ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья *Геотехнология и инженерная геология*

Закладочный композит на основе техногенных отходов горного производства как способ повышения экологической и технологической безопасности

Р.В.Клюев
Московский политехнический университет, Москва, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Клюев Р.В. Закладочный композит на основе техногенных отходов горного производства как способ повышения экологической и технологической безопасности // Записки Горного института. 2026. Т. 281. Вып. 2. С. 60-79. EDN JCHWNP

Аннотация
С учетом возрастающего запроса общества на создание предприятий, обеспечивающих минимальное воздействие на окружающую среду, возникает необходимость разработки безотходных технологий. Реализация потенциала техногенных отходов – неотъемлемая составляющая создания экономики замкнутого цикла. Целью настоящего исследования является применение техногенных отходов в безопасной, экологически сбалансированной и экономически эффективной технологии отработки месторождения в рамках экономики замкнутого цикла. Обоснована необходимость перехода от традиционной системы разработки к системам с многостадийной выемкой при отработке калийно-магниевых (водорастворимых) руд. Подтверждена возможность полной замены специально добываемых компонентов закладочного композита техногенными отходами, включая отходы обогащения калийно-магниевых руд, доменные гранулированные шлаки и дезактивированный цеолит ZSM-5. Установлено, что применение активатора ZSM-5 и ингибитора стекловолокна позволяет сформировать закладочный композит с улучшенными прочностными характеристиками. Оптимальный состав закладочного материала включает 60 % хвостов обогащения, 29,7 % гранулированных шлаков, 0,3 % стекловолокна и 10 % ZSM-5. Доказано, что применение многостадийной выемки с закладкой выработанного пространства повышает экологическую и технологическую безопасность отработки калийно-магниевых (водорастворимых) руд. Технологическая безопасность достигается за счет минимизации горизонтальных деформаций подработанного массива, обеспечивающих сохранение водозащитной толщи и разгрузки междукамерных целиков от повышенных напряжений, что способствует их большей устойчивости во времени. Определено, что экологическая безопасность достигается за счет утилизации техногенных отходов в составе закладочного композита, а также вследствие снижения горизонтальных деформаций подработанного массива, минимизирующих нарушение дневной поверхности.

Ключевые слова
безопасность; горно-перерабатывающее предприятие; численное моделирование; компьютерное моделирование; месторождение; техногенные отходы; закладочный композит; технологическая безопасность; экономика замкнутого цикла; полезное ископаемое; экологическая безопасность

Финансирование
Отсутствует.

Поступила: 10.02.2026 ***Принята: 25.06.2026*** ***Онлайн: 30.10.2026*** ***Опубликована: 30.10.2026***

Введение

В последнее десятилетие наблюдается усиление антропогенного воздействия на окружающую среду, наибольшее влияние на которую оказывает горно-перерабатывающая промышленность [1, 2]. Большие объемы отходов горно-перерабатывающей промышленности в виде пустой породы от вскрышных или/и проходческих работ, хвостов обогащения, металлургических шлаков и др. складируются в техногенных хранилищах [3-5]. Чем меньше содержание полезного компонента в добываемой руде, тем выше объемы образующихся техногенных отходов [6-8]. Следовательно, непосредственно содержание полезного компонента в руде характеризует степень техногенного воздействия горно-перерабатывающего производства на окружающую среду [9-11].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Ввиду истощения запасов богатых руд или/и руд неглубокого залегания мировая горная промышленность демонстрирует очевидную тенденцию перехода к отработке глубоких месторождений и добыче руд низкого качества [3, 11-13]. В результате ожидается экспоненциальный рост объемов накопления техногенных отходов [14, 15]. Помимо этого, освоение глубоких месторождений вызывает более частое возникновение ранее известных горно-динамических проявлений в больших масштабах [16-18], а последствия таких проявлений более разрушительные [19-21]. Такая тенденция предопределяет необходимость поиска решений, позволяющих снизить негативное воздействие горно-перерабатывающей промышленности, и одновременно поиск способов повышения безопасности ведения горных работ [22-24].

Длительное время сдерживающим фактором освоения месторождений георесурсов с низкой ценностью являлась высокая стоимость закладочных работ [25-28], вызванная дорогими компонентами закладочного композита (ЗК) – цементного вяжущего и специально добываемого инертного заполнителя (песок, щебень и др.) [27-30]. В настоящее время стоит задача повысить коэффициент руд калийных месторождений. Решению такой задачи способствует переход от традиционной (камерно-столбовой) системы разработки к системам с закладкой выработанного пространства [31, 32]. Следовательно, актуальность создания высокопрочного ЗК с низкой усадкой возрастает по мере увеличения глубины разработки калийно-магниевых руд [33, 34]. На современных рудниках, осуществляющих добычу металлических руд, прочность ЗК достигает 10 МПа и более [35]. При этом на калийных рудниках, где извлекаются водорастворимые руды, прочность на одноосное сжатие гидравлической закладки на основе отходов обогащения не превышает 1-4 МПа [36].

Ценностью техногенных отходов, как потенциального продукта, используемого для внедрения безопасной, экологически сбалансированной и экономически эффективной технологии отработки месторождения, длительное время пренебрегали [37-39]. Одним из способов применения техногенных отходов в горно-добывающей промышленности является замена ими специально добываемых дорогостоящих компонентов в рецептуре ЗК [40, 41]. Идея реализации потенциала техногенных отходов – неотъемлемая составляющая создания безопасной, экологически сбалансированной и экономически эффективной технологии отработки месторождения в рамках экономики замкнутого цикла [26, 42, 43].

Таким образом, использование техногенных отходов в составе ЗК отвечает современным вызовам горно-перерабатывающей промышленности и принципам экономики замкнутого цикла, являясь актуальным вопросом. Для реализации идеи применения техногенных отходов на горно-перерабатывающем предприятии необходимо разработать состав ЗК на основе техногенных отходов; предложить технологию отработки месторождения полезного ископаемого.

Методы

Использовался комплексный методологический подход, включающий:

• сравнительный анализ существующих систем разработки месторождений и технологических решений по закладке;

• экспериментальные исследования рецептур ЗК на основе техногенных отходов;

• физико-механические испытания образцов ЗК;

• численное моделирование устойчивости подземных выработок с использованием программного пакета FLAC 3D.

Такой подход обеспечил взаимное дополнение экспериментальных и расчетных данных, позволив объективно оценить эффективность предложенной технологии.

Система разработки. В качестве объекта исследования рассматривались условия отработки калийных и/или калийно-магниевых (водорастворимых) неглубоких месторождений, характеризующихся повышенной геодинамической активностью, подземным способом. Выбор обоснован:

• высокой аварийностью, вызванной разрушением оставляемых целиков и частыми проявлениями горного давления в подобных условиях [36, 44-46];

• ограниченной эффективностью традиционных систем разработки с естественным поддержанием очистного пространства [26, 37, 47, 48];

• необходимостью снижения техногенного воздействия на окружающую среду [49].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

На большинстве калийных и калийно-магниевых месторождений, относящихся к водорастворимым, отработка запасов традиционно осуществлялась в основном с применением камерно-столбовой системы разработки. При этом закладка очистных камер не производилась [36]. Анализ причин высокой аварийности на рудниках, осуществляющих добычу водорастворимых руд, продемонстрировал, что происходит разрушение несущих поддерживающих элементов, вызванное развитием субвертикальной нарушенности, повреждением сплошности водозащитной тощи (ВЗТ) [50] и, как следствие, прорывом надсолевых рассолов в отработанные камеры [36, 44, 45]. При таких обстоятельствах лишь незначительная часть рудников водорастворимых руд продолжает свою деятельность, а в большинстве случаев происходят полное разрушение рудника и потеря балансовых запасов руд, подлежащих отработке [44]. Характеристика месторождений водорастворимых руд и основные применяемые способы их отработки описаны в работе [37].

Россия длительное время остается одним из мировых лидеров по производству и экспорту калийных удобрений, уступая по запасам руды и годовому объему производства лишь Канаде. По данным исследования [51] в 2021 г. Россия произвела 9,1 тыс. т калийных удобрений, из которых 8,8 тыс. т реализовано на мировом рынке. В России запасы калийных солей сосредоточены в Верхнекамском, Непском, Гремячинском, Нивенском и Восточно-Красноборском месторождениях. До настоящего времени промышленно осваивалось только Верхнекамское месторождение. Отработка месторождений велась традиционными системами разработки с естественным поддержанием очистного пространства, и закладка отработанных камер с целью осуществления сплошной выемки не применялась. Поэтому можно опираться только на опыт, имеющийся на данном предприятии, и учитывать негативные последствия, вызванные техногенными катастрофами: в 1986 г. БКПРУ-1 – затопление рудника; 2006 г. БКПРУ – затопление рудника; 2014 г. СКРУ-2 – проникновение рассолов в рудник [27, 36, 44, 50].

Разработка рецептуры ЗК и исследование отвержденных образцов. Приготовление ЗК с сохранением одинаковой технологии смешивания, условий хранения и отверждения, а также создание идентичных условий испытания позволяют получить достоверные и репрезентативные результаты для составов ЗК с различной рецептурой. Существуют установленные стандартные методики (ГОСТ 5802-86 и ГОСТ 10180-2012) исследования ЗК с различной рецептурой. В настоящем исследовании использовали модифицированную методику [26] для исследования ЗК на основе бесцементного вяжущего, а для лучшего перемешивания всех компонентов применили принцип смешивания от меньшего к большему. Смешивание осуществлялось с помощью лабораторного планетарного смесителя МИКС-Д-С (Россия). Оптимальное и эффективное смешивание достигалось за счет характерного планетарного движения смесителя, сочетающего круговое движение с вращением вокруг собственной оси. Скорость планетарного вращения составляла 62 об/мин, увеличиваясь до 125 об/мин, при этом начальная круговая скорость вращения составляла 140 об/мин, увеличиваясь до 250 об/мин. Для имитации условий, приближенных к условиям подземных горных выработок, хранение и твердение образцов проводились в специализированных сушильных камерах (ВШ 120 К1/3, Россия) с постоянными температурой и влажностью $T = 20\pm2$ °С; $W = 95\pm5$ %.

Ранее проведенные исследования показали, что замена 0,5 % цементного вяжущего в ЗК, созданного на основе водорастворимых отходов обогащения калийно-магниевых руд, на 8-10 % доменных гранулированных шлаков позволяет сохранить реологические характеристики смеси и механические свойства после твердения [23, 26, 34]. На основании ранее полученных результатов можно предположить, что при соответствующей подготовке доменных гранулированных шлаков и регулировании компонентного состава ЗК возможна полная замена цементного вяжущего шлаковыми вяжущими материалами.

