

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тульский государственный университет»**

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Выпуск 2

**Тула
Издательство ТулГУ
2022**

Председатель

Кравченко О.А., д-р техн. наук.

Первый заместитель председателя

Воротилин М.С., д-р техн. наук.

Заместитель председателя

Прейс В.В., д-р техн. наук, авторизованный представитель Издательства ТулГУ в РИНЦ.

Ответственный секретарь

Фомичева О.А., канд. техн. наук, авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ.

Члены редакционного совета:

Батанина И.А., д-р полит. наук, –

гл. редактор серии «Гуманитарные науки»;

Берестнев М.А., канд. юрид. наук, доц., –

гл. редактор серии «Экономические и юридические науки»;

Борискин О.И., д-р техн. наук, –

гл. редактор серии «Технические науки»;

Егоров В.Н., канд. пед. наук, – гл. редактор серии

«Физическая культура. Спорт»;

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор

Качурин Н.М., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Заместитель главного редактора

Сарычев В.И., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Члены редакционной коллегии:

Захаров В.Н., член-корр. РАН, д-р техн. наук (Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва);

Каплунов Д.Р., член-корр. РАН, д-р техн. наук (Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва);

Клишин В.И., член-корр. РАН д-р техн. наук, (Институт угля ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово);

Опарин В.Н., член-корр. РАН, д-р физ.-матем. наук, (Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск);

Струков К.И., д-р техн. наук, президент (ООО «УК ЮГК», г. Челябинск);

Рыльникова М.В., д-р техн. наук (Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, г. Москва);

Гендлер С.Г., д-р техн. наук (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург);

Голик В.И., д-р техн. наук (Геофизический институт Владикавказского научного центра, г. Владикавказ);

Ефимов В.И., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Заславская О.В., д-р пед. наук, –

гл. редактор серии «Педагогика»;

Качурин Н.М., д-р техн. наук, –

гл. редактор серии «Науки о Земле»;

Понаморев О.Н., д-р хим. наук, –

гл. редактор серии «Естественные науки».

Ответственный секретарь

Стась Г.В., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Авторизованный представитель ТулГУ в РИНЦ

Копылов А.Б., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула).

Жабин А.Б., д-р техн. наук (ТулГУ, г. Тула);

Кавала Р., д-р техн. наук (Фрайбергская горная академия, Институт материаловедения и изготовления материалов, Германия, г. Фрайберг);

Казанин О.И., д-р техн. наук (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург);

Кантович Л.И., д-р техн. наук (Национальный исследовательский технологический университет (МИСиС), г. Москва);

Комащенко В.И., д-р техн. наук (Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва);

Коришунов Г.И., д-р техн. наук (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург);

Мельник В.В., д-р техн. наук (Национальный исследовательский технологический университет (МИСиС), г. Москва);

Мерзляков В.Г., д-р техн. наук (Московский политехнический университет, г. Москва);

Моркун В.С., д-р техн. наук (Криворожский национальный университет, Украина, г. Кривой Рог);

Протосеня А.Г., д-р техн. наук (Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург).

Сборник зарегистрирован в Управлении Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-75993 от 19 июня 2019 г.

Подписной индекс сборника 41408 по Объединённому каталогу «Пресса России».

Сборник включен в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук», утвержденный ВАК Минобрнауки РФ, по следующим специальностям: 25.00.00 – Науки о Земле; 05.06.00 – Безопасность деятельности человека.

Сборник зарегистрирован в системе "Web of Science".

УДК: 622.242 DOI 10.46689/2218-5194-2022-2-1-399-414

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ПОГЛОЩЕНИЯ БУРОВОГО РАСТВОРА ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ СКВАЖИН

А.Д. Черников, Н.А. Еремин, А.В. Замрий, С.П. Черных

Рассматриваются вопросы предупреждения осложнений, связанных с поглощением бурового раствора, при строительстве нефтяных и газовых скважин. Ставятся и приводятся решения задачи обеспечения безопасности строительства нефтяных и газовых скважин на суше и на море с использованием интеллектуальных систем раннего предупреждения осложнений в виде поглощений бурового раствора по результатам обработки больших объемов данных со станций геолого-технологических измерений. Преимущество применения методов машинного обучения для решения задач выявления и прогнозирования осложнений в виде поглощений бурового раствора при строительстве нефтяных и газовых скважин заключается в том, что в ходе их создания и обучения с заданной точностью выявляются явные и скрытые закономерности между геолого-геофизическими, техническими и технологическими параметрами. Эффективное формирование, интеграция и кластеризация все более возрастающих многомерных объемов данных от датчиков различных типов, используемых для измерения параметров в процессе бурения скважин, осуществляются с использованием технологий машинного обучения. Предупреждение поглощений бурового раствора – одно из перспективных направлений для технологии умных микроконтейнеров. Применение технологии умных микроконтейнеров существенно повысит эффективность процесса ликвидации поглощений бурового раствора, что приведет к значительному снижению затрат на бурение скважины.

Ключевые слова: безопасность строительства скважин, методы машинного обучения, большие данные, геолого-технологические исследования, нейросетевая модель, бурение нефтяных и газовых скважин, выявление, прогнозирование и предупреждение поглощений бурового раствора, умные контейнеры.

Ключевыми аспектами Стратегии цифровой модернизации в промышленности являются техническое регулирование и стандартизация, подготовка кадров для цифровой модернизации. Российские нефтегазовые компании либо уже внедряют, либо планируют использование элементов цифровой модернизации с опорой на масштабную автоматизацию бизнес-процессов, информационные технологии, мультисенсоризацию, цифровые двойники, искусственный интеллект. Системы машинного обучения позволяют достичь экологически безопасного уровня управления буровыми операциями за счет своевременного предотвращения осложнений, в частности, поглощения бурового раствора, а также нивелирования влияния человеческого фактора на эффективность принятия управленческих решений при бурении нефтяных и газовых скважин. Как показали исследования, человек является причиной до 70 % осложнений и аварий в нефтегазовом производстве. Значительные улучшения в технологии сбора больших гео-

