

УДК 504.61:532.542: 536.252

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БУРОВОГО РАСТВОРА, ИНТЕНСИФИЦИРУЮЩИХ ТРАНСПОРТ И ОЧИСТКУ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН ОТ ШЛАМОВ

Харламов Сергей Николаевич¹,
kharsn@mail.ru

Джанхорбани Мехран¹,
mehran.janghorbani@gmail.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования связана с практической необходимостью эффективной очистки скважин в технологиях современного бурения их протяженных горизонтальных участков, в которых важно контролировать динамическое давление, весьма чувствительное к изменениям реологических свойств буровых растворов, описываемых нетривиальными деформационными процессами в вязкопластических системах. В большинстве своем это жидкости типа Гершеля–Балкли с трехконтантными параметрами, каждый из которых способен существенно влиять на перепад поля давления, способность раствора выносить шлам через специфическую геометрию эксцентричного межтрубного пространства горизонтальных скважин. Изучение комплексного влияния параметров реологической модели ценно и актуально для оптимизации процесса очистки, предотвращения аварийных режимов функционирования скважин из-за опасности чрезмерного увеличения перепада давления в рабочих узлах оборудования.

Цель: определение степени влияния изменений параметров модели Гершеля–Балкли на перепад поля давления; выяснение гидродинамических особенностей, сопровождающих внутреннее течение реологически сложной среды; выдача практических рекомендаций по интенсификации очистки и выносу шлама из горизонтальных скважин при минимальных значениях перепада давления, используя оптимальную комбинацию диапазона изменений реологических свойств бурового раствора.

Объект исследования представляет собой скважину с десятиметровой горизонтальной эксцентричной секцией, в которой течение осуществляется в условиях, реально близких к фактическим параметрам бурения (*in situ*).

Методы исследования базируются на комплексном физико-математическом и компьютерном моделировании процессов в механике гомогенных и гетерогенных сплошных сред, широко апробированных на классе внутренних реологически сложных течений, а также успешно прошедшие валидацию и верификацию результатов в соответствующих условиях и близких к режимам течений, тепло- и массопереноса, выполненных другими авторами по анализу технологических процессов бурения и очистки скважин.

Результаты. Выполнено численное моделирование гидродинамики ламинарного дисперсного потока смеси неньютоновской капельной жидкости с твердыми частицами в кольцевой эксцентричной трубе. В рамках реального процесса бурения с характерными условиями вязкостно-инерционно-гравитационного несжимаемого изотермического течения вязкопластической среды с частицами песка сферической формы проведен детальный параметрический анализ пространственных эффектов, определяющих интенсивность массопереноса из-за изменения реофизических, геометрических и гидродинамических свойств течения и размеров скважины. Исследованы процессы, определяющие и повышающие эффективность очистки, посредством анализа факта: увеличения количества частиц, покинувших геометрию за характерное гидродинамическое время процесса; контроля механизмов переноса импульса и массы в смеси, а также управления увеличением перепада давления. Численное моделирование соответствовало сценариям течения смеси с разными параметрами геометрии (размеров длин, диаметров и эксцентricности труб) и бурового раствора (неньютоновской реологии). Установлено, что полная очистка скважины при использовании растворов типа Гершеля–Балкли во режиме бурения (*in situ*) в ламинарном режиме невозможна. В практику прикладных исследований предложены рекомендации путей эффективной очистки за счет коррекции реофизических свойств раствора. Показано, что самым эффективным методом улучшения очистки является метод контроля эксцентricности межтрубного пространства, а также метод управления геометрическим параметром, представляющим собой отношение между диаметрами труб. Практические рекомендации сводятся к необходимости контроля эксцентricности в диапазоне $\epsilon < 15\%$. Определено, что из параметров модели Гершеля–Балкли индекс потока является важнейшим с точки зрения управления очисткой скважины. С его помощью создаётся «конвейерная лента» высокой вязкости, которая способна быстро транспортировать частицы шлама через геометрию.

Ключевые слова:

Скважина, бурение, моделирование, гидродинамика, реология, вязкопластическая смесь, жидкость Гершеля–Балкли, кольцевые потоки, транспорт, очистка.

Введение

Хорошо известно (например, [1–7]), что комплексное физико-математическое, численное и экспериментальное моделирование технологического процесса очистки скважин с произвольной ориентацией их ствола представляет одну из ключевых прикладных проблем современного бурения. Применительно

к анализу горизонтальных участков скважин прогноз процессов переноса импульса, массы, тепла при неустановившихся устойчивых и переходных режимах течений вязких сред осложняется необходимостью детального контроля за изменениями гидродинамического давления, поля скорости, диффузионной структуры и фазового состава реологически сложной смеси

в межтрубном пространстве скважины со специальными узлами ее технологического оборудования (буровой трубы и ее соединений) [7] в рамках подходов, методов и алгоритмов CFD (Computational Fluid Dynamics), способных корректно описывать особенности гидродинамики, массо- и теплопереноса в особых зонах течения в эксцентричных трубах. Следует учитывать, что большинство буровых растворов представляют собой неньютоновские вязкопластические среды с формулировкой модели типа Гершеля–Балкли, где каждый из ее замыкающих параметров способен влиять на специфику течения смеси и изменять локальные и интегральные свойства течения смеси. Эволюция поля скорости по всей длине скважины сопровождается эффектами, определяющими $\text{grad}p$ и эффективность выноса шлама из донной части межтрубного пространства. Их анализ способен установить закономерности транспорта шлама в неустановившемся течении и оптимизировать процесс очистки горизонтальных скважин без дополнительных нагрузок на рабочие органы технологического оборудования из-за возможного повышения перепада давления. Следует учитывать, что последнее может привести к серьезным дополнительным проблемам не только при разработке месторождений, но и при эксплуатации бурового оборудования. Для таких условий *актуально и практически ценно* в рамках вычислительной гидродинамики (CFD) осуществлять мониторинг и оптимизацию процессов бурения путем разработок эффективных математических моделей течения гетерогенных сред в трубах; валидации методов их расчета; верификации численных результатов картин изменений многомерных локальных и интегральных свойств потока, особенностей течения в зонах седиментации частиц в сравнении с соответствующими экспериментальными данными. Поэтому *целью* исследования является в рамках CFD: *определение* степени влияния изменений параметров модели Гершеля–Балкли на перепад поля давления; *выяснение* гидродинамических особенностей, сопровождающих внутреннее течение реологически сложной среды; *выдача* практических рекомендаций по интенсификации очистки и выносу шлама из горизонтальных скважин при минимальных значениях перепада давления, используя оптимальную комбинацию диапазона изменений реологических свойств бурового раствора.

Краткий библиографический анализ проблемы

Изучение гидродинамики гетерогенной вязкой смеси в протяженном межтрубном эксцентричном цилиндрическом пространстве с постоянным поперечным сечением имеет долгую историю. Многие исследователи, начиная с Х. Бильгесу и соавторов [8], ставили перед собой задачу детального анализа гидродинамических особенностей транспорта шлама в рамках континуального метода (эйлеровского подхода) и выяснения влияния возмущений входящего потока, изменений геометрической конфигурации пространства на диффузионную структуру примеси (продукты бурения). Например, С. Хан и соавторы [9]

и С. Сун и соавторы [10] изучали эффект вращения внутренней трубы вдоль своей собственной оси. Р. Руки и соавторы [11] применили подход и идеи [8–10] для промывочных жидкостей на основе пены, Т. Офей и соавторы [12] изучили влияние разных параметров на процесс очистки. М. Камяб и соавторы [13] смоделировали данный процесс в условиях бурения с колонной гибких труб. С. Сайиндла и соавторы [14] сравнили эффективность очистки при использовании буровых растворов на основании воды и углекислого газа, а О. Хейдари и соавторы [15], в отличие от других исследователей, использовавших в прогнозе процессов молярного переноса импульса модели турбулентности типа $k-\epsilon$, $k-\omega$, применил более гибкие модели второго порядка для напряжений Рейнольдса [16–18] с целью точного описания изменений неоднородной анизотропной структуры смеси. Б. Панг и соавторы [19] использовали реологическую модель Гершеля–Балкли для учета изменений неньютоновских свойств бурового раствора, способных существенно влиять на развитие течения вязкой смеси по трубам.

Как показывает анализ [3, 4, 7], эйлеровское приближение достаточно апробировано на классе внутренних дисперсных систем в достаточно широких диапазонах изменений динамических условий. При этом в описании процессов переноса твердых частиц распространены модели, основанные на идеях кинетической теории гранулярного течения. Так, в практике прикладных расчетов гидродинамики сдвиговых потоков выделяются модели Гидаспоу [20] и Сиамлал-Обриен [21]. Однако при построении в рамках эйлеровского подхода численного решения задачи о течении континуальной смеси следует учитывать, что в таких допущениях оперативный прогноз гидродинамических и диффузионных эффектов в среде требует значительных вычислительных затрат. Потребность уяснить особенности седиментации частиц шлама в области межтрубного пространства заставила ряд исследователей обратиться в лагранжевскому подходу, отслеживающему местоположение, траектории и динамику миграции твердых частиц. Стоит иметь в виду, что оба подхода при численной реализации модели требуют большой оперативной памяти и это существенный недостаток на пути внедрения инженерных методик в практику, особенно при моделировании процесса с большим количеством частиц. Вместе с этим лагранжевый метод даёт более полную и детальную картину процесса очистки скважин, и в условиях моделирования течения смеси с ограниченным числом частиц можно быстро получить информацию, полезную для инженерных целей, без обращения к аппарату статистического метода и полужемпирических кинетических моделей. Отметим, что одним из первых идей лагранжевого подхода и технологию построения численного решения в рамках полных уравнений законов сохранения массы, импульса для реологически сложной гетерогенной смеси применил У. Мме и соавторы [22]. Он также исследовал влияние изменений геометрической формы частиц на эффективность их транспортировки по

стволу скважины. Эти исследования были продолжены Е. Епелл и соавторами [23], которые установили достаточно близкое соответствие эйлерово-эйлерова (ЭЭ) и эйлеро-лагранжева (ЭЛ) подходов в прогнозах локальных и интегральных свойств течения смеси. С. Акшик и соавторы [24] также использовали ЭЭ, ЭЛ подходы в моделировании гидродинамики течения газожидкостной смеси с твердыми частицами и установили, что модели и методы CFD весьма надежны при расчетах нетривиальных эффектов и нелинейных механизмов процессов переноса в смеси. Выполненные сравнения с экспериментальными данными изменений поля скорости показали их удовлетворительное соответствие, например, в пределах 1...12 % по перепаду давления, накопления на стенках концентрации и роста пласта шлама. В целом данные библиографического анализа позволяют утверждать, что аппарат комплексного исследования гидродинамической очистки горизонтальных скважин в рамках подходов CFD весьма надежен при использовании современных статистических моделей турбулентности второго порядка RANS метода [1–5, 7, 15–18, 25].