Исследования воздействия армирующих ингибиторов на искусственный массив, созданный на основе ЗК, продемонстрировали положительное влияние различных волокон [34, 35], нанокомпозитных волокон и нанотрубок [26]. Ингибиторы, в число которых входит фибра различных видов и сортов, демонстрируют многогранное влияние на свойства и характеристики как смеси, так и отвержденного ЗК. Введение в состав ЗК 0,1 % фибры (от общего объема сухого) независимо от типа и вида приводит к одновременному увеличению как динамики, так и пиковых значений

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

прочностных характеристик. Данная динамика сохраняется для смесей, в рецептуре которых не более 1 % фибры от общего объема сухого. Увеличение содержания волокон выше 1 % приводит к плохому их перемешиванию в составе композита, окомкованию (возникновению гнезд/кластеров – большого скопления в одном месте), что вызывает образование воздушных полостей и повышение пористости после отверждения [34, 36]. Таким образом, при превышении объема фибры более чем на 1 % в составе ЗК происходит резкое снижение прочностных характеристик в процессе отверждения и в уже отвержденных образцах. Экспериментально установлено [34], что оптимальное содержание фибры в рецептуре ЗК составляет 0,25-0,4 % (независимо от типа и/или вида фибры).

Исследования [23] подтвердили положительное влияние различных активирующих добавок на технологические и эксплуатационные характеристики ЗК. Экспериментально [27, 29, 37] были определены оптимальные концентрации активирующих добавок в рецептуре. На основании анализа ранее проведенных исследований разработан алгоритм подбора рецептуры ЗК (табл.1). Бетонные смеси и/или ЗК на основе цементного вяжущего с применением в качестве инертного заполнителя специально добываемого песка являются наиболее изученными. Для изучения возможности замены вяжущего техногенными отходами металлургического передела (в частности доменными гранулированными шлаками) в качестве эталона приготовлен состав 1. С целью изучения возможности применения в рецептуре ЗК отходов обогащения водорастворимых руд (для данного исследования – галитовые отходы обогащения калийно-магниевых руд) приготовлен промежуточный эталон – состав 2.

Таблица 1

Алгоритм подбора рецептуры закладочного композита

Номер состава	Компоненты, %					
	Инертный заполнитель		Вяжущее		Ингибитор	Активатор
	Хвосты обогащения	Песок	Шлаки	Цемент	Стекловолокно	ZSM-5
1	0	99	0	1	0	0
2	99,0	0	0	1	0	0
3	60,0	0	40,0	0	0	0
4	60,0	0	39,7	0	0,3	0
5	60,0	0	35,0	0	0	5,0
6	60,0	0	30,0	0	0	10,0
7	60,0	0	39,7	0	0,3	0
8	60,0	0	34,7	0	0,3	5,0
9	60,0	0	29,7	0	0,3	10,0

Испытания на одноосное сжатие со скоростью нагружения 0,5 МПа/с проводились на цилиндрических образцах размером 50 × 100 мм. Для изучения динамики набора прочности образцы испытывались на 7-е, 28-е, 60-е, 90-е и 120-е сут твердения. Испытание прочности отвержденных образцов производилось на одноосное сжатие с помощью лабораторного автоматического испытательного пресса MTS Insight (MTS Systems Corporation, США).

Для получения достоверных и надежных результатов применили методику, разработанную и апробированную в исследовании [26]. За счет проведения большого количества экспериментов достигалась высокая степень надежности результатов. Достоверность результатов подтверждена повторяемостью экспериментальных данных, полученных в достаточном количестве испытаний. Для каждого состава ЗК было подготовлено по 18 образцов, впоследствии испытанных на одноосное сжатие. Полученные результаты характеризовались удовлетворительной сходимостью, а их средние значения использовались при последующем анализе и формировании выводов исследования.

После тестирования результаты оценивались на предмет согласованности. Если у более 30 % образцов показатели прочности на сжатие отклонялись более чем на 20 % от среднего значения, партия отбраковывалась и испытание повторялось. Такие отклонения свидетельствовали о дефектах образцов (например, пустоты, внутренние трещины или недостаточное уплотнение), а не о свойствах, связанных с материалом. Результаты, представленные в данном исследовании, отражают валидированные партии со стабильным внутренним распределением.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

К методам обнаружения повреждений и деформации микро- и мезоструктуры ЗК относится ультразвуковой импульсный метод (или метод акустической эмиссии). В настоящем исследовании придерживались российских (ГОСТ 22690-2015; ГОСТ Р 59938-2021) и международных (ISO 16836:2019; ISO 16837:2019; ISO 16838:2019) стандартов в области метода акустической эмиссии (АЭ) для исследования бетона.

В момент механического нагружения отвержденных образцов ЗК для изучения процесса образования и распространения микротрещин применяли анализ АЭ. При механическом нагружении образцов ЗК в момент разрушения происходят внутренние микроструктурные изменения и генерируется высвобождаемая энергия, которая в свою очередь формирует переходные упругие волны. В настоящем исследовании применяли систему PCI-2 AE (Physical Acoustics Corporation, США), которая использовалась для захвата сигналов АЭ во время механического нагружения. В процессе нагружения и внутренних микроструктурных изменений два зонда, прикрепленные к поверхностям образца ЗК, собирали сигналы акустического излучения. Частота дискретизации установлена на 140 кГц с усилением сигнала 45 дБ. Полученные результаты предоставляли данные в режиме реального времени о начале, развитии повреждений и окончательного разрушения. Этот подход позволяет оценить механическое поведение материала, определить критические точки напряжения и режимы разрушения. Следовательно, анализ АЭ предлагает ценную информацию о целостности и долговечности материала, облегчая комплексную оценку производительности в различных дополнительных условиях.

В последние годы с целью более детального изучения ЗК проводятся анализы методами сканирующей электронной микроскопии (SEM) и рентгеновской дифрактометрии (XRD), позволяющие изучить морфологию, микроструктуру и кристаллические фазы материала. Как результат, устанавливаются фазовые различия (количество C-S-H- и/или N-A-S-H-гелей; наличие гидроалюминатов; количество и размеры пор; формы сформировавшихся кристаллических структур и их связи и др.), которые объясняют механические свойства создаваемого (исследуемого) ЗК. При проведении SEM- и XRD-анализов использовали ранее апробированную методику [52]. Все микроструктурные исследования проводились на изломе исследуемого материала ЗК. Материал для исследования отбирался после проведения испытания образцов на одноосное сжатие, т.е. излом был произведен механическим путем. При помощи струи воздуха удалялись мелкодисперсные фракции и пыль, образовавшиеся на поверхности излома [53, 54].

Для проведения микроструктурного исследования методом погружения использовали поляризационный микроскоп Polam R-211M (Россия) с максимальным увеличением в 720 раз. Фазы были идентифицированы по показателям преломления, двулучепреломлению, основности, знаку, удлинению и углам затухания [55]. В качестве стандартов применялись иммерсионные жидкости. Количественное соотношение фаз (кристаллографический состав) определяли методом Стройбера. В исследовании с использованием поляризационного микроскопа максимальное увеличение составило 720 раз [56]. В дополнение к данным исследованиям образцы изучались на более мощном сканирующем электронном микроскопе ZEISS EVO 18 (Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH, Германия). Применение такого микроскопа позволяет получить максимальное увеличение в 2000 раз при ускоряющем напряжении первичных электронов 20 кВ. В момент исследования давление в камерах составляло $2{,}67 \cdot 10^{-3}$ Па ($2 \cdot 10^{-5}$ торр).

Доменные гранулированные шлаки – замена цемента. Сходство химического состава цемента и доменных шлаков предопределило возможность применения последних в качестве вяжущего в ЗК. Основными окислами, определяющими возможность шлаков формировать устойчивую и прочную кристаллическую решетку, являются известь CaO, диоксид кремния (кремнезем) SiO_2, окись алюминия (глинозем) Al_2O_3, оксидированный магний MgO. Все данные окислы присутствуют как в цементе, так и в шлаках. Известь и оксидированный магний оказывают положительное влияние на образование продуктов гидратации, а кремнезем и глинозем – отрицательное [56]. В качестве основного вяжущего использовались гранулированные шлаки Чусовского металлургического комбината (Россия). Их химический состав предварительно определен методом рентгенофлуоресцентного анализа (XRF) и представлен в табл.2.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 2

Химический состав компонентов закладочного композита, %

Компонент	Шлаки	ZSM-5	Компонент	Шлаки	ZSM-5
SiO_2	20,23	84,89	Fe_2O_3	3,05	0,24
Al_2O_3	4,54	12,53	SO_3	2,56	–
CaO	61,45	0,18	Na_2O	0,51	–
MgO	2,74	1,52	K_2O	0,70	–
			Др.	4,22	0,64

Примечание. Др. – не выявленные и не выделенные по разности от 100 % компоненты.

С целью улучшения вяжущих перед использованием шлаки подвергались механоактивационной обработке в дезинтеграторе марки DESI-11 при частоте вращения ротора 1500 об/мин в течение 3 мин, что обеспечивало дисперсность < 50 мкм. Методы и способы дезинтеграционной обработки компонентов ЗК подробно описаны в работе [26]. В ходе дезинтеграционной активации был изменен гранулометрический состав шлаков, что привело к увеличению мелкодисперсных фракций (рис.1). В результате увеличилась общая площадь гидратации шлаков, что привело к улучшению вяжущих свойств [26].

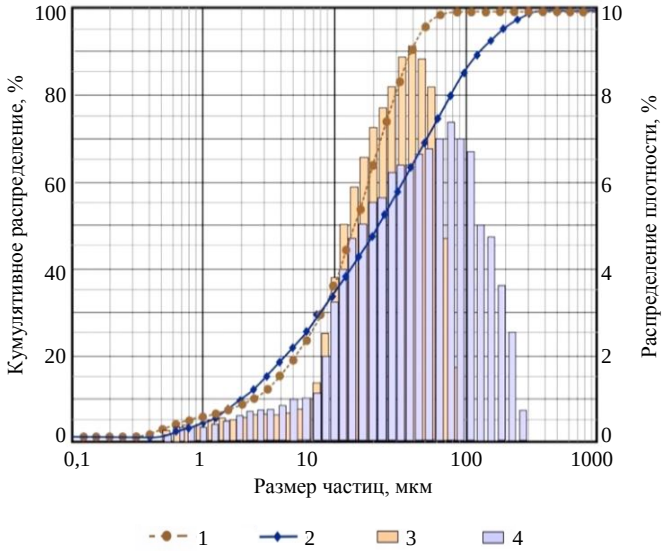


Рис.1. Фракционный состав доменных шлаков

Интегральное содержание шлаков:
1 – активированные доменные шлаки, 2 – доменные.
Дифференциальное содержание шлаков:
3 – активированные доменные, 4 – доменные

Отходы обогащения – замена специально добываемым пескам или гравию. Применение отходов обогащения в рецептуре ЗК не ново. В качестве инертного заполнителя преимущественным и наиболее экономически целесообразным вариантом для условий калийных рудников являются солеотходы и/или глинисто-солевые шламы. Однако длительное время исследованиями не учитывалось отрицательное влияние химических элементов, входящих в их состав, на структуру цементного камня и процессы формирования продуктов гидратации [34]. Отметим, что применение в рецептуре ЗК отходов обогащения, не прошедших извлечение оставляемого в них ценного компонента до нулевого уровня, является атавизмом [57] и не соответствует принципам экономики замкнутого цикла [26]. В настоящем исследовании в качестве инертного заполнителя применялись лежалые отходы флотационного обогащения калийно-магниевых руд, прошедшие обработку с целью извлечения оставленных ценных компонентов. Свойства применяемых отходов обогащения и их химический состав, полученный с использованием рентгенофлуоресцентного анализа и последующей интерпретацией фазового состава, представлены в табл.3.

