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

Совершенствование конструкции наддолотного калибрующе-эжекционного устройства для повышения эффективности разрушения горных пород в процессе строительства скважин

Д.А.Борейко[1]✉, **Н.Д.Цхадая**[1], **Д.Ю.Сериков**[2], **В.А.Хламов**[3]
[1] *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*
[2] *РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М.Губкина, Москва, Россия*
[3] *Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Республика Коми, Россия*

***Как цитировать эту статью*:** Борейко Д.А., Цхадая Н.Д., Сериков Д.Ю., Хламов В.А. Совершенствование конструкции наддолотного калибрующе-эжекционного устройства для повышения эффективности разрушения горных пород в процессе строительства скважин // Записки Горного института. 2026. Т. 280. С. 27-36. EDN IIPXGM

Аннотация
В статье представлен анализ опыта эксплуатации эжекционных систем в составе буровых породоразрушающих агрегатов. Объектом исследования является наддолотное калибрующе-эжекционное устройство (КЭУ), которое устанавливается в компоновке низа бурильной колонны (КНБК) и служит для повышения эффективности промывки забоя скважины при бурении за счет работы встроенных эжекционных систем, обеспечивающих эффективный подхват струй промывочной жидкости из наддолотной области, обогащенной шламом и разрушенной горной породой. Предметом исследования является процесс истечения промывочной жидкости через эжекционные насадки (сопла) с различной геометрией поперечного сечения, от которой зависит гидродинамика потока жидкости. Конструкция наддолотного КЭУ объединяет в себе две системы – буровой калибратор и эжекционные устройства, что позволяет одновременно сэкономить место в КНБК, улучшить стабилизацию диаметра ствола и повысить качество промывки забоя скважины. В результате имитационного гидродинамического моделирования эжекционных насадок различной геометрии поперечного сечения (круг, треугольник, квадрат, пятиугольник, шестиугольник правильный и шестиугольник специально ориентированный) установлено, что увеличение скорости ядра потока жидкости, истекающей из модели сопла со специально ориентированным шестигранным сечением, составило около 4,5 % по сравнению с базовой конструкцией (круглое сечение) и около 5,5 % относительно остальных моделей. Выявлено, что конструкция насадки со специально ориентированным шестигранным сечением также позволяет направлять поток жидкости под углом к стенке скважины. Результаты дополнительного имитационного моделирования позволили установить зависимость между углом отклонения потока промывочной жидкости от вертикали и величиной управляющего угла специально ориентированного шестигранного сечения эжекционной насадки, которая открывает возможность целенаправленного управления траекторией движения промывочной жидкости путем изменения геометрии сопла. Эту возможность можно использовать для дополнительного кольматирования стенок скважины без существенного отклонения от проектного диаметра ствола.

Ключевые слова
калибрующе-эжекционное устройство; эжекционная система; гидродинамическое моделирование; эжекционное сопло; эффективность бурения; бурение скважины; геометрия сечения; промывка скважины; промывочная жидкость

Финансирование
Отсутствует.

Поступила: 26.02.2026 ***Принята: 28.04.2026*** ***Онлайн: 22.06.2026*** ***Опубликована: 10.09.2026***

Введение

Определяющей характеристикой повышения производительности и долговечности бурового инструмента является создание рациональных конструкций, схем и методов его усиления [1, 2]. Однако при бурении любым типом бурового инструмента независимо от характеристик применяемого бурового оборудования особую значимость имеет промывка забоя. Данный технологический процесс является ключевым фактором успешного проведения работ, поскольку выполняет ряд

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

важнейших функций, в том числе предотвращает возникающие при бурении осложнения (зашламление забоя, износ инструмента, повышение материальных затрат и средств и т.д.) [3-5]. При этом эффективность работы бурового инструмента во многом зависит от успешной работы промывочной системы, которая играет одну из ключевых ролей процесса бурения скважины [6, 7]. В современных условиях, когда наблюдается тенденция к увеличению глубины скважин и усложнению горно-геологических характеристик месторождений, грамотно спроектированная система промывки приобретает первостепенное значение. Она не только повышает эффективность буровых работ, но и существенно минимизирует вероятность возникновения технологических проблем, связанных с формированием застойных зон и ухудшением параметров пласта [8, 9]. Несовершенство конструкций промывочных узлов способствует его повышенному износу [10, 11], влияя тем самым на механическую скорость бурового инструмента, что также приводит к большим отклонениям от проектного диаметра ствола скважины и может негативно сказываться на напряженно-деформированном состоянии колонны бурильных труб.

На процесс бурения влияет множество факторов, среди которых геологические условия (свойства породы и пласта), оборудование и инструмент (долота, промывка), технологические параметры (скорость вращения, расход промывочной жидкости и др.), физико-химические свойства бурового раствора, иные факторы (человеческий фактор, погодные условия и др.) [12, 13]. При невозможности влияния на геологические особенности пласта адаптивность и инновации в конструкциях инструмента для разрушения породы, а также технологиях очистки кольцевого пространства становятся ключевыми для увеличения эффективности бурения скважины [14]. В этом направлении более совершенные конструкции породоразрушающего инструмента и систем очистки призабойной зоны позволяют оптимизировать процессы бурения и очистки, поддерживая продуктивность скважины на высоком уровне.

Ключевым компонентом шарошечного бурового долота является система промывки, работоспособность и долговечность которой критически влияет на эффективность всего процесса разрушения породы при бурении скважины [15, 16]. Классические схемы промывки забоя скважины при бурении шарошечными долотами давно известны и подразделяются на три вида – боковую, центральную и комбинированную [17, 18]. Современные тенденции развития конструкций бурового инструмента направлены на усовершенствование этих систем, дополнительно подчеркивая их значимость для повышения производительности бурения [7, 19, 20]. Существует широкий спектр различных разработок специализированных конструкций для систем очистки шарошечных долот, направленных на увеличение их производительности и оптимизацию системы транспортирования выбуренного шлама в наддолотную область и далее – на устье скважины [21, 22]. Все эти инновации направлены на более эффективное распределение и использование кинетической энергии бурового раствора.