данных в жизненном цикле нефтегазовых скважин (бурение, эксплуатация, капитальный ремонт) способствовали разработке передовых систем предотвращения осложнений, основанных на выявлении скрытых закономерностей в больших геоданных с использованием методов искусственного интеллекта. Созданная автоматизированной системы предотвращения осложнений в жизненном цикле нефтегазовых скважин с использованием методов машинного обучения использует большие геоданные, получаемые в режиме реального времени с геологотехнологических измерительных станций. Значительная часть работы была посвящена предварительной обработке больших объемов данных, выбору системы признаков для каждого вида осложнения, нормализации и маркировке геоданных. Преимуществом созданной автоматизированной системы предотвращения осложнений и чрезвычайных ситуаций на скважинах с использованием методов машинного обучения является способность "запоминать" закономерности возникновения чрезвычайных ситуаций, возможность непрерывного дополнительного обучения в процессе эксплуатации для адаптации к различным горно-геологическим условиям. Автоматизированная система выявления и прогнозирования осложнений при строительстве нефтяных и газовых скважин, характеризующаяся тем, что она содержит модуль сбора реально-временных данных геолого-технологических исследований с объекта строительства скважины с подсоединенной к ней архивной базой данных геолого-технологических исследований, буровой тренажер, базу данных симулятора, модуль предварительной обработки данных геолого-технологических исследований, модуль разметки данных геолого-технологических исследований, размеченную и неразмеченную базы данных геолого-технологических исследований, модуль формирования, обучения и валидации модели выявления аномалий в данных геолого-технологических исследований, модуль формирования, обучения и валидации моделей прогнозирования значений функций индикаторов возникновения осложнений (поглощений, прихватов и газонефтеводопроявлений), модуль прогнозирования возникновения аномалий в данных геолого-технологических исследований, модуль прогнозирования значений функций индикаторов возникновения осложнений, модуль формирования, обучения и валидации рекуррентной нейросетевой модели прогнозирования возникновения осложнений, модуль оценки прогнозных значений вероятностей возникновения осложнений и модуль анализа и формирования предупреждений о возникновении осложнений и аварийных ситуаций, при этом выходы модуля сбора реально-временных данных геолого-технологических исследований с объекта строительства и архивной базы данных геолого-технологических исследований подсоединены к модулю предварительной обработки данных геолого-технологических исследований, выходы которого подключены к входам модуля разметки данных геолого-технологических исследований, неразмеченной базе данных геолого-

технологических исследований и к первым входам модуля оценки прогнозных значений вероятностей возникновения осложнений, модуля прогнозирования возникновения аномалий в данных геолого-технологических исследований и модуля прогнозирования значений функций индикаторов возникновения осложнений, выход модуля разметки данных геолого-технологических исследований связан с входом размеченной базы данных геолого-технологических исследований, выход которой подключен ко вторым входам модулей прогнозирования возникновения аномалий в данных геолого-технологических исследований, прогнозирования значений функций индикаторов возникновения осложнений и к первому входу модуля формирования, обучения и валидации рекуррентной нейросетевой модели прогнозирования возникновения осложнений, выход бурового тренажера подсоединен к базе данных симулятора, выход которого подключен к входу модуля формирования, обучения и валидации моделей прогнозирования значений функций индикаторов возникновения осложнений, выход которого подсоединен к третьему входу модуля прогнозирования значений функций индикаторов возникновения осложнений, выходы которого подключены ко второму входу модуля оценки прогнозных значений вероятностей возникновения осложнений и ко второму входу модуля формирования, обучения и валидации рекуррентной нейросетевой модели прогнозирования возникновения осложнений, к третьему входу которого подключен выход модуля прогнозирования возникновения аномалий в данных геолого-технологических исследований, выход неразмеченной базы данных геолого-технологических исследований подключен к модулю формирования, обучения и валидации модели выявления аномалий в данных геолого-технологических исследований, выход которого подключен к третьему входу модуля прогнозирования возникновения аномалий в данных геолого-технологических исследований, выход которого совместно с выходом модуля формирования, обучения и валидации рекуррентной нейросетевой модели прогнозирования возникновения осложнений подключены, соответственно, к третьему и четвертому входам модуля оценки прогнозных значений вероятностей возникновения осложнений, выход которого подключен к входу модуля анализа и формирования предупреждений о возникновении осложнений и аварийных ситуаций, выход которого является выходом системы, см. рис. 1. Были получены шесть свидетельств о регистрации компьютерных программ и два патента на изобретение [13 – 20].