Математическое моделирование

Физическая модель и конфигурация задачи. Геометрическую конфигурацию области течения буровой смеси схематично удобно представить в виде эксцентричного кольцевого канала протяженной длины, создаваемого двумя цилиндрическими трубами с горизонтальным участком и характерной площадью межтрубного пространства, варьируемого в зависимости от изменения эксцентриситета $e=2b/(D-d)$, где $D=2(R_0+\delta)$ – диаметр внешней трубы с толщиной стенки δ , $d=2R_1$ – диаметр внутренней (бурильной) трубы, $b=O_1-O_0$ – смещение центров труб друг относительно друга. Предполагается, что стенка внутреннего цилиндра (бурильной) трубы неподвижна для формирования строго прямого течения смеси. Допускается, что двухфазный поток капельной реологически сложной вязкой жидкости с частицами шлама входит внутрь кольцевого пространства в области входа в горизонтальный участок с сохранением условий непрерывности движения смеси в области выхода. В данных условиях прямого внутреннего течения вязкопластической жидкости в компонентах тензора скоростей деформаций преобладает изменение осевой компоненты вектора скорости, и эта особенность учитывается в формулировке вязких эффектов в смеси. На стенках скважины выполняются условия прилипания для всех динамических осредненных и пульсационных параметров жидкости. Для описания процессов движения частиц твердой фазы при взаимодействии со стенками принимаются условия непротекания и отсутствия пульсаций их скоростей. Предполагается, что течение смеси изотермическое по всей длине скважины. Кроме того, геометрические параметры, реологические постоянные и эксплуатационные характеристики процесса транспорта шлама соответствуют значениям реального режима бурения и функционирования оборудования. Гидродинамика и массообмен смеси при взаимодействии со стенками

скважины описывается системой определяющих уравнений, представляющих собой законы сохранения массы, импульса для стационарных несжимаемых и развивающихся, ламинарных и турбулентных, устойчивых пространственных потоков в поле действия внешних сил (тяжести). Динамика дискретной фазы (частиц песка) описывается уравнениями закона движения Ньютона в рамках эйлерово-эйлерова и эйлеро-лагранжева подходов. Построение численного решения уравнений выполнено в рамках CFD по методологии и при допущениях к физической модели, подробно изложенных, например, в [7], следуя которым отметим, что кольцевое пространство проточной области отличается асимметричностью, существенной «узкостью» под бурильной трубой, препятствующей транспорту частиц песка через кольцевое пространство. Реология бурового раствора отличается вязкопластическими эффектами, описывается моделью эффективной вязкости Гершеля–Балкли. В таких системах переменность физических свойств жидкости существенно влияет на интенсивность очистки скважин. Допускается, что слой осевших частиц имеет толщину много меньшую ширины кольцевой области и в своей верхней части поперечного сечения не оказывает влияния на движение гетерогенной среды. Твердые частицы шлама (песка) химически инертны, имеют сферическую форму диаметра d . Принимается, что доля объема, занимаемого дисперсной твердой фазой, имеет значения $\alpha_p < O(10^1)$. Соударениями частиц пренебрегается. Плотность материала частиц значительно превышает плотность несущей (жидкой капельной) среды. Также предполагается, что режим изотермического несжимаемого течения смеси вязкостно-инерционный и осуществляется в условиях развития по стволу скважины.

Определяющие уравнения. Анализ течения смеси вязкой несжимаемой жидкости с твердыми частицами сферической формы в скважине в рамках эйлерово-эйлеровского гидродинамического подхода с использованием CFD проводится при допущении, что жидкая и твердая фазы представляют собой взаимодействующие и взаимопроникающие континуумы, для которых определены полные дифференциальные уравнения законов сохранения массы и импульса, описывающих пространственные ламинарные и турбулентные течения двухфазных смесей в поле действия силы тяжести. Причем моделирование турбулентных течений выполнено с привлечением идей RANS-подхода с осреднением определяющих уравнений по Рейнольдсу и их замыканий в рамках современных статистических моделей к-теории турбулентности, а также многопараметрических моделей с транспортными уравнениями второго порядка для одноточечных корреляций пульсаций вектора скорости и изменений локальных свойств вихрей, с учетом переменности реологических свойств смеси при конкретных краевых условиях. Детали моделирования подробно изложены, например, в [1–4, 7, 16–18]. Сама система определяющих уравнений законов сохранения массы (1), импульса (2)–(4) в компактной формулировке, согласно [26–28], имеет вид:

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^N (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}), \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = \\ = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau}}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \\ + \sum_{p=1}^N (K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) + \\ + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{VM,q}), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\overline{\overline{\tau}}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q (\zeta_q - \frac{2}{3} \mu_q) \nabla \cdot \vec{v}_q \overline{\overline{I}}, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = \\ = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \overline{\overline{\tau}}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \\ + \sum_{l=1}^N (K_{ls} (\vec{v}_l - \vec{v}_s) + \dot{m}_{ls} \vec{v}_{ls} - \dot{m}_{sl} \vec{v}_{sl}) + \\ + (\vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{VM,s}). \end{aligned} \quad (4)$$

В записи уравнений (1)–(4) принято: «индексы» q и s характеризуют параметры жидкой и твердой фаз соответственно; ρ – плотность; \vec{v} – вектор скорости; \dot{m}_{qp} – интенсивность перехода массы из p -ой в q -ю фазу (в нашем случае отсутствует перенос из жидкой в твердую фазу, поэтому $\dot{m}_{pq} = \dot{m}_{qp} = 0$); $\overline{\overline{\tau}}_q$ – тензор напряжений q -ой фазы; μ_q , ζ_q – коэффициенты динамической (сдвиговой) и объемной вязкостей q -ой фазы; p – давление, K_{pq} – коэффициент межфазного обмена импульсом; \vec{F}_s , $\vec{F}_{lift,s}$, $\vec{F}_{VM,s}$ определяют соответственно внешнюю силу, подъемную силу, дополнительную силу переноса массы частиц твердой фазы; p – относится к давлению, используемому всеми фазами; p_s – давление частиц твердой фазы; $K_{ls} = K_{sl}$ – коэффициент обмена импульсом между жидкой и твердой фазами. Заметим, что при моделировании очистки скважин подъемной силой (которая мала по сравнению с силой сопротивления) можно пренебречь. Видно, что определяющее влияние на динамику оказывают: вязкие эффекты, силы градиента давления, тяжести, сопротивления межфазных процессов.

Реология неньютоновской среды. Хорошо известно [29–31], что в отличие от ньютоновских систем деформационные эффекты в реологически сложных средах существенно нелинейны. Так, для описания вязко-пластических систем и замыкания (3) с коэффициентом эффективной вязкости $\mu_{eff} = \mu_q$ общего вида (5)

$$\mu_{eff} = \mu_q(\overline{\overline{\tau}}, \overline{\overline{S}}, T, p), \quad (5)$$

привлекают модели:

- бингамовской жидкости (6)

$$\mu_{eff} = \mu_f = (\tau_0 + \kappa \dot{\Gamma}) \dot{\Gamma}^{-1}, \quad \dot{\Gamma} = (0,5 \overline{\overline{S}} \cdot \overline{\overline{S}})^{0,5}, \quad (6)$$

- жидкости типа Гершеля–Балкли (7):

$$\overline{\overline{\tau}} = \tau_0 + \kappa \overline{\overline{S}}^n, \quad \mu_{eff} = \mu_f = (\tau_0 + \kappa \dot{\Gamma}^n) \dot{\Gamma}^{-1}. \quad (7)$$

Здесь принято: $\overline{\overline{\tau}}, \overline{\overline{S}}$ – тензоры напряжений и скоростей деформаций жидкой фазы соответственно, [τ], [Pa]; [S], [c⁻¹]; τ_0 – предел текучести, [Pa]; k – индекс консистенции, [Па•сⁿ]; $\dot{\Gamma} = \frac{\partial u}{\partial y}$ – характерное для те-

кущего потока в осевом направлении значение скорости сдвига, [c⁻¹]; n – индекс потока, [–]. Отметим, что математическая модель, включающая уравнения (1)–(7), используется для прогноза гидродинамических и диффузионных стационарных развивающихся процессов и эффектов, сопровождающих транспорт шлама в изотермических ламинарных и турбулентных течениях по всей длине скважины с горизонтальной секцией.