Существующие промывочные системы буровых шарошечных долот характеризуются рядом конструктивных недостатков, которые негативно сказываются на качестве очистки забоя и эффективности удаления бурового шлама из рабочей зоны, влияющей на повышенный износ инструмента. Основными недостатками являются следующие [13, 20, 23]:

• неподходящие конструкции систем промывки для заданных условий бурения и свойств скважины, например неправильное распределение, ориентация или форма сопел, не способствующие эффективному направлению потока бурового раствора;

• превышение рекомендуемой скорости движения промывочной жидкости внутри сопла, что способно привести к эрозионному повреждению промывочных каналов, а также элементов шарошечных долот;

• несовершенство процесса эффективного удаления шлама из области работы шарошек долота в наддолотное кольцевое пространство.

С учетом развития конструкций бурового инструмента и опыта внедрения различных инновационных решений указанные проблемы могут быть решены только за счет комплексного подхода, который включает как оптимизацию работы систем очистки, так и улучшение ее функциональности (например, использование асимметричной схемы промывки, применение принципа эжекции, установка на долотах вихревых камер, использование импульсной очистки и другие способы) [24, 25].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Для уменьшения негативного воздействия экранирующих эффектов, создаваемых высокоскоростными струями в процессе бурения, широко применяются методики, включающие модификации конструкции буровых долот [26, 27]. Эти модификации предусматривают создание отверстий в лапах долот для эффективного удаления бурового шлама из зоны контакта зубьев шарошек с забоем и стенкой скважины. В частности, лапы, расположенные прямо над опорами, оснащаются каналами, соединяющими пространство вблизи контакта долота с забоем и наддолотным кольцевым пространством. Тем не менее, согласно научным исследованиям, такой подход позволяет удалить через указанные отверстия лишь до 11 % шлама [17, 28], что свидетельствует об ограниченной эффективности и, предположительно, вовлечении неудаленного шлама во вторичное перемалывание буровым инструментом.

Таким образом, разработка и совершенствование оборудования для повышения эффективности промывки забоя является актуальной задачей, способствующей повышению эффективности разрушения горных пород в процессе строительства нефтяных и газовых скважин.

Проведенные ранее исследования показали потенциал и эффективность интегрирования эжекционного насоса в буровое калибрующее устройство для повышения эффективности разрушения породы и очистки ствола [29]. Калибрующе-эжекционное устройство (КЭУ) способно одновременно калибровать стенку скважины и создавать эффект эжектирования потоков бурового раствора с выбуренным шламом в наддолотную область. Устройство выполнено в теле стандартного лопастного калибратора модифицированной конструкции, позволяющей перераспределять потоки промывочной жидкости и направлять вверх по межколонному пространству [30] (рис.1).

Наддолотный КЭУ представляет собой полый цилиндрический корпус, оснащенный системой калибрующих лопастей различной длины. Все лопасти армированы твердосплавными элементами, а в коротких лопастях предусмотрены специальные отверстия двух конфигураций (горизонтальные и вертикальные), в которые вмонтированы специальные насадки. Система распределения давления работает благодаря подпорной насадке, которая находится в нижней части внутреннего промывочного канала. Важным параметром является соотношение площадей подпорной насадки и всех эжекционных насадок, что предотвращает недоохлаждение инструмента.

Работа устройства начинается при вращении бурильной колонны с долотом 11. Во время работы вращающиеся шарошки взаимодействуют с забоем, их зубчатое вооружение 15 разрушает породу, а армированные вставки калибратора выравнивают стенки скважины. Процесс очистки забоя осуществляется посредством циркуляции промывочной жидкости через бурильные трубы, внутренние каналы КЭУ 8 и бурового инструмента 10, обеспечивая удаление шлама из зоны разрушения забоя. Проходящая через внутренний канал 8 жидкость встречает сопротивление подпорной насадки 9, что создает необходимое давление внутри системы и направляет поток в эжекционные каналы. Основной механизм работы КЭУ базируется на эффекте Бернулли, когда увеличение скорости потока жидкости приводит к снижению статического давления в зоне смешения. Промывочная жидкость поступает через

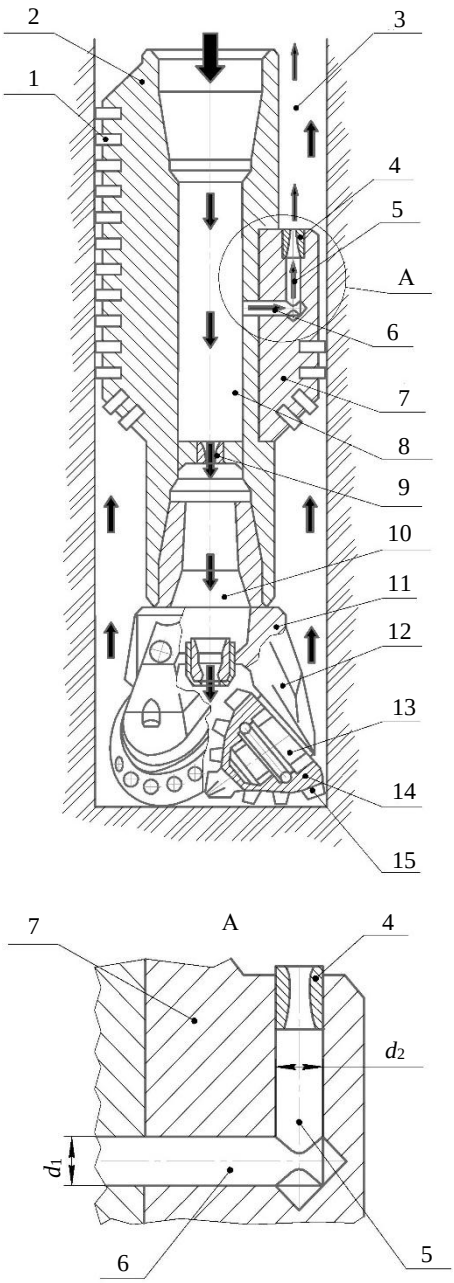


Рис.1. Конструкция и принцип действия бурового калибрующе-эжекционного устройства [30]