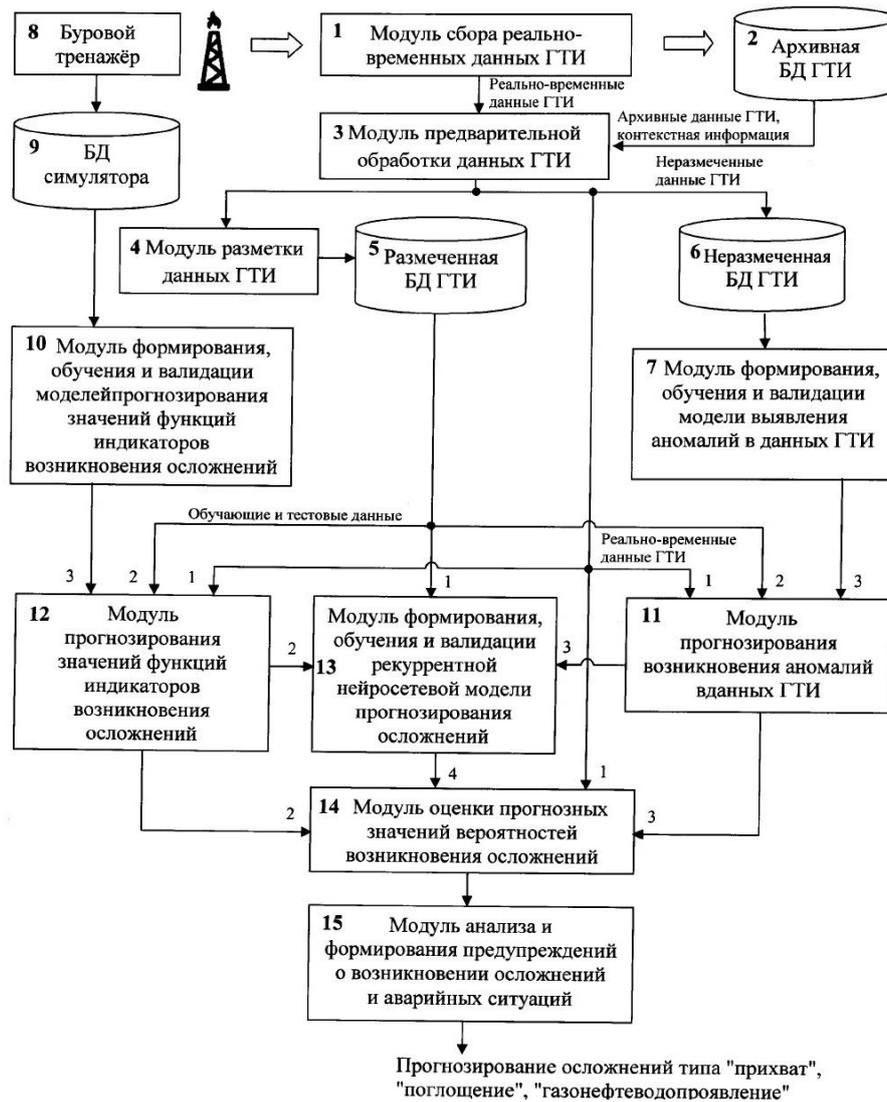


Рис. 1. Блок-схема созданной автоматизированной системы предупреждения поглощений бурового раствора при строительстве нефтяных и газовых скважин [13 – 20]

Цифровые нефтегазовые технологии способны к непрерывному развитию. В цифровых нефтегазовых технологиях используется цифровая форму сбора, передачи, обработка больших геоданных. Общие затраты на цифровую модернизацию нефтегазового производства в условиях снижения углеродного следа могут достичь \$5,0...5,5 миллиардов в год к 2035 г. На рис. 2 представлена доля зарубежного оборудования в нефтегазовой отрасли.

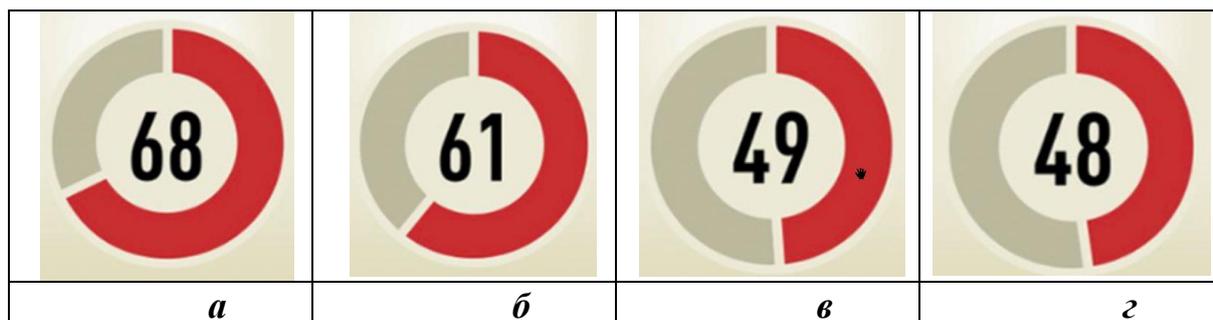


Рис. 2. Доля зарубежного оборудования в нефтегазовой отрасли на 1.01.2021 г.: а – освоение шельфа и строительство заводов по сжижению природного газа; б – МУН/МПН; в – нефтепереработка; г – геолого-разведочные работы. Источник: Минпромторг России

На строительство скважин приходится более 40 % всех инвестиций в нефтегазодобыче. Значительные усовершенствования в технологии сбора больших данных в жизненном цикле скважин (бурение, эксплуатация, капитальный ремонт) способствовали разработки передовых систем предотвращения осложнений и аварий, основанных на выявлении скрытых закономерностей в больших данных методами искусственного интеллекта. К последним относится и созданная автоматизированная система предупреждения осложнений в жизненном цикле скважин [4 – 20]. В работе электрических погружных насосов используются внутрискважинные и поверхностные каналы для передачи больших данных в центр управления разработкой. Система электрического погружного насоса включает в себя блок скважинных датчиков, двигатель, уплотнение двигателя, газоотделитель, впуск насоса, насос, удлинитель двигателя, кабель и обратные клапаны. В зависимости от типа скважинных датчиков электрического погружного насоса контролируются следующие параметры: давление на входе насоса, давление нагнетания насоса, температура всасывания насоса, температура обмотки двигателя, температура моторного масла и три осевые вибрации. Система электрического погружного насоса обеспечивает мониторинг следующих параметров на устье скважины: поверхностный расход, поверхностное давление в трубопроводе, поверхностное давление в обсадной колонне, утечка тока, частота, удельное сопротивление кабеля и фазное напряжение. Автоматизированная система предупреждения осложнений позволяет своевременно выявлять возможные сбои, осложнения в жизненном цикле работы скважины, увеличивать срок службы насоса и снижать затраты на капитальный ремонт за счет своевременного обнаружения нештатного события. Системы электрических погружных насосов обладают функциями, которые могут быть полезны в условиях снижения углеродного следа: электрические погружные насосы - это инструменты, которыми можно управлять дистанционно (в частности, изменять частоту, размер дросселя и положение), что в конечном итоге приводит к снижению эксплуатационных расходов, кроме того скважинные датчики и датчики

электрических погружных насосов обеспечивают значительную информацию о месторождении в режиме реального времени. Системными проблемами в сфере реализации цифровой модернизации промышленности являются: подготовка кадров для цифровизации производства нефти и газа, включая специалистов по кибербезопасности и петророботизации; правовые и гуманитарные аспекты применения автоматизированных систем и использования петроробототехники.

Перед нефтегазовой отраслью стоят задачи по достижению высокой эффективности нефтегазодобычи. Стандартизация цифрового нефтегазового производства позволит создать устойчивые технические ориентиры для модернизации нефтегазовых производств, включая сертификацию и технадзор, как наиболее распространённые в мире инструменты защиты национальных рынков нефти и газа. Процессы цифровизации нефтегазового производства должны строиться на новых ИТ-стандартах, классификаторах нефтегазовой продукции. Проектный технический комитет РСПП по стандартизации ПКТ 711 «Умные (SMART) стандарты» приступил к работе по созданию машиночитаемых, машинопонимаемых стандартов, которые должны стать основой цифровой платформы, которая как ожидается будет включать цифровое производство и кибербезопасность. В рамках ЕАЭС реализуется проект цифрового технического регулирования, включая разработку системы единых стандартов для цифровизации промышленности на 2022 г. Стандартизация является инструментом для практического внедрения цифровых нефтегазовых решений и должна способствовать устранению барьеров применению цифровых двойников нефтегазовых объектов и испытаний на цифровых полигонах, включая моделирование процессов измерения реальных параметров изделий, применения новейших технологий и материалов, оптимизации управления цепочкой поставок нефти, газа и нефтегазопродуктов на мировые рынки. Среди ключевых проектов цифровой модернизации, можно выделить мультисенсоризацию и оптикализацию нефтегазового производства, разработку автоматизированных систем предупреждения осложнений при строительстве и эксплуатации скважин, создание аналитическо-прогнозной вертикали управления, внедрение технологий информационного моделирования, развитие цифровых вертикалей экспертизы и государственного строительного надзора при освоении нефтегазовых месторождений.

