0,12 \cdot 10^{-3}$ % и $0,12-0,3 \cdot 10^{-3}$ % при доверительной вероятности 95 %. Постановка задачи, решаемой моделью M_2 (обоснование рациональных параметров внутрикарьерных усреднительных складов) выглядит следующим образом: имеются геологические данные об объемах и качестве планируемых к добыче выемочных блоков (недельно-суточный график). Требуется определить объем формируемых штабелей для обеспечения дисперсии качественных характеристик гравия в отгружаемых порциях относительно среднего (при оптимальном среднем значении содержания гравия в смеси 45 %) не более 10 %. Для проверки адекватности модели M_2 в качестве контролируемого параметра принято общее содержание гравия в

смеси, как основной качественной характеристики. На вход модели подавались геологические данные, полученные результаты сопоставлялись с лабораторными показателями. Погрешность результатов моделирования относительно лабораторных показателей составила $5,2 \cdot 10^{-3} \%$, при этом ошибка геологических относительно лабораторных данных – $5,0 \cdot 10^{-3} \%$ с доверительной вероятностью 95 %. Следовательно, точность модели M_2 достаточна для решения задачи оптимизации параметров усреднительных складов.

В качестве управляемых параметров при планировании эксперимента с использованием модели M_2 были приняты: X_1 – длина усреднительного штабеля L ; X_2 – режим поступления автосамосвалов на склад; X_3 – направление перемещения фронта разгрузки автосамосвалов. Эффективность усреднения на внутрикарьерных складах определяется общей дисперсией качества валунно-гравийно-песчаной смеси в отгружаемых со склада порциях смеси σ^2 . Таким образом, целевая функция (критерий оптимальности) Y при постановке эксперимента имеет вид:

$$\sigma^2 \rightarrow \min. \quad (3)$$

Задача решалась при помощи математического планирования эксперимента [3, 4]. Полный трехфакторный эксперимент проводился в окрестностях точки факторного пространства с координатами $X_{01} = 120$ м. Условия проведения полного факторного эксперимента приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристика плана эксперимента по определению оптимальных параметров внутрикарьерного усреднительного склада

Характеристика	Длина штабеля, м	Режим поступления автосамосвалов	Направление заполнения штабеля
	X_1	X_2	X_3
Основной уровень	120	-	-
Интервал варьирования	80	-	-
Верхний уровень +1	200	равномерное	параллельно
Нижний уровень -1	40	случайное	перпендикулярно

Матрица планирования для полного трехфакторного эксперимента представлена в таблице 4.

Таблица 4 – Матрица планирования для полного трехфакторного эксперимента

Номер эксперимента	Порядок реализации экспериментов	Фактор X_1	Фактор X_2	Фактор X_3	Параметр оптимизации Y_{cp} (σ – общая дисперсия качества смеси)
1	4	+1	+1	+1	0,18
2	3	-1	+1	+1	0,50
3	8	+1	-1	+1	0,25
4	5	-1	-1	+1	0,56
5	7	+1	+1	-1	0,55
6	2	-1	+1	-1	0,60
7	1	+1	-1	-1	0,54
8	6	-1	-1	-1	0,78
Итого:					3,76

Для исключения систематических ошибок эксперименты, предусмотренные матрицей, проводили в случайной последовательности. Порядок проведения выбирали по таблице случайных чисел. Опыты не дублировали. Для определения дисперсии параметра оптимизации было проведено три эксперимента на основных уровнях при длине штабеля 120 м. Полученные значения параметра оптимизации y_u , его среднее значение y_{cp} , отклонения значений параметра оптимизации от его среднего значения $(y_u - y_{cp})$ и квадраты этих отклонений приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Данные для расчета дисперсии параметра оптимизации s_y^2

Номер эксперимента на основном уровне n_0	y_u	y_{cp}	$(y_u - y_{cp})$	$(y_u - y_{cp})^2$
1	0,50	$\sum_{u=1}^3 y_u = 0,5$	0	0
2	0,52		0,02	0,0004
3	0,48		-0,02	0,0004
Сумма:				0,0008

Дисперсия параметра оптимизации s_y^2 вычислена по формуле:

$$s_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_u - y_{cp})^2}{n_0 - 1} = \frac{0,0008}{3 - 1} = 0,0004.$$

Коэффициенты регрессии b_i вычислим по формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N y_{jcp}}{N} = \frac{3,76}{8} = 0,47;$$

$$b_1 = \frac{\sum_{j=1}^N x_{1j} y_{jcp}}{N} = \frac{-0,92}{8} = -0,115;$$

$$b_2 = \frac{\sum_{j=1}^N x_{2j} y_{jcp}}{N} = \frac{-0,296}{8} = -0,037;$$

$$b_3 = \frac{\sum_{j=1}^N x_{3j} y_{jcp}}{N} = \frac{-0,98}{8} = -0,123,$$

где j – номера факторов;

N – количество опытов.

Средняя квадратичная ошибка в определении коэффициентов регрессии составит:

$$s\{b_i\} = \sqrt{\frac{s_y^2}{N}} = \sqrt{\frac{0,0004}{8}} = 0,007.$$

Доверительный интервал коэффициентов регрессии вычислим по формуле:

$$\Delta b_i = \pm t_T s\{b_i\},$$

где t_T – критерий Стьюдента;

$s\{b_i\}$ – ошибка в определении i -го коэффициента регрессии.

При 5 % уровне значимости и числе степеней свободы $f = n_0 - 1 = 2$ табличное значение критерия $t_T = 4,3$. Следовательно, доверительный интервал коэффициентов равен:

$$\Delta b_i = \pm (4,3 \times 0,007) = \pm 0,03.$$

Все коэффициенты регрессии по абсолютной величине больше доверительного интервала, поэтому их можно признать статистически значимыми. Для вычисления дисперсии адекватности составим вспомогательную таблицу 6.

Таблица 6 – Данные для расчета дисперсии адекватности $s_{ад}^2$

Номер опыта	Значения y_{jcp}	Значения $y_{расч,j}$	$y_{jcp} - y_{расч,j}$	$(y_{jcp} - y_{расч,j})^2$
1	0,18	0,22	-0,04	0,0016
2	0,50	0,48	0,02	0,0004
3	0,25	0,27	-0,02	0,0004
4	0,56	0,59	-0,03	0,0009
5	0,55	0,53	0,02	0,0004
6	0,60	0,62	-0,02	0,0004
7	0,54	0,51	0,03	0,0009
8	0,78	0,72	0,04	0,0016
Сумма:				0,0066

Дисперсию адекватности найдем по формуле:

$$s_{ад}^2 = \frac{\sum (y_{jcp} - y_{расч,j})^2}{N - (k + 1)} = \frac{0,0066}{4} = 0,0017,$$

где k – число факторов;

N – число опытов.

Проверку адекватности модели производим по F – критерию Фишера:

$$F_p = \frac{s_{ад}^2}{s_y^2} = \frac{0,0017}{0,0004} = 4,25,$$

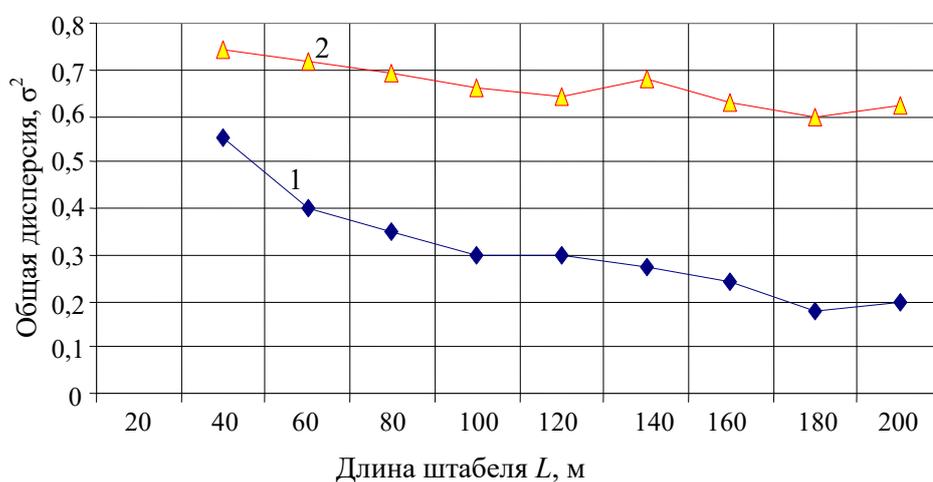
где F_p – расчетное значение критерия Фишера;

F_m – табличное значение критерия Фишера.

Табличное значение F_m – критерия при 5 % уровне значимости и числах степеней свободы для числителя 4 и знаменателя 2 равно 19,3, значит $F_p < F_m$, и можно сделать вывод об адекватности модели. В результате эксперимента установлено, что требуемое технологией переработки значение общей дисперсии в отгружаемых порциях смеси (при оптимальном среднем значении содержания гравия в смеси – 45 %) достигается при длине склада 180-195 м ($\sigma^2 = 0,23$) при направлении разгрузки автосамосвалов параллельно оси штабеля вне зависимости от режима поступления автосамосвалов. Уравнение регрессионной зависимости общей дисперсии в отгружаемых порциях валунно-гравийно-песчаной смеси от исследуемых факторов имеет вид:

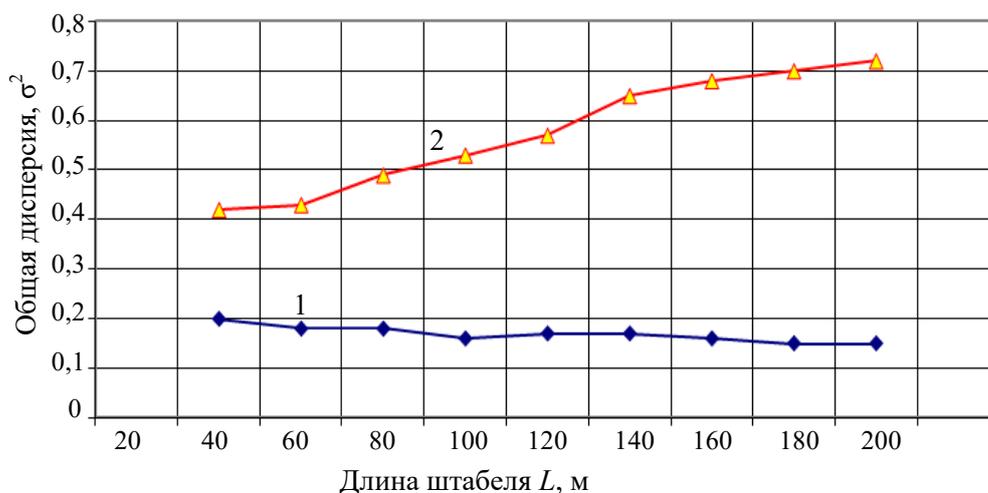
$$Y = 0,47 - 0,115 \cdot X_1 - 0,037 \cdot X_2 - 0,123 \cdot X_3. \quad (4)$$

Таким образом, наибольшее влияние на критерий оптимизации, судя по величине коэффициентов регрессии, оказывает фактор X_3 – направление разгрузки автосамосвалов и заполнение штабеля ($b_3 = -0,123$). Фактор X_1 – длина штабеля – также имеет существенное влияние на качество усреднения ($b_1 = -0,115$). С увеличением длины штабеля общая дисперсия качества смеси уменьшается. Значимость коэффициента фактора X_2 находится на границе допустимого значения, следовательно, режим поступления автосамосвалов практически не влияет на качество усреднения смеси. Изменения средней общей дисперсии σ^2 качества валунно-гравийно-песчаной смеси в зависимости от длины штабеля и средней дисперсии качества приведены на рисунках 4 и 5.



- 1 – наилучшие показатели, которые наблюдаются при равномерном поступлении автосамосвалов на склад и разгрузке смеси параллельно фронту;
 2 – наихудшие показатели, которые наблюдаются при случайном поступлении автосамосвалов на склад и разгрузке смеси перпендикулярно фронту

Рисунок 4 – Зависимость средней общей дисперсии качества σ^2 валунно-гравийно-песчаной смеси в зависимости от длины штабеля L



- 1 – наилучшие показатели, которые наблюдаются при равномерном поступлении автосамосвалов на склад и разгрузке смеси параллельно фронту;
 2 – наихудшие показатели, которые наблюдаются при случайном поступлении автосамосвалов на склад и разгрузке смеси перпендикулярно фронту

Рисунок 5 – Зависимость средней дисперсии качества σ^2 валунно-гравийно-песчаной смеси в зависимости от длины штабеля L

Выводы

В статье рассмотрены рациональные подходы по переработке нерудных строительных материалов, обеспечивающих энерго- и ресурсосбережение. В частности, рассмотрена необходимость устройства на предприятиях нерудной промышленности нашей страны усреднительных складов, на которых можно добиться содержания гравия в валунно-гравийно-песчаной смеси в размере 40-50 %. Подавая на переработку сырье после усреднительного склада с таким содержанием гравия, получаем минимальную себестоимость переработки 1 м^3 валунно-гравийно-песчаной смеси и минимальные удельные приведенные затраты, также повышаем коэффициент загрузки дробильно-сортировочного оборудования и уменьшаем износ дробилок за счет равномерности их загрузки.

Изложены обоснованные результаты по оптимизации проектных параметров внутрикарьерных усреднительных складов, использование которых обеспечивает решение актуальной прикладной проблемы управления качеством подаваемой на переработку валунно-гравийно-песчаной смеси. Также исследован процесс усреднения на внутрикарьерных складах с позиций информационного преобразователя потока нерудного сырья – подсистемы в общей системе взаимодействия карьера и дробильно-сортировочного завода. Установлено, что оптимальной является схема разгрузки автосамосвалов на складе параллельно фронту формирования штабеля, при этом последовательность их поступления на качество усреднения существенного влияния не оказывает. Из штабелей песчано-гравийная смесь должна отгружаться погрузчиками вкрест слоев, в результате чего происходит ее оптимальное перемешивание.

Список использованных источников

1. Временная инструкция по формированию структур комплексной механизации горных работ (применительно к условиям циклично-поточной технологии разработки связных и раздельно-зернистых пород на карьерах по добыче нерудных строительных материалов). – М.: Министерство промышленности строительных материалов, 1979. – 50 с.

-
2. **Буянов, Ю.Д.** Разработка гравийно-песчаных месторождений / Ю.Д. Буянов. – М.: Недра, 1988. – 208 с.
 3. **Адлер, Ю.П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Граковский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
 4. **Хартман, К.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / К. Хартман, Э. Лецкий, В. Шеффер. – М.: Мир, 1977. – 552 с.
-

Berezovsky S.N.

Optimal parameters of intraquarry homogenization storehouses at the enterprises of non-metal mining in our country

Rational approaches to processing of nonmetallic building materials providing energy and resource saving are considered in the article. In particular, the necessity of organization of homogenization storehouses at the enterprises of the nonmetallic industry in our country is considered, where the gravel content in boulder sandy gravel mixture is achieved within the range 40-50%. Conveying the raw materials for processing after homogenization storehouse with such gravel content we can reach the minimal processing prime cost of 1 m³ boulder sandy gravel mixture and decrease specific total costs as well as increase loading factor of crushing-screening equipment and reduce wearing of crushers for account of feed-rate consistency. The received regression equation by means of mathematical experiment planning allows to determine optimal parameters for homogenization storehouses of nonmetallic building materials, stock pile creation in storehouse and as well as unloading direction for tip-lorries in the storehouse.

Поступила в редакцию 08.08.2011 г.

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 622.673.29-85(045)(476)

**ДВИЖЕНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО КОЛЕСА
ПО МАЛОДЕФОРМИРУЕМОЙ ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

Казаченко Г.В. (УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск, Беларусь)

Предлагается подход к моделированию движения колеса, основанный на формировании силовой функции по способу академика М.В. Келдыша, а диссипативной – на базе теории трения профессора Ф.А. Опейко. Полученные соотношения анализируются в наиболее часто встречающихся режимах криволинейного движения с уводом и прямолинейном при действии тяговой нагрузки. Показано, что сформированная модель движения колеса хорошо согласуется с экспериментами, результаты которых приводятся в специальной литературе.