1 – армированные износостойкие вставки; 2 – корпус; 3 – эжекционная камера; 4 – эжекционная насадка; 5, 6 – каналы; 7 – эжекционная лопасть; 8 – центральный промывочный канал; 9 – подпорная насадка; 10 – породоразрушающий инструмент; 11 – буровое долото; 12 – лапы; 13 – цапфы; 14 – шарошки; 15 – зубья

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

эжекционную насадку 4 в специально образованную камеру, которая формируется стенками скважины, корпусом калибратора и двумя прилегающими длинными лопастями, являющимися частью корпуса КЭУ. В этой зоне высокоскоростные потоки жидкости из насадок 4 смешиваются с более медленными восходящими потоками, содержащими частицы разрушенной породы и поступающими от забоя через промежутки между лопастями в эжекционную камеру 3. Взаимодействие потоков приводит к образованию интегрированного эжектированного потока, который отличается заметно более высокими показателями скорости и подъемной силы в сравнении с исходным потоком. При этом в призабойной зоне формируется зона пониженного давления, что создает благоприятные условия для эффективного разрушения горной породы. Данный эффект достигается благодаря уменьшению дифференциального давления на забое, что существенно облегчает процесс вскрытия разбуриваемого массива. Эти процессы позволяют снизить вероятность вторичного перемалывания выбуренной породы и интенсивность износа бурового инструмента.

Известно, что увеличение площади контакта струи промывочной жидкости с боковой поверхностью сопла может улучшить процесс выноса шлама на поверхность и повысить производительность работы насадок породоразрушающего инструмента. Это связано с тем, что увеличение контактной площади может улучшить эффективность передачи энергии от струи на выбуриваемую породу за счет увеличения ее скорости. Анализ расчетных данных подтверждает очевидное преимущество сопла шестигранного профиля в процессе формирования промывочной струи. Конструктивная особенность данного типа сопла заключается в том, что оно создает поток жидкости с существенно увеличенной площадью соприкосновения с рабочей средой в призабойной зоне по сравнению с классическими насадками круглого сечения. Подобное решение обеспечивает более качественное взаимодействие между потоком промывочной жидкости и гидравлической средой забоя [9, 28].

Данное конструктивное решение обеспечивает более эффективное вовлечение в циркуляционный процесс значительных объемов забойной гидравлической среды со шламом. Следствием этого становится повышение качества промывки как бурового инструмента, так и всей призабойной зоны в целом. Таким образом, от правильного выбора типа насадок 4 и формы их геометрического сечения зависит плотность истекающей струи и скорость ее потока, определяющие эффективность работы КЭУ.

Методы

Для рационального и обоснованного выбора оптимальной конструкции эжекционных насадок КЭУ в работе предлагается исследование и сравнение сечений различной геометрии (круглое, треугольное, квадратное, пятиугольное, шестиугольное и шестиугольное специально ориентированное) методом имитационного компьютерного моделирование гидродинамики (CFD), который является наиболее точным и апробированным на достаточном количестве подобных прикладных задач [22, 31, 32]. С целью детального изучения этого вопроса были проанализированы конструктивные параметры эжекционных насадок с поперечными сечениями различной геометрической формы: круг, треугольник, квадрат, пятиугольник, правильный шестиугольник и специально ориентированный шестиугольник. Главным исходным условием моделирования является равенство площадей поперечного сечения насадок на входе и выходе, а также равенство высоты и наружного диаметра цилиндра.

Для проведения компьютерного моделирования гидродинамических процессов в CFD-комплексе были заданы следующие исходные параметры системы: рабочий объем 0,017 м^3; дистанция между выходным соплом и границей рабочей зоны 0,4 м; расход жидкости на входе в сопло 0,03 м^3/с; рабочая среда – жидкая фаза с плотностью 1200 кг/м^3; выходное давление моделирования 0,2 МПа.

Расчетная область для моделирования представлена на рис.2, *а*, геометрические формы моделируемых сечений – на рис.2, *б*. Размеры расчетной области соответствуют габаритным размерам эжекционной камеры, образованной стенкой скважины и соседними длинными лопастями корпуса КЭУ. Нижняя плоскость расчетной области совмещена с входным сечением сопла.