Поглощение бурового раствора – это потеря некоторого объёма бурового раствора, а иногда и вовсе всего раствора, подаваемого в скважину, вследствие его фильтрации из ствола скважины в пласт, осложнение в скважине, характеризующееся полной или частичной потерей циркуляции бурового раствора в процессе бурения. По разным оценкам борьба с поглощениями промывочной жидкости в среднем занимает 20 % календарного времени строительства скважин. Ежегодные затраты времени на ликви-

дацию поглощений буровых растворов по предприятиям нефтегазовой промышленности составляют сотни тысяч часов.

Необходимость проведения работ по предупреждению поглощений бурового раствора обусловлена следующими обстоятельствами:

- поглощения могут привести к ухудшению коллекторских свойств продуктивного пласта, что в дальнейшем может привести к снижению дебита скважины;
- поглощения могут способствовать появлению новых осложнений при бурении (газонефтеводопроявления, осыпи, обвалы);
- борьба с поглощениями приводит к задержкам при бурении скважин, и, как следствие, к серьезным денежным потерям.

Основной причиной поглощения бурового раствора является значительное превышение величины давления, действующего со стороны скважины на пласт (сумма гидростатического и гидродинамического давлений), по сравнению с пластовым давлением:

$$P_{пл} + DP_{\phi} \leq +P_{ГД},$$

где $P_{ГС}$ – гидростатическое давление, МПа; $P_{ГД}$ – гидродинамическое давление, МПа; DP_{ϕ} – фильтрационный перепад давления, обусловленный степенью загрязнения призабойной зоны пласта и проницаемостью пласта, МПа; $P_{пл}$ – пластовое давление, МПа.

Среди причин поглощения промывочной жидкости можно выделить следующие:

Геологические (низкое пластовое давление, вследствие длительной эксплуатации пласта; тектонические нарушения пород; высокая степень трещиноватости и кавернозности пород.

Технологические (свойства бурового раствора, такие как плотность и реологические свойства; расход бурового раствора; скорость проведения спускоподъемных операций, как правило, при спуске труб увеличивается давление на забое, что приводит к образованию трещин).

Поглощающие пласты обычно представлены несвязными, мелкопористыми, пористыми (песчаными и крупнообломочными), закарстованными и трещиноватыми породами. Наиболее интенсивные поглощения отмечаются чаще всего в крупнообломочных, закарстованных и трещиноватых горных породах.

Классификация поглощений бурового раствора по фактору объемов потери бурового раствора на один метр бурения позволяет выделить пять основных групп:

- 1) умеренное поглощение (менее 5 %);
- 2) частичное поглощение (5...30 %);
- 3) среднее поглощение (30...60 %);
- 4) полное поглощение (от 60 до 100 %, уровень бурового раствора падает на 50...150 м);

5) катастрофическое поглощение (100 %, уровень бурового раствора падает на 150...300 м).

Рассмотрим технологии и вещества, используемые для борьбы с поглощениями более подробно:

Предупреждение поглощений (регулирование реологических свойств промывочной жидкости, в том числе изменение эффективной вязкости и плотности, аэрирование); уменьшение сечения или полной изоляции каналов поглощения и уменьшение перепада давления в системе скважина-пласт.

Намыв наполнителя (закупоривание поровых каналов и трещин и образование малопроницаемой фильтрационной корки материалами, доставляемыми в зону поглощения различными жидкостями-носителями;). Объёмная концентрация наполнителей в жидкости рекомендуется 15...20 %. В качестве жидкости намыва применяют глинистые растворы с фильтрацией более 40 см³ /30 мин. Рекомендуемые концентрации наполнителей в растворе должны составлять не более 30 кг/м³ при роторном способе и не более 5 кг/м³ при турбинном способе. Намыв наполнителя применяется при поглощениях менее 100 м³/ч.

Продавливание тампонажных и быстросхватывающихся смесей. Способ закачивания тампонажных смесей заключается в изоляции поглощающих каналов загустевающими или твердеющими тампонажными смесями.

Бурение на обсадной колонне. При вращении обсадной колонне возникает такое явление, как механическая кольматация — выбуренный шлам вдавливаются обсадной трубой в стенки скважины, поры и трещины закупориваются, а в случае наличия поглощения оно уменьшается или совсем ликвидируется.

Применение эластичных оболочек. Применяются перекрывающие устройства, которые спускаются в зону перекрытия поглощающих каналов вместе с тампонирующей смесью, которая выдавливается в скважину вместе с перекрывающей оболочкой.

Несмотря на то, что проблема поглощений изучается давно и существует множество современных методов борьбы с поглощениями, однако большая часть из них технологически несовершенна.

1. Увеличение эффективной вязкости и динамического напряжения сдвига могут снизить интенсивность поглощения или его предотвратить, однако приводят к резкому падению механической скорости бурения.

2. Для аэрации необходимо компрессорное хозяйство. Кроме того, аэрация ускоряет коррозию бурильных труб и оборудования.

3. При намыве наполнителей усложняется очистка бурового раствора, создаются пробки в местах сужения бурильных труб, что снижает эффективность работ.

4. Продавливание тампонажных смесей имеет некоторые ограничения в качестве метода борьбы с поглощением: интенсивность поглощения не менее 30 м³/час, зона поглощения расположена на глубине менее 2000 м, а выше нее нет высокопроницаемых пластов, необсаженный ствол скважины сложен устойчивыми породами.

5. Бурение на обсадной колонне ведет к ограниченной механической скорости проходки, а также, ввиду новизны технологии, к большой стоимости оборудования и проведения работ.

Инновационным решением является использование умных микроконтейнеров для доставки закупоривающего материала (см. рис.3) позволит точно направить его к местам дислокации каналов и полостей поглощения, локализовать изолирующий компонент при помощи умных микроконтейнеров, что приведет к увеличению эффективности процесса ликвидации.