Введение

Моделированию движения колеса посвящено огромное количество исследований и научных работ прикладного и фундаментального характера [1]. Это обусловлено, прежде всего, тем, что колесные движители – самые распространенные опорно-ходовые устройства транспортных и тягово-энергетических средств. Причем сфера их применения непрерывно расширяется, что влечет за собой появление новых конструкций колес, обеспечивающих их надежную работу в самых разнообразных условиях. Этим объясняется неослабевающий интерес к исследованию работы колеса и поиску технических решений, повышающих эффективность колесных движителей.

При моделировании движения машин на колесном ходу, колесо рассматривается как элемент, воспринимающий нагрузки от некоторой машины и передающий их опорной поверхности. Под действием этих нагрузок колесо деформируется, а характер и величина деформаций существенно зависят от конструктивных параметров колеса, величины нагрузок и свойств опорного основания.

Большое разнообразие конструкций колес, характеристик материалов шин и физико-механических свойств опорных оснований не позволяет охватить единой теорией движение и работу колес во всех возможных ситуациях. Это обусловило создание ряда теорий движения колеса, которые хорошо объясняют его работу в одних условиях, но недостаточны для описания движения в других ситуациях. Характерные особенности работы колеса можно определить следующими ситуациями:

- жесткое колесо – твердое основание (деформации колеса и дороги пренебрежительно малы по сравнению с его размерами);
- жесткое колесо – деформируемое опорное основание (пренебрежительно малы только деформации колеса);
- деформируемое колесо – жесткое опорное основание (пренебрежительно малы только деформации дороги);
- деформируемое колесо – деформируемое опорное основание.

В настоящее время наиболее распространенным и важным в практических приложениях в связи с почти абсолютным применением пневматических колес при безрельсовом транспорте является третий вариант работы колеса. При моделировании работы колеса в таких условиях воспользуемся моделью деформаций шины, предложенной в свое время академиком АН СССР М.В. Келдышем [2], и теорией трения члена-корреспондента АН БССР Ф.А. Опейко [3].

Формирование основных зависимостей

Движение пневматического колеса на опорной поверхности сопровождается смещением его контактной площади относительно обода и деформациями шины, включая и деформации контактной площадки. Силы, действующие на колесо и вызывающие деформации шины, могут быть найдены по величине этих деформаций. Для этого необходимо определить деформации шины и установить зависимость сил от величин параметров деформации. Следуя [2] считаем, что силы от параметров деформаций шины зависят линейно, а деформированное состояние шины определяется смещением центра контакта из натурального положения и поворотом контактной площадки в плоскости дороги относительно обода. Под центром контакта площадки понимается центр ее давления на опорную поверхность, который при симметричном распределении давления совпадает с полюсом трения. При определении параметров деформации шины и нагрузок, вызывающих эти деформации, введем системы координат $Oxyz$ и $Oknz'$ с началом в центре колеса. Ось Ox первой системы совпадает с осью вращения колеса, а ось Oz отклонена от нормали к опорной поверхности вместе с ободом, оси Ox и On второй системы параллельны опорной плоскости. Таким образом, параметры деформации определены в триэдре, связанном с опорной поверхностью. В этом же триэдре определены скорости v_k, v_n, v_z деформации центра контакта шины и угловые скорости ω_1, ω_2 поворота колеса. Скорость вращения колеса вокруг своей собственной оси обозначена через ω_3 (рисунок 1, 2). Углы θ – отклонения обода от нормали к опорной поверхности, и γ – поворота контактной площадки относительно обода, малы, поэтому принимаем $\cos \theta = 1, \cos \gamma = 1, \sin \theta = 0, \sin \gamma = \gamma$.

Тогда, обозначив смещения центра контакта через $\lambda_k, \lambda_n, \lambda_z$, силы и моменты, вызывающие эти деформации и повороты $P_k, P_n, P_z, M_\gamma, M_\theta$ и, считая известной матрицу d жесткостей, запишем:

$$\begin{aligned} P_k &= d_{11}\lambda_k + d_{12}\lambda_n + d_{13}\lambda_z + d_{14}\gamma + d_{15}\theta; \\ P_n &= d_{21}\lambda_k + d_{22}\lambda_n + d_{23}\lambda_z + d_{24}\gamma + d_{25}\theta; \\ P_z &= d_{31}\lambda_k + d_{32}\lambda_n + d_{33}\lambda_z + d_{34}\gamma + d_{35}\theta; \\ M'_\gamma &= d_{41}\lambda_k + d_{42}\lambda_n + d_{43}\lambda_z + d_{44}\gamma + d_{45}\theta; \\ M'_\theta &= d_{51}\lambda_k + d_{52}\lambda_n + d_{53}\lambda_z + d_{54}\gamma + d_{55}\theta. \end{aligned} \tag{1}$$

где d_{ij} – элементы матрицы жесткости;

P_k, P_n, P_z – проекции равнодействующей упругих сил на соответствующие оси;
 M'_γ, M'_θ – проекции момента упругих сил на плоскость дороги и плоскость, перпендикулярную ободу.

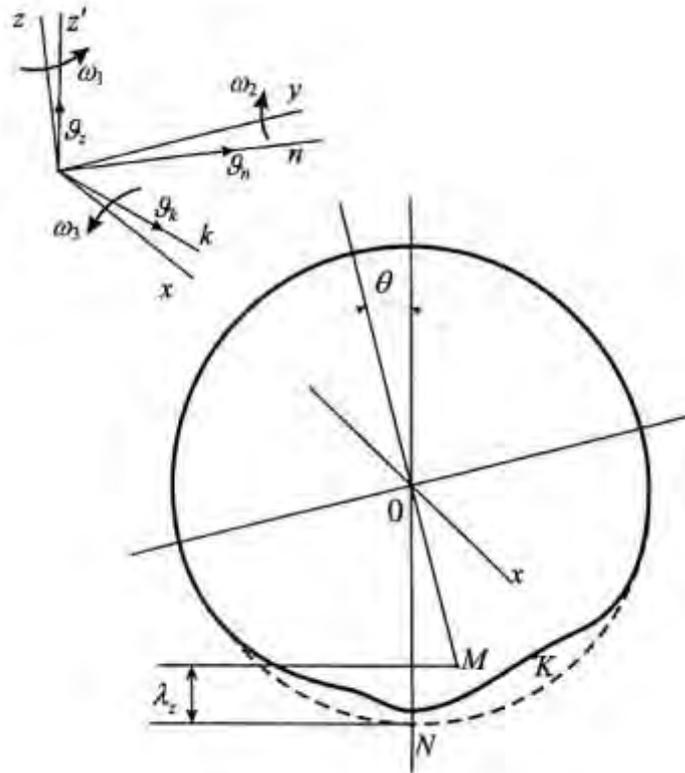


Рисунок 1 – Деформация экваториальной линии шины

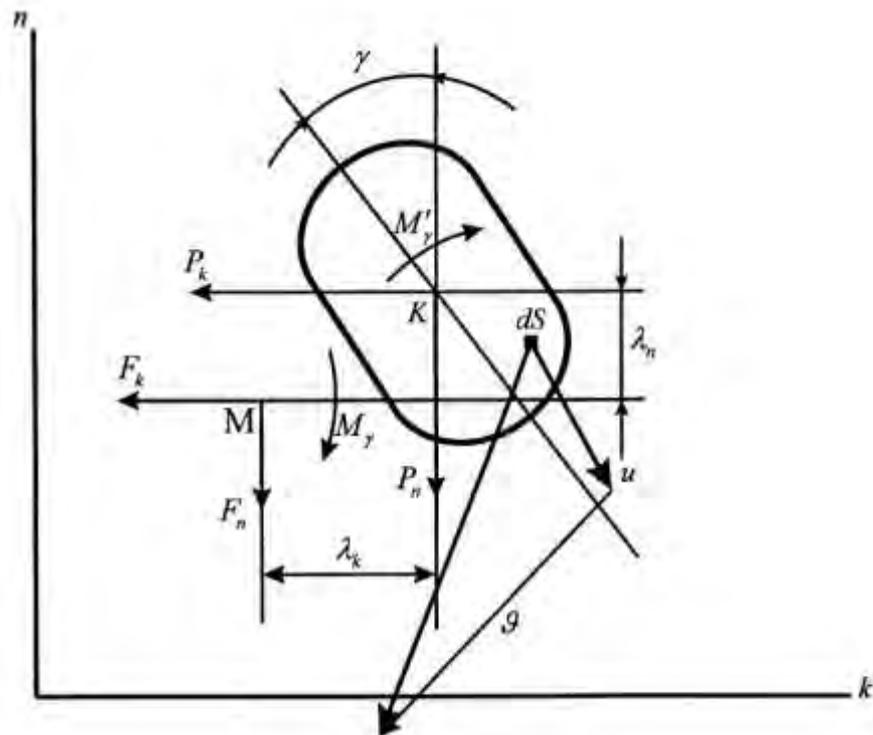


Рисунок 2 – Деформация контактной площадки в плоскости дороги

Так как по условию упругие силы потенциальны, то $d_{ik} = d_{ki}$. Рассуждая теперь аналогично [2], рассмотрим частные случаи деформации шины и определим нагрузки в таких ситуациях:

$$1. \lambda_k = 0, \lambda_n = 0, \theta = 0.$$

При такой деформации $P_k = 0, P_n = 0, M'_\theta = 0$. Отсюда следует, что:

$$d_{31} = d_{13} = d_{14} = d_{41} = d_{32} = d_{23} = d_{24} = d_{42} = d_{35} = d_{53} = d_{45} = d_{54} = 0. \quad (2)$$

$$2. \lambda_k = 0, \gamma = 0, \theta = 0.$$

В этом случае $P_k = 0; M'_\theta = 0; M'_\gamma = 0$. Тогда $d_{12} = d_{21} = d_{25} = d_{52} = d_{34} = d_{43} = 0$.

С учетом этого упругие силы и моменты, приведенные к точке К (центру контакта), определяются формулами:

$$\begin{aligned} P_k &= d_{11}\lambda_k + d_{15}\theta; & M'_\gamma &= d_{44}\gamma; \\ P_n &= d_{22}\lambda_n; & M'_\theta &= d_{51}\lambda_k + d_{55}\theta; \end{aligned} \quad (3)$$

$$P_z = d_{33}\lambda_z.$$

Осуществляя приведение сил в точке М пересечения линий наибольшего наклона колеса с опорной поверхностью и, используя коэффициенты упругости, введенные М.В. Келдышем, имеем:

$$\begin{aligned} F_k &= c_1\lambda_k + \sigma F_z\theta; & F_n &= c_2\lambda_n; \\ F_z &= c_3\lambda_z; & M_\theta &= F_z(\sigma\lambda_k + \rho\theta); \end{aligned} \quad (4)$$

$$M_\gamma = c_4\gamma + \lambda_n \lambda_k (c_2 - c_1) + \sigma F_z\theta,$$

где c_1, c_2, c_3, c_4 – соответственно боковая, продольная, вертикальная и угловая жесткости шины;

σ, ρ – коэффициенты упругости, введенные М.В. Келдышем;

$F_k, F_n, F_z, M_\gamma, M_\theta$ – значения упругих сил и моментов при приведении к точке М.

При вычислении сил трения считаем, что последние реализуются в зоне скольжения контактной площадки относительно дороги. В случае изотропного трения элементарные силы трения направлены противоположно скоростям скольжения точек контактной площадки, а вектор и момент сил трения определяется полем скоростей скольжения. В свободном режиме движения колеса поле скоростей скольжения таково, что главный момент и вектор элементарных сил трения равны нулю. Потери энергии колеса на качение в этом режиме можно учитывать коэффициентом сопротивления качению [4], определенным по формуле:

$$f_c = f_0 \left(\frac{r_k^0}{r_k^c} \right)^2, \quad (5)$$

где f_0 – коэффициент сопротивления качению колеса в ведомом режиме;

r_k^0, r_k^c – радиусы качения в ведомом и свободном режимах.

Для вычисления проекций вектора и момента элементарных сил трения представим, используя модель трения [5], скорости скольжения точек контактной площадки (рисунок 2) как сумму двух скоростей u и \mathcal{G} . Первая из них u – скорость, которую имеет точка в свободном режиме качения колеса, то есть представляющая собой разность скоростей деформаций опорного основания и ширины в опорной плоскости под действием только вертикальной сжимающей нагрузки. Вторая \mathcal{G} есть скорость, приобретаемая точкой за счет нагрузок, действующих в плоскости контакта и вызывающих переход колеса в другой режим движения. Проекции вектора и момент сил трения относительно центра контакта определяются выражениями:

$$T_k = -f \iint_S p \frac{\mathcal{G}_{ck}}{\sqrt{\mathcal{G}_{ck}^2 + \mathcal{G}_{cn}^2}} dS ;$$

$$T_n = -f \iint_S p \frac{\mathcal{G}_{cn}}{\sqrt{\mathcal{G}_{ck}^2 + \mathcal{G}_{cn}^2}} dS ; \quad (6)$$

$$L_k = -f \iint_S p \frac{\mathcal{G}_{ck}(n - n_k) - \mathcal{G}_{cn}(k - k_k)}{\sqrt{\mathcal{G}_{ck}^2 + \mathcal{G}_{cn}^2}} dS ,$$

где p – давление между шиной и опорной поверхностью;

$\mathcal{G}_{cn} = \mathcal{G}_n + u_n$ – проекция скорости скольжения точки на ось On ;

$\mathcal{G}_{ck} = \mathcal{G}_k + u_k$ – проекция скорости скольжения точки на ось Ok ;

$\mathcal{G}_n, u_n, \mathcal{G}_k, u_k$ – проекция скоростей u и \mathcal{G} на те же оси;

f – коэффициент трения;

$dS = d_n \cdot d_k$ – дифференциал площади контакта;

n и k – координаты контактной площадки в системе $Oknz'$.

Скорости u точек контактной площадки в свободном режиме качения являются функциями скорости вращения, а также давления между шиной и опорной поверхностью. Из определения этого режима следует, что поле скоростей скольжения симметрично. Это позволяет ввести в рассмотрение среднюю скорость точек контактной площадки, модуль которой определяется выражением:

$$|u| = \frac{1}{S} \iint_S |u(k, n)| dS . \quad (7)$$

Принимая во внимание неоднородность свойств шин в различных направлениях, положим, что годографом этой скорости является эллипс с полуосями u_1 и u_2 , уравнения которого:

$$u_k = u_1 \cdot \cos \alpha ; \quad u_n = u_2 \cdot \sin \alpha , \quad (8)$$

и осредним функции, стоящие в числителе и знаменателе подынтегральных выражений (7) по углу α :

$$\begin{aligned} \mathcal{G}_{ck} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \mathcal{G}_{ck} d\alpha = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\mathcal{G}_k + u_1 \cos \alpha) d\alpha = \mathcal{G}_k ; \\ \mathcal{G}_{cn} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \mathcal{G}_n d\alpha = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (\mathcal{G}_n + u_2 \sin \alpha) d\alpha = \mathcal{G}_n ; \\ \sqrt{\mathcal{G}_{cn}^2 + \mathcal{G}_{ck}^2} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\int_0^{2\pi} (\mathcal{G}_{cn}^2 + \mathcal{G}_{ck}^2) d\alpha} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [(\mathcal{G}_k + u_1 \cos \alpha)^2 + (\mathcal{G}_n + u_2 \sin \alpha)^2] d\alpha} = \\ &= \sqrt{\mathcal{G}_k^2 + \mathcal{G}_n^2 + \frac{1}{2} u_1^2 + \frac{1}{2} u_2^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Используя модель трения скольжения [6], а также, учитывая обновление контактирующих сред в процессе движения колеса, примем, что средние относительные скорости u_1 и u_2 пропорциональны среднему давлению в контакте. Тогда в первом приближении:

$$u_1 = k_1 \cdot P_z \cdot \omega_3 ; \quad u_2 = k_2 \cdot P_z \cdot \omega_3 , \quad (10)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности;

P_z – нормальная нагрузка на пятно контакта.