Таблица 3

Химический состав отходов обогащения водорастворимых руд, %

Отходы обогащения		Состав	KCl	NaCl	$MgCl_2$	$CaSO_4$	Н.О.	Br^-	H_2O_{cryst}
Галургические	Лежалые	Весовое соотношение	3,35	92,66	0,07	1,91	1,9	0,03	0,08
	Текущие		1,91	94,3	0,07	1,914	1,7	0,026	0,08
Флотационные	Лежалые		9,96	82,64	1,1	4,488	1,7	0,032	0,08
	Текущие		4,88	87,78	1,1	4,331	1,8	0,029	0,08

Примечание. Н.О. – нерастворимый минеральный остаток (глинисто-алюмо-силикатные минеральные компоненты, остающиеся в твердой фазе); H_2O_{cryst} – кристаллизационная вода (химически связанная влага в кристаллической структуре минерала).

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Активирующие добавки. При создании бетонных конструкций и дорожных покрытий (в строительно-транспортной отрасли), а также при возведении искусственного закладочного массива в горно-добывающей отрасли активирующие добавки (активаторы) нашли широкое применение. Активаторы способствуют изменению или регулируют свойства ЗК. Среди них выделяют три вида: катализаторы, пластификаторы и ингибиторы. Пластификаторы предназначены для регулирования реологических свойств композитной смеси, поэтому возможность их применения в настоящем исследовании не рассматривали. Акцент сделан на катализаторах и ингибиторах, потому что задача научной работы – разработка рецептуры ЗК с прочностными характеристиками, удовлетворяющими технологической безопасности.

Катализаторы обычно представляют собой химические добавки, которые вступают в реакцию с компонентами ЗК. Для улучшения структуры ЗК (в качестве катализатора) в настоящем исследовании применялся дезактивированный цеолит ZSM-5 Московского НПЗ (АО «Газпромнефть-МНПЗ») (фракция 10-40 мкм). Химический состав применяемого дезактивированного цеолита представлен в табл.2. Алюмосиликаты – цеолит ZSM-5 (Zeolite Socony Mobil-5) нашли широкое применение в качестве катализатора крекинга в нефтеперерабатывающей промышленности [58-61]. Цеолит ZSM-5 используется для сушки, очистки, разделения и рекуперации газов и жидкостей в процессе разделения фракций нефти [62-64]. В процессе крекинга в порах ZSM-5 протекает реакция изомеризации, что приводит к его дезактивации [65-67], и повторное использование становится невозможным [68, 69]. Таким образом, после однократного применения ZSM-5 нуждается в утилизации, как и в случае с отходами, образующимися в цикле производства стали и/или добыче водорастворимых руд, когда формируются техногенные захоронения, оказывающие негативное воздействие на окружающую среду [70].

В отличие от катализаторов, ингибиторы выполняют независимые функции – могут регулировать свойства смеси ЗК или свойства сформированного искусственного массива, не вступая в реакцию с компонентами ЗК. В данном исследовании для увеличения прочностных свойств создаваемого искусственного массива были использованы ингибиторы – стекловолокно производства ГК «Завод Паскаль» (Россия), обладающее следующими свойствами: диаметр – 19 мкм; длина – 6 мм; прочность на растяжение – 369 МПа; модуль упругости – 4,8 ГПа; плотность – 2,699 г/см^3; удлинение при разрыве 36,5 %.

Моделирование устойчивого состояния кровли и элементов системы разработки. Для анализа устойчивости камер применялся программный пакет FLAC 3D 7.0 (Itasca, USA):

• Геометрия модели – блок 100×100×100 м с имитацией камер шириной 20 м и высотой 15 м.

• Сетка – тетраэдральная, шаг 0,5 м.

• Граничные условия – нижняя граница закреплена по всем степеням свободы; боковые – по нормали; верхняя поверхность свободна.

• Нагрузки – вертикальное давление соответствовало глубине 400 м ($\sigma v \approx 20$ МПа).

• Модель материала – упругопластическая с ползучестью (CREEP model).

• Параметры ЗК – модуль упругости и предел прочности на сжатие получены в настоящем исследовании.

Программирование поведения массива осуществлялось с использованием встроенного языка FISH.

Результаты

Исследования отвержденных образцов. *Одноосное сжатие.* Анализ результатов исследования отвержденных образцов на одноосное сжатие продемонстрировал положительную динамику набора прочности вне зависимости от рецептуры (табл.4). Эталонный состав 1, в котором присутствовали только специально добываемые компоненты (цемент и песок), показал стандартные динамику набора прочности и прирост на каждом этапе твердения. Промежуточный эталон (состав 2), в котором песок был заменен на отходы обогащения водорастворимых руд, также продемонстрировал увеличение прочностных характеристик с увеличением срока хранения. Однако динамика набора и максимальные значения были ниже, чем у эталонного состава 1. Снижение прочностных характеристик состава 2 можно объяснить тем, что изначальная прочность отходов обогащения водорастворимых руд ниже песка, несущего основную нагрузку в массиве после отверждения.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Таблица 4

Результаты испытаний отвержденных образцов закладочного композита различного состава

Номер состава	Компоненты, %						Динамика набора прочности за сутки, МПа				
	Хвосты	Песок	Шлак	Цемент	Стекловолокно (ингибитор)	ZSM-5 (активатор)	7	28	60	90	120
1	0	99	0	1	0	0	1,20	2,08	3,25	3,92	4,25
2	99,0	0	0	1	0	0	0,92	1,64	2,57	3,01	3,23
3	60,0	0	40,0	0	0	0	0,33	1,11	1,82	2,32	2,57
4	60,0	0	35,0	0	0	5,0	1,11	2,42	3,50	3,91	4,30
5	60,0	0	30,0	0	0	10,0	1,39	3,02	4,48	4,77	5,12
6	60,0	0	39,7	0	0,3	0	0,17	0,95	1,80	2,45	2,69
7	60,0	0	34,7	0	0,3	5,0	1,0	2,33	3,55	4,15	4,57
8	60,0	0	29,7	0	0,3	10,0	1,27	2,91	4,37	5,02	5,43

Полная замена специально добываемых компонентов ЗК на техногенные отходы (металлургические шлаки и отходы обогащения водорастворимых руд) (состав 3) доказала перспективность таких составов. Однако экспериментально подтвержденная максимальная прочность отвержденных образцов (на 120-е сут) не достаточна для применения составов с данной рецептурой при отработке месторождений системами с закладкой при многостадийной выемке.

Введение в рецептуру ЗК активирующих добавок (катализаторов и ингибиторов) оказало положительное влияние на прочностные характеристики отвержденных образцов. Происходило увеличение прочности образцов всех рецептурных составов на всех этапах твердения, и достигнуты пиковые значения на 120-е сут. Прочностные характеристики экспериментальных составов превысили значения образцов эталонного состава на 20,5 % при введении только катализатора и на 27,7 % при введении комплексного активатора (катализатора совместно с ингибитором). Отметим, что введение в рецептуру ЗК только ингибитора не оказало значительного влияния на прочность отвержденного образца. Прирост составил всего 4,66 % к составу 3, а в сравнении с эталонными образцами наблюдается значительное снижение на 58 % в сравнении с эталонным составом 1 и на 20 % в сравнении с промежуточным эталоном – составом 2.

Динамика набора прочности составов с активирующими добавками в рецептуре ЗК сохранялась на уровне эталонных образцов, т.е. прочностные характеристики образцов увеличивались с увеличением срока хранения. Отметим, что скорость набора прочности для различных видов активирующих добавок показала разнонаправленные значения на первоначальных этапах твердения (7-е, 28-е и 60-е сут). Если скорость набора прочности при введении в рецептуру ЗК катализаторов (составы 4 и 5) увеличивалась до 60 сут, то после 90 сут скорость набора прочности принимала стандартные значения. Введение в рецептуру ЗК ингибиторов (составы 6-8) изначально (до 60 сут хранения) способствовало падению скорости набора прочности, а после этого времени происходил резкий набор прочностных характеристик отвержденных образцов.

Динамика развития напряжения в образцах в момент разрушения. Развитие повреждений (образование микротрещин) в структуре отвержденного ЗК можно отслеживать путем измерения и анализа изменения модуля деформации в процессе нагружения. На рис.2 продемонстрированы зависимости изменения напряжения во времени (синий график) и скорости изменения (роста/падения) напряжения (красный график). Для сравнительного анализа результатов АЭ, как правило, на горизонтальной оси обозначают деформационные изменения, происходящие в образцах в процессе нагружения (одноосного сжатия). С целью более наглядного сравнения, на горизонтальной оси разместили время. Фиолетовым штрихпунктиром подчеркнуто значение напряжений. Отметим, что представленные на рис.2 зависимости отражают не только изменение общего напряжения в образце, но и темп его изменения во времени. В связи с этим пики соответствующих кривых могут не совпадать, поскольку максимальная скорость изменения напряжения и максимальное значение самого напряжения являются различными физическими параметрами. Для неоднородных ЗК, характеризующихся пористой структурой, локальным перераспределением напряжений и развитием микродефектов, такое поведение является закономерным.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