Рис. 3. Вид закупоривающего материала

Ключевыми преимуществами технологии умных микроконтейнеров в данном случае являются высокая точность воздействия на зону поглощения, и, как следствие, снижение времени, необходимого для устранения проблемы.

Процесс использования бурового раствора с умных микроконтейнеров состоит из следующих этапов:

- подача бурового раствора с умными микроконтейнерами в зону циркуляции;

- перемещение умных микроконтейнеров к стенкам ствола скважины под действием магнитного поля, локализация умных микроконтейнеров на участке поглощения;
- высвобождение закупоривающего вещества из умных микроконтейнеров под воздействием определенных физических факторов;
- интенсивная полимеризация закупоривающего агента, см. рис. 4;
- образование непроницаемого слоя за счет полимеризации изолирующего компонента.



Рис. 4. Вид лабораторной установки Spray drying по исследованию процессов интенсивной полимеризации закупоривающего агента

При необходимости закачку промывочной жидкости с умными микроконтейнерами можно провести несколько раз, однако и в этом случае технология сохранит эффективность и экономичность. Стоит отметить возможность комбинирования технологии умных микроконтейнеров – как с различными видами кольматантов, так и с некоторыми жидкостями, в том числе меняющими реологические свойства под действием физических факторов, таких как магнитное поле.

Ключевыми направлениями внедрения технологии умных микроконтейнеров являются:

- бурение (борьба с поглощениями);
- разработка месторождений и добыча (МУН, РИР, трассеры);
- борьба с коррозией в системах трубопроводного транспорта;
- процессы очистки нефти (деметаллизация, сероочистка);

процессы водоподготовки;
процессы полимеризации;
процессы, в основе которых лежит управляемое смешивание компонентов (применимое во многих технологиях);
процессы экологической ремедиации;
мониторинг параметров продуктов, контроль идентичности (контроль качества, борьба с контрафактом).

Заключение

Стратегические задачи по достижению высокой эффективности производства углеводородов и конкурентоспособности товарной продукции российского нефтегазового комплекса в условиях снижения углеродного следа могут быть достигнуты за счет глубокой технологической модернизации процессов строительства скважин. Системы машинного обучения позволяют своевременно предупреждать бурильщика о возможном осложнении в виде поглощения бурового раствора при операциях бурения нефтяных и газовых скважин. Борьба с поглощениями – одно из перспективных направлений для технологии умных микроконтейнеров. Применение технологии умных микроконтейнеров существенно повысит эффективность процесса ликвидации поглощений, что приведет к значительному сокращению времени операций, и, как следствие, к снижению затрат на бурение скважины. В настоящее время проект (шифр - УМК БУР) находится в стадии разработки; для развития технологии УМК БУР ведется специальная научная работа в этом направлении. Результаты проделанной работы и научно-производственная кооперация позволяет рассчитывать на разработку в ближайшее время ряда прорывных технологий (на базе умных микроконтейнеров) для крупнотоннажных процессов нефтегазового производства (бурение, МПН/МУН, и нефтехимии с большим технологическим и экономическим эффектом.

Статья подготовлена в рамках выполнения государственного задания (тема «Фундаментальный базис инновационных технологий нефтяной и газовой промышленности (фундаментальные, поисковые и прикладные исследования)», № ААААА19-119013190038-2).

Список литературы

1. Дмитриевский А. Н., Еремин Н.А. Цифровая глобальная декарбонизация газодобычи // Сб. науч. тр. VII междунар. науч.-технич. конф. Экологическая безопасность в газовой промышленности (ESGI-2021): Москва, 07–08 декабря 2021 года. ООО "Газпром ВНИИГАЗ". М.: Общество с ограниченной ответственностью "Научно- исследовательский ин-

ститут природных газов и газовых технологий – Газпром ВНИИГАЗ", 2021. С. 4-5.

2. Digital oil and gas complex of Russia / A.N. Dmitrievsky, N.A. Eremin, D.S. Filippova, E.A. Safarova // *Georesursy = Georesources, Special issue*, (2020). P. 32–35. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.SI.32–35>.

3. Цифровая глобальная декарбонизация зрелых нефтяных и газовых месторождений / А. Н. Дмитриевский [и др.] // Сб. науч. тр. Черноморские нефтегазовые конф. Новороссийск; Сочи, 20 сентября 2021. Новороссийск; Сочи: ООО «Научно-производственная фирма «Нитпо», 2021. С. 63-66.

4. Dmitrievsky A.N., Eremin N.A., Safarova E.A., Filippova D.S., Borozdin S.O. Qualitative Analysis of Time Series GeoData to Prevent Complications and Emergencies During Drilling of Oil and Gas Wells SOCAR Proceedings. 2020. No.3 031-037. ISSN 2218-6867 eISSN 2218-8622 <http://dx.doi.org/10.5510/OGP20200300442>.

5. On increasing the productive time of drilling oil and gas wells using machine learning methods / A.N. Dmitrievsky [and other] // *Georesursy = Georesources*, 22(4). 2020. P. 79–85. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.79-85>.

6. Алгоритм создания нейросетевой модели для классификации в системах предотвращения осложнений и аварийных ситуаций при строительстве нефтяных и газовых скважин / А.Н. Дмитриевский, В.О. Дуплякин, Н.А. Еремин, В.В. Капранов // *Датчики и системы*. 2019. №12 (243). С.3-10.

7. Применение методов искусственного интеллекта для выявления и прогнозирования осложнений при строительстве нефтяных и газовых скважин: проблемы и основные направления решения / А.Д. Черников [и др.] // *Георесурсы*, 2020. 22(3). С. 87–96. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.87-96>

8. Анализ качества данных станции геолого-технологических исследований при распознавании поглощений и газонефтеводопроявлений для повышения точности прогнозирования нейросетевых алгоритмов / А.И. Архипов [и др.] // *Нефтяное хозяйство*. 2020. №08 (1162). С.63-67. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-8-63-67.

9. Drilling Problems Forecast System Based on Neural Network / S. Borozdin [and other] // *SPE Annual Caspian Technical Conference*. 2020. doi:10.2118/202546-MS.

10. Интеллектуальное бурение при обустройстве цифровых месторождений / Н.А. Еремин, А.Д. Черников, О.Н. Сарданашвили, В.Е. Столяров // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*, 2020. №5 (562). 26-36. DOI 10.33285/0132-2222-2020-5(562)-26-36.