Предположение о пропорциональности скоростей u_1 и u_2 среднему давлению нормальной к опорной поверхности нагрузке справедливо, если контактирующие материалы подчиняются закону Гука и имеют разные по величине коэффициенты Пуассона, и требует экспериментального определения коэффициентов k_1 и k_2 . Как показано далее, эта гипотеза хорошо согласуется с экспериментальными данными по определению радиуса качения колеса при действии тягового усилия.

Перепишем теперь (6) с учетом полученных осредненных значений скоростей скольжения:

$$\begin{aligned} T_k &= -f \iint_S p \frac{\mathcal{G}_k}{\sqrt{\mathcal{G}_k^2 + \mathcal{G}_n^2 + \frac{1}{2}(u_1^2 + u_2^2)}} dS ; \\ T_n &= -f \iint_S p \frac{\mathcal{G}_n}{\sqrt{\mathcal{G}_k^2 + \mathcal{G}_n^2 + \frac{1}{2}(u_1^2 + u_2^2)}} dS ; \\ L_k &= -f \iint_S p \frac{\mathcal{G}_k(n - n_k) - \mathcal{G}_n(k - k_k)}{\sqrt{\mathcal{G}_k^2 + \mathcal{G}_n^2 + \frac{1}{2}(u_1^2 + u_2^2)}} dS . \end{aligned} \quad (11)$$

Вычисление интегралов (11) возможно при известном распределении скоростей \mathcal{G} и u всех точек контактной площадки шины. Свойства этих интегралов, называемых функциями трения, изучены в математической теории трения [3]. В практических приложениях обычно пользуются их приближенными значениями, которые вычисляются по средним значениям давления в пятне контакта и скорости скольжения его центра [7, 8]:

$$\begin{aligned}
 T_k &= -f \cdot P_z \frac{\mathcal{G}_k}{\sqrt{\mathcal{G}_{kk}^2 + \mathcal{G}_k^2 + \frac{1}{2}(u_1^2 + u_2^2)}}; \\
 T_n &= -f \cdot P_z \frac{\mathcal{G}_n}{\sqrt{\mathcal{G}_{kk}^2 + \mathcal{G}_{kn}^2 + \frac{1}{2}(u_1^2 + u_2^2)}}; \\
 L_k &= -f \cdot P_z \frac{r_a^2 \cdot \omega_k^2}{\sqrt{\mathcal{G}_{kk}^2 + \mathcal{G}_{kn}^2 + \frac{1}{2}(u_1^2 + u_2^2)}},
 \end{aligned} \tag{12}$$

где r_a – статистический радиус трения;

ω_k – угловая скорость контактной площадки;

\mathcal{G}_{kn} , \mathcal{G}_{kk} – проекции скорости скольжения центра контактной площадки.

Контактная площадка колеса скользит по опорной поверхности с поворотом только при криволинейном движении колеса. В этом случае угловую скорость ω_k поворота контактной площадки можно представить как сумму (рисунок 1) переносной угловой скорости ω_1 и скорости $\dot{\gamma}$ – поворота контактной площадки относительно обода колеса:

$$\omega_k = \omega_1 + \dot{\gamma}.$$

Поворот контактной площадки относительно обода начинается раньше ее соприкосновения с опорной поверхностью. В связи с этим среднее значение угловой скорости поворота можно принять пропорциональным углу поворота γ , т.е. принять $\dot{\gamma} = k \cdot \gamma$.

Статистический радиус трения определяется как отношение момента трения при повороте контактной площадки относительно центра давления к нормальной нагрузке, умноженной на коэффициент трения $r_a = \frac{L_k}{f \cdot P_z}$, где L_k – момент трения при повороте колеса относительно центра контакта.

Полученные соотношения (12) совместно с (3) позволяют составить уравнения равновесия контактной площадки шины. Эти уравнения в отличие от уравнений неголономных связей катящейся шины дают возможность применять для моделирования колесных машин уравнения движения голономных систем во всех режимах движения.

Рассмотрим некоторые частные режимы движения колеса и покажем, что разработанная модель хорошо согласуется с наиболее известными и применяемыми в инженерных расчетах зависимостями.

Пусть колесо движется прямолинейно при небольшой величине тяговой силы. Тогда $T_k = 0$, $L_k = 0$, $\omega_k = 0$, $\mathcal{G}_{kk} = 0$, а величина продольной силы трения по (12):

$$T_n = -f \cdot P_z \frac{\mathcal{G}_n}{\sqrt{\mathcal{G}_{kn}^2 + \frac{1}{2} k_2^2 P_z^2 \omega_3^2}}. \quad (13)$$

Скорость скольжения центра контакта:

$$\mathcal{G}_{kn} = \mathcal{G}_{On} - \omega_3 r_k^c, \quad (14)$$

где r_k – радиус качения колеса.

Выражения для вычисления T_n принимает вид:

$$T_n = -f \cdot P_z \frac{\omega_3 (r_k - r_k^c)}{\sqrt{\omega_3^2 (r_k - r_k^c)^2 + \frac{1}{2} k_2^2 P_z^2 \omega_3^2}}. \quad (15)$$

Разложив выражение для T_n в ряд по степеням разности $r_k - r_k^c$ и, ограничившись первым членом, получим:

$$T_n \approx -f \frac{\sqrt{2} (r_k - r_k^c)}{k_2}. \quad (16)$$

При небольшой величине тяговой нагрузки радиус качения определяется по известной формуле академика Е.А. Чудакова:

$$r_k = r_k^c - c_\lambda T_n,$$

где $c_\lambda = \frac{T_n}{c_2 \cdot \lambda_n}$ – коэффициент пропорциональности. Из (16):

$$r_k = r_k^c - \frac{k_2}{f \sqrt{2}} T_n.$$

Сравнивая два последних соотношения, находим:

$$k_2 = c_\lambda f \sqrt{2}. \quad (17)$$

Последняя зависимость позволяет определить величину k_2 по накопленным экспериментальным значениям c_λ и f .

Рассмотрим теперь качение колеса с малым углом увода при отсутствии тяговой силы. Такое движение обычно имитируется на стендах для испытания шин и определя-

ется условиями $\omega_k = 0$, $\mathcal{G}_n = 0$. Согласно (12) поперечная сила в этом случае определяется формулой:

$$T_k = -f \cdot P_z \frac{\mathcal{G}_k}{\sqrt{\mathcal{G}_k^2 + \frac{1}{2} k_1^2 P_z^2 \omega_3^2}}. \quad (18)$$

Боковая скорость центра контакта:

$$\mathcal{G}_k = \mathcal{G}_{Ok}.$$

При малых углах ввода:

$$\mathcal{G}_{Ok} = \mathcal{G}_{On} \gamma,$$

$$T_k = -f \cdot P_z \frac{\omega_3 r_k \gamma}{\sqrt{\omega_3^2 r_k^2 \gamma^2 + \frac{1}{2} (k_1^2 \omega_3^2 P_z^2)}}. \quad (19)$$

Разлагая это выражение по степеням γ и пренебрегая членами второго порядка малости, имеем:

$$T_k = -f \frac{r_k \gamma \sqrt{2}}{k_1}. \quad (20)$$

С другой стороны, по гипотезе Рокара:

$$T_k = -k_y \gamma,$$

где k_y – коэффициент сопротивления боковому уводу.

Отсюда:

$$k_1 = \frac{f r_k \sqrt{2}}{k_y}. \quad (21)$$

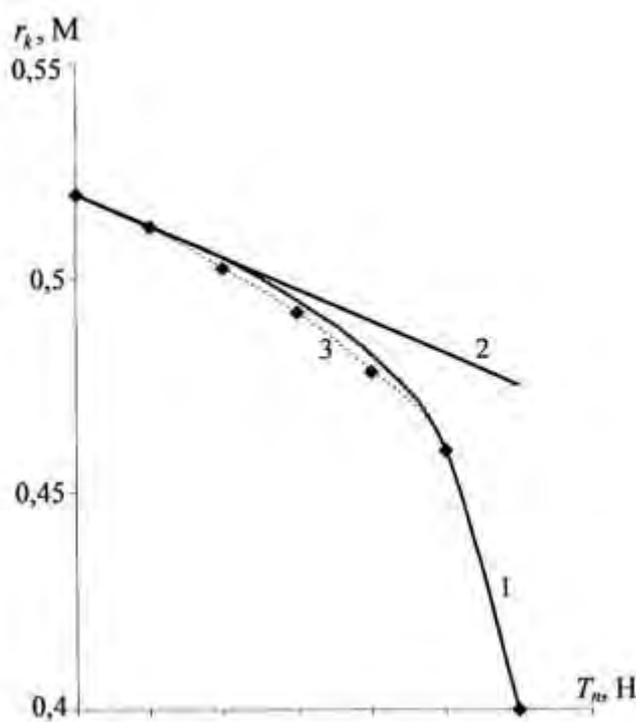
Формулы (17) и (21) позволяют вычислить коэффициенты k_1 и k_2 по значениям c_λ , r_k , k_y , определяемым экспериментально и получившим широкое применение в практических расчетах.

Отметим также хорошее совпадение зависимости (15) с экспериментальными данными по измерению радиуса качения колеса, приведенными в [1]. Преобразуем формулу (15), разрешив ее относительно r_k :

$$r_k = r_k^c - \frac{T_n k_2 P_z}{\sqrt{2 \cdot (f^2 P_z^2 - T_n^2)}} \quad (22)$$

Для определения коэффициентов f и k_2 воспользуемся методикой, предложенной в работе [6]. Обработка экспериментальных данных, приведенных в [1], дала следующие значения этих коэффициентов: $f = 0,866$; $k_2 = 0,4745 \cdot 10^{-5}$.

На основании этих данных по формуле (22) построен график зависимости радиуса качения от тяговой нагрузки для шины 12.00-18 при внутреннем давлении воздуха $P_B = 275$ кПа, вертикальной нагрузке $P_z = 275$ кПа, радиусе свободного качения $r_k^c = 0,52$ м (рисунок 3). На этом рисунке приведены также экспериментальные данные и прямая (2), построенная по формуле Е.А. Чудакова [1]. Численное сравнение экспериментальных и расчетных данных не приводим, так как относительная погрешность не превышает 4 %.



1 – формула (22); 2 – формула Е.А. Чудакова; 3 – экспериментальные данные [1]
Рисунок 3 – Зависимость радиуса качения шины 12.00-18 от тягового усилия

Выводы

В предлагаемой модели работы колеса охвачены едиными зависимостями все ситуации взаимодействия с опорной поверхностью от режима свободного качения до полного буксования. Это дает возможность моделировать движение колесных машин в единой системе уравнений во всем диапазоне изменения тяговых нагрузок. Упругие силы в пневматической шине моделируются по способу М.В. Келдыша, т.е. линейной моделью. В ряде случаев, например, для шин низкого давления, этого недостаточно. Предлагаемый подход не исключает применения нелинейных упругих моделей в таких случаях.

Список использованных источников

1. Динамика системы дорога – шина – водитель / А.А. Хачатуров [и др.]; под общ. ред. А.А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
2. **Келдыш, М.В.** Шимми переднего колеса трехколесного шасси / М.В. Келдыш // Тр ЦАГИ. – 1945. – № 564. – 33 с.
3. **Опейко, Ф.А.** Колесный и гусеничный ход / Ф.А. Опейко. – Минск: АСХН БССР, 1960. – 228 с.
4. **Петрушов, В.А.** Сопротивление качению автомобилей и автопоездов / В.А. Петрушев, С.А. Шуклин, В.В. Московкин. – М.: Машиностроение, 1975. – 235 с.
5. **Опейко, Ф.А.** Модель трения покоя / Ф.А. Опейко // Труды Института торфа АН БССР. – 1985. – Т.6. – С. 511-520.
6. **Казаченко, Г.В.** О силе трения при плоском контакте трущихся тел / Г.В. Казаченко // Горная механика. – 2006. – № 4. – С. 69-73.
7. **Давыдик, И.И.** Исследование поворота гусеничного хода: дис. ... канд. техн. наук / И.И. Давыдик. – Минск, 1970. – 211 с.
8. **Казаченко, Г.В.** Исследование поворота колесных машин с бортовой схемой управления: дис. ... канд. техн. наук / Г.В. Казаченко. – Минск: 1982. – 203 с.

Kazachenko G.V.

Tire motion on small deformed support surface

Approach to tire motion simulation based on shaping of force function after the manner of the academician M.V. Keldysh and as for dissipative function – on the base of friction theory of the professor F.A. Opeyko is proposed. The received correlations are analyzed in the most frequently occurring modes of curvilinear deviation motion and rectilinear motion by traction load action. It is shown that the shaped model of tire motion is well co-ordinated with the experiments which results are given in the books on specialized subjects.

Поступила в редакцию 22.08.2011 г.

УДК 622.24.05-52-045.37(045)

ПРОБЛЕМЫ ВНЕДРЕНИЯ PLC-ТЕХНОЛОГИИ В АВТОМАТИЗАЦИЮ ГОРНО-ШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Севрук П.Н. (НП ЧУП «Институт горной автоматики», г. Солигорск, Беларусь)

Рассмотрен вопрос технического совершенствования систем автоматического управления горно-шахтным технологическим оборудованием путем внедрения PLC-технологии (Power Line Communications – коммуникации по силовым линиям).

Введение

В настоящее время одним из направлений технического прогресса в горной автоматике является совершенствование систем оперативного управления технологическими процессами с целью использования новейшего горного оборудования, увеличения производительности и безопасности труда по добыче полезных ископаемых и предприятия в целом. В связи с совершенствованием автоматизированных систем управления особое значение приобретает передача информации о состоянии технологического оборудования.

Внедрение телемеханики в системы автоматизации технологического оборудования на шахтах ОАО «Беларуськалий» – одна из первоначальных задач, тем более, что содержание рабочих в этих условиях чрезвычайно дорого и имеется постоянный дефицит рабочей силы. На современном производстве встречаются участки с вредными и опасными условиями труда. В таких случаях обеспечение безопасности для персонала может быть достигнуто применением дистанционного управления технологическими установками. Часто положение усугубляется высокой запыленностью, плохими условиями для прохождения радиоволн и подвижностью технологических установок. Реализация дистанционного управления возможна в таких случаях только по кабельным линиям. Однако прокладка и перемещение сигнальных кабелей создают большие неудобства в процессе работы. При этом автоматизация горных работ возможна на основе внедрения телемеханики с созданием специальных каналов передачи информации. Привлекательным в таких условиях выглядит дистанционное управление подвижными технологическими установками по кабелям электропитания этих установок.

Известны методы и производится аппаратура передачи данных по линиям электропередачи – технология PLC. Однако применение этих методов в промышленности для управления сложными, энергонасыщенными установками, работающими в опасных условиях, требует научного обоснования и экспериментальной проверки.

Именно в этой связи в настоящей статье рассматриваются вопросы передачи информации по питающим кабелям в условиях шахты.

Устройство станции МПКС-500

На предприятии ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» производится два типа станций управления комбайном ПКС-8:

- работа станции КУУВП10 основана на релейной логике. Для защиты двигателей от токовых перегрузок применяются блоки защиты типа БКЗ-3. Искробезопасность внешних цепей управления обеспечивается блоками БДУ и искробезопасным источником питания. Станция рассчитана для работы от сети 660 В;

- логическое управление станцией МПКС-500 осуществляет контроллер S7-200. Для защиты электроприводов применяются блоки типа ELBA100, TMA100, ER100, SIR100. Искробезопасность внешних цепей управления обеспечивается блоками МК4, PSOI и искробезопасным источником питания. Станция рассчитана для работы от сети 660/1140В.

Рассмотрим подробнее устройство и принцип работы станции МПКС-500, так как данная станция построена на базе контроллера, что позволяет производить работы по модернизации с наименьшими затратами.