Моделировалась затопленная вертикальная струя жидкости плотностью 1200 кг/м^3, истекающей из сопла. В качестве базы для анализа была принята эжекционная насадка с круглым поперечным

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

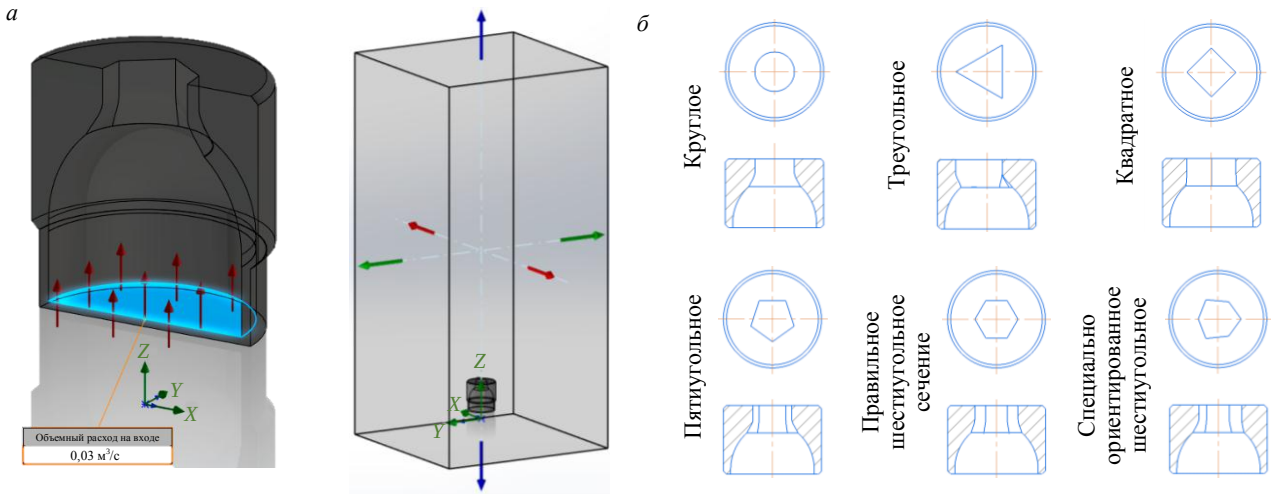


Рис.2. Исходные данные для моделирования течения жидкости через эжекционное сопло:
а – расчетная модель и область моделирования; *б* – формы моделируемых поперечных сечений сопла

сечением, поскольку прототипом эжекционных насадок бурового КЭУ являются гидромониторные насадки бурового породоразрушающего инструмента, что предопределяет собой их дальнейшую взаимозаменяемость.

Важно отметить следующие ограничения модели:

• модель не учитывает эффекты вращения бурильной колонны и связанные с этим динамические нагрузки;

• в модели приняты идеализированные граничные условия;

• не учтены динамические изменения реологических свойств промывочной жидкости в реальном процессе бурения;

• результаты получены для стационарных условий, тогда как реальное бурение характеризуется нестационарностью процесса.

Данные ограничения необходимо учитывать при интерпретации результатов и их практическом применении. Рекомендуется проведение дополнительных исследований для уточнения полученных зависимостей в реальных условиях бурения.

Геометрической особенностью специально ориентированного шестиугольного поперечного сечения является то, что оно выполнено с тремя углами одного размера ($\beta_1 = \beta_2 = \beta_3$) и тремя углами другого, меньшего, размера ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3$) (рис.3). В конструкции бурового КЭУ эжекционная насадка с данным сечением зафиксирована относительно эжекционной лопасти от проворота. Одна из вершин углов меньшего размера ориентирована по направлению к оси КЭУ, а вторая направлена в сторону набегающей грани одной смежной длинной лопасти. Третья из вершин углов меньшего размера направлена в сторону сбегающей грани другой смежной длинной лопасти [30].

Обсуждение результатов

Основными показателями, характеризующими эффективность работы эжекционных насадок, являются скорость и высота ядра потока струи промывочной жидкости, истекающей из сопла. При этом наиболее важным показателем является скорость потока, поскольку именно она влияет на возникновение и интенсивность эффекта эжекции (высасывания) жидкости из области работы бурового инструмента в наддолотную область и дальнейший ее «разгон» вверх по межтрубному пространству, способствуя повышению эффективности процесса промывки [15, 17]. Результаты моделирования потоков жидкости представлены на рис.4 в виде сравнительного анализа скорости и высоты ядра потока между соплами с рассматриваемыми поперечными сечениями.

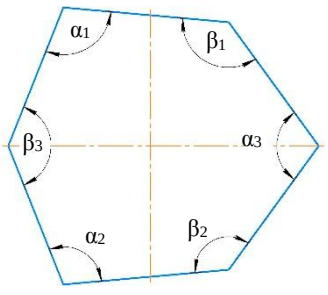


Рис.3. Геометрические параметры специально ориентированного шестиугольного сечения