11. Цифровые технологии строительства скважин. Создание высокопроизводительной автоматизированной системы предотвращения

осложнений и аварийных ситуаций в процессе строительства нефтяных и газовых скважин / Н.А. Еремин [и др.] // Деловой журнал Neftegaz.Ru. 2020. №4 (100). С. 38-50.

12. А.Н. Дмитриевский, Н.А. Еремин, В.Е. Столяров Роль информации в применении технологий искусственного интеллекта при строительстве скважин для нефтегазовых месторождений // Научный журнал Российского газового общества. 2020. № 3 (26). С.06-21.

13. Программный компонент "Нефтегазовый блокчейн" / Н.А. Еремин [и др.] // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020614626, 17.04.2020. Заявка № 2020613699 от 27.03.2020.

14. Дмитриевский А.Н., Чашина-Семенова О.К., Фицнер Л.К., Черников А.Д. Программный компонент "Нейросетевые расчеты – построение моделей прогноза осложнений и аварийных ситуаций при бурении и строительстве скважин» (ПКНР) / Н.А. Еремин [и др.] // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020660892, 15.09.2020. Заявка № 2020660182 от 08.09.2020.

15. Программный компонент "Адаптация обобщенных нейросетевых моделей прогнозирования осложнений и аварийных ситуаций к геофизическим параметрам при бурении конкретной скважины» / Н.А. Еремин [и др.] // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020660890, 15.09.2020. Заявка № 2020660179 от 08.09.2020.

16. Программный компонент "Индикация прогноза осложнений и аварийных ситуаций при бурении и строительстве скважин» (ПК «Индикация») / Н.А. Еремин [и др.] // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020661356, 22.09.2020. Заявка № 2020660450 от 14.09.2020.

17. Программный компонент "Оркестровка – интеграция модулей системы прогнозирования осложнений и аварийных ситуаций при бурении и строительстве скважин» / Н.А. Еремин [и др.] // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020660891, 15.09.2020. Заявка № 2020660181 от 08.09.2020.

18. Программный компонент "Обратная связь» / Н.А. Еремин [и др.] // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020665410, 26.11.2020. Заявка № 2020661058 от 25.09.2020. Дата публикации: 26.11.2020.

19. Автоматизированная система выявления и прогнозирования осложнений в процессе строительства нефтяных и газовых скважин // Патент на изобретение RU 2 745 137 С1, 22.03.2021. Заявка № 2020129673 от 08.09.2020. Automated system for identifying and predicting complications during the construction of oil and gas wells.

20. Автоматизированная система выявления и прогнозирования осложнений в процессе строительства нефтяных и газовых скважин: пат. № 2020129671 RU, 22.03.2021; опубл.08.09.2020.

Черников Александр Дмитриевич, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., cha60@mail.ru, Россия, Москва, Институт проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН),

Еремин Николай Александрович, д-р техн. наук, проф., гл. науч. сотр., ermn@mail.ru, Россия, Москва, Институт проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН); Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина,

Замрий Анатолий Владимирович, исп. директор, zav@sngpr.ru.com, Россия, Москва, Межотраслевой экспертно-аналитический центр Союза нефтегазопромышленников России,

Черных Сергей Петрович, ст. советник, csp@sngpr.ru.com, Россия, Москва, Межотраслевой экспертно-аналитический центр Союза нефтегазопромышленников России

INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR DRILLING MUD LOSS PREVENTION IN WELL CONSTRUCTION

A.D. Chernikov, N.A. Eremin, A.V. Zamriy, S.P. Chernykh

The article discusses the issues of preventing complications associated with the absorption of drilling mud during the construction of oil and gas wells, poses and provides solutions to the problem of ensuring the safety of the construction of oil and gas wells on land and at sea using intelligent systems for early warning of complications in the form of losses of drilling mud according to results of processing large volumes of data from stations of geological and technological measurements. The advantage of using machine learning methods for solving the problems of identifying and predicting complications in the form of drilling mud losses during the construction of oil and gas wells is that in the course of their creation and training, explicit and hidden patterns are revealed with a given accuracy between geological and geophysical, technical and technological parameters. Efficient formation, integration and clustering of ever-increasing multidimensional data volumes from various types of sensors used to measure parameters in the process of drilling wells are carried out using machine learning technologies. Loss prevention is one of the promising areas for smart microcontainer technology. The use of smart microcontainers technology will significantly increase the efficiency of the lost circulation elimination process, which will lead to a significant reduction in well drilling costs.

Key words: well construction safety, machine learning methods, big data, geological and technological research, neural network model, drilling of oil and gas wells, detection, prediction and prevention of lost circulation, smart containers.

Chernikov Alexander Dmitrievich, candidate of technical sciences, leading sci. officer, cha60@mail.ru, Russia, Moscow, Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences (IPNG RAS),

Eremin Nikolay Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, chief science officer, ermn@mail.ru, Russia, Moscow, Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences (IPNG RAS); Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),

Zamri Anatoly Vladimirovich, executive director. director, zav@sngpr.ru.com, Russia, Moscow, Intersectoral Expert and Analytical Center of the Union of Oil and Gas Producers of Russia,

Chernykh Sergey Petrovich, senior adviser, csp@sngpr.ru.com, Russia, Moscow, Intersectoral Expert and Analytical Center of the Union of Oil and Gas Industrialists of Russia