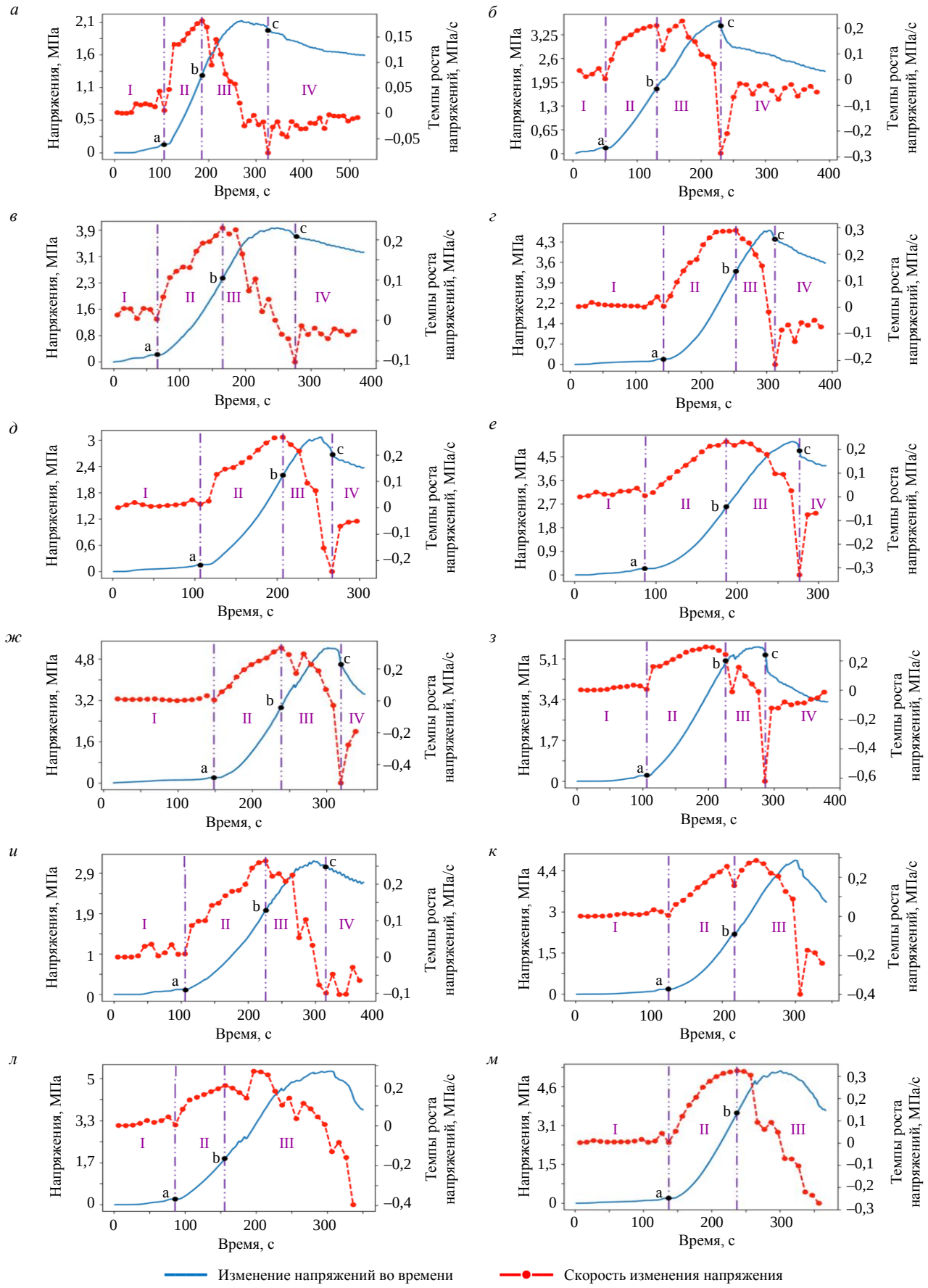


Рис.2. Функции сжимающих напряжений и скорости изменения напряжений (номер состава/сутки дневного отверждения): *а* – 1/28; *б* – 1/60; *в* – 1/90; *г* – 1/120; *д* – 5/28; *е* – 5/60; *ж* – 5/90; *з* – 5/120; *и* – 8/28; *к* – 8/60; *л* – 8/90; *м* – 8/120
Точки на горизонтальной оси a, b, c – деформационные изменения в процессе нагружения

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В настоящем анализе полученных экспериментальных данных мы применили метод контролируемых деформационных изменений в процессе нагрузки (испытания образца на одноосное сжатие). Это позволило выполнить линейную корреляцию между скоростью роста напряжения и модулем деформационных изменений. В свою очередь, функции изменения деформаций от величины нагрузки и изменения напряжения во времени приведены к идентичному стандарту (одинаковой сравнительной составляющей) – времени, т.е. изменению напряжения и скорости изменения напряжения. Для лучшего и более наглядного сравнительного анализа функции размещены на одном графике. Энергия АЭ во время прогрессивного разрушения образцов ЗК проанализирована путем сравнения графиков.

Из анализа графиков рис.2 следует, что при увеличении вертикальной осевой нагрузки энергетические сигналы АЭ образцов ЗК всех исследуемых рецептур имеют очевидные фазовые характеристики: начальная, или активная, фаза (стадия I); спокойная, или фаза основного восприятия (стадия II); вторичная активность, или пиковая фаза (стадия III); постпиковая, или остаточная, фаза (стадия IV). Однако для ЗК, в рецептуру которого был введен ингибитор (состав 8), постпиковая фаза не характерна (рис.2 *к*-*м*). Если для образцов, хранившихся 28 сут, можно выделить явный признак разрушения (рис.2, *и*), то при исследовании образцов ЗК более длительного хранения, модифицированных ингибитором, явный признак разрушения отсутствовал, следовательно IV стадия (постпиковая фаза) отдельно не выделялась.

Начальная, или активная, фаза (стадия I) в образцах ЗК всех исследуемых рецептур практически одинаковая и включает плотную стадию сжимающей кривой напряжения – времени, линейную упругую стадию и раннюю часть стадии пластического уплотнения. Отсутствуют какие-либо значимые коррекции напряжения и/или скорости изменения напряжения. Продолжительность активной фазы практически одинакова для исследуемых образцов ЗК всех рецептур и всех сроков твердения. Исключение составляют образцы эталонной рецептуры на ранних стадиях хранения (рис.2, *а*-*в*) и составы, модифицированные ингибитором до 28 дней хранения (рис.2, *и*).

Фаза основного восприятия (фаза спокойствия, стадия II) характерна для этапа потери пластичности (plastic-yielding). На этом этапе сигнал АЭ для всех исследуемых образцов независимо от рецептуры и сроков твердения был стабильным, а интенсивность скорости энергии АЭ – низкой. Это свидетельствует, что в образцах произошел процесс дестабилизации и началась эволюция разрушения – образование микротрещин и их последующее расширение. Фаза основного восприятия по времени короче, чем активная. Результаты данной фазы позволяют понять начало дестабилизации структуры образцов ЗК и получить информацию об ее изменениях.

Пиковая фаза, или вторичная активность (стадия III), характеризуется пиком кривой напряжения – времени и усиленным процессом разрушения – увеличением ранее образованных трещин; снижением структурных связей ЗК. На данной стадии наблюдаются усиление сигнала АЭ и значительные колебания скорости энергии АЭ. Именно в фазе вторичной активности отмечается пик скорости энергии АЭ для всех рецептур и на всех этапах твердения. Наблюдаются возрастание скорости распространения микротрещин и увеличение их размеров, а также образование новых. Резкий скачок скорости энергии АЭ характерен для ступенчатой дестабилизации структуры и ступенчатого разрушения. Такое поведение отмечается для образцов начиная с 60 сут твердения и свидетельствует о переходе от пластических деформаций к хрупким. Исключение составляют образцы, в рецептуре которых использовали ингибитор (рис.2, *к*-*м*).

В хрупких структурах скорость энергии АЭ распространяется неравномерно и с различными скоростями, что подтверждает неустойчивое (ступенчатое) распространение микротрещин, формирование новых макроскопических трещин и/или переход микротрещин в категорию макротрещин. Дальнейшее развитие микро- и/или макротрещин, изменение их конфигураций и/или направления распространения приводит к общей нестабильности структуры образцов ЗК. Образцы после пика кривой напряжения сохраняют некоторую несущую способность, характерную для макроскопического разрыва (разрушение структуры образца ЗК) с трением. Всплеск скорости энергии АЭ свидетельствует о высвобождении более упругой энергии напряжения, характерной для процесса скольжения, который происходит на границах разрушенных участков.

В постпиковой, или остаточной, фазе (стадия IV) скорость роста напряжения стабилизируется около определенного значения (различного для рецептурного содержания и времени твердения),

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

отражая остаточную несущую способность образцов. Для данной фазы характерны более низкая и более стабильная скорость энергии АЭ очевидных колебаний. Эти значения подтверждают, что трехмерные пространственно-временные эволюционные структурные изменения (т.е. процесс формирования и развития трещин) в процессе испытания на одноосное сжатие закончились. Следовательно, на стадии IV внутренняя структура исследуемых образцов ЗК повреждена и они разрушились, что свидетельствует о потере несущей способности.

Исключение составили образцы ЗК, в рецептуру которых введены ингибиторы. Отметим, что выделение различных стадий в процессе исследования образцов ЗК на одноосное сжатие зависит от времени хранения (отверждения) образца и рецептуры. Эталонные образцы 1 и 2 показывают более высокую скорость снижения АЭ вокруг точки «с» по сравнению с образцами, усиленными катализатором ZSM-5 и армированными ингибитором SF.

При этом стадия I для образцов длительного хранения, армированных ингибиторами, длится дольше и характеризуется более стабильными показателями в отличие от эталонных образцов и образцов, активированных катализатором, в то время как стадия IV в образцах, армированных ингибитором, на средних и поздних стадиях отверждения отсутствует. Экспериментальные результаты характеризуются тем, что в ходе испытания на одноосное сжатие образцов ЗК, армированных ингибиторами, отсутствует их спонтанное (хрупкое) разрушение и происходит переход на хрупкопластичное. Несущая способность таких образцов сохраняется после пика напряжения, что свидетельствует о формировании мостового соединения в матрице ЗК. Роль такого соединения выполняют волокна ингибитора. Отмечается, что продолжительность стадии IV для всех образцов, характеризующихся хрупким разрушением, уменьшается со временем из-за снижения остаточной нагрузки ввиду того, что прогрессирует реакция гидратации цемента.

Микроструктурный анализ. Регулирование прочности ЗК происходит за счет внутренних гидратационных продуктов и самого процесса гидратации. Методом SEM проведено сканирование разрушенных образцов ЗК после их испытания на одноосное сжатие с целью влияния компонентов на прочностные характеристики. SEM-сканирование позволяет проанализировать формирование матрицы ЗК, проследить процесс гидратации, наличие и размеры пор и др.

Программное обеспечения ImageJ применялось для анализа значений уровня яркости (оттенков серого) на SEM-изображении. Построение графика значений уровня яркости вдоль выбранной линии позволяет оценить микроструктурные неоднородности (поры, зерна) и/или фазы (C-S-H, C-H и др.). Также при помощи данного программного обеспечения значения SEM-изображения преобразуются в 3D-изображения, что позволило изучить структуру матрицы ЗК, количество, объем и размеры пор, т.е. создать карту шероховатости для выбранного участка (рис.3).

Анализ исследования позволяет утверждать, что ЗК состава 3, сформированный без применения активирующих добавок (инертный заполнитель + вяжущее), обладает высокопористой структурой (рис.3, *а*). Уровень яркости имеет большую разницу максимальных и минимальных значений, что свидетельствует о значительной фазовой дифференциации. Карта шероховатости образцов состава 3, как и уровень яркости, демонстрирует значительные неровности и перепады, сопровождающиеся как высокими всплесками, так и глубокими падениями.

Введение в рецептуру ЗК активатора цеолита ZSM-5 (состав 4) позволяет «разогнать» процесс гидратации и сформировать более плотную матрицу, характеризующуюся меньшим объемом пор и меньшим их количеством (рис.3, *б*). Уровень яркости хоть и демонстрирует увеличение частоты всплесков, но при этом перепады между максимальными и минимальными значениями уменьшились, что свидетельствует о формировании более плотной структуры. На карте шероховатости образцов состава 4 отсутствуют значительные неровности и перепады, что также подтверждает более ровную структуру матрицы ЗК.