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

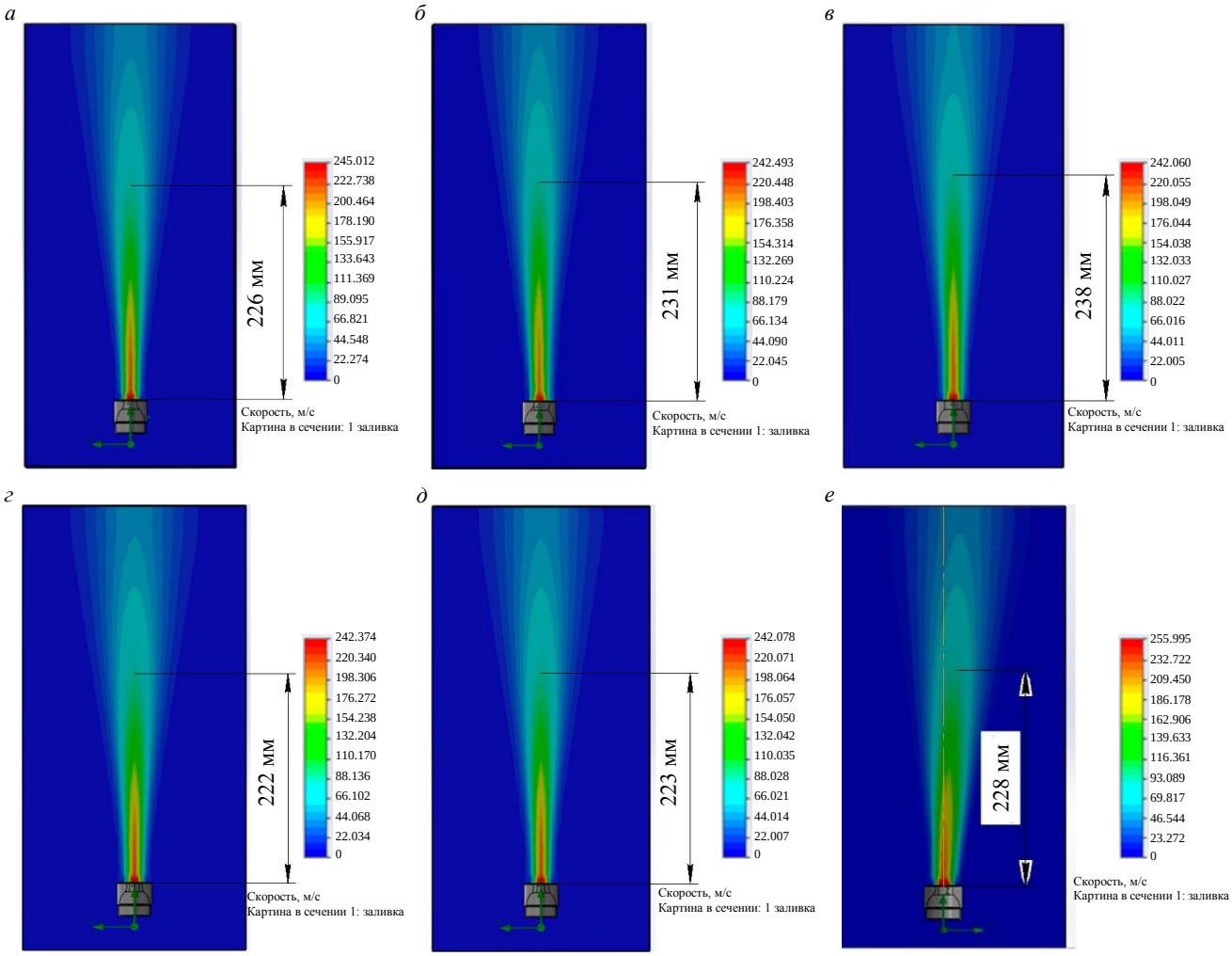


Рис.4. Результаты моделирования потока промывочной жидкости через эжекционные сопла различного поперечного сечения (скорость в конце ядра потока, м/с / максимальная высота основного потока, мм): *а* – круглое (111/226); *б* – треугольное (110/231); *в* – квадратное (110/238); *г* – пятиугольное (110/222); *д* – правильное шестиугольное (110/223); *е* – специально ориентированное шестиугольное (116/228)

Все насадки различного сечения, кроме специально ориентированного шестигранного, имеют одинаковую скорость. Увеличение скорости ядра потока жидкости, истекающей из модели сопла со специально ориентированным шестигранным сечением, составило около 4,5 % по сравнению с базовой конструкцией (круглое сечение) и около 5,5 % относительно остальных моделей. Это обстоятельство способствует повышению скорости интегрального смешанного потока и повышению эффективности удаления выбуренного шлама из зоны работы долота, что будет способствовать повышению его надежности за счет снижения вероятности вторичного перемалывания породы. Таким образом, можно сделать вывод о том, что буровое КЭУ, оснащенное эжекционными соплами со специально ориентированным шестигранным сечением, будет работать более эффективно по сравнению с базовым круглым и другими.

В результате моделирования было установлено, что сопло со специально ориентированным шестиугольным сечением отклонило поток жидкости от вертикали на 2° (рис.4, *е*). При детальном рассмотрении установлено, что данное отклонение произошло в сторону одного из трех углов меньшего размера – α_3, величина которого составила 105°50'. Это побудило дополнительное исследование, для чего были смоделированы насадки с различными углами α_3 (85°, 95°, 115°, 125°) так, чтобы соблюдалось главное исходное условие моделирования – равенство площадей поперечного сечения насадок на входе и выходе. Угол отклонения струи от вертикали обозначен как β. Результаты моделирования потоков жидкости асимметричного шестиугольного сечения с различными углами сечения насадки α_3 представлены на рис.5.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