Reference

1. Dmitrievsky A. N., Eremin N.A. Digital global decarbonization of gas production // Sb. nauch. tr. VII International Scientific and Technical Conference. Environmental safety in the gas industry (ESGI-2021): Moscow, 07-08 December 2021. Gazprom VNIIGAZ LLC. Moscow: Limited Liability Company "Scientific Research Institute of Natural Gases and Gas Technologies - Gazprom VNIIGAZ", 2021. pp. 4-5.
2. Digital oil and gas complex of Russia / A.N. Dmitrievsky, N.A. Er-emin, D.S. Filippova, E.A. Safarova // Georesursy = Georesources, Special is-sue, (2020). P. 32-35. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.SI.32-35>.
3. Digital global decarbonization of mature oil and gas fields / A. N. Dmitrievsky [et al.] // Collection of scientific tr. Black Sea oil and gas conf. Novorossiysk; Sochi, September 20, 2021. Novorossiysk; Sochi: LLC "Scientific and Production Company "Nitpo", 2021. pp. 63-66.
4. Dmitrievsky A.N., Eremin N.A., Safarova E.A., Filippova D.S., Borozdin S.O. Qualitative Analysis of Time Series GeoData to Prevent Complications and Emergencies During Drilling of Oil and Gas Wells SOCAR Proceedings. 2020. No.3 031-037. ISSN 2218-6867 eISSN 2218-8622 <http://dx.doi.org/10.5510/OGP20200300442>.
5. On increasing the productive time of drilling oil and gas wells using machine learning methods / A.N. Dmitrievsky [and others] // Georesursy = Georesources, 22(4). 2020. pp. 79-85. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.4.79-85>.
6. Algorithm for creating a neural network model for classification in systems for preventing complications and emergencies during the construction of oil and gas wells / A.N. Dmitrievsky, V.O. Duplyakin, N.A. Eremin, V.V. Kapranov // Sensors and systems. 2019. No.12 (243). pp.3-10.
7. Application of artificial intelligence methods for detecting and predicting complications in the construction of oil and gas wells: problems and main directions of solution / A.D. Chernikov [et al.] // Georesources, 2020. 22(3). pp. 87-96. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2020.3.87-96>
8. Analysis of the data quality of the geological and technological research station in the recognition of uptake and oil and gas occurrences to improve the accuracy of forecasting neural network algorithms / A.I. Arkhipov [et al.] // Oil industry. 2020. No.08 (1162). pp.63-67. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-8-63-67.
9. Drilling Problems Forecast System Based on Neural Network / S. Borozdin [and other] // SPE Annual Caspian Technical Conference. 2020. doi:10.2118/202546-MS.
10. Intelligent drilling in the arrangement of digital birthplaces / N.A. Eremin, A.D. Chernikov, O.N. Sardanashvili, V.E. Stolyarov // Automation, telemechanization and communication in the oil industry, 2020. №5 (562). 26-36. DOI 10.33285/0132-2222-2020-5(562)-26-36.
11. Digital technologies of well construction. Creation of a highly productive automated system for preventing complications and emergencies during the construction of oil and gas wells / N.A. Eremin [et al.] // Business journal Neftegaz.Ru, 2020. No.4 (100). pp. 38-50.

12. A.N. Dmitrievsky, N.A. Eremin, V.E. Stolyarov The role of information in the application of artificial intelligence technologies in the construction of wells for oil and gas fields // Scientific Journal of the Russian Gas Society, 2020. No. 3 (26). pp.06-21.

13. Software component "Oil and gas blockchain" / N.A. Eremin [et al.] // Certificate of registration of a computer program RU 2020614626, 04/17/2020. Application No. 2020613699 dated 03/27/2020.

14. Dmitrievsky A.N., Chashchina-Semenova O.K., Fitzner L.K., Cherikov A.D. Program component "Neural network calculations - building models for predicting complications and emergencies during drilling and construction of wells" (PKNR) / N.A. Eremin [et al.] // Certificate of registration of the program for computers RU 2020660892, 09/15/2020. Application No. 2020660182 dated 08.09.2020.

15. Program component "Adaptation of generalized neural network models for predicting complications and emergencies to geophysical parameters when drilling a specific well" / N.A. Eremin [et al.] // Certificate of registration of a computer program RU 2020660890, 09/15/2020. Application No. 2020660179 dated 08.09.2020.

16. Program component "Indication of the forecast of complications and emergencies during drilling and construction of wells" (PC "Indication") / N.A. Eremin [et al.] // Certificate of registration of the computer program RU 2020661356, 22.09.2020. Application No. 2020660450 dated 14.09.2020.

17. Program component "Orchestration – integration of modules of the system for predicting complications and emergencies during drilling and construction of wells" / N.A. Eremin [et al.] // Certificate of registration of the computer program RU 2020660891, 09/15/2020. Application No. 2020660181 dated 08.09.2020.

18. Software component "Feedback" / N.A. Eremin [et al.] // Certificate of registration of a computer program RU 2020665410, 11/26/2020. Application No. 2020661058 dated 25.09.2020. Date of publication: 26.11.2020.

19. Automated system for detecting and predicting complications during the construction of oil and gas wells // Patent for invention RU 2 745 137 C1, 03/22/2021. Application No. 2020129673 dated 08.09.2020. Automated system for identifying and predicting complications during the construction of oil and gas wells.

20. Automated system for detecting and predicting complications during the construction of oil and gas wells: pat. No. 2020129671 RU, 22.03.2021; publ.08.09.2020.

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОЛОГИЯ

<i>Голик В.И., Валиев Н.Г., Белодедов А.А., Версилов С.О.</i> Экологические особенности добычи руд в горах Кавказа.....	3
<i>Гусейнова Л.И.</i> Экогеографические условия трансформации почв предгорий северо-восточного склона Большого Кавказа.....	14
<i>Любимова Н.Г., Линник Ю.Н., Жабин А.Б., Цих А.</i> Анализ возможностей сохранения угольной генерации в России на основе мирового опыта.....	24
<i>Иванищев В.В.</i> Цинк в природе и его значение для растений.....	35
<i>Маргарян В.Г., Гайдукова Е.В., Винокуров И.О.</i> Пространственно-временная изменчивость максимального стока весеннего половодья рек бассейна реки Арпа (Армения).....	50

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

<i>Гендлер С.Г., Степанцова А.Ю.</i> Закрытые склады как безопасный способ хранения угля.....	64
<i>Гендлер С.Г., Крюкова М.С.</i> Проблемы эксплуатации линий метрополитена с двухпутными тоннелями в условиях холодного климата.....	77
<i>Куриленко А.В.</i> Особенности шумопоглощающих свойств и акустические характеристики шумозащитных экранов.....	87
<i>Куриленко А.В.</i> Акустические аспекты шумозащитных экранов при локализации шума городского транспорта.....	95
<i>Николаев А.В., Максимов П.В., Кычкин А.В., Постников В.П.</i> Система обеспечения безопасных условий труда в нефтяных шахтах, работающая по принципу «Бережливого производства».....	102
<i>Перятинский А.Ю.</i> Концепция формирования производственного процесса горнодобывающего предприятия с параметрами приемлемого риска травмирования.....	113

<i>Довженко А.С., Эссальников А.О., Моисеенко В.В., Громов Д.Г.</i> Организационно-технологический проект – инструмент вовлечения персонала в устойчивое развитие предприятия.....	131
---	-----