Логическое управление станцией осуществляется при помощи контроллера CPU226 и трех модулей расширения дискретных входов EM321. CPU226 характеризуется следующими показателями:

- встроенный блок питания 24 В, 400 мА для питания датчиков и преобразователей;
- 24 встроенных дискретных входа и 16 дискретных выходов;
- 2 коммуникационных порта (RS 485), каждый из которых может использоваться:
 - как PPI-интерфейс, используемый для программирования контроллера, подключения устройств человеко-машинного интерфейса (TD 200, OP, TP), организации связи между центральными процессорами S7-200. Скорость передачи данных может устанавливаться равной 9,6/ 19,2/ 187,5 кбит/с;
 - как MPI-интерфейс, используемый для программирования контроллера и подключения к ведущим MPI-устройствам (S7-300/ S7-400, панелям оператора, текстовым дисплеям, кнопочным панелям). Скорость передачи данных может устанавливаться равной 9,6/ 19,2/ 187,5 кбит/с;
 - как свободно программируемый порт с возможностью поддержки прерываний, используемый для организации последовательного канала обмена данными с оборудованием и аппаратурой других производителей. Например, с поддержкой ASCII протокола передачи данных. Скорость передачи данных может устанавливаться равной 0,3/ 0,6/ 1,2/ 2,4/ 4,8/ 9,6/ 19,2/ 38,4 кбит/с;
- возможность подключения до 7 модулей расширения EM (из состава серии S7-22х) для ввода и вывода дискретных или аналоговых сигналов;
- съемный опциональный модуль EEPROM-памяти, используемый для быстрого программирования контроллера (установкой запрограммированного модуля памяти) и архивирования данных [1].

На комбайне типа ПКС-8 установлены следующие электродвигатели:

- два асинхронных электродвигателя по 110 кВт привода режущего органа;
- два асинхронных электродвигателя по 11 кВт приводов вентиляторов;
- асинхронный электродвигатель 110 кВт привода бермовых фрез и маслососов;
- асинхронный электродвигатель 15 кВт привода конвейера;
- асинхронный электродвигатель 25 кВт привода бункера-перегрузателя [2].

Для управления выше перечисленными электродвигателями в станции МПКС-500 установлено шесть силовых панелей. Устройство панелей, за исключением мощности контакторов и параметров настроек блоков защит, однотипное и состоит из следующих элементов [3]:

- быстродействующие предохранители – осуществляют токовую защиту электродвигателя;
- контактор – осуществляет подачу напряжения на электродвигатель. С дополнительного контакта передается дискретный сигнал на вход CPU226 о состоянии контактора;
- блок электронный ELBA100 с датчиками тока – осуществляет токовые защиты электродвигателя. Выдает два дискретных сигнала для CPU226 о состоянии защит;

- блок SIR100 осуществляет контроль целостности предохранителей и выдает дискретный сигнал для CPU226;
- блок ER100 осуществляет предварительный контроль сопротивления изоляции отходящего силового кабеля и электродвигателя. Выдает дискретный сигнал для CPU226;
- блок TMA – осуществляет контроль температуры электродвигателя. Выдает дискретный сигнал для CPU226 (рисунок 1).

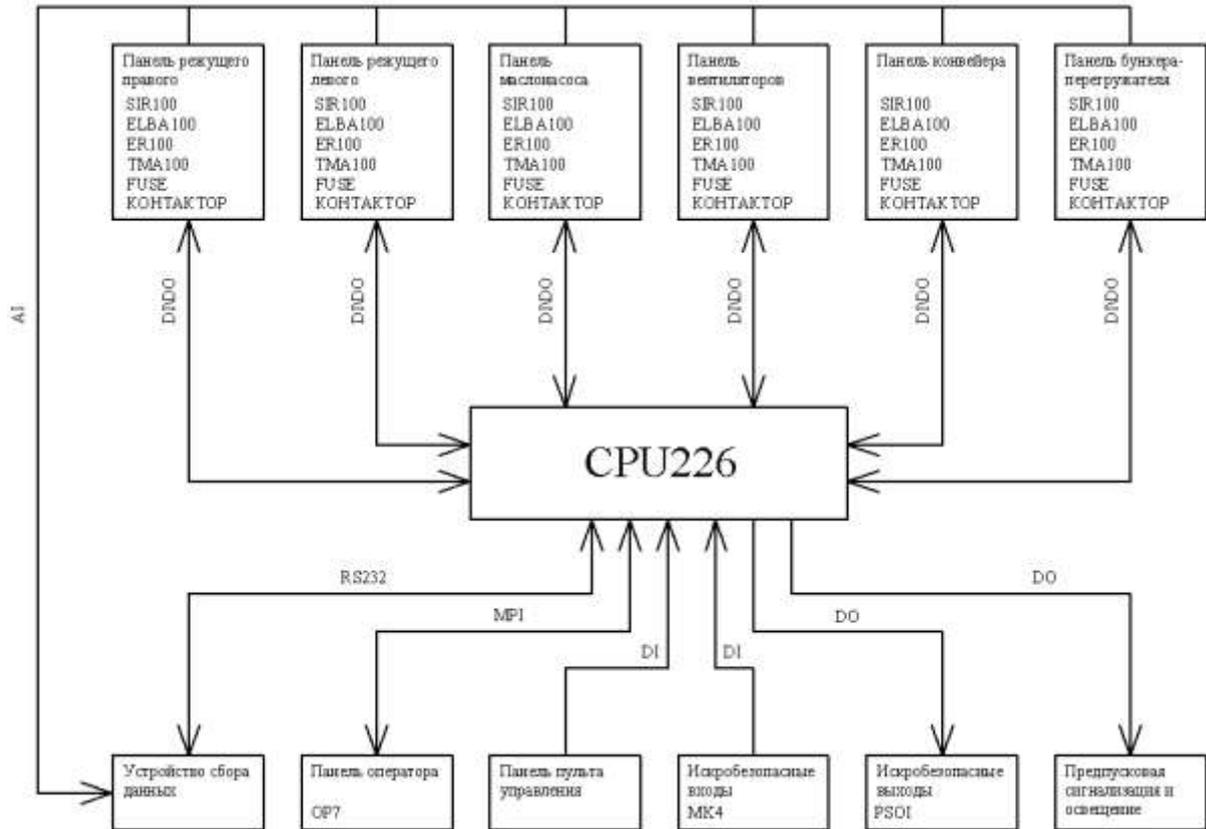


Рисунок 1 – Структурная схема станции МПКС-500

Так же на контроллер сводятся дискретные сигналы с пульта управления, через блоки искробезопасные МК4 поступают внешние дискретные сигналы с постов аварийного останова, концевых выключателей положения станка бурильного, а так же информация с бункера-перегрузателя о начальном и конечном заполнении, наличии самоходного вагона.

Для управления электроклапанами контроллер подает дискретные сигналы на искробезопасные барьеры PSOI, которые, в свою очередь, подключают катушки клапанов к источнику искробезопасного напряжения.

CPU226 осуществляет управление электроприводами и гидроклапанами при помощи дискретных выходов (DO), анализируя информацию, поступающую по дискретным входам (DI) от выше описанных силовых панелей, пульта управления и внешних постов и конечных выключателей, т.е. осуществляет слаженную работу приводов в режимах «Ревизия», «Ручной», «Полуавтоматический», «Автоматический» согласно заложенным алгоритмам. Контроллер постоянно производит опрос состояния блоков защит и внешних сигналов: в случае сработки любого блока защиты или внешнего поста происходит остановка электропривода или всего комбайна, и на панель оператора выводится информация о неисправности либо о причине остановки.

PLC-технология

Технология PLC является проводной технологией, направленной на использование кабельной инфраструктуры силовых электросетей для организации высокоскоростной передачи данных. Подразделяется в зависимости от скорости передачи на широкополосную (BPL) со скоростью более 1 Мбит/с и узкополосную (NPL).

На самом деле, способы передачи информации при помощи электрической проводки существовали давно. Среди них всем известные советские репродукторы [4]. Технология основана на достаточно простой идее разделения сигнала: если каким-то образом можно было бы одновременно передавать несколько сигналов по одному физическому каналу, то можно было бы увеличить общую скорость передачи данных. Этого можно добиться при помощи модуляции (к тому же, модулированный сигнал устойчив к помехам), и при разных способах модуляции на одних и тех же физических каналах передачи данных можно добиться разной скорости.

На первый взгляд, рецепт удачной технологии PLC может показаться простым – достаточно выбрать такой способ модуляции, который мог бы обеспечить большую скорость передачи данных, и современное средство связи готово. Однако те способы модуляции, которые обеспечивают наиболее плотную упаковку сигнала, требуют сложных математических операций, и, для того чтобы их можно было применять в технологиях PLC, необходимо применение быстрых сигнальных процессоров.

Процессор цифровой обработки сигналов (digital signal processor – DSP) – это специализированный программируемый микропроцессор, предназначенный для манипулирования в реальном масштабе времени потоком цифровых данных. DSP-процессоры широко используются для обработки потоков графической информации, аудио- и видеосигналов.

Таким образом, развитие PLC-технологий упиралось в темпы развития DSP-процессоров, и как только последние стали справляться с продвинутыми алгоритмами эффективной модуляции, появились новые технологии организации таких сетей. На данный момент в PLC-технологиях используется OFDM-модуляция, которая позволяет добиваться большой скорости передачи данных и хорошей устойчивости сигнала к помехам [5].

Области применения PLC-технологий:

- широкополосный доступ в Интернет;
- домашние и офисные компьютерные сети;
- VoIP – IP-телефония;
- высокоскоростная аудио- и видеопередача;
- офисное и домашнее (в том числе через Internet) видеонаблюдение, построение систем удаленного видеомониторинга;
- построение каналов передачи цифровых данных для промышленной и домашней автоматизации (АИИС КУЭ, АСУ ТП(SCADA), СКУД);
- системы безопасности (пожарно-охранная сигнализация).

Современные PLC-системы, ориентированные на решение задачи широкополосного абонентского доступа, в основном используют две технологии. В первой применяется сигнал с так называемым расширением спектра (spread spectrum – SS), существенно повышающий помехоустойчивость передачи. При использовании SS-модуляции мощность сигнала распределяется в широкой полосе частот, и сигнал становится незаметным на фоне помех. На принимающей стороне значимая информация выделяется из шумоподобного сигнала с использованием уникальной для данного сигнала псевдослучайной кодовой последовательности. С помощью различных кодов можно осуществлять передачу сразу нескольких сообщений в одной широкой полосе частот. Описанный принцип лежит в основе метода множественного доступа с кодовым разделением каналов

(CDMA). Отметим, что помимо помехоустойчивости SS-модуляция обеспечивает высокий уровень защиты информации. В качестве базовой используется QPSK-модуляция.

Вторая технология основана на ортогональном частотном уплотнении с одновременной передачей сигналов на нескольких несущих частотах (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplex). Этот метод также гарантирует высокую достоверность передачи и устойчивость к искажениям сигнала.

Дальнейшим развитием второго варианта стала технология, предложенная американской фирмой Intellon. Здесь применен модифицированный OFDM-метод, в котором исходный поток данных разбивается на пакеты, и каждый из них передается в диапазоне частот 4,3-20,9 МГц с использованием относительной фазовой модуляции на собственной поднесущей (DBPSK или DQPSK – Differential Quadrature Phase Shift Keying, дифференциальная квадратурная фазовая модуляция со сдвигом). Максимальная информационная скорость передачи достигает десятков Мбит/с.

В большинстве случаев системы PLC классифицируются в соответствии с напряжением силовой сети, на которой они используются, и зоной действия (территорией):

- применяемые на высоковольтных линиях (HV);
- применяемые на средневольтных линиях (MV);
- применяемые на низковольтных линиях (LV);
- последняя миля;
- внутри здания;
- внутри помещения (квартиры).

При передаче сигналов по бытовой электросети могут возникать большие затухания в передающей функции на определенных частотах, что может привести к потере данных. В технологии PowerLine предусмотрен специальный метод решения этой проблемы – динамическое включение и выключение передачи сигнала (dynamically turning off and on data-carrying signals). Суть данного метода заключается в том, что устройство осуществляет постоянный мониторинг канала передачи с целью выявления участка спектра с превышением определенного порогового значения затухания. В случае обнаружения данного факта, использование этих частот на время прекращается до восстановления нормального значения затухания.

Существует также проблема возникновения импульсных помех (до 1 микросекунды), источниками которых могут быть галогенные лампы, а также включение и выключение мощных бытовых электроприборов, оборудованных электрическими двигателями [6].

Внедрение PLC-технологии в систему управления комбайном ПКС-8

Рассмотрим принцип работы системы передачи данных от станции управления комбайном МПКС-500 до штрекового пускателя (рисунок 2).

Подключение PLC-модемов к каналу передачи данных – питающему кабелю комбайна осуществляется при помощи схем согласования. Основные функции, которые лежат на данных схемах – это обеспечение изоляции, фильтрации и усиление передаваемых и принимаемых аналоговых сигналов.

Далее подготовленный аналоговый сигнал поступает на PLC-модем. Основой модема является специализированная микросхема или цифровой сигнальный процессор DSP, которые организуют протокол передачи данных, а также отвечают за физическую реализацию передачи, т.е. формирование несущей частоты, модуляцию, демодуляцию, фильтрацию и т.д. PLC-модем подключается посредством протокола RS485 или RS232 к существующему контроллеру станции CPU226. Производительность контроллера CPU226 позволяет заложить в него алгоритмы по передаче данных от устройства сбора данных, а также по передаче информации о работе электроприводов комбайна и аварийных остановках. На другом конце питающего кабеля в штрековом пускателе уста-

новлены аналогичная схема согласования и PLC-модем, который передает по протоколу RS232 полученную информацию ADSL-модему. К ADSL-модему подключена существующая линия телефонной связи горного участка, по которой происходит передача информации о функционировании комбайна диспетчеру.

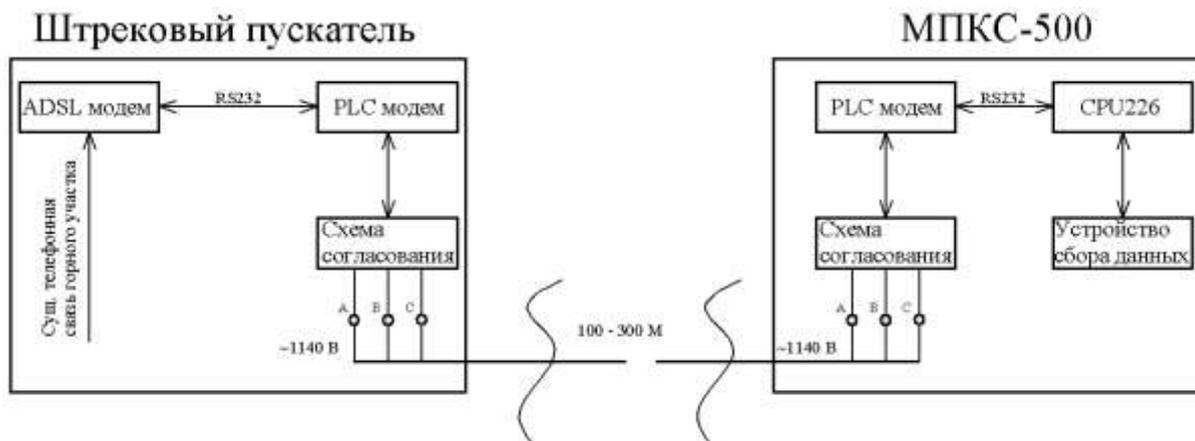


Рисунок 2 – Структурная схема системы передачи данных

Выводы и направление дальнейших исследований

На основе данного примера видно, что можно осуществить передачу данных от технологического оборудования, построенного на базе контроллера, к компьютеру диспетчера, используя существующие каналы связи.

Дальнейшие исследования представляется целесообразным выполнить по помеховым обстановкам в кабелях электропитания действующего энергонасыщенного технологического оборудования.