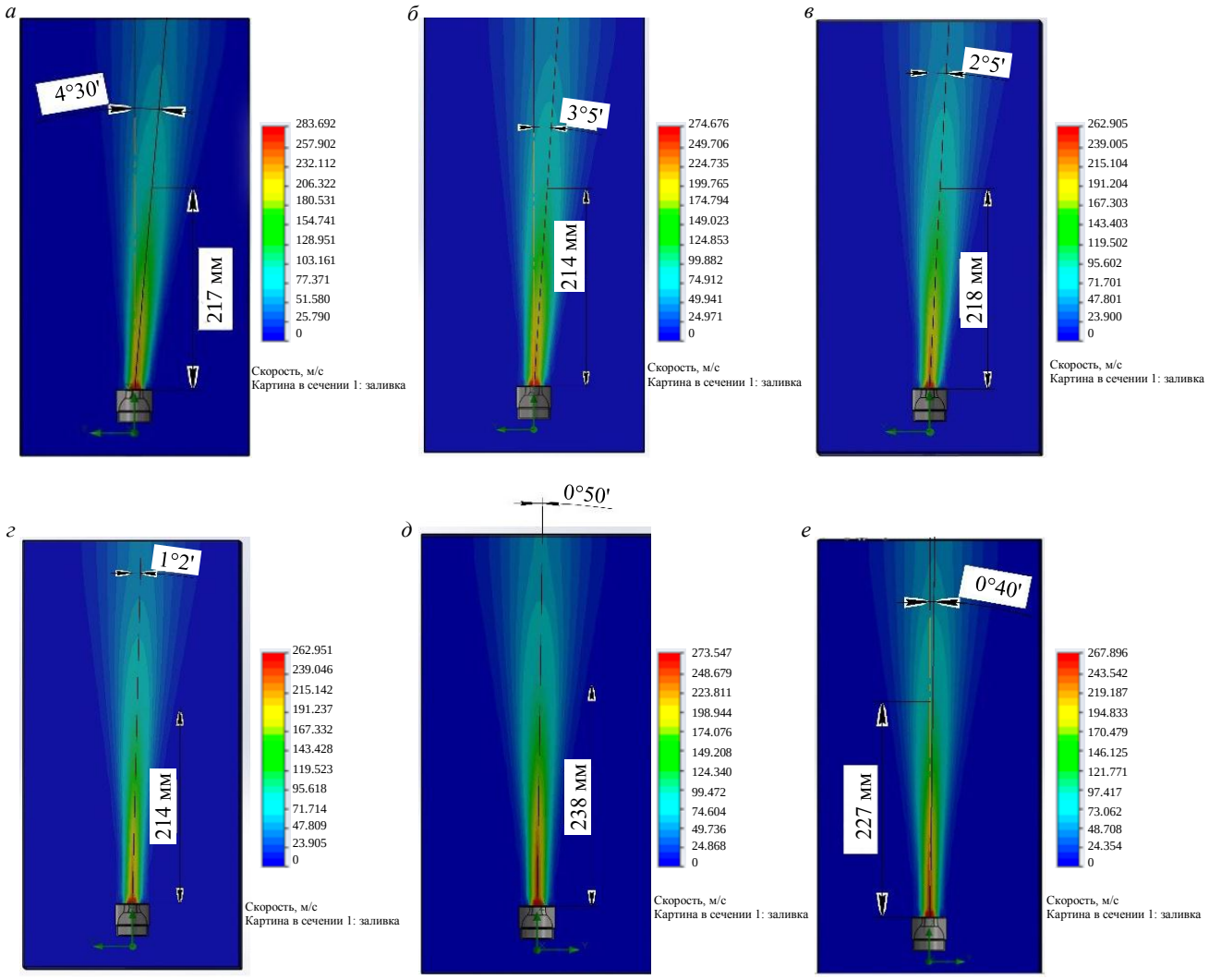


Рис.5. Результаты моделирования потока промывочной жидкости через эжекционное сопло со специально ориентированным шестиугольным сечением при различных углах $\alpha_з$: *а* – 85°; *б* – 95°; *в* – 100°; *г* – 110°; *д* – 115°; *е* – 125°

На основе полученных дополнительных данных построен график зависимости изменения величины угла отклонения от вертикали β потока промывочной жидкости через эжекционное сопло со специально ориентированным шестиугольным сечением от величины угла $\alpha_з$ (рис.6). Установлена

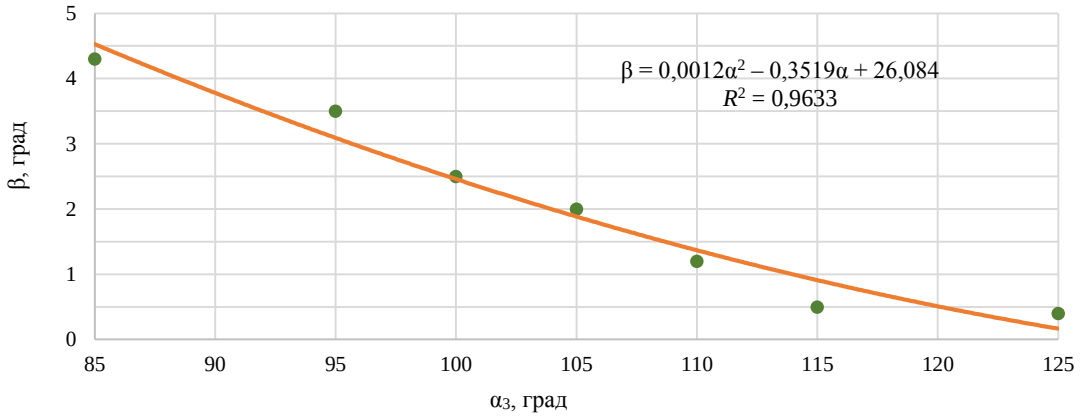


Рис.6. График зависимости изменения величины угла отклонения от вертикали β потока промывочной жидкости от величины управляющего угла $\alpha_з$ специально ориентированного шестигранного сечения эжекционной насадки

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

зависимость между углом отклонения потока промывочной жидкости от вертикали β и величиной управляющего угла α_3 специально ориентированного шестигранного сечения эжекционной насадки: $\beta = 0{,}0012\alpha_3^2 - 0{,}3519\alpha_3 + 26{,}084$. Это свидетельствует о том, что с увеличением угла α_3 возрастает угол отклонения потока β, что подтверждает возможность целенаправленного управления направлением движения промывочной жидкости путем изменения геометрии сопла. Значение коэффициента детерминации $R^2 = 0{,}9633$ свидетельствует о высокой степени достоверности установленной зависимости. Полученный коэффициент детерминации находится в диапазоне, характерном для точных технических измерений, что говорит о высоком уровне достоверности установленной зависимости и возможности ее практического применения.

Физический смысл данного явления можно объяснить следующим образом. При изменении геометрии сопла (через изменение управляющего угла α_3) меняется характер течения жидкости. Это приводит к изменению распределения скоростей в потоке, а также перераспределению давления в системе и возникновению боковых сил, отклоняющих поток. Квадратичная зависимость показывает, что влияние управляющего угла на отклонение потока носит нелинейный характер: при малых значениях α_3 влияние на β относительно слабое, а с увеличением управляющего угла α_3 эффект отклонения усиливается нелинейно. Таким образом, для различных условий бурения можно выделять оптимальные диапазоны углов, где достигается максимальное отклонение потока.