Введение в рецептуру ЗК ингибитора (стекловолокно) (состав 6) практически не изменило структуру ЗК в сравнении с составом 3. Сохранилась рыхлая и пористая структура (рис.3, *в*) с включением волокон, вокруг которых сосредоточен процесс гидратации и образование C-S-H-гелей. Сами волокна не принимают участия в реакции. Уровень яркости демонстрирует высокие перепады с уменьшенной частотой всплесков. Карта шероховатости, как и в случае с образцами состава 3, также характеризуется значительными неровностями.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

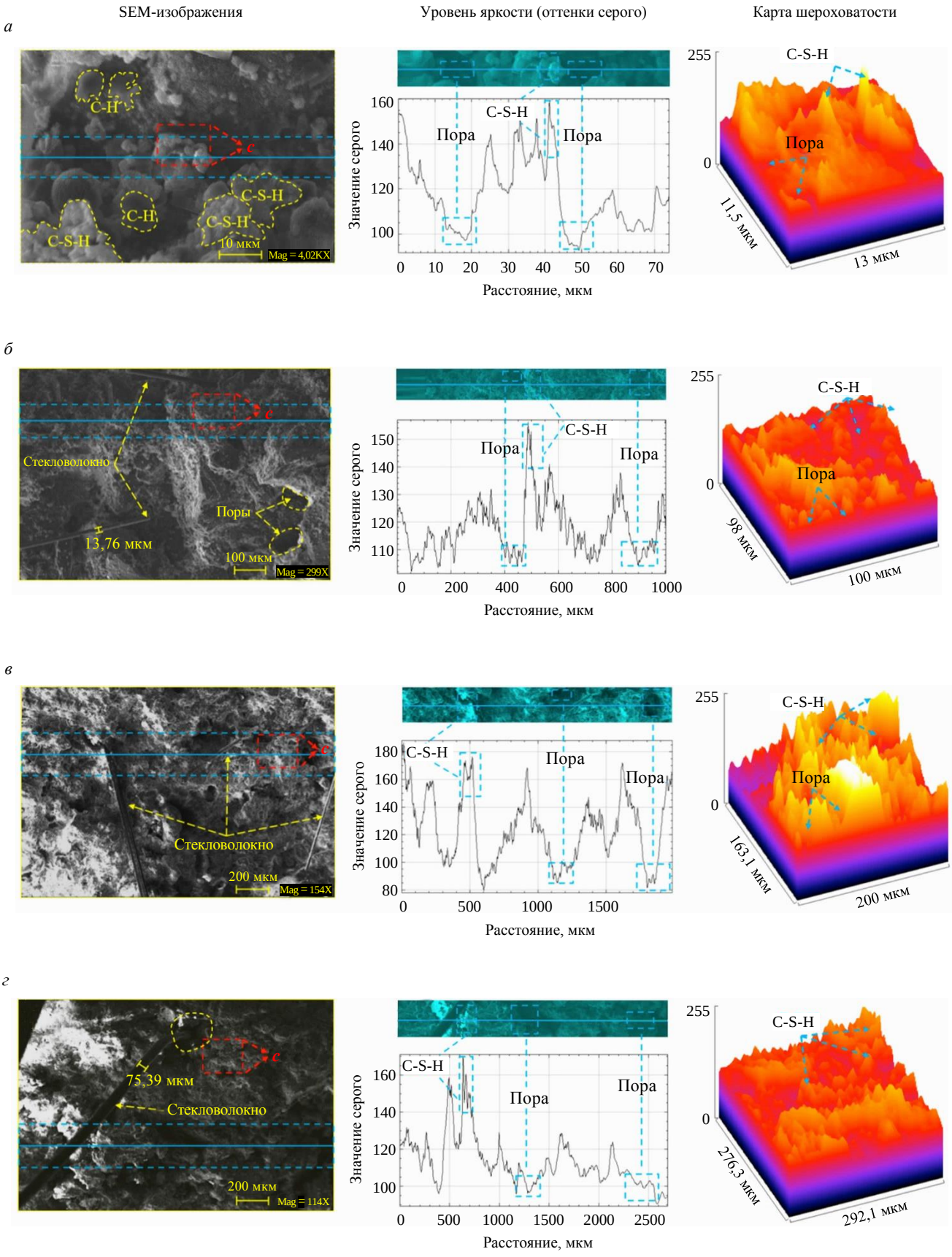


Рис.3. Микроструктурное исследование образцов ЗК, заполнитель/вяжущее:
состав 3 (*а*), состав 4 (*б*), состав 6 (*в*), состав 8 (*г*)

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Одновременное введение в состав ЗК ингибитора и активатора (состав 8) позволяет сформировать ЗК с наибольшими значениями предела прочности на одноосное сжатие. Активатор разгоняет реакцию гидратации и позволяет сформироваться большему объему фаз C-S-H-гелей. При этом волокна служат каркасом для их формирования, что значительно снижает пористость (рис.3, *г*). Для уровня яркости характерны незначительные перепады при увеличении амплитудной частоты, а карта шероховатости имеет наименьшие неровности в сравнении с другими составами.

Расчетные варианты отработки участка калийного месторождения. В последнее время на горно-добывающих предприятиях, осуществляющих добычу калийных или калийно-магниевых руд, производят укладку твердеющего материала (на основе солеотходов без использования вяжущего) в отработанное пространство [36, 47]. Однако предлагаемая технология в основном решает задачи снижения объемов техногенных накоплений на поверхности, укрепления междукамерных целиков (МКЦ). Это снижает риски их разрушения и уменьшения объемов пустот, минимизируя риски обрушения подработанного массива и деформационных изменений ВЗТ. При этом в предлагаемой технологии не предусмотрена полная или частичная отработка запасов, оставляемых в МКЦ.

Внедрение систем разработки с многостадийной выемкой с закладкой при освоении калийных и/или калийно-магниевых месторождений является весьма перспективным вариантом, позволяющим найти более рациональный подход к освоению ресурсов и исключить (минимизировать) региональную опасность калийдобывающих предприятий, осуществляющих освоение запасов. Внедрение многостадийной выемки с закладкой (с искусственным поддержанием очистного пространства) подразумевает отказ от традиционной камерно-столбовой системы (системы с естественным поддержанием очистного пространства). Предлагается технология, которая заключается в чередовании очистных и закладочных работ на отрабатываемом участке и последующей отработке ранее оставляемых МКЦ (доизвлечение запасов руды).

Для оценки экологической и технологической безопасности отработки месторождений калийных руд на примере Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей проведено моделирование горно-технических ситуаций для трех различных вариантов отработки (табл.5):

• вариант 1 – участок отрабатывается традиционной камерно-столбовой системой с оставлением жестких целиков при выемке пластов АБ (расчетная степень нагружения с ≈ 0,24), и применяются условно-податливые целики на пласте КрII (расчетная степень нагружения с ≈ 0,67), закладочные работы (модель 1). В данном варианте закладка не используются;

• вариант 2 – участок отрабатывается модернизированной системой. Применяется традиционная камерно-столбовая система разработки с последующей закладкой отработанных камер на пласте КрII (модель 2). Таким образом, на пласте КрII осуществляется выемка с применением сплошной системы разработки;

• вариант 3 – участок отрабатывается традиционной камерно-столбовой системой с оставлением жестких целиков при работе на обоих пластах АБ и КрII (на пласте АБ с ≈ 0,3, на пласте КрII с ≈ 0,38) (модель 3). В данном варианте работы ведутся без применения закладки.

Таблица 5

Условия моделирования для рассматриваемых вариантов

Параметр	Вариант		
	1	2	3
Глубина залегания пласта АБ, м	290	290	346
Мощность пласта АБ, м	3,2	3,2	3,1
Ширина МКЦ пласта АБ, м	5,8	5,8	6,9
Ширина камер пласта АБ, м	3,2	3,2	5,1
Мощность пласта КрII, м	3,7	3,7	5,9
Ширина МКЦ пласта КрII, м	2,9	2,9	6,9
Ширина камер пласта КрII, м	6,1	6,1	5,1
Мощность нерудного междупластья, м	6,8	6,8	4,9
Расстояние между осями, м	9,0	9,0	12,0
Отставание очистных работ на пласте КрII от пласта АБ, лет	1	1	2
Отставание закладочных работ от очистных на пласте КрII, лет	Нет	2	Нет
Недозаклад на пласте КрII, %	Нет	15	Нет

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Недозаклад принят для оценки консервативного сценария и соответствует максимально возможным технологическим потерям заполнения.

Для выполнения численного моделирования использованы усредненные физико-механические параметры слагающих рассматриваемый массив. Принятые параметры основаны на анализе ранее опубликованных экспериментальных и расчетных исследований, посвященных геомеханике калийно-магниевых месторождений, и приведены в табл.6. При моделировании плотность пород принималась равной 2200 кг/м^3, коэффициент Пуассона – 0,35. Использование усредненных значений обусловлено необходимостью получения репрезентативной расчетной модели, позволяющей корректно оценить напряженно-деформированное состояние массива и устойчивость элементов системы разработки.

Таблица 6

Прочностные и деформационные свойства моделируемых пород

Параметры	Модуль Юнга, МПа	Угол внутреннего трения, град	Сцепление, МПа	Предел прочности на растяжение, МПа
Породы кровли	800	39,8	4,2	1,2
Породы пластов АБ/АВ	12000	38,7	4,3	1,3
Породы междупластья	13500	39,2	4,7	1,4
Породы пласта КрII	13800	38,4	4,9	1,5
Породы почвы	12000	40,0	4,3	1,2

В варианте 2 произведено моделирование геомеханических параметров подрабатываемого массива с целью оценки влияния закладочных работ на экологическую и технологическую безопасность горно-технической системы. В модель варианта 2 включено условие, что создаваемый ЗК имеет схожие реологические характеристики с породным и рудным массивом и учитывает полученные прочностные характеристики на трехточечный изгиб. Прочностные характеристики ЗК на одноосное сжатие получены при исследовании прочностных характеристик на одноосное сжатие (табл.6). Варианты 1 и 3 рассмотрены с целью сравнения предлагаемой технологии отработки (вариант 2) с реальными вариантами, применяемыми на отдельных участках рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых руд (БКПРУ-2 и БКПРУ-4). При моделировании горно-технических ситуаций для вариантов 1 и 3 приняты параметры, соответствующие реальным горно-геологическими условиям на рудниках.

Достижение максимального коэффициента извлечения на отрабатываемом участке является преимуществом предлагаемого варианта. С целью обеспечения более высоких технико-экономических показателей отработки участка закладка камер последней очереди может быть произведена частично или вовсе не производиться. Такая дифференциация возможна при гарантированном обеспечении сохранности ВЗТ. В зависимости от выбранной технологии период между отработкой камер первой и второй очередей варьируется и может вестись как с минимальным (незначительным) технологическим отставанием, так и при выдерживании достаточного периода времени между стадиями.

Результаты моделирования несущей способности элементов конструкции системы разработки. В модели рассмотрен 50-летний период развития оседания дневной поверхности и скорости развития нарушений (рис.4). Вариант 1 с податливыми целиками на пласте КрII продемонстрировал наибольшую интенсивность на начальной стадии отработки (первые 26 лет). В середине этого периода (через 13 лет после начала работ) зафиксирована максимальная скорость оседания 105 мм/год, которая к 26 годам снижалась и приобретала постоянную величину 10 мм/год. На конец моделируемого промежутка (50 лет) общая величина оседания для варианта 1 – 1,8 м.