Список использованных источников

1. Программируемый контроллер S7-200. Системное руководство. Нюрнберг, 2004. – 538 с.
2. Устройство и эксплуатация проходческого комбайна ПКС-8М / В.А. Данилов [и др.] под ред. В.Я. Прушака. – Минск: 2010. – 175 с.
3. Руководство по эксплуатации станции микроконтроллерной компактной МПКС-500. Солигорск, 2009.
4. **Бурденков, Г.В.** Автоматика, телемеханика и передача данных в энергосистемах / Г.В. Бурденков, А.И. Мальшев, Я.В. Лурье. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 336 с.
5. **Савин, А.Ф.** PLC – уже не экзотика / А.Ф. Савин // Вестник связи. – 2004 – № 9. – С. 14-16.
6. **Hrasnica, H.** Broadband Powerline Communications Networks / Halid Hrasnica, Abdelfatteh Haidine, Ralf Lehnert. – Dresden: University of Technology, 2004. – 292 с.

Sevruk P.N.

Problems of PLC-technology introduction in automation of mining equipment.

The question concerning technical development of automatic control systems of mining process equipment through introduction of PLC-technology (Power Line Communications) was considered.

Поступила в редакцию 23.08.2011 г.

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 543.42:621.373

СВЧ-МОДИФИЦИРОВАНИЕ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ

¹Овчинников Е.В., ²Чекан Н.М., ¹Эйсымонт Е.И. (¹УО «Гродненский государственный университет им. Я. Купалы», Беларусь, ²НИЦ «Плазмотег» ФТИ НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь)

Изучена структура, морфология, физико-механические свойства алмазоподобных покрытий (АПП), подвергнутых воздействию СВЧ-излучения. Увеличение времени экспозиции алмазоподобных покрытий в области СВЧ-излучения увеличивает размер включений и уменьшает их количество. Проведенные исследования по определению значений поверхностной энергии, исходя из значений краевого угла смачивания полярной и неполярной жидкостей, свидетельствуют о немонотонном изменении ее значений. Показано, что значения микротвердости алмазоподобных покрытий, сформированных на стальных подложках и модифицированных СВЧ-излучением, возрастают с увеличением времени экспозиции в электромагнитном поле СВЧ-излучения.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяют методам получения ультрадисперсных и нанодисперсных материалов. Установлено, что уменьшение размера структурных элементов (частиц, кристаллов, зерен) материалов ниже некоторой пороговой величины, приводит к существенному изменению физических, химических и механических свойств [1-3]. Данный эффект проявляется, когда средний размер частиц у большинства материалов становится менее 40-100 нм, и которые, согласно классификации веществ и материалов, принято называть нанокристаллическими. Помимо размеров частиц важную роль в нанокристаллических материалах играют структура и состояние границ разделов фаз. Это влияние особенно характерно для таких материалов, в которых границы разделов фаз находятся в неравновесном состоянии (интерметаллические соединения), что приводит к самопроизвольной релаксации таких границ даже при комнатной температуре. Необходимо также отметить, что и сами нанодисперсные частицы могут содержать различные дефекты, количество и распределение которых качественно иное, чем в крупных частицах.

Для формирования нанодисперсных композиционных материалов, в основном, используют такие методы, как интенсивная пластическая деформация, кристаллизация аморфных сплавов, компактирование порошков и т.д. [4-8]. Применение плазмохимических вакуумных технологий позволило получать наноматериалы в виде нанодисперсных и нанокомпозитных многокомпонентных и многослойных покрытий на основе боридов, силицидов, нитридов, карбидов и пр. [9-11]. При этом может формироваться нанодисперсная структура с различной степенью структурной неравновесности, спектром разориентации, дефектностью и разным химическим составом границ. В большинстве случаев образование данных структур связано с сегрегацией одной фазы к границам другой. При этом твердые частицы не внедрены в матрицу другой фазы, а разделены друг от друга или покрыты очень тонким слоем адсорбированных атомов

второй фазы. Тем не менее, перечисленные структурные модели не в полной мере отражают типы покрытий на основе соединений металл – неметалл. Изучение закономерностей формирования нанодисперсных нанокompозитных покрытий, получаемых плазмохимическими методами, представляет научный интерес. Основными методами формирования покрытий являются: химическое (CVD), физическое (PVD) и плазмохимическое (PCVD) осаждения [12-15].

Формирование нанокompозиционных покрытий с использованием данных методов позволяет получить защитные тонкие пленки толщиной порядка от 0,5 до 10 мкм, характеризующиеся высокими эксплуатационными характеристиками: повышение производительности обработки резанием на 25-210 %, увеличение служебных характеристик от 2,5 до 10 раз в зависимости от вида обрабатываемого материала. Эффективно применение плазмохимических покрытий при модифицировании инструмента, изготавливаемого из твердых сплавов методами порошковой металлургии, для снижения расхода сложно-профильного инструмента, за счет уменьшения количества переточек. Однако не всегда применение тонкослойных вакуумных покрытий для обрабатываемого инструмента дает ожидаемый эксплуатационный и экономический результат. В ряде случаев для увеличения служебных характеристик изделий, модифицированных вакуумными тонкослойными покрытиями, используют дополнительно энергетические воздействия различного типа: термообработку, лазерное, гамма-излучение, высокотемпературную и низкотемпературную плазму. Представляет интерес изучить влияние СВЧ-излучения на структуру, физико-механические характеристики плазмохимических покрытий.

Целью данной работы является изучение структуры, морфологии, физико-механических характеристик алмазоподобных покрытий, подвергшихся воздействию СВЧ-излучения.

Материалы и методы исследований

В качестве объекта исследований использовали алмазоподобное покрытие (АПП) толщиной 0,48 мкм, полученное на серийной установке вакуумного напыления УВНИПА-1-001, состоящей из ионного источника, источника плазмы стационарного катодно-дугового разряда с металлическим катодом, источника плазмы импульсного катодно-дугового разряда с катодом из графита. Формирование покрытий проводили при следующих условиях: емкость основной батареи конденсаторов – 2150 мкФ, частота генерации импульсов – 2 Гц, число импульсов – 17000. В качестве подложки использовали сталь 45. Модифицирование АПП проводили с помощью сверхвысокочастотного излучения с длиной волны $\lambda = 12,25$ см, мощностью 2500 Вт, частотой 2450 МГц, время облучения варьировали от 0 до 120 с.

Исследование трансформаций структуры и морфологии покрытий проводили методами ИК-спектроскопии (МНПВО), атомно-силовой микроскопии (АСМ), оптической микроскопии с использованием программ обработки и визуализации изображений, разработанных ОДО «Микротестмашины», ЗАО «Спектроскопические системы». Микротвердость покрытий определяли методом микроиндентирования на приборе ПМТ-3, при $m = 150$ г. Поверхностную энергию покрытий определяли прямо-теневым методом по изменению значений краевого угла смачивания.

Результаты и обсуждение

В ИК-спектре алмазоподобного покрытия, сформированного на стальной подложке, наблюдаются полосы поглощения, лежащие в области $520-630$ см⁻¹; $950-1300$ см⁻¹;

2200-3000 cm^{-1} . Согласно данным работы [16] полосы поглощения, лежащие в области 950-1300 cm^{-1} , можно отнести к валентным колебаниям С–Н групп. Полосы поглощения, лежащие в области 2200-3000 cm^{-1} , состоят из пиков валентных колебаний карбонильных групп, одинарных С–С и двойных С=С связей и деформационных колебаний С–Н групп. При этом наблюдались пики в области 2100 cm^{-1} , 1000 cm^{-1} , отвечающие валентным колебаниям С \equiv С связей [16]. В работе [16] было установлено, что в спектрах МНПВО покрытий D1 α -С:Н, синтезированных из разных углеводородов – октана, толуола и циклогексана, не наблюдается каких-либо существенных различий. Они подобны спектрам α -С:Н пленок с $n \geq 2,0$, полученных с применением ацетилена. Поэтому делается вывод, что независимо от химической природы исходного углеводорода D1-пленки α -С:Н имеют типичные ИК-спектры МНПВО.

На рисунке 1 представлены ИК-спектры алмазоподобных покрытий, подвергнутых воздействию СВЧ-излучения. Установлено, что с увеличением времени воздействия СВЧ-излучения происходят изменения в ИК-спектрах исследуемых образцов. Так, увеличение времени выдержки образцов в поле СВЧ-излучения до 120 секунд приводит к исчезновению полос поглощения при 1268 cm^{-1} , 1314 cm^{-1} , 1740 cm^{-1} , 2084 cm^{-1} , 2318 cm^{-1} , 2852 cm^{-1} , 2918 cm^{-1} . Наблюдается широкая размытая полоса поглощения, лежащая в области 1000-2500 cm^{-1} . Установлено, что оптическая плотность поглощения уменьшается линейно с увеличением времени экспозиции образца в поле СВЧ-излучения (рисунк 2).

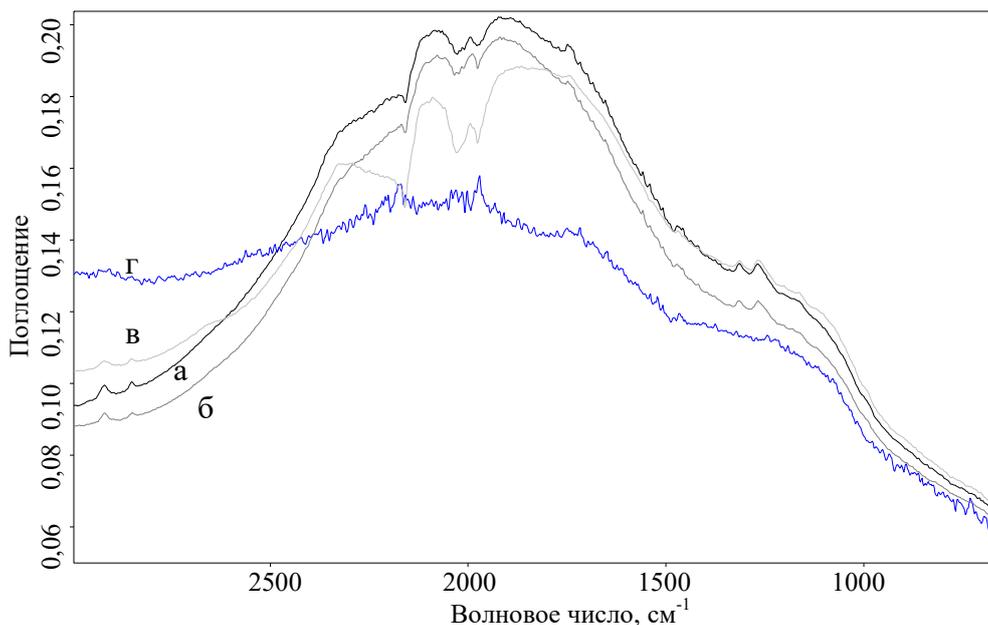


Рисунок 1 – ИК-спектры алмазоподобных покрытий: исходного (а) и подвергнутых воздействию СВЧ-излучения: 8 с (б), 30 с (в), 120 с (г)

Полосу поглощения, соответствующую волновому числу 2084, можно отнести к колебаниям С=О связей, полосу поглощения при 2318 cm^{-1} – к колебаниям группы RC \equiv CR'. Полоса поглощения при 2918 cm^{-1} соответствует колебаниям СН₂, СН₃-групп. Таким образом, модифицирование алмазоподобных покрытий СВЧ-излучением приводит к существенным изменениям в структуре данных материалов.

Морфология поверхностных слоев алмазоподобных покрытий претерпевает существенные изменения при воздействии электромагнитного излучения СВЧ-диапазона.

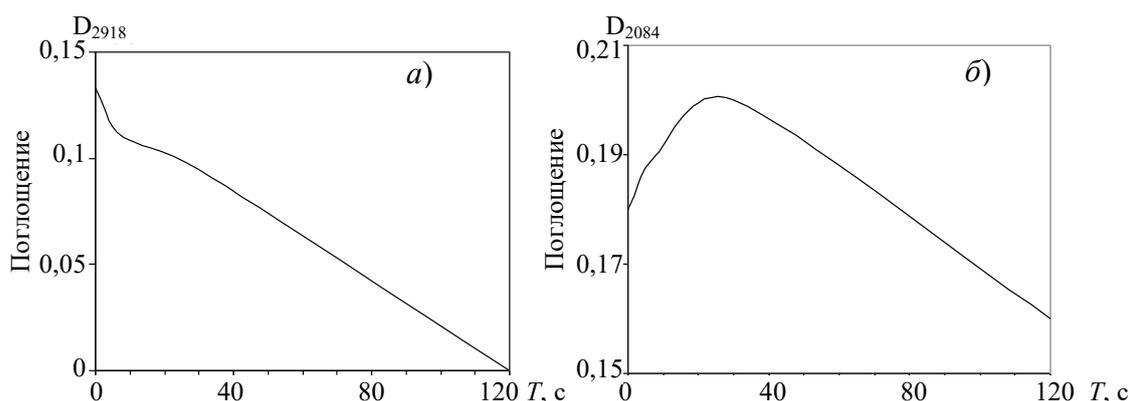


Рисунок 2 – Зависимость оптической плотности полос поглощения 2918 см^{-1} (а) и 2084 см^{-1} (б) от времени (T) экспозиции в электромагнитном поле СВЧ-излучения

На рисунке 3 приведены АСМ-изображения алмазоподобных покрытий с различным временем экспозиции в зоне действия сверхвысокочастотного электромагнитного излучения. Исходное алмазоподобное покрытие характеризуется достаточно гладкой поверхностью с большим количеством мелкодисперсных включений глобулярной формы, шероховатость поверхностных слоев составляет $Ra = 16,1 \text{ мкм}$ (рисунок 3б).

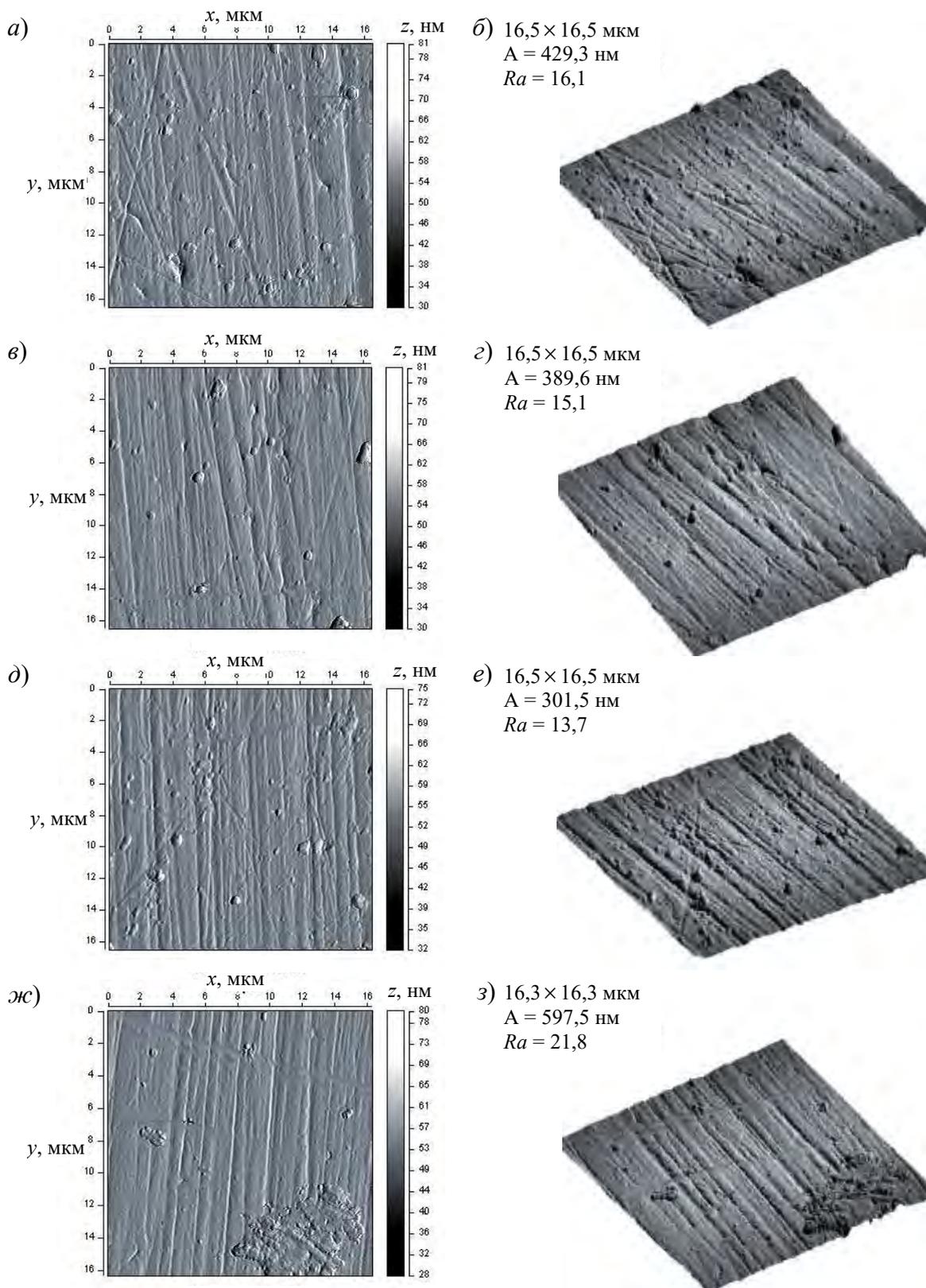
Проведение модифицирования покрытия путем выдержки в электромагнитном поле СВЧ-диапазона приводит к уменьшению количества и размеров дисперсных включений. Увеличение времени экспозиции алмазоподобных покрытий в зоне действия СВЧ-излучения увеличивает размеры включений и уменьшает их количество. Дальнейшее увеличение времени выдержки образцов в зоне действия СВЧ-излучения приводит к образованию крупных агломератов развитой формы, дисперсные глобулярные образования в структуре покрытия фактически отсутствуют.