Заключение

На основании проведенных исследований установлено, что увеличение скорости ядра потока промывочной жидкости, истекающей из модели сопла со специально ориентированным шестигранным сечением, составило около 4,5 % по сравнению с базовой конструкцией (круглое сечение) и около 5,5 % относительно остальных моделей. Дополнительно было выявлено, что конструкция насадки со специально ориентированным шестигранным сечением также позволяет направлять поток жидкости под углом к стенке скважины.

Результаты дополнительного имитационного моделирования позволили установить зависимость между углом отклонения потока промывочной жидкости от вертикали и величиной управляющего угла специально ориентированного шестигранного сечения эжекционной насадки: $\beta = 0{,}0012\alpha_3^2 - 0{,}3519\alpha_3 + 26{,}084$. Данная зависимость открывает возможность целенаправленного управления траекторией движения промывочной жидкости путем изменения геометрии сопла, что на практике можно использовать для дополнительного кольматирования стенок скважины без существенного отклонения от проектного диаметра ее ствола. Однако для повышения эффективности этого процесса необходимо дополнительно применять современные инновационные промывочные жидкости, например [33, 34].

В результате проведенного исследования установлены закономерности влияния геометрии эжекционных насадок на гидродинамические характеристики потока промывочной жидкости, а также на возможность определенным образом влиять на траекторию потока, что расширяет научные представления о процессах эжекции в буровом породоразрушающем инструменте.

Полученные результаты создают предпосылки для дальнейших исследований оптимизации конструктивных параметров эжекционных насадок (в том числе гидромониторных насадок буровых долот), изучения влияния новых геометрических параметров на эффективность работы промывочной системы в целом, а также для разработки методики подбора оптимальных параметров для конкретных условий бурения, что в перспективе может иметь существенное значение для развития технологий бурения скважин и использоваться при проектировании современного бурового инструмента для повышения эффективности процесса разрушения горных пород и качества очистки забоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. *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 (62). С. 1681-1694. DOI: 10.21177/1998-4502-2024-16-4-1681-1694

2. *Afanasev A., Simisinov D., Zubov V.* Modeling of gear production in loose-abrasive machining technique // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 19. Part 5. P. 2358-2360. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.07.693

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

3. *Xiaohua Zhu, Keyu Shen, Bo Li.* Investigation: Cutting Transport Mechanism in Inclined Well Section under Pulsed Drilling Fluid Action // Energies. 2021. Vol. 14. Iss. 8. № 2141. DOI: 10.3390/en14082141

4. *Al-Rubaii M., Al-Shargabi M., Al-Shehri D.* A Novel Automated Model for Evaluation of the Efficiency of Hole Cleaning Conditions during Drilling Operations // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. Iss. 11. № 6464. DOI: 10.3390/app13116464

5. *Rastvorova I.I., Dvoynikov V.M.* Analysis of Mathematical Models for Developing a Methodology to Measure Energy and Spatial Characteristics of Axial Impact During Well Drilling // WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. 2025. Vol. 20. P. 130-137. DOI: 10.37394/232011.2025.20.15

6. *Xiaohua Zhu, Keyu Shen, Bo Li, Yanxin Lv.* Cuttings Transport Using Pulsed Drilling Fluid in the Horizontal Section of the Slim-Hole: An Experimental and Numerical Simulation Study // Energies. 2019. Vol. 12. Iss. 20. № 3939. DOI: 10.3390/en12203939

7. *Повалихин А.С., Близнюков В.Ю.* Особенности технологии бурения и подготовки ствола вертикальной скважины к спуску обсадной колонны большого диаметра // Инженер-нефтяник. 2017. № 1. С. 5-12.

8. *Xiaoming Li, Yuyue Fan, Jiahua Li et al.* Research on the Influence of a Cuttings Bed on Drill String Friction Torque in Horizontal Well Sections // Processes. 2022. Vol. 10. Iss. 10. № 2061. DOI: 10.3390/pr10102061

9. *Kunshin A.A., Buslaev G.V., Reich M. et al.* Numerical Simulation of Nonlinear Processes in the «Thruster–Downhole Motor–Bit» System While Extended Reach Well Drilling // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 9. № 3759. DOI: 10.3390/en16093759

10. *Šporin J., Balaško T., Mrvar P. et al.* Change of the Properties of Steel Material of the Roller Cone Bit Due to the Influence of the Drilling Operational Parameters and Rock Properties // Energies. 2020. Vol. 13. Iss. 22. № 5949. DOI: 10.3390/en13225949

11. *Овчинников В.П., Рябуха А.В., Рожкова О.В., Листак М.В.* Причины и виды аварий с породоразрушающим инструментом (на примере скважины № 307 Копанского месторождения) // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2022. № 3. С. 18-22.

12. *Борейко Д.А., Лютоев А.А., Сериков Д.Ю.* Теоретические исследования характера и условий взаимодействия с забоем тыльных и периферийных конусов шарошек бурового долота со смещенными осями вращения // Горные науки и технологии. 2022. Т. 7. № 3. С. 231-239. DOI: 10.17073/2500-0632-2022-3-231-239

13. *Литвиненко В.С., Двойников М.В.* Методика определения параметров режима бурения наклонно прямолинейных участков скважины винтовыми забойными двигателями // Записки Горного института. 2020. Т. 241. С. 105-112. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.105

14. *Третьяк А.Я., Попов В.В., Гроссу А.Н., Борисов К.А.* Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 8. С. 225-230. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-8-0-225-230

15. *Rawal R., Karmakar N.C., Sharma S.K.* Optimization of Fluid Flushing Rate: A Study on Laboratory Drilling Setup // Journal of The Institution of Engineers (India): Series C. 2022. Vol. 103. Iss. 4. P. 985-990. DOI: 10.1007/s40032-022-00809-9

16. *Тошниезов Л.Г., Тошов Ж.Б.* Анализ теоретических и экспериментальных исследований в области процесса сальникообразования при бурении скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 11. С. 139-151. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-11-0-139-151

17. *Богомолов Р.М., Панин Н.М.* Совершенствование элементов систем промывки шарошечного бурового инструмента // Сфера. Нефть и Газ. 2021. № 3 (82). С. 52-57.