Сведения о моделировании турбулентности. Проблемы замыканий определяющих уравнений (1)–(4) для описания турбулентности в гомогенных и гетерогенных средах подробно проанализированы, например, в [7, 16–18]. Отмечалось, что весьма надежными в прогнозах взаимосвязанных внутри- и межфазных процессов переносов тепла, массы и импульса в низкорейнольдсовых зонах ньютоновских потоков выступают двухпараметрические модели RANS-метода, которые составляют эффективную опорную базу с локальными свойствами турбулентности для моделей переноса рейнольдсовых напряжений RSS, такими как SST- $k\omega$ [32], $-kL$ [33, 34], $-k\epsilon$ [35], $-k\tau$ [36]. Все это в расчетах сложных сдвиговых дисперсных потоков позволяет обоснованно обратиться к SST- $k\omega$ -модели. Однако при исследовании реологически сложных систем все еще требуется кропотливая работа по построению и апробации моделей RANS-метода для данных условий [1–5]. Например, Б. Гуо и Г. Лио [37], Р. Стайнсби [38] предлагают нетривиальный подход определения числа Рейнольдса и его критического значения, а также метод, основанный на использовании значений напряжения сдвига на стенках, которое в общем случае неизвестно. Полезной в практике инженерных расчетов смесей выступает формулировка Re, подобно, К. Медленер и соавторам [39], Р. Акари и Н. Фернандес [40] в виде (8):

$$Re = \frac{\rho U_0 D}{\kappa (U_0 / D)^{n-1}}. \quad (8)$$

Последнее позволяет ввести обобщения в постановку задачи, формулировку замыкающих соотношений при расчетах транспорта шлама при эйлерово-лагранжевом подходе в рамках ПО ANSYS CFD-DEM по уравнениям для частиц вида (9) [3, 4, 7, 41]:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u_f - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} + F_x. \quad (9)$$

Здесь индекс « p » относится к частицам; F_D – сила гидродинамического сопротивления и F_x – другие возможные внешние силы, например, подъемная сила Саффмена, вращения частиц Магнуса. Замыкания других параметров можно представить в виде (10), подобно [41]:

$$F_D = \frac{3\mu c_d \text{Re}}{4\rho_p d_p^2}, \quad c_d = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}} + \frac{a_3}{\text{Re}^2},$$

$$\text{Re} = \frac{\rho_f d_p |\vec{v}_p - \vec{v}_f|}{\mu_f}. \quad (10)$$

Таким образом, учитывая реофизические особенности течения, допущения, что объемная концентрация твердой фазы является разбавленной (до 10 %), моделирование параметров турбулентности выполняется лишь для жидкой капельной фазы смеси по двухпараметрическим $k-\omega$, L моделям турбулентности, а также по RSS- ω модели [1–4, 7].

Граничные условия. Физическая область течения определяется заданием формы и границ пространства (линейных размеров внешней и внутренней труб, эксцентриситеты). Для динамической части задачи условия состоят в задании на входе в скважину средней скорости потока. Формулировка *теплофизических свойств* связана с заданием: плотности несущей (капельной, дисперсионной) среды и материала частиц (твердой, дисперсной фазы); объемной доли твердой фазы; динамической вязкости и теплопроводности дисперсионной фазы (жидкости). Процессы межфазного взаимодействия определяются заданием силы сопротивления F_D . Далее, согласно [1–4, 42, 43], принимается, что при малых объемных долях и отсутствии эффекта начального вращения дисперсной фазы силами Магнусена, Саффмена, плавучести пренебрегаем. Начальными и граничными условиями для системы уравнений (1)–(10) выступают следующие соотношения со значениями параметров, отвечающих реальному процессу бурения. При этом в начальный момент времени рабочая смесь описывается параметрами, соответствующими первоначальному (характерному) состоянию ее структуры и условиям входа в скважину. Условия на границах являются типичными для внутренних сложных сдвиговых потоков. В частности, выполняются условия прилипания на стенках межтрубного пространства для всех осредненных и пульсационных динамических величин капельной жидкости. Принимаем, что во входном сечении распределения фаз находятся в равновесии. Причем в режимах ламинарного/турбулентного течения поток жидкой фазы может быть развитым (с продольной составляющей вектора скорости в виде профиля, описываемого законом Пуазейля (ламинарный случай), Прандтля–Кармана (закон «1/7», турбулентный случай)). А также возможно течение с однородным распределением фаз по сечению. На выходе – «мягкие» граничные условия для всех искомых параметров. Численное решение задачи строится с учетом деталей, особенностей, проблем построения неявных устойчивых конечно-разностных схем со вторым порядком точности, применения алгоритмов SIMPLE/PISO для определения поля давления, линеаризации СЛАУ с учетом переменности рео- и теплофизических свойств, с учетом внутри- и межфазных взаимодействий в фазах, выбора модели для корректного описания процессов молярного переноса в узких низкорейнольдсовых зонах межтрубного пространства

скважины. Детали итерационного процесса, замечания по отработке блоков построения численного решения динамической и диффузионной частей задачи можно найти, например, в [1–4, 7, 44].

Режимные параметры и условия технологического процесса

Расчеты проводились в геометрической конфигурации кольцевой трубы, представленной на рис. 1, при следующих значениях основных параметров, описывающих гидродинамическую очистку скважин с горизонтальным участком. При длине 10...12 м внутренняя и внешняя трубы имеют диаметры $d=12$ см и $D=20$ см. Заметим, что указанные размеры соответствуют широко распространенным значениям долот и бурильных труб в процессах бурения, как в России, так и за рубежом. Межтрубное пространство скважины эксцентрично с $e=75\%$, что характерно для горизонтальных секций. Данные условия адекватны состоянию, при котором бурильная труба лежит на своих муфтах на нижней стенке скважины.

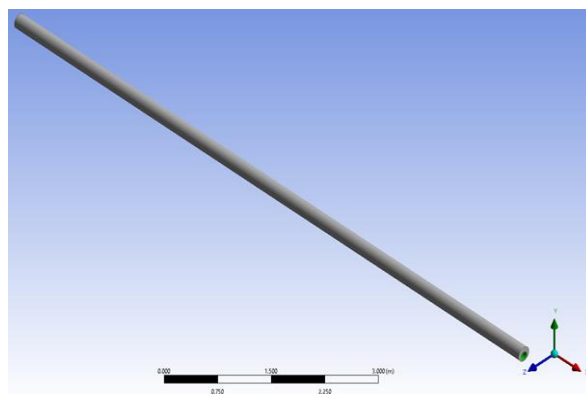


Рис. 1. Схема расчетного участка скважины
 Fig. 1. Scheme of well calculated section

При построении численного решения особое внимание уделяется достаточности размера сетки, числа узлов, формы, структуры ячеек для корректного прогноза деталей течений в особых зонах конфигурации. Следует учитывать, что разностная сетка должна быть достаточно «тонкой», чтобы не пропускать важные детали развития течений. Однако чрезмерное увеличение разрешимости сетки ведет к неоправданному росту объема вычислений тонкости. В таких условиях естественным является решение вопроса об оптимальности сетки с точки зрения установления разумного соответствия между данными «цена–качество–точность» конкретного прогноза процесса. В табл. 1 приведены сведения о достаточности узлов, оптимальности сетки в описании деталей очистки скважины в указанных значениях геометрической и гидродинамической конфигурациях задачи в оценках изменений перепада поля давления (с точностью до 2 % в узлах сетки) во внутренних стационарных развивающихся изотермических потоках. Расчеты показывают, что приемлемой следует считать сетку H_4 , вид которой представлен на рис. 2.

Таблица 1. Влияние вложенности сеток на точность определения Δp (Па)

Table 1. Influence of mesh resolution on the accuracy of determining Δp (Pa)

Общий размер разностной сетки Total size of mesh elements	Число узлов/Number of nodes			Перепад давления, Δp (Па) Pressure drop Δp (Pa)
	по оси X in X direction	по оси Z in Z direction	по оси Y in Y direction	
$H_1=12900$	100	40	30	11572
$H_2=258000$	200	40	30	11257
$H_3=387000$	300	40	30	11231
$H_4=344000$	200	40	40	12013
$H_5=408000$	200	50	40	11978
$H_6=430000$	200	40	50	12055

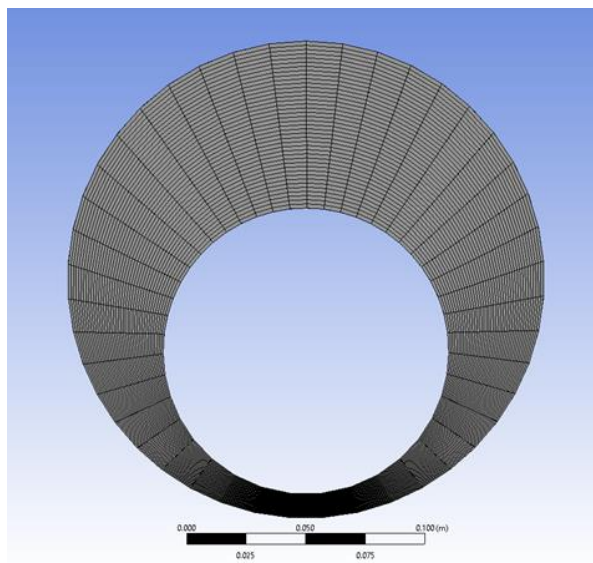


Рис. 2. Структурированная сетка (H_4) и поперечное сечение кольцевой трубы

Fig. 2. Structured grid (H_4) and the cross section of annular tube

В качестве несущей среды выбрана капельная жидкость, использованная А. Мохаммедом и С. Мыцка [45] в экспериментах очистки, со следующими реологическими параметрами (табл. 2). Заметим, что раствор с данными значениями наиболее соответствует особенностям и характеру поведения деформационных процессов бурового раствора. Причем в силу отсутствия данных о плотности в работе принимается значение, близкое для пресной воды ($\rho=1000 \text{ кг/м}^3$).

Таблица 2. Реологические свойства жидкости Гершеля–Балкли

Table 2. Rheological characteristics of the Hershel–Bulkley fluid

Предел текучести, τ_0 [Па] Yield strength, τ_0 [Pa]	Индекс консистенции, k [Па·с ⁿ] Consistency index, k [Pa·s ⁿ]	Индекс потока, n [–] Flow index, n [–]
3,7	0,425	0,648

В качестве твёрдой фазы рассматривались монодисперсные сферические частицы песка с плотностью $\rho_p=2650 \text{ кг/м}^3$, диаметром $d_p=6 \text{ мм}$, которые загружаются на входе скважины и увлекаются течением жид-

кости с характерной скоростью U_0 . В расчетах предполагается, что течение смеси организуется при диапазоне изменений весовой доли частиц ($M = \frac{\rho_p^0 \alpha_b}{\rho_{fb}^0}$)

$M=2,654 \dots 1,65$ с условием, что из угла каждого элемента сетки, находящегося на входе, одна частица входит в расчетную область. Анализ показывает, что при соответствующем числе частиц песка $N_p=1720$ с параметрами (d_p, ρ_p) имеем общую массу дисперсной фазы транспортируемой жидкостью со значением порядка 0,516 кг, что эквивалентно забуренной долотом с диаметром 20 см размера 0,006 м горной породе. Следует отметить, что здесь пористость породы принята равной нулю, а это с точки зрения режима очистки скважины представляет наихудшую ситуацию.