На рисунке 4 приведено изменение шероховатости поверхности Ra в зависимости от времени экспозиции АПП в электромагнитном поле СВЧ-диапазона. Таким образом, из представленных данных следует, что СВЧ-излучение приводит к структурным трансформациям в алмазоподобных покрытиях. Однако на текстурированность покрытия и распределение массы вещества по толщине СВЧ-излучение в исследуемых диапазонах облучения не оказывает существенного влияния (рисунок 5, 6).

Наблюдаемые структурно-морфологические трансформации в алмазоподобных покрытиях при модифицировании с применением СВЧ-излучения обусловлены, скорее всего, изменением поверхностной энергии исследуемых образцов. Об изменении поверхностной энергии модифицированных алмазоподобных покрытий свидетельствует изменение удельной поверхности (рисунок 7), т.к. при увеличении поверхности раздела фаз удельная полная поверхностная энергия характеризует увеличение энергии системы (рисунок 8).

Проведенные исследования по определению значений поверхностной энергии, исходя из значений краевого угла смачивания полярной и неполярной жидкостей, свидетельствуют о немономонном изменении значений поверхностной энергии. Исходя из данных, представленных на рисунках 7 и 8, существует корреляция между значениями удельной поверхности и значением поверхностной энергии.

Изменение структуры, морфологии, величины поверхностной энергии должно сказываться на физико-механических характеристиках покрытий. Проведенные исследования показали, что значения микротвердости алмазоподобных покрытий, сформированных на стальных подложках и модифицированных СВЧ-излучением, возрастают с увеличением времени экспозиции в электромагнитном поле СВЧ-излучения (рисунок 9).



а, б, в, ж – 2D-изображение; г, д, е, з – 3D-изображение; а, г – исходное покрытие;
 б, д – экспозиция 8 секунд в электромагнитном поле СВЧ-излучения;
 в, е – экспозиция 30 секунд в электромагнитном поле СВЧ-диапазона;
 ж, з – экспозиция 120 секунд в электромагнитном поле СВЧ-диапазона;
 Ra – шероховатость поверхности

Рисунок 3 – АСМ-изображение алмазподобных покрытий, подвергнутых предварительному облучению СВЧ-излучением

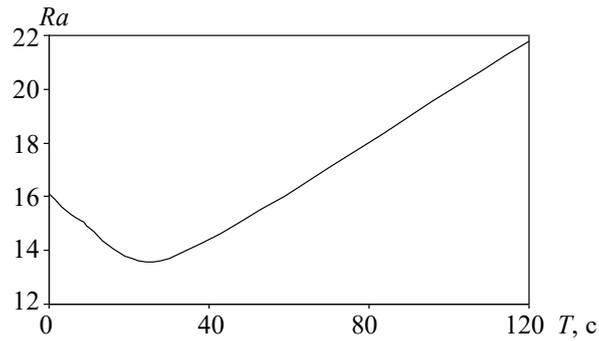
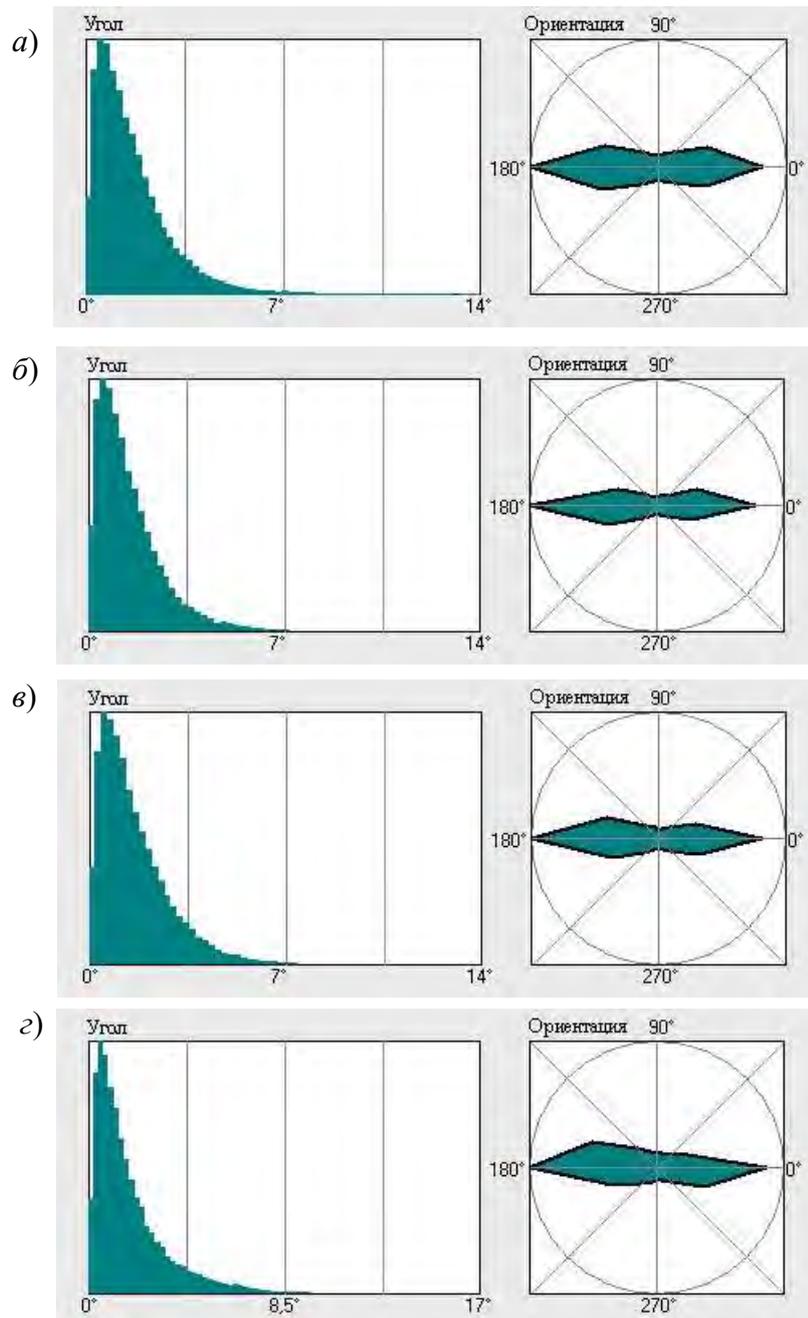
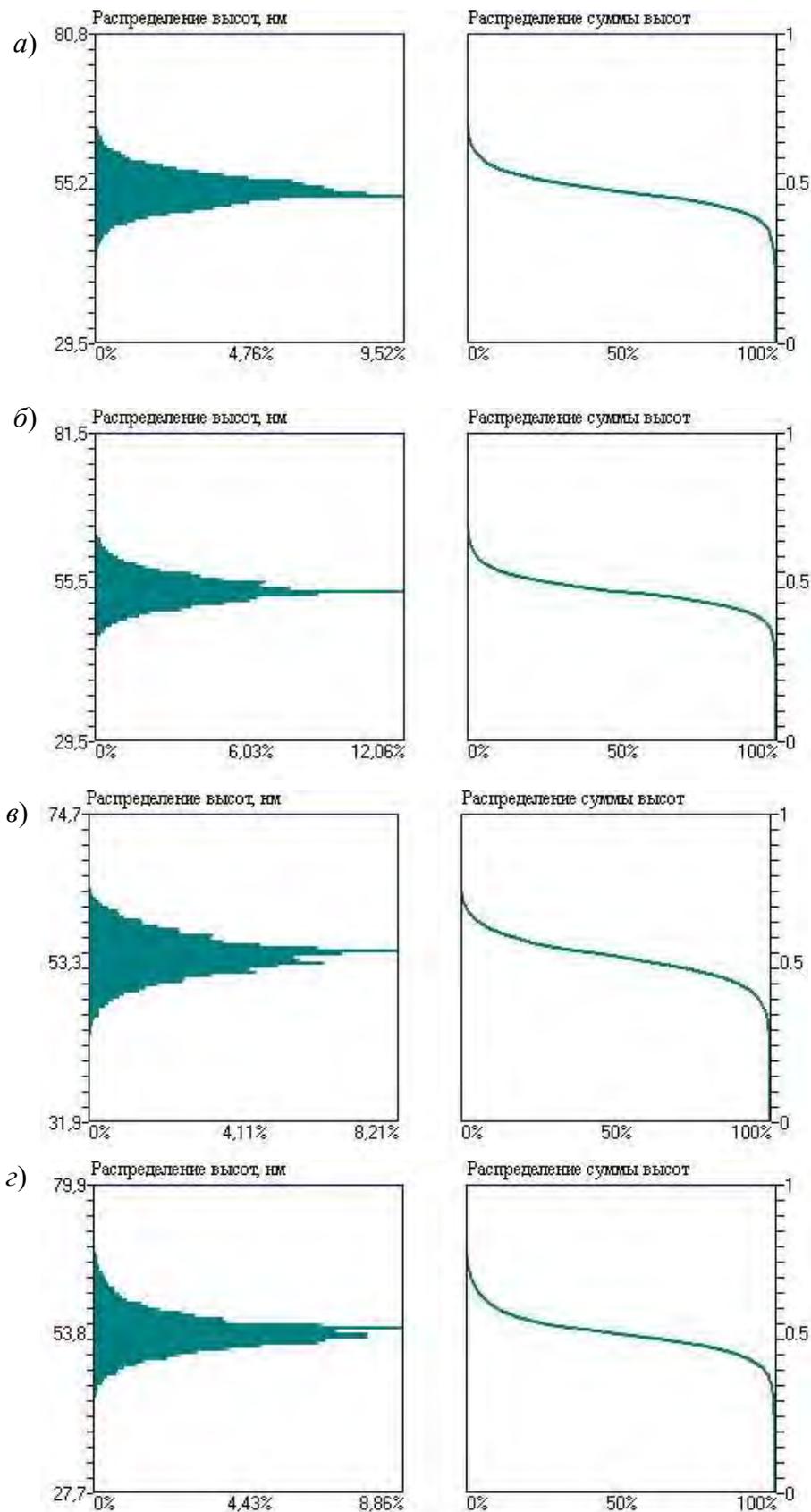


Рисунок 4 – Зависимость параметров шероховатости алмазоподобного покрытия Ra от времени воздействия T СВЧ-излучения



a – исходное; $б$ – экспозиция 8 секунд; $в$ – экспозиция 30 секунд; $г$ – экспозиция 120 секунд

Рисунок 5 – Угловое распределение алмазоподобных покрытий, модифицированных СВЧ-излучением



a – исходный образец; *б* – экспозиция 8 сек; *в* – экспозиция 30 секунд; *г* – экспозиция 120 секунд

Рисунок 6 – Высотное распределение алмазоподобных покрытий, модифицированных СВЧ-излучением

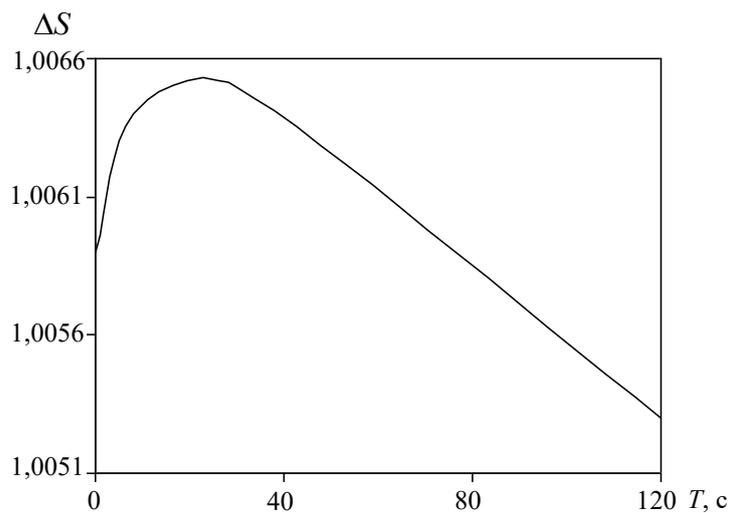


Рисунок 7 – Зависимость удельной поверхности ΔS алмазоподобных покрытий от времени воздействия T СВЧ-излучения

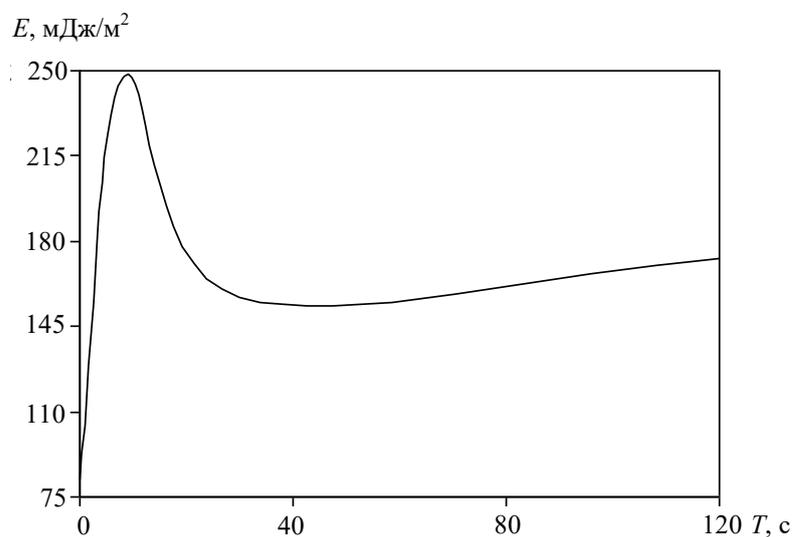


Рисунок 8 – Зависимость поверхностной энергии E алмазоподобных покрытий от времени экспозиции T в электромагнитном поле СВЧ-излучения

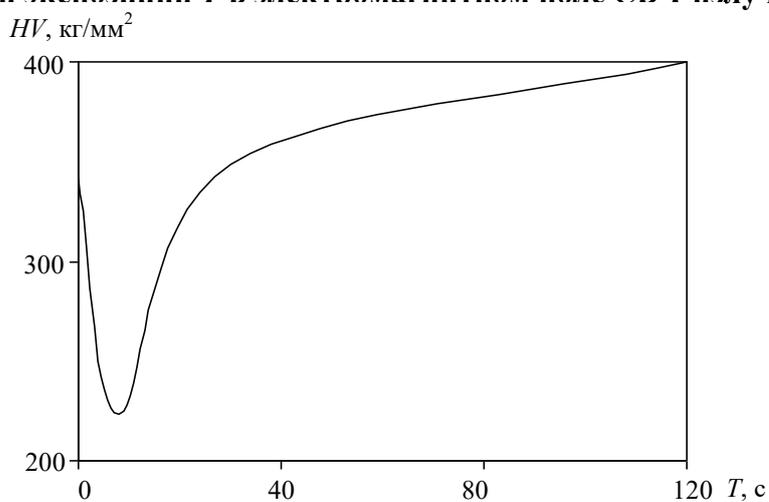


Рисунок 9 – Зависимость значений микротвердости HV алмазоподобных покрытий от времени экспозиции в поле электромагнитного СВЧ-излучения

Заключение

Таким образом, установлен эффект увеличения физико-механических характеристик алмазоподобных покрытий, модифицированных СВЧ-излучением. Данный эффект объясняется с точки зрения структурной морфологической трансформации поверхностных слоев АПП под воздействием СВЧ-излучения. Данный процесс сопровождается увеличением поверхностной энергии, что затрудняет выход на поверхность точечных и линейных дефектов и, в конечном счете, увеличивает физико-механические характеристики. Возрастание значений поверхностной энергии граничных слоев АПП на разделе фаз «газ – твердое тело» также может свидетельствовать об увеличении адгезионного взаимодействия на границе раздела «покрытие – подложка».