Моделирование другой системы без применения закладки (вариант 3) с оставлением жестких целиков на обоих пластах продемонстрировало более ровную скоростную динамику. Скорость сдвижения на всем исследуемом промежутке равномерна и не превышала 10 мм/год. Общая величина оседания земной поверхности на конец исследуемого периода составила не более 0,5 м.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

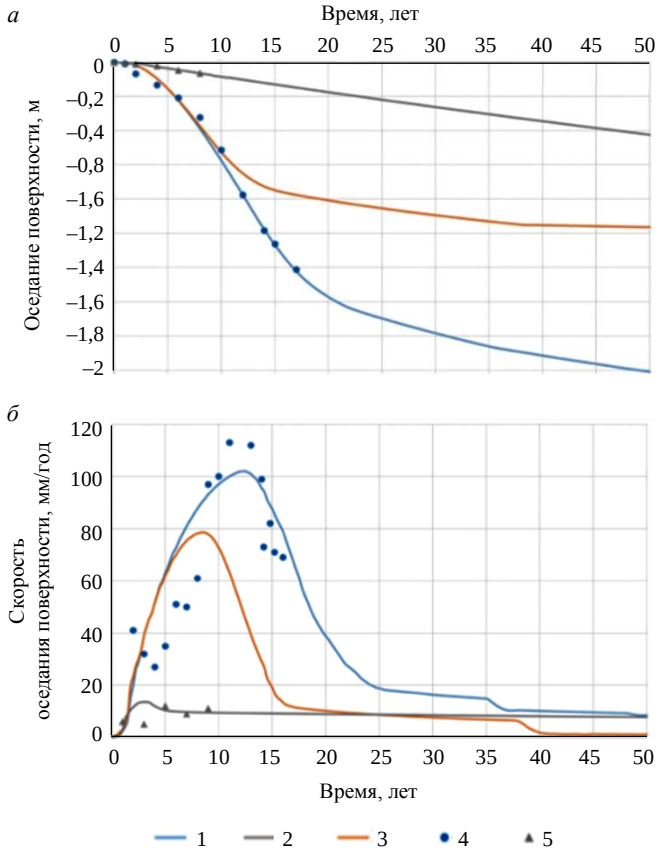


Рис.4. Развитие нарушений по верхней границе вариантов 1-3 рассматриваемых моделей разработки:
а – величина; *б* – скорость
1-3 – значения для моделей 1-3;
4, 5 – фактические значения, полученные в результате маркшейдерского мониторинга для моделей 1 (4), 3 (5)

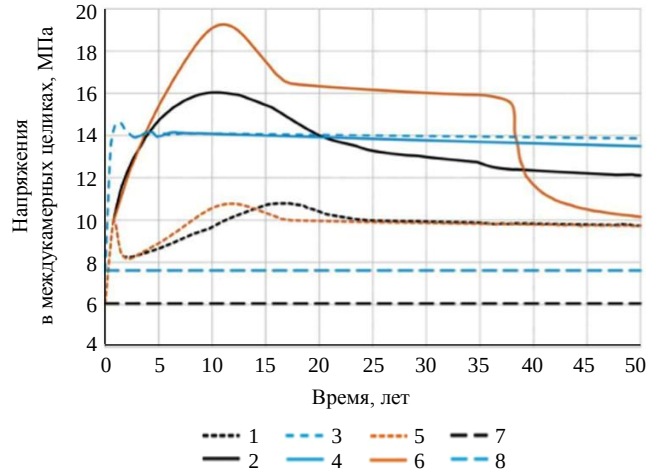


Рис.5. Развитие напряжений в междукамерных целиках
1, 2 – значения для модели 1: пласт АБ (1), КрII (2);
3, 4 – модели 2: пласт АБ (3), КрII (4);
5, 6 – модели 3: пласт АБ (5), КрII (6);
7, 8 – фактические значения, полученные в результате маркшейдерского мониторинга для моделей 1, 2 (7), 3 (8)

Наибольший интерес представляли результаты моделирования варианта 2. Значительный эффект от применения закладки выработанного пространства виден к 16-му году после начала отработки участка. После такого периода происходит падение скорости сдвижения, а к 37-му году процесс практически прекращается. Это свидетельствует о том, что объем пустот над закладочным массивом (недозаклад) был заполнен, т.е. кровля полностью опустилась на закладку. По истечении 37 лет в модели отсутствуют деформационные изменения МКЦ. К концу исследуемого временного интервала величина оседания за весь исследуемый период составила 0,95 м, что практически в два раза меньше, чем в применяемой на предприятии системе (вариант 1).

Сохранность МКЦ и их несущей способности доказывает технологическую безопасность рассматриваемой системы разработки. Рассмотрев историю развития напряжений в МКЦ (рис.5), можно сделать вывод, что на всех моделируемых системах (вариантах) целики сохраняют остаточную несущую способность во весь период моделирования.

Для традиционных систем разработки, применяемых на Верхнекамском калийно-магниевом месторождении (варианты 1 и 3), характерно различие в развитии напряжений в податливых целиках, в отличие от жестких. Для податливых целиков характерны ярко выраженные максимумы напряжений, существенно превышающие уровень естественного напряженного состояния массива. Данные максимумы проявляются в период 11-13 лет после начала отработки участка. При замене традиционной системы на систему с закладкой наблюдаются более высокие напряжения в массиве в период второй четверти моделируемого временного промежутка. Отмечается существенная разгрузка МКЦ благодаря закладке камер первой очереди и опусканию кровли на сформированный закладочный массив. Полученные значения позволяют утверждать возможность отработки запасов, оставленных в целиках, т.е. внедрения многостадийной выемки.

Обсуждения

Система разработки. Как экологическая, так и технологическая безопасность при сохранении экономических показателей является необходимым условием внедрения многостадийной выемки с применением закладки на калийно-магниевых месторождениях. Все организационно-

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

хозяйственные и технические мероприятия по созданию искусственного массива приводят к увеличению расходов на добычу. Однако негативный опыт отработки месторождений водорастворимых руд, в том числе калийно-магниевых на Верхнекамском месторождении, где применение традиционных систем разработки (без закладки) привело к масштабным катастрофам, предопределяет отнесение расходов на закладочные работы (строительство закладочного комплекса; проведение трубопроводной транспортной системы; производство ЗК; его доставка и укладка в выработанное пространство и др.) к обоснованным и неизбежным.

Расходы на строительство закладочного комплекса нельзя расценить как недостаток перехода от традиционных систем разработки, ранее применяемых на калийно-магниевых рудниках (системы с естественным поддержанием очистного пространства), к реализации многостадийной выемки (системы с искусственным поддержанием очистного пространства). При этом необходимо учесть, что внедрение многостадийной выемки не предусматривает существенного изменения технологической схемы рудника, примявшей традиционную систему отработки. Сохранение ранее применяемой технологической схемы не требует дополнительного комплекса работ и мероприятий по проведению дополнительных подготовительно-нарезных или вскрывающих выработок, так как отработка оставленных запасов (целиков) будет производиться уже на вскрытых и подготовленных участках.

Повышение коэффициента извлечения (за счет отработки ранее оставляемых целиков) не является единственным положительным эффектом многостадийной выемки. Предлагаемая технология позволяет утилизировать в очистное пространство значительные объемы техногенных отходов (в составе ЗК), складируемых ранее на поверхности, что позволяет снизить (вплоть до исключения) деградационное воздействие на окружающую среду и таким образом получить положительный экологический эффект.

Закладочный композит. Искусственный массив, создаваемый на базе разрабатываемого и исследуемого ЗК, является важнейшей составляющей предлагаемой системы разработки, одновременно обеспечивающей эколого-технологическую безопасность и полноту извлечения. При этом эффективную и безопасную реализацию многостадийной выемки обеспечивают физико-механические свойства разрабатываемого ЗК.

Для эталонных составов (состав 1) характерно формирование хрупкой структуры матрицы ЗК. Из рис.2, *а-г* следует, что образцы подвергались хрупкому разрушению, о чем свидетельствует резкий «обрыв» в графике напряжений. При этом при замене традиционных компонентов ЗК на отходы горно-перерабатывающего производства характерно резкое снижение прочностных характеристик. Но введение в рецептуру ЗК активатора (составы 4 и 5) позволяет создать более прочный ЗК. В таких образцах сохраняется хрупкая структура матрицы (см. рис.2, *ж*, *з*), но для конечной (остаточной) фазы разрушения характерно менее спонтанное. В структуре данного ЗК характерно большее количество C-S-H-гелей и меньший объем пор (см. рис.3).

Введение в состав ЗК ингибитора (состав 6) не позволило значительно увеличить его прочность. Сохранилась хрупкость и высокая пористость матрицы ЗК. Незначительный рост прочности на одноосное сжатие объясняется тем, что волокно служило основой для формирования на нем продуктов гидратации (см. рис.3), а высокая прочность волокна на разрыв препятствует спонтанному разрушению. Волокно выполняет подобие соединительного «моста».

Одновременное введение в состав ЗК активатора и ингибитора позволило создать более прочные образцы. Активатор ZSM-5 разгоняет процесс гидратации и формирование C-S-H-гелей, заполняющих поровое пространство (см. рис.3). Волокна, служащие дополнительной площадью для формирования C-S-H-гелей и одновременно связующими «мостами», препятствуют резкому и хрупкому разрушению (см. рис.2, *и-л*). При исследовании образцов на одноосное сжатие наблюдается сохранение сопротивления вертикальным нагрузкам, о чем свидетельствует увеличение значения деформации. Эта матрица способна оказывать сопротивление и после разрушения. По мере приложения нагрузки образец (на поздних сроках хранения) демонстрирует несущую способность (см. рис.2, *л*, *м*), что видно на постпиковой фазе III разрушения. Дальнейшее приложение нагрузки сохранило сопротивление матрицы ЗК, после чего произошли деформация и разрушение. Настоящее исследование продемонстрировало, что ЗК, в рецептуру которого одновременно введены

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

катализатор и ингибитор, обладает несущей способностью после повреждения. Это доказывает, что добавление в состав ЗК предлагаемых активаторов приводит к формированию пластичной структуры ЗК, а волокна препятствуют резкому разрушению.

Моделирование. Восприятие веса налегающих пород является основной задачей как естественных, так и искусственных целиков. Помимо этого, искусственный массив должен обеспечить определенную величину допуска вертикальных обнажений при отработке камер второй и/или последующих очередей. Исследование поведения массива как подработанного, так и отрабатываемого при помощи компьютерного моделирования позволило определить характер развития напряжений в целиках для различных систем разработки рассматриваемых вариантов, а также установить величину оседаний земной поверхности и вертикальной конвергенции МКЦ. Данные процессы в горной геомеханике малоизучены, что связно с труднодоступностью выработанного пространства. Это характерно не только для калийно-магниевых месторождений.

Как следует из представленных результатов, с течением времени напряжения в оставляемых целиках постепенно снижаются и стремятся к уровню естественного напряженного состояния массива независимо от рассматриваемого варианта системы разработки. При системе с закладкой (вариант 2) заметно влияние незаложенных камер верхнего пласта АБ. Это выражается в передаче нагрузки подработанного массива (над пластом АБ) через целики данного пласта на отрабатываемый системой с многостадийной выемкой нижележащий пласт КрII.