Сведения по валидации и верификации математической модели

Отметим, что для подобных конфигураций крайне мало лабораторных исследований, позволяющих судить об эволюции динамической структуры фаз. В таких условиях CFD прогноз представляет основной способ контроля неблагоприятных технологических эффектов в широком диапазоне изменений режимов транспорта и очистки скважин. Наш анализ современных библиографических данных [1–4, 7] указывает на то, что самые близкие к режимным параметрам лабораторные исследования были выполнены А. Мохаммедом [45] и получены распределения об изменении отдельных интегральных параметров течения, например, перепаде давления в канале с полной эксцентricностью. В нашем случае при $e=70 \dots 75 \%$ эти данные следует использовать для получения представлений о качественном и количественном соответствии прогнозируемых эффектов очистки, пригодности модели, метода и алгоритма численного решения задачи.

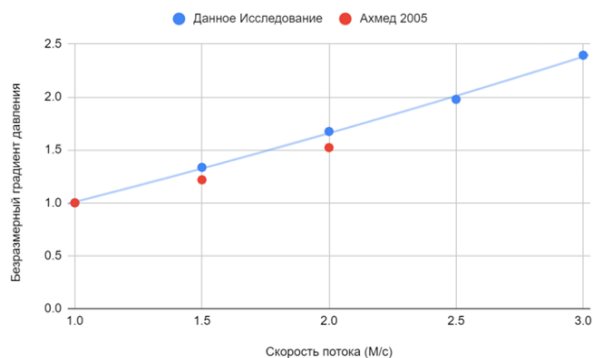


Рис. 3. Распределение безразмерного $gradp$ при течении смеси в скважине в зависимости от скорости потока на входе

Fig. 3. Changes in dimensionless $gradp$ at the mixture flows in the well vs. inlet flow velocity

В частности, на рис. 3 проиллюстрировано распределение безразмерного градиента давления при течении смеси в скважине в зависимости от изменений скорости потока, где линия – настоящий расчет с режимными параметрами реального процесса бурения при $e=75 \%$, символы – опыт [45] в условиях, по-

добных расчёту при $\epsilon=90\%$. Видно, что предлагаемая методология и её результаты находятся в удовлетворительном соответствии. Это позволяет утверждать, что особенности, сопровождающие эффекты транспорта и седиментации частиц в донной области скважины также адекватно предсказываются моделью установившегося по времени и развивающегося по межтрубному пространству реологически сложного вязкого течения бурового раствора.

Детали численного метода и алгоритма расчёта

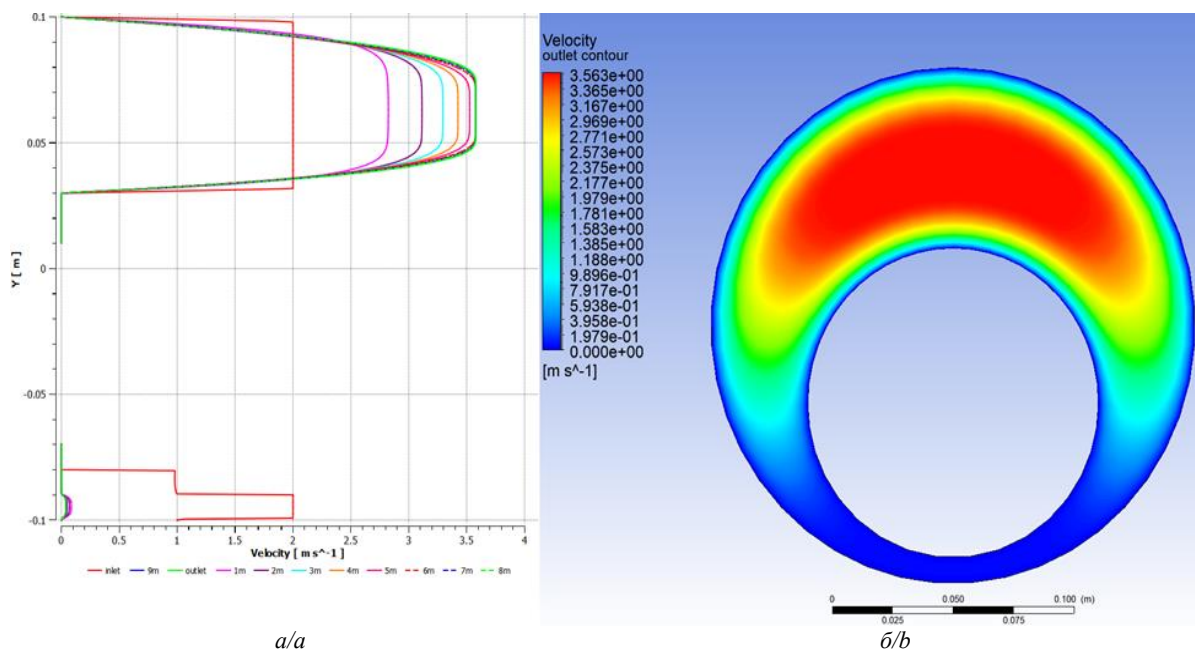
Интегрирование уравнений (1)–(10) выполняется численно на основе операций, отвечающих за: построение разностной сетки расчетной области рассматриваемой задачи; конечно-разностную аппроксимацию дифференциальных уравнений, сводящую уравнения к соответствующему дискретному аналогу; построение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с искомыми величинами для динамической и диффузионной задачи в узловых точках расчетной сетки; решение СЛАУ итерационным методом и определение сходимости решения по удовлетворению критерию малости между решениями, получаемыми на двух последних итерациях с точностью порядка $O(10^{-5})\%$. Подробно эти вопросы изложены, например, в [1–4, 7, 44]. Отметим, что численное решение строится с последовательной отработкой блоков гидродинамической части для описания процессов в жидкой фазе и включением PISO алгоритма и диффузионной части для определения траекторий частиц. Во всех режимах течения результаты были стабильны с общим числом глобальных итераций порядка $2 \cdot 10^4$ на завершающей стадии, погрешности изменений локальных параметров которых были меньше значений по указанному выше критерию устойчивости. Все этапы расчёта (с создания геометрии до обработки результатов) осуществлялись в ПО ANSYS FLUENT 2021 R1. Расчёты показывают, что при шаге установления порядка 10^{-3} с для решения задачи требуется порядка $5 \cdot 10^4$ глобальных итераций, причем время определения отдельной траектории движения частицы по стволу скважины соответствует порядка 500 с. Заметим, что важными в настоящем исследовании эффективности очистки скважины и транспорта раствора выступают интегральные параметры, такие как перепад давления, масса осевших и покинувших горизонтальный участок частиц. Расчётами установлены условия, при которых следует, что чем число частиц ближе к 100 %, тем эффективнее происходит процесс очистки. Кроме того, внесение неопределённостей при моделировании турбулентности неньютоновских жидкостей в рамках RANS-подхода повышает требования к точности их расчёта и корректности прогноза переходов вихревой природы в смесях. В настоящее время эти вопросы недостаточно изучены и требуют тщательной настройки на конкретный процесс с выяснением соответствия экспериментальным данным о течении. Отсутствие таких данных приводит к необходимости детального расчёта вязкостно-инерционно-гравитационных ламинарных неньютоновских потоков. В настоящей работе этот

класс течений исследован в широком диапазоне изменений чисел Рейнольдса ($Re=200\dots 2100$).

Результаты и их обсуждение

Представленные ниже результаты объединены в группы, анализ которых позволяет уяснить эффекты, сопровождающие и осложняющие течение в скважине вследствие учета таких факторов, как переменность реофизических свойств раствора, эксцентricность межтрубного пространства, нелинейность конвективно-диффузионных процессов переноса импульса и массы в вязкостно-инерционно-гравитационном течении дисперсной смеси. Отметим, что данные CFD моделирования важны для прикладных и фундаментальных исследований гидродинамической очистки, поскольку указанные факторы как отдельно, так и в комбинации друг с другом представляют собой комплексы параметров для определяющих критериев задачи, в рамках которых формулировка функциональной связи по оптимизации очистки в виде уравнения подобия представляется полезной для проведения успешных операций бурения, определения точного времени и качества бурения, а также момента завершения эксплуатации скважины. Перейдем к анализу результатов.

Влияние эксцентricности бурильной трубы. При бурении протяженных горизонтальных участков бурильная труба под действием силы тяжести лежит на своих муфтах на нижней стенке скважины. В этом случае на величину эксцентricности межтрубного пространства с вероятностью в 70...80 % оказывают влияние такие параметры, как толщина муфты, прочность бурильной трубы, изменение образующей ствола скважины. Исследования течений в таких конфигурациях, выполненные С. Накашима и соавторами [46], Л. Ши и соавторами [47] и В. Дохани и соавторами [48], показали, что вследствие заметного уменьшения перепада давления в системе наблюдается ухудшение выноса шлама. Кроме того, условия течения формируют «мертвые зоны» в донной части скважины, в которой локальные скорости потока значительно ниже в сравнении с верхней областью поперечного сечения. Особенности такого течения иллюстрирует рис. 4, где представлена картина радиальных распределений осевой скорости жидкой фазы в условиях развивающегося течения в отдельных выделенных по длине сечениях скважины (при $x=0$ м (вход), 1–10 м (выход)), а также картина интенсивности изменения осевой скорости жидкости в области выхода ($x=10$ м, рис. 4, справа). Из рис. 4 видно, что по всей длине скважины структура течения сопровождается эффектами развития потока в ядре и пристеночной зоне пограничного слоя в верхней части поперечного сечения (рис. 4, слева). Кроме того, вследствие выраженного влияния сил вязкости в донной части профиль осевой скорости имеет весьма малые абсолютные значения, характерные для «мертвой зоны», и отвечает условиям автомодельности на длинах порядка $x>1$ м. Все это находится в удовлетворительном соответствии с данными, полученными и Ю. Хашемиан и соавторами [49].



a/a
 радиальные профили осевой компоненты вектора скорости жидкой фазы в сечениях от входа
 radial distributions of axial component of the fluid phase vector velocity at different distances from the entry

b/b
 профиль осевой компоненты вектора скорости жидкой фазы в области выхода
 profile of fluid phase axial component of vector velocity at the outlet area

Рис. 4. Осевая компонента вектора скорости жидкой фазы
Fig. 4. Axial component of the fluid phase velocity vector