18. *Сериков Д.Ю., Блинков О.Г., Панин Н.М., Шигин А.О.* Совершенствование центральной промывки шарошечного бурового инструмента // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2019. № 3 (111). С. 23-27. DOI: 10.33285/1999-6934-2019-3(111)-23-27

19. *Повалихин А.С., Близнюков В.Ю.* Селективное управление бурильной колонной при проводке горизонтальной скважины // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2019. № 5. С. 5-10. DOI: 10.30713/0130-3872-2019-5-5-10

20. *Шигин А.О., Гилев А.В., Шигина А.А.* Напряжения и стойкость шарошечных долот при бурении сложноструктурных массивов горных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. № 4. С. 325-333.

21. *Тунгусов С.А.* Пульсирующий поток и технические средства для его создания при промывке скважин // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2024. Т. 66. № 1. С. 109-115. DOI: 10.32454/0016-7762-2024-66-1-109-115

22. *Kun Bo, Fangzhou Ji, Zhiqiang Zhao et al.* Optimum Design of Large-Diameter Reverse Circulation Drill Bit for Drilling Rescue Wells Using Orthogonal Experimental Method and CFD Simulation // Energies. 2023. Vol. 16. Iss. 9. № 3913. DOI: 10.3390/en16093913

23. *Leusheva E., Alikhanov N., Tabatabaee Moradi S.S.* Experimental Evaluation of Influence of Physico-chemical Properties of Surfactants on Drilling Process in Pay-zones // International Journal of Engineering, Transactions A: Basics. 2025. Vol. 38. Iss. 4. P. 819-829. DOI: 10.5829/ije.2025.38.04a.13

24. *Xinda Qi, Weishan Chen, Yingxiang Liu et al.* A Novel Well Drill Assisted with High-Frequency Vibration Using the Bending Mode // Sensors. 2018. Vol. 18. Iss. 4. № 1167. DOI: 10.3390/s18041167

25. *Jalakani R., Tabatabaee Moradi S.S., Morenov V.* Reliability Analysis of a Drilling Bit Penetration Model in Oil and Gas Wells: A Case Study // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2024. Vol. 37. Iss. 11. P. 2213-2222. DOI: 10.5829/ije.2024.37.11b.08

26. *Еловых П.Ф., Нескоромных В.В., Еловых В.Ф.* Определение коэффициента боковой фрезерующей способности отклоняющей системы при бурении наклонно-направленного ствола скважины // Инженер-нефтяник. 2018. № 1. С. 11-14.

27. *Джураев Р.У., Меркулов М.В., Хатамова Д.Н., Асанов А.Т.* Разработка технических решений по предотвращению образования шламового режима на забое скважины // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2025. № 7. С. 102-114. DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_102

28. *Шигин А.О., Борейко Д.А., Цхадая Н.Д., Сериков Д.Ю.* Сравнительный анализ эффективности работы шарошечных буровых долот // SOCAR Proceedings. 2021. № S2. 7 с. DOI: 10.5510/OGP2021SI200536

29. *Сериков Д.Ю., Мягков К.А., Васильев А.А.* Совершенствование конструкции наддолотного прямолопастного калибратора-эжектора // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2019. № 10. С. 21-26. DOI: 10.30713/0130-3872-2019-10-21-26

30. *Сериков Д.Ю., Борейко Д.А., Мурадов А.В.* Патент № 2799295 РФ. Калибратор скважинный. Опубл. 04.07.2023. Бюл. № 19.

31. *Buslaev G.V., Konoplyannikov A.V.* Mathematical Modeling of a Hydro-mechanical System with a Positive Displacement Motor and Hydraulic Thruster to Optimize the Drilling Process for Extended-reach Drilling Wells // International Journal of Engineering. 2026. Vol. 39. Iss. 5. P. 1077-1087. DOI: 10.5829/ije.2026.39.05b.03

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

32. *Ганиев Р.И., Дебоер Л., Аглиуллин А.Х., Исмаков Р.А.* Самоактивируемый циркуляционный переводник CIRCUL+: моделирование, стендовая валидация и полевые испытания // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. 2025. № 4. С. 31-39.

33. *Литвиненко В.С., Николаев Н.И.* Технологические жидкости для повышения эффективности строительства и эксплуатации нефтяных и газовых скважин // Записки Горного института. 2011. Т. 194. С. 84-90.

34. *Шишов А.М., Уляшева Н.М.* О возможности регулирования формированием призабойной зоны пласта за счет управления составом бурового раствора // Инженер-нефтяник. 2023. № 4. С. 67-71.

***Авторы*: Дмитрий Андреевич Борейко,** *канд. техн. наук, доцент* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), Boreyko_DA@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0002-0248-4526, **Николай Денисович Цхадая,** *д-р техн. наук, специальный представитель ректора* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*), https://orcid.org/0000-0003-2332-1117, **Дмитрий Юрьевич Сериков,** *д-р техн. наук, профессор* (*РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М.Губкина, Москва, Россия*), https://orcid.org/0000-0003-3256-580X, **Вячеслав Александрович Хламов,** *ассистент* (*Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Республика Коми, Россия*), https://orcid.org/0009-0003-1950-652X.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0