С целью исключения отрицательного влияние незаложенных камер, равномерного перераспределения напряжений в массиве, а также для снижения напряжений в целиках (до естественного состояния нетронутого массива) необходимо предусмотреть закладку всех смежноотрабатываемых пластов. Отсутствие деформационных изменений в оставляемых междукамерных целиках к 16 годам после закладки камер первой очереди и падение скорости сдвижения подработанных пластов к этому периоду свидетельствует, что произошло обрушение кровли в камерах первой очереди и переуплотнение обрушенных пород, «севших» на закладку. Стабильное напряженно-деформированное состояние массива указывает на то, что с этого момента можно приступить к отработке камер второй очереди.

Стабильное напряженное состояние в МКЦ и подработанном массиве при применении систем с закладкой (в сравнении с традиционными) свидетельствует о большей технологической безопасности предлагаемой многостадийной выемки с применением разработанного ЗК. При системах с многостадийной выемкой величина оседания земной поверхности за весь исследуемый период не превышает 1 м, что почти в два раза меньше, чем при традиционной системе, применяемой в настоящее время на калийно-магниевых рудниках Верхнекамского месторождения. Совокупность полученных при моделировании результатов, а именно меньшая величина оседания дневной поверхности и более стабильное напряженное состояние в МКЦ и подработанном массиве, свидетельствует о минимизации рисков деградации дневной поверхности. Закладочный массив, полностью сформированный из техногенных отходов региона, в полной мере подтверждает, что предлагаемая многостадийная система разработки минимизирует (практически исключает) воздействие горно-добывающего предприятия на окружающую среду и обеспечивает экологическую безопасность региона.

Заключение

Предлагаемая многостадийная система разработки с применением разработанного ЗК позволяет повысить коэффициент извлечения (за счет отработки/доизвлечения запасов, оставляемых в МКЦ); способствует разгрузке МКЦ от повышенных напряжений; стабилизирует напряженно-деформированное состояние массива; минимизирует горизонтальные нарушения как в подработанном массиве, так и в целиках, что в целом обеспечивает технологическую безопасность, а применение в ЗК местных техногенных отходов обеспечивает создание экологически безопасной технологии отработки калийно-магниевых месторождений.

В ходе исследования достигнуты следующие результаты:

• Обоснована необходимость перехода от традиционной системы разработки (с естественным поддержанием очистного пространства) к системам с многостадийной выемкой (искусственным поддержанием очистного пространства) при отработке калийно-магниевых (водорастворимых) руд.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

• Подтверждена возможность полной замены специально добываемых компонентов ЗК на техногенные отходы в его рецептуре.

• Доказано, что применение многостадийной выемки с закладкой выработанного пространства повышает экологическую и технологическую безопасность отработки калийно-магниевых (водорастворимых) руд.

• Установлено, что технологическая безопасность достигается минимизацией горизонтальных деформаций подработанного массива, обеспечивающих сохранение водозащитной толщи и разгрузки МКЦ от повышенных напряжений. Это способствует их большей устойчивости во времени.

• Определено, что экологическая безопасность достигается утилизацией техногенных отходов в составе ЗК, а также снижением горизонтальных деформаций подработанного массива, минимизирующих нарушение дневной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Конгар-Сюрюн Ч.Б., Черевко М.А., Деньгаев А.В., Мустафаев С.В.* Классификация хвостов обогащения по категории опасности // Горная промышленность. 2025. № 3. С. 80-84. DOI: 10.30686/1609-9192-2025-3-80-84

2. *Sudarikov A.E., Merkulova V.A., Bogoliubova A.A.* The Impact of Mining Technology on Stability of Open Cast Mine // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. Vol. 12. № 20. P. 10385-10388.

3. *Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М., Горелкина Е.И.* Классификация георесурсов в парадигме их комплексного освоения // Горная промышленность. 2024. № 6. С. 140-143. DOI: 10.30686/1609-9192-2024-6-140-143

4. *Aleksandrova T.N., Kuznetsov V.V., Prokhorova E.O.* Investigation of Interfacial Characteristics as a Key Aspect of the Justification of the Reagent Regime for Coal Flotation // Minerals. 2025. Vol. 15. Iss. 1. № 76. DOI: 10.3390/min15010076

5. *Казанин О.И., Евсюкова А.А.* Обоснование технологии проведения спаренных выработок с отработкой межштрековых целиков короткими забоями // Горный информационно аналитический бюллетень. 2025. № 11-1. С. 23-37. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_111_0_23

6. *Jastrzębska M., Kazimierowicz-Frankowska K., Chiaro G., Rybak J.* New Frontiers in Sustainable Geotechnics // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Iss. 1. № 562. DOI: 10.3390/app13010562

7. *Cappuyns V., Dries L.* Bioaccessibility of Lead and Arsenic in Mining Waste and Mining-Affected Soils // Toxics. 2026. Vol. 14. Iss. 2. № 114. DOI: 10.3390/toxics14020114

8. *Evtushenko A., Startseva Y., Khoperskov A., Azarov V.* On the assessment of the dust-air masses distribution regularity in the workshops of the reinforced concrete products' manufacturing // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 281. № 09025. DOI: 10.1051/e3sconf/202128109025

9. *Meskhi B., Evtushenko A., Startseva Yu. et al.* Investigation of the dispersed composition of dust of inert materials exposed to overload in the manufacture of building materials // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 937. № 022083. DOI: 10.1088/1755-1315/937/2/022083

10. *Eljoudiani A., Veras M.M., Sampaio C.H. et al.* Pyrite Concentration and Associated Polymetallic Minerals from the Iberian Pyrite Belt Through the Multi-Gravity Separator // Minerals. 2026. Vol. 16. Iss. 2. № 147. DOI: 10.3390/min16020147

11. *Стадник Д.А., Стадник Н.М., Жилин А.Г., Лопушняк Е.В.* Методические основы имплицитного моделирования месторождений твердых полезных ископаемых при автоматизированном проектировании // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 5-1. С. 185-197. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_185

12. *Мельник В.В., Ефимов В.И., Корчагина Т.В. и др.* Опыт отработки крутых угольных пластов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 11. С. 18-38. DOI: 10.25018/0236-1493-2018-11-0-18-38

13. *Pshenin V., Sleptsov A., Dukhnevich L.* Prospects of Improving the Vibroacoustic Method for Locating Buried Non-Metallic Pipelines // Eng. 2025. Vol. 6. Iss. 6. № 121. DOI: 10.3390/eng6060121

14. *Morales J.G., Gallegos B.V.C., Reyes R.H. et al.* Political Ecology as an Analytical Tool in the Mezquital Valley, Mexico: A Permanent Struggle // Social Sciences. 2025. Vol. 14. Iss. 9. № 509. DOI: 10.3390/socsci14090509

15. *Babyr N.V.* Topical Themes and New Trends in Mining Industry: Scientometric Analysis and Research Visualization // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2024. Vol. 37. Iss. 2. P. 439-451. DOI: 10.5829/ije.2024.37.02b.18

16. *Ilinets A.A., Sidorenko A.A., Sirenko Y.G.* Computer modelling of a floor heave in coal mines // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1333. Iss. 3. № 032028. DOI: 10.1088/1742-6596/1333/3/032028

17. *Korelskiy D., Mentsiev A., Dengaev A. et al.* Land Assessment in Mining Regions Considering Ecology // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2024. Vol. 37. Iss. 11. P. 2344-2353. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.19

18. *Гендлер С.Г., Крюкова М.С., Галачиев К.В., Дедегкаева Н.Т.* Управление термодинамическими параметрами воздушной среды линий метрополитенов с однопутными тоннелями глубокого заложения // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 3 (61). С. 1343-1352. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1343-1352

19. *Конгар-Сюрюн Ч.Б., Сазанкова Е.С., Черевко М.А., Деньгаев А.В.* Исследование влияния структурных дефектов на прочность горных пород // Уголь. 2025. № 5. С. 114-117. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-5-114-117

20. *Nikitin V.I., Zhivaeva V.V., Nechaeva O.A., Kamaeva E.A.* Influence of capillary pressure on the restoration of the bottomhole zone permeability at the filtrate-oil interfacial phase // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources. CRC Press, 2019. Vol. 2. P. 558-562. DOI: 10.1201/9781003014638-12

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

21. *Адигамов А.Э., Юденков А.В., Ногинова Л.Ю.* Обобщенная математическая модель основных задач теории упругости для анизотропных тел // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16 (59). № 1. С. 358-367. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-1-358-367

22. *Monteiro M., Santos P., Espinha Marques J. et al.* Assessment of Potential Environmental Risks Posed by Soils of a Deactivated Coal Mining Area in Northern Portugal – Impact of Arsenic and Antimony // Pollutants. 2025. Vol. 5. Iss. 2. № 15. DOI: 10.3390/pollutants5020015

23. *Yihe Yu, Liqiang Ma, Dongsheng Zhang.* Characteristics of Roof Ground Subsidence While Applying a Continuous Excavation Continuous Backfill Method in Longwall Mining // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 1. № 95. DOI: 10.3390/en13010095

24. *Meskhi B., Evtushenko A., Alekseenko L. et al.* Organization of supply air supply in workshops for the production of reinforced concrete products // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Col. 937. № 022084. DOI: 10.1088/1755-1315/937/2/022084

25. *Đurđevac V., Staletović N., Ignjatović L.Đ. et al.* Application of Flotation Tailings as a Substitute for Cement in Concrete Structures for Environmental Protection and Sustainable Development – Part I: Sulfide Neutralization // Materials. 2025. Vol. 18. Iss. 12. № 2804. DOI: 10.3390/ma18122804

26. *Khayrutdinov M.M., Aleksakhin A.V., Kibuk T.N. et al.* Technogenic Waste in Backfill Composite Is a Paradigm of Circular Economy // Mining. 2025. Vol. 5. Iss. 3. № 57. DOI: 10.3390/mining5030057

27. *Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М.* Создание закладочного композита на основе отходов угольной промышленности // Уголь. 2024. № 10. С. 24-27. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-10-24-27

28. *Savin E.S., Kuzmich A.S., Startseva J.V. et al.* Numerical models of ventilation systems for cement manufacturing facility based on hydrodynamic simulation // AIP Conference Proceedings. 2021. Vol. 2410. № 020023. DOI: 10.1063/5.0067647

29. *Конгар-Сюрюн Ч.Б.* Влияние шахтной воды на прочностные характеристики искусственного массива, созданного на основе техногенных отходов // Уголь. 2024. № 12. С. 75-78. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-12-75-78

30. *Клюев Р.В., Хетагуров В.Н., Гаврина О.А., Плиева М.Т.* Комплексный анализ потребления электроэнергии мельниц самоизмельчения обогатительной фабрики // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 5-1. С. 145-156. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_145

31. *Гришин А.В., Чистяков А.Н., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Чудинов А.А.* Оптимизация технологических способов отработки калийных запасов при камерной системе разработки // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 2 (60). С. 600-611. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-2-600-611