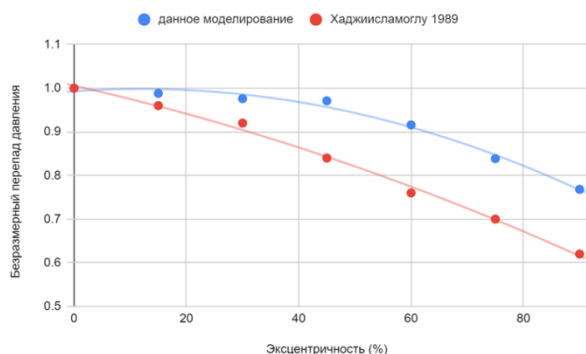


Рис. 5. Изменение величины безразмерного перепада давления ($\Delta p/\Delta p_0$) при течении неньютоновской жидкости в трубе с ростом ее эксцентricности

Fig. 5. Change in dimensionless pressure drop ($\Delta p/\Delta p_0$) of the non-Newtonian fluid in the annular at increasing eccentricity ($e, \%$)

Также интересным представляет вопрос влияния изменений в реологических свойствах диспергированной среды на интегральные параметры течения. В частности, сравнения настоящих расчетов с результатами, полученными М. Хаджиисламоглу [50] об изменении безразмерного перепада давления ($\Delta p/\Delta p_0$, где Δp_0 – значение перепада давления в коаксиальной трубе) в зависимости от эксцентricности буровой трубы ($e, \%$) (рис. 5), позволяют отметить следующее. Как ожидалось, предлагаемая математическая модель качественно верно предсказывает тенденции снижения перепада давления в скважине с ростом e , а также эволюцию динамической структуры неньютоновской смеси по длине скважины. Наблюдаемые количественные различия расчетов с дан-

ными [48–53] связаны с тем, что диспергированные жидкости в настоящем расчете (синяя линия) и исследованиях [50] (красная линия) имели близкие, но все же различные реологические параметры и геометрическую конфигурацию межтрубного пространства. Так, В. Дохани [48] анализировал гидродинамику в кольцевом канале при течении жидкости с параметрами: предел текучести $\tau_0=2,394$ Па, индекс консистенции $k=0,25$ Па \cdot с n и индекс потока $n=1$. Кроме того, в отличие от настоящего расчета, отношение между диаметрами труб 0,6, исследование М. Хаджиисламоглу [50] выполнено в геометрии канала при отношении между диаметрами труб 0,5.

Интенсивность внутри- и межфазного массопереноса при течении в скважине смеси со свойствами, представленными в табл. 2, иллюстрируют данные на рис. 6. Здесь приведено изменение числа частиц (об. %) в зависимости от роста эксцентricности ($e, \%$) буровой трубы. Из рисунка видно, что эксцентricность межтрубного пространства существенно влияет на процессы транспорта частиц в скважине. В частности, число частиц, успевших пройти рабочую область с горизонтальным участком скважины (от момента входа до выхода из скважины за характерное гидродинамическое время процесса $\tau_{гд}=500$ с, где $\tau_{гд}=L/(D-d)$) снижается с ростом e . Причем в диапазоне $e=20...50 \%$ влияние геометрических эффектов межтрубного пространства на динамику смеси наиболее выражено. Установлено, что в рамках выбранной гидродинамической конфигурации течения при эксцентricности буровой трубы $e<50 \%$ следует ожидать интенсификации процесса осаждения частиц. И в дальнейшем в условиях стационарного течения смеси с ростом e процесс седиментации приобретает черты устано-

вившегося эффекта при очистке скважины. Более того, данные на рис. 6 показывают, что для анализируемого потока эксцентricность в диапазоне $e=15...30\%$ представляется особой с точки зрения ожиданий существенного засорения шламом скважины и ухудшения ее очистки гидродинамическим способом. Эти значения e следует отнести к геометрическим условиям формирования «мёртвой зоны» течения.

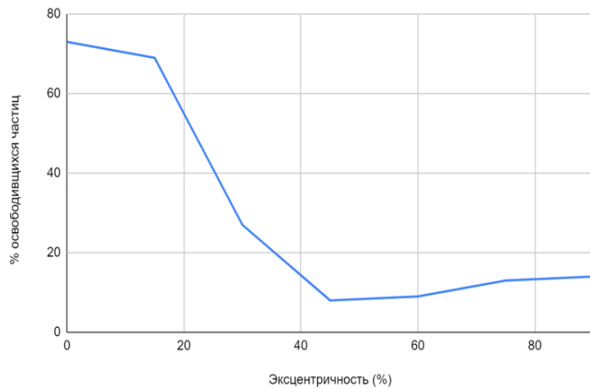


Рис. 6. Изменения объемной концентрации выносимого шлама из скважины в зависимости от эксцентricности

Fig. 6. Changes in the volume concentration of cuttings removed from the well depending on eccentricity

Эффект влияния индекса потока. Вторым по значимости фактором в спектре свойств бурового раствора, изменение которых способно оказать влияние на интенсивность очистки, является индекс потока. Транспорт смеси в неньютоновских средах обеспечивается повышенными затратами энергии для преодоления гидравлического сопротивления из-за роста градиента давления. Данные расчета распределений безразмерного перепада давления ($\Delta p/\Delta p_0$) в зависимости от изменений индекса потока при течении в эксцентricной трубе с $e=75\%$ жидкости Гершеля–Балкли со скоростью входа $U_0=2$ м/с приведены на

рис. 7. Заметим, что нормировка перепада давления осуществляется по соответствующему значению для коаксиальной трубы ($e=0$).

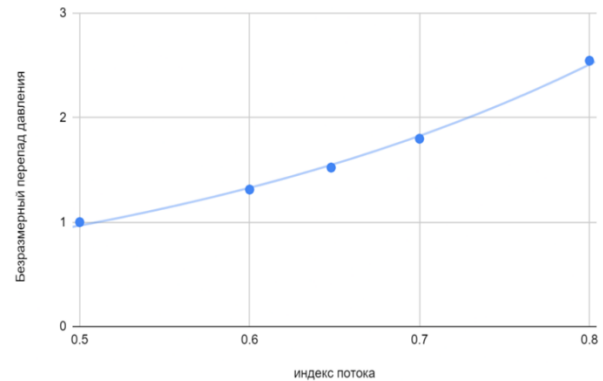


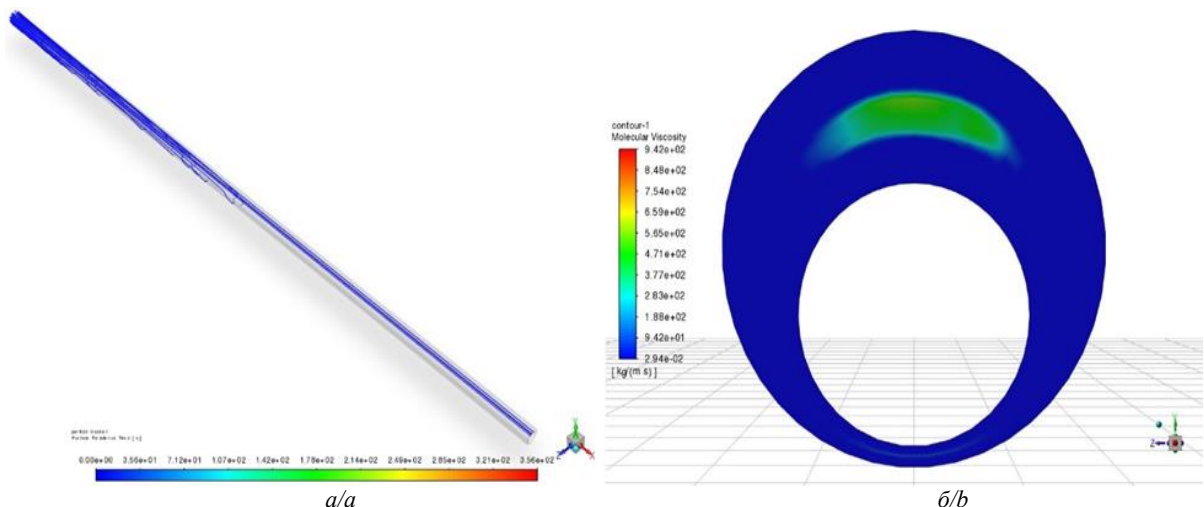
Рис. 7. Распределение безразмерного перепада давления ($\Delta p/\Delta p_0$) в зависимости от изменений индекса потока

Fig. 7. Distribution of dimensionless pressure drop ($\Delta p/\Delta p_0$) depending on changes in the flow index

Анализ эффектов, сопровождающих гидродинамику вязкостно-инерционного внутреннего течения реологически сложной среды, показывает, что в сравнении с ньютоновской жидкостью кажущаяся (эффективная) вязкость в двумерном потоке с преобладающим осевым направлением и соответствующими компонентами скоростей деформаций $\dot{\gamma}_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y}$ может быть представлена в виде (11):

$$\mu_{eff} = \frac{\tau_0}{\partial u / \partial y} + \kappa \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^{n-1}. \quad (11)$$

Из (11) следует, что в зонах, где скорость сдвига $\dot{\gamma}_{xy}$ мала, кажущаяся вязкость будет достигать своих максимальных значений, и наоборот.



изменение траекторий движения частиц по стволу скважины/changes in particle movement trajectories along the wellbore

эффективная вязкость в сечении выхода effective viscosity in the outlet section

Рис. 8. Влияние зоны высокой вязкости на интенсивность очистки скважины

Fig. 8. Effect of the high viscosity zone on cuttings transport

Отметим, что области с высокими значениями вязкости отличаются эффектами течения, характерными для «конвейерной ленты», захватывающей и транспортирующей частицы шлама через межтрубное пространство смеси. Условная ширина этой зоны зависит от индекса потока, режима течения и геометрии скважины. Гидродинамические процессы «конвейерной ленты» иллюстрируют данные, представленные на рис. 8. На этом рис. расчеты соответствуют: (а) изменению траекторий частиц по стволу скважины; (б) эффективной вязкости в радиальном сечении на выходе из скважины. Условия течения отвечают параметрам $U_0=2$ м/с и свойствам базовой неньютоновской жидкости (табл. 2).