ГЕОТЕХНОЛОГИЯ

<i>Соловьёв Г.И., Нефёдов В.Е., Малышева Н.Н.</i> Роль крепи в поддержании подготовительной выработки.....	144
---	-----

<i>Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л.</i> Обоснование рациональных параметров систем разработки наклонных жил малой и средней мощности при изменении криоусловий.....	157
--	-----

<i>Авдеев А.Н., Сосновская Е.Л., Павлов А.М.</i> Обоснование безопасных и эффективных систем разработки маломощных крутопадающих рудных тел на глубинах свыше 1000 м.....	169
--	-----

<i>Аленичев В. М.</i> Повышение достоверности оценки техногенного золотосодержащего объекта...	181
---	-----

<i>Беляков Н.А., Емельянов И.А.</i> Развитие подхода к обработке результатов измерений напряженного состояния методом кольцевой разгрузки.....	192
---	-----

<i>Валиев Н.Г., Алиева М.Г., Эфендиева З.Дж., Лебзин М.С.</i> Основные области использования бентонитовых глин месторождений Азербайджана.....	207
---	-----

<i>Голик В.И.</i> Геомеханические аспекты комбинирования технологий разработки месторождений Садона.....	222
---	-----

<i>Еремин Н.А., Столяров В.Е., Сафарова Е.А., Гавриленко С.И.</i> Цифровые системы управления транспортом газа.....	234
--	-----

<i>Еремин Н.А.</i> Цифровые технологии извлечения запасов нетрадиционной нефти.....	255
--	-----

<i>Земсков А.Н., Кудряшова О.С., Заалишвили В.Б., Шамрин М.Ю.</i> Разработка мероприятий по предотвращению затопления рудника Дехканабадского калийного завода (Узбекистан).....	270
---	-----

<i>Земсков А.Н., Лискова М.Ю., Заалишвили В.Б., Шамрин М.Ю.</i> Современные технологические и технические решения при ведении горных работ на калийных рудниках.....	284
---	-----

<i>Каюмова А.Н., Балек А.Е., Харисов Т.Ф.</i> Устойчивость камерных и сближенных выработок в сложных горно-геологических условиях.....	296
---	-----

<i>Клюев Р.В., Босиков И.И., Гаврина О.А., Голик В.И.</i> Повышение качества электроэнергии на промышленных предприятиях за счет применения активного фильтра гармоник.....	313
<i>Коровин М.О.</i> Применение эффектов анизотропии проницаемости в гидродинамической модели на примере терригенного коллектора пласта Ю ₁ ^М	325
<i>Кухарь В.Д., Яковлев С.С.</i> Исследование процесса получения рифлей на наружной поверхности цилиндрической оболочки.....	332
<i>Кулибаба С. Б., Есина Е. Н.</i> Устранение неоднозначности в определении горизонта полной подработки над очистной выработкой.....	339
<i>Овчинников Н.П.</i> Влияние ило-шламовой пульпы на эффективность горных машин.....	348
<i>Писаренко М.В., Тайлаков О.В., Соколов С.В., Колмакова А.А.</i> О прогнозировании малоамплитудной нарушенности угольных пластов.....	356
<i>Писаренко М.В., Шаклеин С.В.</i> Поддержание сырьевой базы коксующихся углей для открытого способа добычи.....	366
<i>Рыльникова М.В., Струков К.И., Федотенко Н.А.</i> Влияние фактора распределения ценных компонентов в массиве месторождения «Светлинское» на структуру производственной мощности золотодобывающего предприятия АО «Южуралзолото».....	375
<i>Чебан А.Ю.</i> Обоснование необходимости модернизации карьерных комбайнов для увеличения их эксплуатационной производительности.....	387
<i>Черников А.Д., Еремин Н.А., Замрий А.В., Черных С.П.</i> Инновационные технологии предупреждения поглощения бурового раствора при строительстве скважин.....	399
<i>Шарипзянова Г.Х., Еремеева Ж.В., Саенко А.А.</i> Исследование свойств механосинтезированных диборидов гафния.....	415
<i>Коротков В.А., Яковлев С.С.</i> Получение металлических изделий с рифлями на наружной поверхности пластическим формоизменением.....	425

ГЕОМЕХАНИКА

<i>Волошин В.А., Ермаков А.Ю., Разумов Е.А.</i> Геомеханическое обоснование планирования горных работ на шахте им. В.И. Ленина» с учетом природных сейсמודинамических процессов.....	432
<i>Ермолович Е.А., Аникеев А.А., Ермолович О.В.</i> Упрочнение искусственного массива путем создания в нем несущих элементов	443
<i>Никитина А.М., Борзых Д.М., Риб С.В., Петрова О.А.</i> Сопоставление результатов математического моделирования геомеханических процессов и шахтных измерений в угольном пласте.....	452
<i>Яцыняк С.Д., Ермолович Е.А.</i> Устройство для измерения деформаций на стенках горной выработки.....	466

ЭКОНОМИКА

<i>Богаткина Ю.Г., Сарданашвили О.Н.</i> Технико-экономическая оценка разработки многопластовых месторождений углеводородов (на примере Ольховского месторождения).....	475
<i>Ю.Г. Богаткина, О.Н. Сарданашвили</i> Технико-экономическое обоснование разработки морских месторождений углеводородов (на примере месторождений Азовского моря).....	485
<i>Калиниченко М.П., Степанов А.А., Егорушкина Т.Н., Бороухин Д.С.</i> Создание и развитие «умных производств» для решения экологических проблем (на примере г. Тулы).....	494
<i>Минбалеев А.В., Берестнев М.А., Евсиков К.С.</i> Регулирование использования искусственного интеллекта в добывающей промышленности.....	509

Научное издание

**ИЗВЕСТИЯ
ТУЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

Выпуск 2

Редактор Н.М. Качурин

Компьютерная правка и верстка Г.В. Стась

Учредитель:
ФГБОУ ВО "Тульский государственный университет"
300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Изд. лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97
Подписано в печать 27.06.22 Дата выхода в свет 30.06.22
Формат бумаги 70×100 1/8. Бумага офсетная
Усл. печ. л. 86,1.
Тираж 500 экз. Заказ 113
Цена свободная

Адрес редакции и издателя:
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95

Отпечатано в Издательстве ТулГУ
300012, г. Тула, просп. Ленина, 95