Список использованных источников

1. **Гусев, А.И.** Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2005. – 416 с.
2. **Gleiter, H.** Nanocrystalline materials / H. Gleiter // Progress in Materials Science. – 1989. – Vol. 33. – P. 223-314.
3. **Gleiter, H.** Nanostructured materials: basic concepts and microstructure / H. Gleiter // Acta mater. – 2000. – Vol. 48. – P. 1-29.
4. **Валиев, Р.З.** Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
5. **Васильев, М.А.** Нанокристаллизация металлических поверхностей методами пластической деформации / М.А. Васильев, Г.И. Прокопенко, В.С. Филатов // Успехи физики металлов. – 2004. – Т. 5. – С. 345-390.
6. **Шевченко, С.В.** Наноструктурные состояния в металлах, сплавах и интерметаллических соединениях: методы получения, структура, свойства / С.В. Шевченко, Н.Н. Стеценко // Успехи физики металлов. – 2004. – Т. 4. – С. 219-254.
7. **Лариков, Л.Н.** Нанокристаллические соединения материалов / Л.Н. Лариков // Металлофизика и новейшие технологии. – 1994. – Т. 17, № 9. – С. 56-68.
8. **Поздняков, В.А.** Механизмы пластической деформации и аномалии зависимости Холла-Петча металлических нанокристаллических материалов / В.А. Поздняков // Физики металлов и металловедение. – 2003. – Т. 96, № 1. – С. 114-128.
9. CrN_x покрытия, получаемые вакуумно-дуговым методом на основе малолегированных сплавов хрома / В.В. Кунченко [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2004. – № 3 (85). – С. 87-95.
10. **Barshilia Harish C.** Structure, hardness and thermal stability of nano-layered TiNiCrN multilayer coatings / C Barshilia Harish, Anjana Iain, K.S. Rajam // Vacuum. – 2004. – Vol. 72. – P. 241-248.
11. **Gautier, C.** Study of the growth mechanisms of chromium nitride films deposited by vacuum ARC evaporation / C. Gautier, J. Magnet // Thin Solid Films. – 1997. – Vol. 294. – P. 43-52.
12. **Андриевский, Р.А.** Синтез и свойства пленок внедрения / Р.А. Андриевский // Успехи химии. – 1997. – Т. 66, № 1. – С. 57-77.
13. **Андриевский, Р.А.** Получение и свойства нанокристаллических тугоплавких соединений / Р.А. Андриевский // Успехи химии. – 1994. – Т. 63, № 5. – С. 431-448.
14. (TiCr)N and Ti/TiN PVD coatings on 304 stainless steel substrates: Texture and residual stress / M. Leoni [et al.] // Thin. Sol. Films. – 1999. – V. 345. – P. 263-269.

15. Characterization of PVD (TiCr) N_x hard coatings / H.A. Iehn [et al.] // Surf. and Coat. Technol. – 1991. – Vol. 50. – P. 45-52.

16. **Коншина, Е.А.** Особенности колебательных спектров алмазоподобных и полимероподобных пленок α -C:H / Е.А. Коншина, А.И. Вангонен // Физика и техника полупроводников. – 2006. – № 6. – С. 616-622.

Ovchinnikov E.V., Chekan N.M., Eismont E.I.

SHF modification of diamond-like coatings

Structure, morphology, physical and mechanical properties of diamond-like coatings exposed to microwave radiation were studied. Increase of exposure time of diamond-like coatings in the area of microwave radiation increases the size of inclusions and reduces their number. Determination of the surface energy values, based on the values of the contact angle of the polar and nonpolar fluids, shows a nonmonotonic change in the surface energy values. It was showed that the microhardness of diamond-like coatings formed on steel substrates and modified by microwave radiation increase with increasing of exposure time in the electromagnetic field of microwave radiation.

Поступила в редакцию 03.08.2011 г.

УДК 621.7:621.217:678.033

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ МАТРИЦ

Михайлова Л.В. (УО «Гродненский государственный университет им. Я. Купалы», Беларусь)

На основе современных представлений физики конденсированного состояния и квантовой механики разработаны физические модели формирования габитуса и зарядового состояния наноразмерных частиц различного состава, структуры и технологии производства. Особенности габитуса наночастиц, полученных диспергированием полуфабрикатов и конденсированием атомарных и молекулярных ингредиентов доказаны с использованием матричного метода и точечных групп.

Введение

Ведущие отрасли производства – машиностроение, энергетика, стройиндустрия, определяющие устойчивое экономическое развитие, базируются на широком применении энергосберегающих технологий и машиностроительных материалов нового поколения, позволяющих сформировать и расширить сектора отечественной продукции на рынке СНГ и дальнего зарубежья.

К числу машиностроительных материалов нового поколения относят композиты на основе полимерных и олигомерных матриц, содержащих функциональные компоненты с размером частиц не превышающих 100 нм. По современной классификации такие композиты относят к наноструктурным и нанокпозиционным материалам. Обоснованный выбор состава композиционного материала для обеспечения заданных параметров эксплуатационных характеристик и технологии его изготовления определяется совокупностью факторов, включающих материаловедческие, технологические, экономические и др. аспекты.

Важным аспектом проблем современного функционального наноматериаловедения является установление физико-химических принципов формирования наноразмерных частиц и механизма их взаимодействия с полимерными макромолекулами на основе современных представлений физики конденсированного состояния, материаловедения и технологии полимерных материалов. Анализ литературных и патентных источников свидетельствует о существовании выраженной тенденции развития полимерного наноматериаловедения для машиностроения.

Несмотря на многочисленные литературные источники, посвященные различным аспектам получения наноразмерных частиц, их строения, технологии, а также влияния на параметры служебных характеристик, в настоящее время отсутствуют обоснованные методологические подходы как к получению наночастиц, так и композиционных материалов заданного функционального назначения. Также отсутствует устоявшийся понятийный аппарат и теоретическое обоснование механизмов физико-химических процессов, протекающих на границе раздела «наночастица – матрица».

Более того, характерные особенности структуры и свойств дисперсных частиц, которые позволяли бы относить их к нанообъектам, требуют физического обоснования, основанного на современных представлениях физики конденсированного состояния и квантовой механики.

Требует уточнения и физического обоснования критерий наноразмерности, т.к. общепринятая в настоящее время размерная граница в 100 нм необоснованна и в ряде случаев не соответствует экспериментальным результатам. Целесообразно проведение комплексных исследований по установлению факторов, определяющих наносостояние – особое состояние материальных объектов, обусловленное размерным фактором.

Цель настоящего исследования состоит в разработке физических принципов формирования нанокomпозиционных материалов на основе термопластичных матриц.

Материалы и методы исследований

Для проведения исследований были выбраны материалы, нашедшие наибольшее распространение в отечественном машиностроении:

а) термопластичные полимеры – полиамид 6 (ПА6), полиамид 11 (ПА11) и композиции на его основе, полиэтилен высокого и низкого давления (ПЭНД, ПЭВД) и сополимеры этилена и винилацетата (СЭВА), полипропилен (ПП), полиэтилентерефталат (ПЭТФ);

б) совмещенные полимер-олигомерные смеси на основе олигомеров сшивающихся смол (эпоксидных, полиэфирных), модифицированных полимерными компонентами.

В качестве функциональных модификаторов полимерных и совмещенных матриц использовали низкоразмерные частицы различного состава, строения и технологии получения: ультрадисперсные углеродсодержащие продукты детонационного синтеза с отрицательным кислородным балансом, выпускаемые под марками УДА и УДАГ (ЗАО «Синта»), природные кремнийсодержащие продукты (глины, трепел, слюды, кремень, шунгит) в соответствии с требованиями нормативной документации производителей, а также компоненты, обеспечивающие необходимые параметры служебных и технологических характеристик композиционных материалов (растворители, разбавители, отверждающие системы и т.д.).

Результаты и обсуждение

Применяемые в настоящее время наноразмерные модификаторы полимерных связующих существенно отличаются не только по составу и строению, но и по размерному фактору, при котором проявляется их комплексное действие на структуру высокомолекулярной матрицы. Для обоснованного определения размерной границы, ниже которой дисперсные частицы вещества переходят в наносостояние, необходимо установление основных критериев наноразмерности на основе анализа структурных, энергетических факторов во взаимосвязи с размерным.

На основании критерия меры дисперсности δ , равной $\delta = -\ln d$, где d – поперечный размер частицы, предложена классификация вещественных объектов, включающая 10 классов. Согласно этой классификации наноразмерные частицы относятся к 9 классу с мерой дисперсности $8 < \delta < 9$. Вместе с тем, очевидно, что частица вещества может иметь наноразмеры не по всем трем направлениям и проявлять весьма высокую активность в процессах взаимодействия с высокомолекулярным веществом, при наличии хотя бы одного наноразмера.

К числу основных факторов, определяющих модифицирующие свойства дисперсных частиц, относятся химический состав, структурная модель («идеальный структурный мотив» по Н.В. Белову), которые объединяются понятием «структурно-химическая модель» для некристаллических веществ и «идеальная кристаллохимиче-

ская модель» – для кристаллов. Третьим важнейшим фактором являются тип и наличие дефектов строения, четвертым – характеристики окружающей среды.

Анализ свидетельствует о том, что существенное влияние на эти факторы оказывает метод получения наноразмерного объекта. Рассмотрены основные методы получения наноразмерных частиц (НРЧ) на базе принципов диспергирования полуфабрикатов, конденсирования на активных центрах и синтеза из атомарных и молекулярных компонентов. В зависимости от использованной технологии получения НРЧ обладают при одном и том же составе различным габитусом и энергетическим состоянием [7].

С применением теории групп и матричного описания точечных симметрий систематизированы НРЧ, получаемые методом диспергирования полуфабрикатов. При диспергировании кристаллического полуфабриката, пока поверхностная энергия не играет существенной роли, образуются частицы, имеющие форму полиэдров. Кристалл при механическом дроблении ограничивается плоскостями с наибольшей ретикулярной плотностью. Увеличение степени диспергирования повышает поверхностную энергию, и в соответствии с принципом наименьшей энергии образуются микрочастицы с формой, близкой к сферической или эллипсоидной. Точечные группы позволяют предсказать форму наночастиц, получаемых диспергированием: для наночастиц на основе кристаллов кубической сингонии наиболее вероятной формой является сфера; для средних сингоний – эллипсоид вращения; для кристаллов со спайностью – частица будет иметь чешуйчатую форму. У наночастиц, полученных диспергированием полуфабрикатов низших сингоний, наиболее вероятной формой является трехосный эллипсоид, который в предельных случаях приобретает форму чешуйки или вискера [8].

Наночастицы получают не только диспергированием, но и конденсированием из жидкой или газообразной среды. Рассмотрены физические принципы формирования частиц с различной кристаллической решеткой (ОЦК, ГЦК, ГПУ) в рамках модели шаровых упаковок. Показано, что метод шаровых упаковок позволяет определить форму наночастицы.

Для оценки активности наночастицы необходимо не только определение габитуса, но и размерных параметров. Разработана методика оценки размеров НРЧ на основании дифракционного метода [9].

Теория рассеяния рентгеновского излучения на кристаллах основана на том, что объем рассеивающего объекта роли не играет. Если кристалл бездефектный, то его узлы обратной решетки являются точками. Выход узла обратной решетки на сферу Эвальда определяет условие получения дифракционного максимума. В условиях эксперимента даже в близком по структуре к идеальному рефлекс кристалла будет иметь конечную ширину (рисунок).

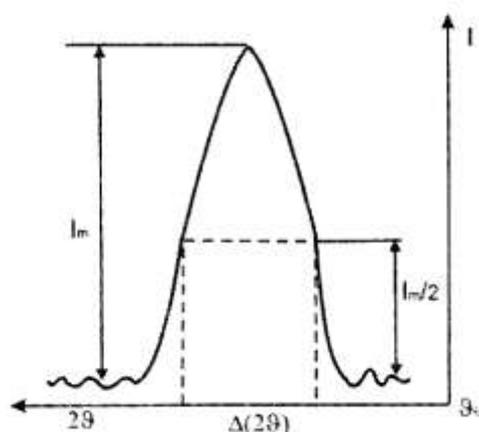


Рисунок – Характеристики рефлекса

Параметрами рентгеновского рефлекса являются: максимальная интенсивность (I_m), полуширина ($\Delta 2\vartheta$) и интегральная интенсивность I (ϑ – брэгговский угол, 2ϑ – угол дифракции). Так как рентгеновские рефлексы в большинстве случаев имеют форму, близкую к Δ -образной, то $I = I_m (\Delta 2\vartheta)$.

На полуширину и интенсивность рентгеновского рефлекса оказывают влияние различные факторы, в том числе размер кристаллов в поликристаллическом образце, температура образца и его дефектность как нарушение идеальной структурной модели изучаемого кристалла.

Связь между размерами кристаллов (L) и полушириной рентгеновского рефлекса ($\Delta 2\vartheta$) определяется условием (1).

Линейный размер частицы в направлении, перпендикулярном плоскости (hkl), от которой получен рефлекс с учетом разности хода (рисунок 1), обусловленной отличием брэгговского угла на величину ε , определяется из выражения:

$$L = \frac{c \cdot \lambda}{\Delta(\alpha\vartheta) \cos \vartheta}, \quad (1)$$

где λ – длина волны рентгеновского излучения.

Формула (1) известна как формула Шеррера. На величину интенсивности рефлекса оказывает влияние и температура кристалла. Чем выше температура, тем меньше максимальная интенсивность и тем больше его полуширина. Зависимость ($\Delta 2\vartheta$) от температуры оценивается на основе фактора Дебая-Валлера. Следовательно, температура T_L , при которой величина ($\Delta 2\vartheta$) так же, как и для того же диспергированного до размера L кристалла, является температурным «эквивалентом» дисперсности. Установлена зависимость $T_L = f(L)$, которая учитывает свойства кристалла и проведено ее физическое обоснование: чем выше класс крупности кристалла, тем больше удельная поверхность при той же массе. Следовательно, с увеличением класса дисперсности растет внутренняя энергия, мерой которой является температура. Зависимость $T_L = f(L)$ начинает заметно проявляться при размерах частиц в нанодиапазоне. В этом кроется одна из причин изменения физических свойств частиц при размерах $L \rightarrow L_0$, где L_0 – размерная граница между нано- и макросостояния микрокристаллов. L_0 связана с дебаевской температурой θ_D зависимостью (2):

$$L_0 = 230(\theta_D)^{-1/2}. \quad (2)$$

На основе этого можно сделать вывод, что модифицирующие свойства нанонаполнителей зависят не только от их кристаллохимических свойств, но и от размера их частиц, что подтверждается нашими исследованиями и согласуется с литературными данными. Предложенная формула при любых значениях $0,8 \leq c \leq 2$ позволяет определить некоторое эффективное, усредненное значение параметра $\langle L \rangle$. Это значение может отличаться от значений $\langle L \rangle$, определенных другими методами, однако точность определения параметра методом рентгеновской дифрактометрии достаточна для практического использования в инженерных приложениях. Эффективность предложенного

метода возрастает в том случае, если необходимо анализировать не абсолютные, а относительные значения параметра $\langle L \rangle$ по сравнению с некоторым эталонным образцом.