Расчеты показывают, что в неустановившемся течении параметры модели неньютоновской среды оказывают решающее влияние на интенсивность выноса шлама и прогноз этих процессов возможен только при использовании численных процедур, способных корректно определять динамику и перепад поля давления в эксцентричном пространстве (рис. 9).

Установлено, что рост индекса потока снижает роль нелинейных эффектов в диффузионных процессах, уменьшает инерционные механизмы выноса шлама и формирует условия для роста размеров пласта отложений. Также из анализа данных рис. 8, 9 следует, что чем сильнее нелинейность реологических процессов в смеси (течение при малых n), тем больше частиц успевают совершить свой путь за определённое время. Подобно Ю. Хашемиан и соавторам [49], это явление можно интерпретировать так, что с увеличением индекса потока профиль скорости имеет тенденции к параболизации. Поэтому ширина зоны высокой вязкости сокращается

(рис. 10). На этом рисунке приведены радиальные распределения осевой скорости смеси при течении в скважине раствора с индексом потока $n=0,8$, эксцентricностью $e=75\%$ в выделенных по длине поперечных сечениях. Кроме того, данные рис. 10, а отвечают распределениям скорости на разных длинах x ; рис. 10, б – скорости в выходном сечении. В целом из рис. 10, а, б следует, что в верхней части поперечного сечения скважины профили стали более обостренными в ядре течения (данные рис. 10, а). Это привело к тому, что в картине изменений осевой скорости в выходном сечении скважины не наблюдается зоны повышенных значений вязкости (рис. 10, б). Причем в донной части эксцентричного пространства течение почти отсутствует и интенсифицируется накопление шлама (рис. 10, а).

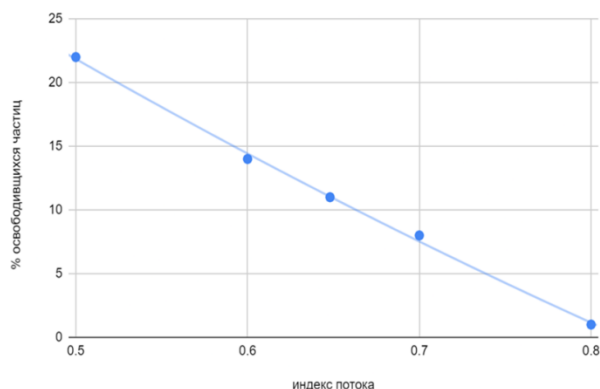
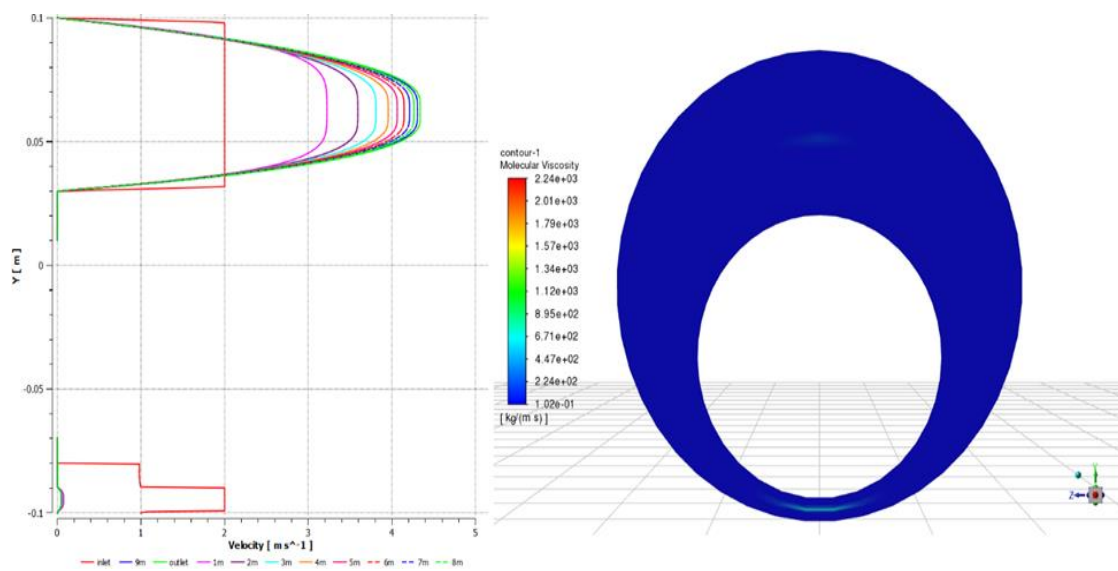


Рис. 9. Распределение объемной концентрации выносимых из скважины частиц в зависимости от изменений индекса потока

Fig. 9. Distribution of volumetric concentration of particles removed from the well depending on changes in flow index



а/а
 профили осевой компоненты вектора скорости жидкой фазы
 profiles of the axial component of the velocity vector of the fluid phase

б/б
 осевая компонента вектора скорости жидкой фазы в выходном сечении
 axial component of the vector velocity of the fluid phase at the output section

Рис. 10. Радиальные распределения осевой скорости при течении в скважине

Fig. 10. Radial axial velocity distributions during well flow

Влияние предела текучести. Особенности этого эффекта демонстрируют результаты, приведенные на рис. 11. Здесь представлено изменение безразмерного перепада давления ($\Delta p/\Delta p_0$) в зависимости от увеличения предела текучести в реологической модели раствора. Расчеты выполнены в условиях: $U_0=2$ м/с, $e=75$ %. В сравнении с данными рис. 7–10 (по учету влияния индекса потока на поле давления) из рис. 11 следует, что варьирование значений предела текучести оказывает слабое влияние на перепад поля давления. Так, при росте индекса потока на 50 % наблюдается увеличение перепада давления до 100 %. Но здесь рост предела текучести в 15 раз приводит к увеличению перепада давления только на 80 %.

Также расчетами установлено (рис. 12, где течение отвечает условиям: $U_0=2$ м/с; $e=75$ %), что, несмотря на относительно слабое влияние изменений значений предела текучести на перепад давления, имеется возможность интенсификации выноса шлама из скважины. Из рис. 12 видно, что оптимизация значений предела текучести до значений $\tau_0 < 7$ Па ведет к интенсификации процесса выноса частиц из скважины. Однако впоследствии этот процесс стабилизируется, на что указывает изменение объемной концентрации частиц при $\tau_0 = 7 \dots 11$ Па. Кроме того, из рис. 11 следует, что при этих значениях τ_0 перепад давления увеличивается только на 30 %. Поэтому наряду с уменьшением индекса потока n следует увеличивать значения τ_0 для организации оптимального управления процессом очистки с контролем значений перепада давления.

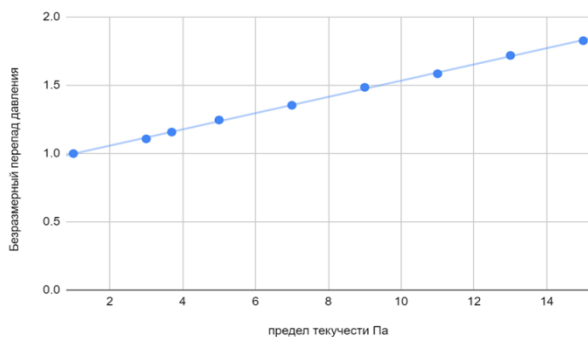


Рис. 11. Изменение безразмерного перепада давления ($\Delta p/\Delta p_0$) в зависимости от увеличения предела текучести

Fig. 11. Changes in dimensionless pressure drop ($\Delta p/\Delta p_0$) with increasing yield strength

Влияние на транспорт и очистку скважины индекса консистенции бурового раствора. Наши исследования показывают, что на перепад поля давления большее влияние оказывает изменение индекса консистенции, затем изменения индекса потока и предела текучести. Согласно рис. 13, где представлено распределение безразмерного перепада давления от индекса консистенции при течении базовой буровой жидкости в скважине, видно, что анализируемая связь линейная с коэффициентом пропорциональности для перепада давления порядка $\sigma=2$. Также на рис. 14 приведены сведения о распределении числа транс-

портируемых частиц раствором в условиях свободного их выноса из горизонтального участка скважины при параметрах течения $U_0=2$ м/с, $e=75$ %. Расчетами установлено, что, как в случае с индексом потока, индекс консистенции тоже формирует обратный эффект на очистку, т. е. чем меньше значение индекса консистенции, тем больше количество выносимых частиц из межтрубного пространства. Но, как и в случае с анализом влияния предела текучести, есть определенный диапазон изменений этого параметра, который сформировался заданной геометрической и гидродинамической конфигурациями задачи, вне которого этот эффект значительно слабеет. В данном случае это значения индекса консистенции порядка $0,5 \text{ Па}\cdot\text{с}^n$.

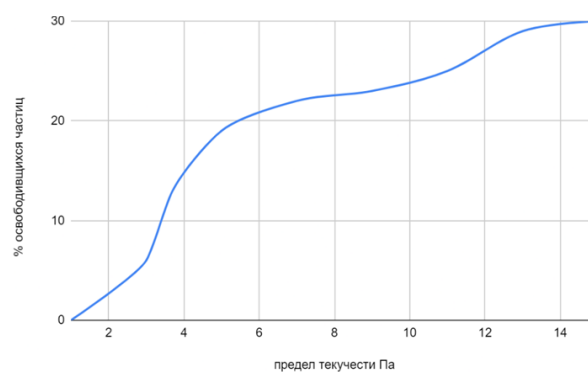


Рис. 12. Влияние изменений предела текучести на количество вынесенных частиц из межтрубного пространства скважины

Fig. 12. Effect of yield strength on the percentage of escaped particles

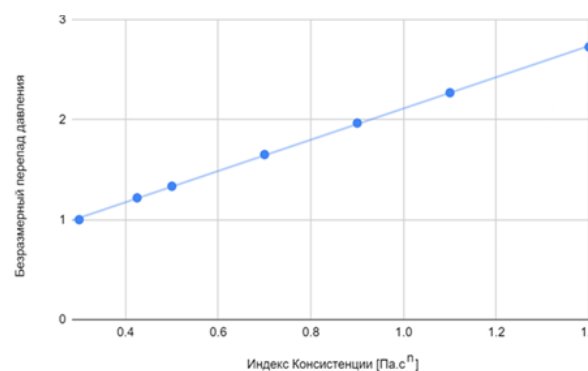


Рис. 13. Распределение безразмерного перепада давления ($\Delta p/\Delta p_0$) от индекса консистенции

Fig. 13. Changes in dimensionless pressure drop ($\Delta p/\Delta p_0$) with increasing consistency index

Эффект отношения диаметров. Также одним из важнейших параметров, влияющих и на перепад давления, и на очистку, является отношение между диаметрами буровой колонны и скважины. Как видно из рис. 15 (расчеты отвечают условиям $U_0=2$ м/с, $e=75$ %), этот геометрический параметр очень сильно влияет на перепад давления и его увеличение на 40 % ведёт к увеличению перепада давления до 90 %. Это весьма предсказуемо, так как с увеличением диаметра буровой колонны по отношению к диаметру скважины свободное пространство между ними уменьша-

ется и, следовательно, перепад давления будет возрастать, при этом увеличение сопровождается экспоненциальным характером. Учитываем, что, когда отношение диаметров приближается к единице, свободное пространство между ними исчезает и возникает сингулярность процесса (перепад давления становится неограниченно большим).