32. *Сиренко Ю.Г., Ковальский Е. Р.* Совершенствование селективной выемки калийных пластов короткими очистными забоями с частичной закладкой выработанных камер // Горный журнал. 2016. № 1. С. 24-26. DOI: 10.17580/gzh.2016.01.05

33. *Кузнецов Ю.Н., Стадник Д.А., Стадник Н.М., Шадыжева Э.Б.* Методические основы синтеза моделей развития горных работ для управления процессом воспроизводства очистного фронта угольных шахт // Устойчивое развитие горных территорий. 2022. Т. 14. № 4 (54). С. 685-694. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-4-685-694

34. *Тюляева Ю.С., Хайрутдинов А.М., Галачиева И.Д., Тотрукова И.К.* Создание высокопрочного закладочного композита на основе сульфидоносных техногенных отходов горного производства // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 3. С. 1384-1396. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1384-1396

35. *Адигамов А.Э., Ногинова Л.Ю., Шафоростова Е.Н., Косарева-Володько О.В.* Выбор оптимальной рецептуры закладочного композита с необходимой вязкостью и достаточными механическими характеристиками // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 4. С. 1610-1621. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-11610-1621

36. *Ковальский Е.Р., Конгар-Сюрюн Ч.Б., Сиренко Ю.Г., Миронов Н.А.* Моделирование реологических процессов деформирования несущих элементов камерной системы разработки для условий Верхнекамского месторождения калийных солей // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 3. С. 1017-1030. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-3-1017-1030

37. *Конгар-Сюрюн Ч.Б.* Техногенные отходы в составе закладочного композита – парадигма экологической и технологической безопасности освоения месторождения // Безопасность труда в промышленности. 2025. № 3. С. 73-78. DOI: 10.24000/0409-2961-2025-3-73-78

38. *Voronina M.V., Ignatiev S.A., Merkulova V.A.* Systematic Review of a Flipped Learning Model for the Courses of Descriptive Geometry, Engineering and Computer Graphics // ICGG 2018 – Proceedings of the 18th International Conference on Geometry and Graphics. Springer, 2018. P. 1765-1776. DOI: 10.1007/978-3-319-95588-9_158

39. *Sudarikov A.E., Merkulova V.A.* The solution of problems of descriptive geometry as a basis for the training of engineers // Man In India. 2017. Vol. 97. Iss. 3. P. 431-441.

40. *Terrones-Saeta A., Terrones-Saeta J.M., Suárez-Macías J. et al.* Development and Mechanical Analysis of Geopolymers Formed with Mining Residue and Fly Ash from Municipal Solid Waste Incineration Obtained After the Neutralisation Stage // Polymers. 2025. Vol. 17. Iss. 12. № 1704. DOI: 10.3390/polym17121704

41. *Стадник Д.А., Стадник Н.М., Григорян К.Л., Кожиев З.В.* Актуализация технологических показателей технических проектов разработки месторождений полезных ископаемых с помощью компьютерных технологий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2023. № 5-1. С. 170-184. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_51_0_170

42. *Новоселов С.В., Мельник В.В., Агафонов В.В.* Год экологии в России и пути решения геоэкологических проблем в Кузбассе // Уголь. 2017. № 3. С. 78-79. DOI: 10.18796/0041-5790-2017-3-78-79

43. *Shammazov I.A., Borisov A.V., Aleksandruk B.S. et al.* Algorithmic Models for Determining the Flow Patterns of Oil Pipelines in Gravity Sections // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. 2025. Vol. 38. Iss. 10. P. 2476-2485. DOI: 10.5829/ije.2025.38.10a.22

44. *Барях А.А., Губанова Е.А.* О мерах охраны калийных рудников от затопления // Записки Горного института. 2019. Т. 240. С. 613-620. DOI: 10.31897/PMI.2019.6.613

45. *Беляков Н.А., Беликов А.А.* Прогноз целостности водозащитной толщи на Верхнекамском месторождении калийных руд // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 33-46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_62_0_33

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

46. *Гендлер С.Г., Крюкова М.С., Алферова Е.Л.* Исследование термодинамических параметров воздушной среды на линиях метрополитенов с однопутными и двухпутными тоннелями // Горные науки и технологии. 2024. Т. 9. № 3. С. 250-262. DOI: 10.17073/2500-0632-2024-02-223

47. *Isaevich A., Semin M., Levin L. et al.* Study on the Dust Content in Dead-End Drifts in the Potash Mines for Various Ventilation Modes // Sustainability. 2022. Vol. 14. Iss. 5. № 3030. DOI: 10.3390/su14053030

48. *Sidki-Rius N., Sanmiquel L., Bascompta M., Parcerisa D.* Subsidence Management and Prediction System: A Case Study in Potash Mining // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 9. № 1155. DOI: 10.3390/min12091155

49. *Ushakova E., Perevoshchikova A., Menshikova E. et al.* Environmental Aspects of Potash Mining: A Case Study of the Verkhnekamskoe Potash Deposit // Mining. 2023. Vol. 3. Iss. 2. P. 176-204. DOI: 10.3390/mining3020011

50. *Барях А.А., Лобанов С.Ю., Ломакин И.С.* Анализ изменения степени нагружения междукамерных целиков во времени на Верхнекамском месторождении солей // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 4. С.70-82.

51. *Земсков А.Н., Максимович Н.Г., Мещерякова О.Ю.* Современные тенденции в развитии калийной промышленности в мире // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. Вып. 3. С. 369-382.

52. *Sokolov A., Kuzmovs V., Ordóñez U.M., Gostilo V.* Online XRF Analysis of Elements in Minerals on a Conveyor Belt // Mining. 2025. Vol. 5. Iss. 4. № 77. DOI: 10.3390/mining5040077

53. *Ермаков Б.С., Ермаков С.Б., Вологжанина С.А., Хузнахметов Р.М.* Влияние условий эксплуатации на формирование нано- и ультрадисперсных зернограничных дефектов в сварных соединениях // Цветные металлы. 2023. № 8. С. 80-85. DOI: 10.17580/tsm.2023.08.13

54. *Алиева Л., Жуков И.А.* Повышение эффективности ударно-поворотного бурения горных пород высокой крепости совершенствованием структуры породоразрушающего безлезвийного инструмента // Устойчивое развитие горных территорий. 2024. Т. 16. № 4. С. 1681-1694. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1681-1694

55. *Vologzhanina S.A., Khuznakhmetov R.M., Amyaga J.V. et al.* Influence of laser exposure on the processes occurring in a surface layer of austenitic steel products // CIS Iron and Steel Review. 2025. Vol. 30. P. 52-58. DOI: 10.17580/cisisr.2025.02.09

56. *Patakiouta I.V., Asvestas A., Tzima A. et al.* Determining the Thickness of Gold Leaf in Post-Byzantine Religious Panel Paintings Using Imaging μ-XRF // Heritage. 2025. Vol. 8. Iss. 10. № 432. DOI: 10.3390/heritage8100432

57. *Zong-Xian Zhang.* Lost-ore mining – A supplementary mining method to sublevel caving // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2023. Vol. 168. № 105420. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2023.105420

58. *Nikitin V.I., Zhivaeva V.V., Mozgovoy G.S.* Calculation of Saturation and Depth of Filtrate Penetration in the Primary Opening // Proceedings of the International Conference Engineering Innovations and Sustainable Development. Springer, 2022. P. 271-275. DOI: 10.1007/978-3-030-90843-0_30

59. *Shibaev I.A., Sas I.E., Bagriantcev D.M., Dudchenko O.L.* Multivariate Assessment of Soil – Building Foundation Interaction Using PLAXIS Software // Recent Advances in Geo-Environmental Engineering, Geomechanics and Geotechnics, and Geohazards. Springer, 2018. P. 341-343. DOI: 10.1007/978-3-030-01665-4_79

60. *Pshenin V.V.* Determination of Parameters of Rational Placement of Oil and Petroleum Product Vapor Recovery Unit // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2025. Vol. 38. Iss. 2. P. 362-367. DOI: 10.5829/ije.2025.38.02b.10

61. *Skorobogatov A.A., Pshenin V.V., Tsvetkova C.P., Borisov R.A.* Multiphase Oil-water Flow in Horizontal and Inclined Pipelines. Effect of Flow Velocity on Flow Patterns // Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2025. Vol. 38. Iss. 8. P. 1820-1830. DOI: 10.5829/ije.2025.38.08b.08

62. *Nikitin V.I., Agrelkina M.M.* Justification for the Selection of a Relative Permeability Model in the Task of Predicting Drilling Fluid Filtrate Invasion into the Formation // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. 2025. Vol. 38. Iss. 10. P. 2312-2320. DOI: 10.5829/ije.2025.38.10a.08

63. *Кузьмин М.И., Пономарева А.И., Герасимов Р.В.* Подход к адаптивному управлению фондом скважин с установкой электролопастного насоса // Нефтяное хозяйство. 2025. № 7. С. 130-134. DOI: 10.24887/0028-2448-2025-7-130-134

64. *Zakirova G.S., Pshenin V.V., Gustov A.A.* Compensation of Temperature Deformations of Gas Pipelines // Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2025. Vol. 38. Iss. 7. P. 1699-1707. DOI: 10.5829/ije.2025.38.07a.20

65. *Никитин В.И.* Математическое моделирование проникновения фильтрата буровой промывочной жидкости в призабойную зону пласта с учетом вязкопластичных свойств нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 3. С. 130-137. DOI: 10.18799/24131830/2023/3/3760

66. *Hao S., Wang Y., Xing E., Mu X.* On the Deactivation Analysis of IM-5 Zeolite in Pseudocumene Methylation with Methanol // Crystals. 2025. Vol. 15. Iss. 7. № 598. DOI: 10.3390/cryst15070598

67. *Никитин В.И., Нечаева О.А., Живаева В.В.* Программа для расчета объема фильтрата бурового раствора, проникающего в пласт при первичном вскрытии // Нефтяное хозяйство. 2022. № 8. С. 126-128. DOI: 10.24887/0028-2448-2022-8-126-128

68. *Karpe S., Veser G.* Coke Formation and Regeneration during Fe-ZSM-5-Catalyzed Methane Dehydro-Aromatization // Catalysts. 2024. Vol. 14. Iss. 5. № 292. DOI: 10.3390/catal14050292

69. *Никитин В.И., Двойников М.В., Купавых К.С., Пантелеева Т.А.* Применение машинного обучения при моделировании параметров бурового раствора реологической модели Гершеля – Балкли для оптимизации промывки скважины // Записки Горного института. 2025. Т. 275. С. 70-80.

70. *Yajun Ji, Honghui Yang, Wei Yan.* Strategies to Enhance the Catalytic Performance of ZSM-5 Zeolite in Hydrocarbon Cracking: A Review // Catalysts. 2017. Vol. 7. Iss. 12. № 367. DOI: 10.3390/catal7120367

Автор **Роман Владимирович Клюев,** *д-р техн. наук, профессор* (*Московский политехнический университет, Москва, Россия*), *kluev-roman@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0003-3777-7203.*

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0