Проведенный комплексный анализ физических факторов, определяющих наноразмерное состояние дисперсных частиц, позволяет проводить оценку метода получения НРЧ и их состава для композитов конкретного функционального назначения.

Квантово-механические сравнения объемного и поверхностного состояний частиц показывают, что потенциалы приповерхностных областей являются не просто обрывком волновых функций потенциала в объеме, но и имеют свои особенности, которые проявляются в появлении работы выхода электрона у металлов и ряде поверхностных эффектов у диэлектриков и полупроводников. Предложен механизм образования особого энергетического состояния металлических и диэлектрических образцов, приводящих к появлению поверхностной мозаики, наблюдаемой экспериментально.

При небольших размерах частиц потенциал в приповерхностных областях не равен нулю. Связи поверхностного слоя становятся нескомпенсированными. Изменение поверхностной конфигурации атома приводит к возникновению поверхностной энергии. Следовательно, вблизи поверхности ячейки кристалла искажаются и становятся отличными от объемных. Может возникнуть отличный от нуля дипольный момент, и искажения в ячейках согласно Н. Ашкрофту «могут даже создать не равный нулю суммарный электрический заряд на поверхности».

Распределение зарядов на поверхности кристаллов зависит от множества факторов: морфологии поверхности, блочности кристалла, наличия дефектов, а также от кристаллографической плоскости, которой соответствует поверхность. Если грани кристалла кристаллографически неэквивалентны, то есть, не связаны точечной группой симметрии, то на каждой грани помимо двойного слоя – внешнего от поверхности отрицательного и приповерхностного положительного – появляется отличный от нуля макроскопический заряд.

Величина заряда определяется поверхностью Ферми. Для частиц Fe и Al симметрия поверхности Ферми существенно отличается от сферы. Следовательно, у этих металлов в поликристаллическом образце будет проявляться зарядовая мозаика в большей степени, чем, например, у меди, у которой симметрия поверхности Ферми почти сферическая. Если металлы относятся не к кубической, а к средним или низшим сингониям (Cu, Ag, Au), то перераспределение зарядов между контактирующими частицами будет наблюдаться всегда, т.к. кристаллофизические различия граней частиц этих металлов обусловлены самой структурой, а величина зарядов зависит от электронных состояний металлов и их дефектности. Из проведенного анализа следует, что на поверхности поликристаллических металлических образцов будет формироваться зарядовая мозаика, которая определяет адгезионные, триботехнические и коррозионные характеристики металлических поверхностей. Появление такой мозаики было показано Г.И. Дистлером в середине XX века.

Аналогичное явление характерно и для поверхностей диэлектриков, образующихся при расщеплении полуфабрикатов слоистых минералов (сланцы, глины) и минералов каркасного и цепочечного строения (кремнезем). Этот эффект обусловлен переходом зарядов через потенциальный барьер, возникающий при образовании ювенильных поверхностей.

Проведенные исследования показали, что размерный фактор, определяющий наносостояние частицы, является анизотропной величиной и для разных направлений величина L_0 не является постоянной. Поэтому L_0 [uvw] должна быть описана характеристической фигурой, симметрия которой определяется точечной симметрией кристалла. Для кубических кристаллов – это сфера, для кристаллов средних сингоний – эллипсоид,

в кристаллах низших сингоний характеристической фигурой размерной границы между наночастицей и объемной фазой является трехосный эллипсоид с различным соотношением осей. Кроме того, возможна ситуация, когда частица имеет наноразмер только в одном направлении (чешуйки), в двух направлениях (нанонити или вискеры) или в трех направлениях (наночастица).

Исследован механизм модифицирующего действия наноразмерных частиц в полимерных матрицах различного состава. Установлено существование общих закономерностей влияния частиц, отличающихся составом и строением, на параметры структуры высокомолекулярной матрицы, обусловленные их специфическим энергетическим состоянием. Осуществлена оценка содержания наномодификатора, обеспечивающего полное модифицирование связующего. Предложено аналитическое выражение для оценки оптимальной концентрации наномодификатора L (3):

$$L = r_1 \left[1 + \frac{\rho_n}{\rho_n} \left(\frac{1}{C_n} - 1 \right) \right]^{1/3} . \quad (3)$$

Полученное выражение позволяет осуществить выбор модификатора при создании функционального композита. При этом, учитывая, что модифицирующее действие наночастицы распространяется не менее чем на 2-3 слоя полимерных молекул, то при создании нанокompозитов общего назначения влияние ее природы (состава) не оказывает решающей роли. Проведенный системный анализ влияния энергетического состояния наноразмерных объектов позволил установить основные закономерности их модифицирующего действия в полимерных матрицах, состоящие в образовании пространственной сетки адсорбционных связей и упорядочении периферийных областей, прилегающих к наночастице.

Заключение

Анализ литературных источников и проведенные исследования позволили сформулировать физические принципы выбора компонентов функциональных нанокompозиционных материалов на основе термопластичных матриц. Для оценки размерной границы между макро- и наносостоянием материальных объектов целесообразно использовать табулированный параметр температуры Дебая. Использование этого критерия позволяет осуществлять обоснованный выбор класса наномодификатора и технологию получения наночастиц, приемлемую для промышленного производства нанокompозитов с оптимизированными параметрами служебных, экономических и технологических характеристик.

При выборе наномодификатора с оптимальной эффективностью действия в полимерных матрицах заданного молекулярного строения целесообразно использовать принцип зависимости активности от габитуса частицы и габитуса от кристаллофизической структуры полуфабриката.

Принцип допингового модифицирования определяет концентрационный диапазон содержания наночастиц в высокомолекулярных матрицах, обеспечивающий их оптимальное структурирование.

Разработанные на основе предложенных физических принципов функциональные материалы нашли применение в конструкции автомобильных агрегатов, технологического оборудования предприятий химической и перерабатывающей промышленности.

Список использованных источников

1. **Витязь, П.А.** Перспективные нанофазные материалы на основе ультрадисперсных алмазов / П.А. Витязь // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. науч. тр. – Новополоцк, 2001. – С. 4-8.
2. Новые ресурсосберегающие технологии и композиционные материалы / Ф.Г. Ловшенко [и др.]. – М.: Энергоатомиздат; Гомель: БелГУТ, 2004 – 519 с.
3. Полимер-силикатные машиностроительные материалы: физико-химия, технология, применение / С.В. Авдейчик и [др.]; под ред. В.А. Струка, В.Я. Щербы. – Минск: Тэхналогія, 2007. – 431 с.
4. **Авдейчик, С.В.** Нанокоспозиционные машиностроительные материалы: опыт разработки и применения / С.В. Авдейчик [и др.]; под ред. В.А. Струка. – Гродно: ГрГУ, 2006. – 403 с.
5. **Песецкий, С.С.** Полимерные нанокоспозиты: результаты и направление исследований и разработок / С.С. Песецкий, Б. Юрковский // Поликомтриб 2009: тезисы докладов международной научно-технической конференции – Гомель: ИММС НАНБ, 2009. – С. 56.
6. Металлополимерные нанокоспозиты (получение, свойства, применение) / В.М. Бузник [и др.] – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 260 с.
7. Композиционные материалы на основе совмещенных матриц для защитных покрытий: монография / Л.В. Ахмадиева [и др.]; под науч. ред. В.А. Струка. – Гродно: ГГАУ, 2009. – 532 с.
8. **Лиопо, В.А.** Матричная кристаллография / В.А. Лиопо. – Гродно, 1998. – 78 с.
9. **Лиопо, В.А.** Рентгеновская дифрактометрия / В.А. Лиопо, В.В. Война. – Гродно: ГрГУ, 2003. – 171 с.

Mikhailova L.V.

Physical principles of functional nanocomposites formation based on thermoplastic matrices

Physical models of formation of habitus and charge state of nanoscale particles of different composition, structure and production technology are developed on the basis of modern concepts of condensed matter physics and quantum mechanics. The habit features of nanoparticles received by half-finished products dispersion and atomic or molecular components condensation are proved using matrix method and point groups.

Поступила в редакцию 04.08.2011 г.

ДИМЧО ЙОСИФОВ**К 80-летию со дня рождения**

Исполнилось 80 лет доктору геолого-минералогических наук, профессору Димчо Йосифову, крупному ученому в области геофизических методов исследования строения земной коры, поисков, разведки и прогнозирования месторождений полезных ископаемых.

Научная продукция и тематическая палитра трудов профессора Д. Йосифова представляют его как талантливого ученого-исследователя, научные достижения которого отражены в 155 научных статьях, опубликованных в Болгарии и за рубежом, 3 монографиях, 4 монографических сборниках, 33 научных докладах.

Научная деятельность Д. Йосифова является крупным вкладом в теоретическую и прикладную геофизику.

Под его руководством и при непосредственном участии построены карты элементов гравимагнитных полей Карпато-Балканского региона и отдельных его участков. На основе разработанных Д. Йосифовым методик проведен анализ глубинного строения Юго-Восточной Европы, построены разрезы земной коры по направлениям, характеризующим основные структурные элементы Балкан. Построена карта рельефа фундамента на значительной части Восточно-Центрально-Европейской и Скифской платформ и Мизийской плиты как единое целое, а также карта рельефа поверхности Мохоровичича и основных разломных структур Карпато-Балканского орогена, схема разновозрастного фундамента Карпато-Балканского орогена. Составлена модель земной коры Южной Болгарии. Д. Йосифовым исследованы возможности потенциальных полей при выявлении зон оруднений в различных тектонических условиях, прослежены корреляции между элементами геофизических полей и пространственным распределением эндогенного оруднения и геофизические критерии, отражающие условия образования и локализации рудных месторождений.

Профессор Д. Йосифов является одним из пионеров в создании нового научного направления по созданию геофизической основы металлогении, имеющего большое народнохозяйственное значение. На основе комплексного анализа геологических, геофизических и геохимических полей и ареалов развития рудных формаций разработаны новые и усовершенствованы существующие прогрессивные геофизические методы регионального и локального прогноза и поисков месторождений полезных ископаемых. Д. Йосифовым созданы геофизические основы геоэкологических исследований территории Болгарии.

Многоплановость научных интересов Д. Йосифова, высокий научный уровень выполненных им разработок делают Д. Йосифова признанным лидером болгарской рудной геофизики. Д. Йосифов достойно представляет болгарскую геофизику на европейском и мировом уровнях, является членом редколлегий различных международных изданий.

Плодотворная научно-исследовательская деятельность, достижения в труде и науке Д. Йосифова отмечены многочисленными национальными и международными наградами, знаками отличия и признания.

Редакция и читатели журнала «Горная механика и машиностроение» сердечно поздравляют юбиляра, желают ему доброго здоровья, долголетия и новых творческих успехов.



ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертаций», утвержденной постановлением президиума государственной ВАК РФ от 24.12.1997 г. № 178 (в редакции с изменениями и дополнениями постановления ВАК РФ от 22.02.2006 г. № 2 и постановление ВАК РФ от 15.08.2007 г. № 4).

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Поступившие в редакцию статьи проходят рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, информативность, научная новизна.

3. Статья должна быть представлена в распечатанном виде в двух экземплярах и в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows (97/2000/2003).

4. В статье должны быть указаны индекс УДК, название статьи, фамилии авторов, наименования организаций, в которых работают авторы. Статья должна включать в себя: аннотацию (до 10 строк), введение, основную часть, заключение, завершаемое четко сформулированными выводами, список использованных источников. В структуру (при необходимости) может быть включен перечень обозначений и сокращений. Аннотация и название статьи, а также фамилии авторов должны быть представлены на английском и русском языках.

5. Объем статьи не должен превышать 10-ти страниц машинописного текста (шрифт Times New Roman, размер 12 п., интервал – 1).

6. Рисунки должны быть четкие черно-белые и созданы в одном из графических редакторов (формат tif, pcx, bmp, gif, cdr, wmf, psd), в данном случае они присоединяются с помощью табличного процессора «Excel» или «MS Graph» (встроенного в «Word»). Все обозначения на рисунках должны быть расшифрованы.

7. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. При этом они не должны дублировать графики. Каждая таблица должна иметь заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте.

8. Обозначения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте, кроме того, могут быть вынесены на отдельную страницу.

9. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ). Не следует употреблять сокращения, кроме общепринятых.

10. Список использованных источников должен быть приведен в конце статьи и содержать полные библиографические данные. Список должен быть составлен в порядке упоминания ссылок в тексте. Ссылки на непубликованные работы не допускаются.

11. Авторам необходимо на отдельной странице сообщить о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, почтовый адрес для переписки, место работы и занимаемая должность, а также номера телефонов, факсимильной и электронной связи.

12. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly stated.

2. The receiving by the Editorial Board articles are sent for review to specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.

3. All materials should be thoroughly reviewed and sent in two hard copies on white paper and one electronic copy additionally in the Word format (97/2000/2003).

4. The first page should contain UDC number, Title, Author(s), full Address of organization(s) in which author(s) work, Annotation (till 10 lines), Introduction, the text of the paper with diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, References, List of Symbols and Abbreviations (if it is necessary). Annotation, Title and Authors should be presented in English and Russian languages.

5. The paper should not exceed 10 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1 interval).

6. The figures should be black-and-white and represented in one of graphical formats: tif, pcx, bmp, gif, cdr, wmf, psd and attached with Excel or MS Graph (built-in Word). All symbols should be deciphered. The minimum size of figures is 60×90 mm. The photographs should be of good quality. Their minimum size is 60×60 mm.

7. Tables should be placed directly in the text of the article. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables and diagrams should have references in the text.

8. Symbols which are used in articles can be deciphered directly in the text or taken out on a separate page.

9. All symbols used in the text should correspond to International System. Only standard contractions should be used.

10. References are to be cited at the end of the paper on a separate page with full bibliographic information. List of references should correspond to the order of occurrence in the text. References on unpublished works are prohibited.

11. The authors should give the following information: surname, first name, patronymic name, full address with the postal code for correspondence, organization and position, home and office phone numbers, fax, e-mail.

12. The articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.

Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.

Подписные

индексы:

749332

74933

Основные направления научно-исследовательской деятельности ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»:

- разработка горношахтного подъемно-транспортного оборудования;
- разработка горного проходческого, очистного и бурового оборудования;
- разработка технологического горно-обогательного оборудования;
- разработка методов повышения надежности и долговечности деталей и узлов машин, работающих в условиях абразивных, химически активных сред горно-обогательного оборудования;
- разработка оборудования для комплексов по перегрузке и складированию сыпучих материалов;
- разработка высокопроизводительной технологии обогащения полезных ископаемых;
- разработка композиционных и теплозвукоизоляционных материалов;
- разработка конструктивных материалов и покрытий, предназначенных для использования в агрессивных химически активных, абразивных средах предприятий горной промышленности;
- совершенствование технологии добычи и повышение безопасности ведения горных работ на месторождениях полезных ископаемых;
- моделирование и автоматизированное проектирование горных машин, работающих на глубине более 1000 м во взрывоопасной среде и при больших давлениях;
- разработка автоматизированных систем управления горношахтным добывающим и перерабатывающим оборудованием.

Адрес редакции:

223710, Республика Беларусь,

Минская обл., г. Солигорск, ул. Козлова, 69

Телефоны:

(+375 174) 26 28 37 главный редактор (приемная)

(+375 174) 26 35 32 ответственный секретарь

E-mail: ipr@sipr.by

ISSN 1728-3841



9 771 728 384 000