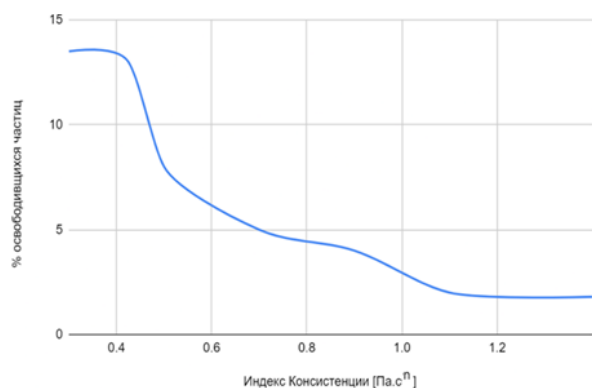


Рис. 14. Распределение объемной концентрации вынесенных потоком свободных частиц в зависимости от индекса консистенции

Fig. 14. Effect of consistency index on the percentage of escaped particles

Анализ результатов расчета показывает, что, как и индекс потока, и индекс консистенции, так и отношение диаметров вызывает обратный эффект на очистку скважины, т. е. чем меньше отношение диаметров, тем больше свободное пространство для выноса шлама и, соответственно, большее количество частиц способно покинуть скважину за характерное гидродинамическое время. Из рис. 16 (расчеты отвечают условиям $U_0=2$ м/с, $e=75$ %) видно, что при отношении диаметров порядка единицы число освобожденных частиц стремится к нулю. Поэтому с целью улучшения очистки и уменьшения перепада давления целесообразно стремиться к малым значениям отношений между диаметрами труб.

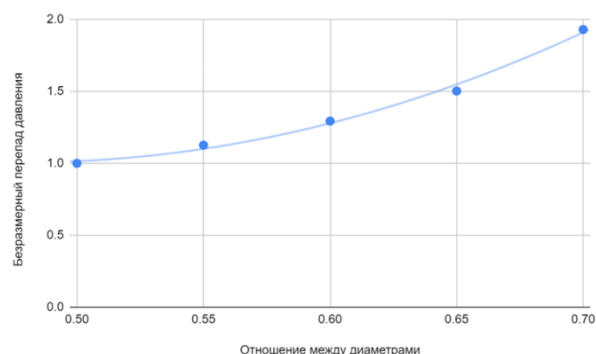


Рис. 15. Распределение безразмерного перепада давления ($\Delta p/\Delta p_0$) в зависимости от изменения величины отношений между диаметрами

Fig. 15. Changes in dimensionless pressure drop ($\Delta p/\Delta p_0$) with increasing diameter ratio

Влияние средней скорости транспортируемого раствора в области входа на интенсивность очист-

ки скважины. Изменение расхода в области входа, как и изменение средней скорости, оказывает влияние на рост перепада давления. Причем это влияние слабее, чем влияние индекса консистенции (здесь коэффициент пропорциональности меньше единицы). Как видно из рис. 17 (расчеты выполнены в условиях $e=75$ %), влияние скорости на очистку скважины сравнительно слабее. Так как при увеличении скорости входа в два раза перепад давления увеличивается до 70 %, при этом число выносимых частиц уменьшается с 13 до 11 %.

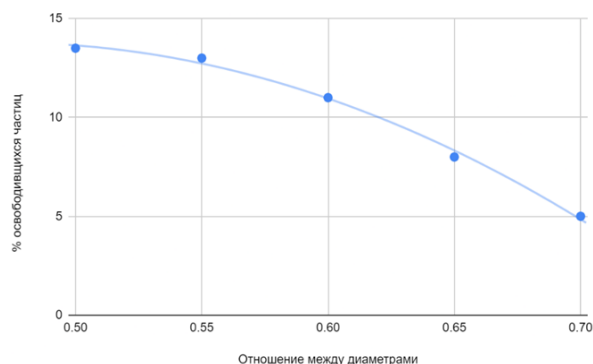


Рис. 16. Распределение объемной концентрации выносимых свободных частиц в зависимости от величины отношения диаметров

Fig. 16. Effect of diameter ratio on the percentage of escaped particles

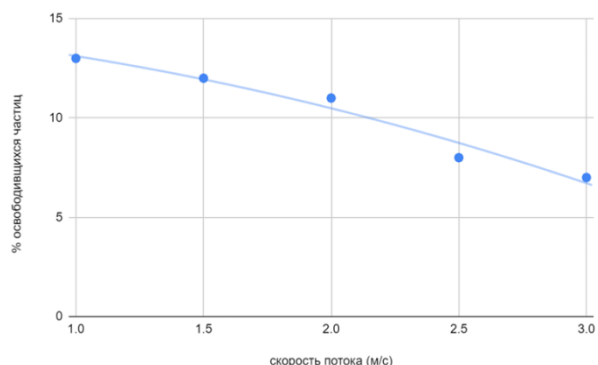


Рис. 17. Распределение объемной концентрации выносимых свободных частиц из скважины в зависимости от изменений скорости входа в скважину

Fig. 17. Distribution of the volumetric concentration of free particles removed from the well depending on changes in the rate of entry into the well

Выводы

В настоящем исследовании выполнено численное моделирование гидродинамики ламинарного дисперсного потока смеси неньютоновской капельной жидкости с твердыми частицами в кольцевой эксцентричной трубе с целью уяснения особенностей течения, выявления закономерностей движения, а также оптимизации процесса транспорта и очистки межтрубного пространства скважины с горизонтальным участком от продуктов буровой выработки. В рамках реального процесса бурения с характерными условиями вязкостно-инерционно-гравитационного

несжимаемого изотермического течения вязкопластической среды с частицами песка сферической формы проведен детальный параметрический анализ пространственных эффектов, определяющих интенсивность массопереноса из-за изменения реофизических, геометрических и гидродинамических свойств течения и размеров скважины. Определение эффективности очистки сводится к фактам: увеличение количества частиц, покинувших геометрию за характерное гидродинамическое время процесса; контроль механизмов переноса импульса и массы в смеси, а также управление увеличением перепада давления в развивающемся течении. Численное моделирование соответствовало сценариям течения смеси с разными параметрами геометрии (размеров длин, диаметров и эксцентricности труб) и бурового раствора (ньютоновской реологии), и его результаты приводят к следующим заключениям.

1. Полная очистка скважины при использовании растворов типа Гершеля–Балкли во время бурения в ламинарном режиме невозможна. И в любом случае необходимо будет останавливать бурение и очищать скважину через установленное время. Однако можно увеличивать промежуток между этими периодами очистки, корректно выбирая (в рамках предложенной вычислительной технологии) значения реофизических свойств растворов и геометрии межтрубного пространства.
2. Самым эффективным методом улучшения очистки является метод контроля эксцентricности межтрубного пространства. Практические рекомендации сводятся к необходимости контроля эксцентricности в диапазоне $e < 15\%$. Отметим, что, к сожалению, в большинстве случаев это невозможно при стандартном бурении. Но возможно только при бурении небольших участков с помощью калибраторов.
3. Эффективным в интенсификации очистки выступает метод управления геометрическим параметром, представляющим собой отношение между диаметрами труб. Этот параметр оказывает заметное влияние на уменьшение перепада давления с условием, что чем меньше диаметр бурильной колонны в сравнении с диаметром долота (и, следовательно, скважины), тем меньшего перепада поля давления следует ожидать в скважине в технологическом процессе бурения.
4. Характерное значение скорости потока в области входа в скважину в рабочем процессе бурения иг-

рает незначительную роль в сравнении с другими параметрами, ответственными за интенсификацию очистки, т. е. на процент пробуренных частиц, освободившихся от геометрии, или, другими словами, на скорость накопления шлама. В качестве практических рекомендаций следует предложить, что, когда с помощью других параметров не удастся интенсификация полной очистки, следует подключить метод оптимизации очистки по управлению изменений скорости на входе. Это позволит ускорить процесс и, таким образом, обеспечит бурение с высокими скоростями.

5. Из параметров модели Гершеля–Балкли индекс потока является важнейшим с точки зрения очистки скважины. Установлено, что при малых значениях этого параметра профиль скорости становится плоским и в этих плоских участках скорость сдвига приближается к нулю, увеличивая кажущуюся вязкость до высоких значений. Таким образом, создаётся некая «конвейерная лента» высокой вязкости, которая способна быстро транспортировать частицы шлама через геометрию. Более того, при уменьшении индекса потока перепад давления тоже значительно снижается. Поэтому индекс потока следует считать наиважнейшим из всех параметров, подлежащих управлению на предмет интенсификации очистки.
6. Индекс консистенции, как и индекс потока, оказывает обратное влияние на процесс перепада поля давления и эффективность очистки скважины. Хотя эффект влияния индекса консистенции слабее в сравнении с эффектом от изменений индекса потока. Такое заключение характерно для процесса с определенными условиями, сформированными конкретной геометрической и гидродинамической конфигурациями течения и скважины.
7. Установлено, что с увеличением предела текучести перепад давления и эффективность очистки увеличиваются. Но, с одной стороны, влияние этого параметра на перепад давления не так сильно и, с другой стороны, его влияние на очистку заметно выражено только до определённого значения. Поэтому для практики рекомендуется организовать процесс бурения так, чтобы его увеличивали только до порогового значения, соответствующего деталям конфигураций течения и реальным значениям геометрических параметров скважины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харламов С.Н., Джангхорбани М., Филиппов К.А. Математическое моделирование и методы исследования гидродинамической очистки горизонтальных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 8. – С. 53–73.
2. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Численное исследование вязкостно-инерционного ламинарного закрученного течения в круглой трубе с эксцентricным круглым ядром // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 7–21.
3. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Численное моделирование течений вязких смесей бурового шлама и потока сырой нефти

на горизонтальных участках скважин с эксцентricными бурильными трубами // Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа – XXI век: Материалы Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых, посвященной 150-летию акад. АН СССР И.М. Губкина и 110-летию акад. АН СССР и РАН А.А. Трофимука. Секция 2. Геология нефти и газа. Подсекция 3. Нефтегазопромысловая геология. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2021. – С. 221–224. DOI: 10.25205/978-5-4437-1248-2-221-224. URL: http://gubkin-trofimuk2021.ipgg.sbras.ru/prepare_materials (дата обращения 15.05.2022).

4. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Процедуры и инструментальный мониторинг процессов и механизмов транспорта шлама при гидравлической очистке горизонтальных скважин // Изве-

- стия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 22–40. URL: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2936> (дата обращения 15.05.2022).
5. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I. Numerical modeling of a vortical investigation of heat transfer in fields of centrifugal mass forces in elements of the power equipment with a curvilinear wall // The 5th Proc. of the International Forum on Strategic Technology (IFOST. 2010). – Ulsan, South Korea, October, 13–15, 2010. – P. 105–109.
 6. Kharlamov S.N., Kudelin N.S., Dedeyev P.O. Hydrodynamic, heat and acoustic processes modelling in transport of rheologically complex viscous media technology in pipelines // XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov: PGON2014 IOP Publishing IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 21. – Tomsk, Russia, 2014. – P. 1. – 6 p.
 7. Modeling of dynamic cuttings transportation during drilling of oil and gas wells by combining 2D CFD and 1D discretization approach / F. Zhang, Y. Wang, Y. Wang, S. Miska, M. Yu // SPE Journal. – 2020. – V. 25. – Iss. 3. – № 6. – P. 21–42.
 8. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores / H.I. Bilgesu, M.W. Ali, K. Aminian, S. Ameri // The Eastern Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers. – Lexington, Kentucky, USA, October 2002. – 27 p.
 9. Solid-liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus / S.-M. Han, H. Young-Kyu, W. Nam-Sub, K. Young-Ju // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2010. – V. 70. – № 3–4. – P. 308–319.
 10. Effect of drillpipe rotation on cuttings transport using computational fluid dynamics (CFD) in complex structure wells / S. Xiaofeng, K. Wang, T. Yan, S. Shao, J. Jiao // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2014. – V. 4. – № 3. – P. 255–261.
 11. Simulation of cuttings transport with foam in deviated wellbores using computational fluid dynamics / R. Rooki, D.A. Faramarz, A. Moradzadeh, M. Norouzi // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2014. – V. 4. – № 3. – P. 263–273.
 12. Ofei T.N., Irawan S., Pao W. CFD method for predicting annular pressure losses and cuttings concentration in eccentric horizontal wells // Journal of Petroleum Engineering. – 2014. – № 4. – P. 110–120.
 13. Kamyab Mohammadreza, Vamegh Rasouli. Experimental and numerical simulation of cuttings transportation in coiled tubing drilling // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – V. 29. – P. 284–302.
 14. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and water-based drilling fluids / Sayindla Sneha, L. Bjørnar, J.D. Ytrehus, A. Saasen // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 159. – P. 49–57.
 15. Heydari Omid, Eghbal Sahraei, Pål Skalle. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuli using computational fluid dynamics (CFD) // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 156. – P. 801–813.
 16. Харламов С.Н., Фатянов Д.С. Исследование структуры турбулентного потока природного сырья в трубопроводах с секцией переменного по длине поперечного сечения конфузorno-диффузорного типа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 53–67.
 17. Харламов С.Н., Фатянов Д.С. Моделирование пространственных течений вязких сред в системе каналов с участками соединений сложной формы // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 70–88.
 18. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Engineering approaches' progress in calculation of inhomogeneous turbulence in pipelines // Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, 2010. – V. 2. – P. 798–805.
 19. Numerical prediction of flow behavior of cuttings carried by Herschel-Bulkley fluids in horizontal well using kinetic theory of granular flow / Pang Boxue, Shuyan Wang, Guodong Liu, Xiaoxue Jiang, Huilin Lu, Zhenjie Li // Powder Technology. – 2018. – V. 329. – P. 386–398.
 20. Gidaszow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. – Sand Diego: Academic press, 1994. – 467 p.
 21. Syamlal Madhava, O'Brien T.J. The derivation of a drag coefficient formula from velocity-voidage correlations // Technical Note. – Morgantown, WV: US Department of energy, Office of Fossil Energy, NETL, 1987. – P. 1–11.
 22. Mme U., Pål Skalle. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles // International Journal of Petroleum Science and Technology. – 2012. – V. 6. – № 2. – P. 129–141.
 23. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle sphericity // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 170. – P. 992–1004.
 24. Akhshik Siamak, Majid Rajabi. CFD-DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 160. – P. 229–246.
 25. Movahedi H., Jamshidi S. Experimental and CFD simulation of slurry flow in the annular flow path using two-fluid model // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 198. – № 3 (108224). – P. 1–19.
 26. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Т. 1. – 464 с.
 27. Yeoh G.H., Tu J. Computational techniques for multi-phase flows. 2nd ed. – Butterworth-Heinemann: Elsevier Ltd, Inc., 2019. – 590 p.
 28. Crowe C.T. Review- numerical models for dilute gas-particle flows // ASME Journal of Fluids Engineering. – 1982. – V. 104 (Sept.). – P. 297–303.
 29. Tanner R.I., Milthorpe J.F. Numerical simulation of the flow of fluids with yield stresses // Proc. of the International Conference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow. – Swansea: Pineridge Press, 1983. – P. 680–690.
 30. Mitsoulis E. Flows of viscoplastic materials: models and computations // Rheology. – 2007. – № 135. – P. 66–78.
 31. Taibi H., Messelmi F. Effect of yield stress on the behavior of rigid zones during the laminar flow of Herschel-Bulkley fluid // Alexandria Engineering Journal. – 2018. – V. 57. – № 2. – P. 1109–1115.
 32. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. – 1994. – V. 32. – № 8. – P. 1598–1605.
 33. Prospects of RANS models with effects multiparameter at modeling of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface / S.N. Kharlamov, V.Yu. Kim, S.I. Silvestrov, R.A. Alginov, S.A. Pavlov // Proc. of the 6th International Forum on Strategic Technology. – Heilongjiang, Harbin, China, 2011. – V. 2. – P. 787–791. DOI: 10.1109/IFOST.2011.6021139
 34. Глушко Г.С. Дифференциальное уравнение для масштаба турбулентности и расчет турбулентного пограничного слоя на плоской пластине // Турбулентное течение. – М.: Наука, 1970. – С. 34–44.
 35. Launder B.E. On the computation of convective heat transfer in complex turbulent flows // Journal of Heat Transfer. – 1988. – V. 110. – P. 1112–1128.
 36. Chien W.L., Lien F.S., Leschziner M.A. Computational modelling of turbulent flow in turbomachine passage with low-re two-equation models // Computational Fluid Dynamics. – 1994. – V. 1. – P. 517–524.
 37. Boyun Guo, Gefei Liu. Applied drilling circulation systems: hydraulics, calculations and models. – Burlington: Gulf Professional Publishing, 2011. – 272 p.
 38. Chilton R.A., Stainsby R. Pressure loss equations for laminar and turbulent non-Newtonian pipe flow // Journal of Hydraulic Engineering. – 1998. – V. 124. – № 5. – P. 522–539.
 39. Madlener K., Frey B., Ciezki H.K. Generalized Reynolds number for non-Newtonian fluids // Program of Propulsion Physics. – 2009. – № 1. – P. 237–250.
 40. A Well-balanced finite volume-augmented Lagrangian method for an integrated Herschel-Bulkley model / R.C. Acary,

- N.E.D. Fernandez, R.G. Narbona, P. Vigneaux // Journal of Scientific Computing. – 2012. – V. 53. – P. 608–641.
41. Morsi S.A., Alexander A.J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems // Journal of Fluid Mechanics. – 1972. – V. 55. – № 2. – P. 193–208.
42. Ди Джачинто, Сабетта Р., Пива К. Эффекты двустороннего взаимодействия в газовых потоках с неплотным множеством частиц // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1982. – Т. 104. – № 3. – С. 122–131.
43. Miloshevich H. Modelling of two-phased turbulent flows in jets with burning particles and phase transition in them // Proc. of the 4th European CFD conference. – Athens, Greece, 1998. – V. 1. – Pt. 1. – P. 175–179.
44. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. – Томск: Томский государственный университет, 2001. – 448 с.
45. Mohammed A.R., Miska S.Z. Experimental study and modeling of yield power-law fluid flow in annuli with drillpipe rotation // IADC/SPE Drilling Conference, OnePetro. – Houston, Texas, USA, 2008. – P. 1–16.
46. Nakashima C.Y., Oliveira S. Jr., Caetano E.F. Calculation of pressure drop in narrow rotating annular clearances // Revista de Engenharia Térmica. – 2008. – V. 7. – № 2. – P. 27–34.
47. Xie L., Chaudhary S., Chen Z. Analysis of the effect of eccentricity on displacement of non-Newtonian fluids with a hybrid method // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro. – Houston, Texas, USA, 2015. – № 9 (September). – P. 1–13.
48. Effects of drill string eccentricity on frictional pressure losses in annuli / V. Dokhani, Yue Ma, Zili Li, Tie Geng, Mengjiao Yu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 187. – № 106853. – P. 1–17.
49. Accurate predictions of velocity profiles and frictional pressure losses in annular YPL-fluid flow / Y. Hashemian, M. Yu, S. Miska, S. Shirazi, R. Ahmed // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 2014. – V. 53. – № 6. – P. 355–363.
50. Hacıislamoglu M. Non-Newtonian fluid flow in eccentric annuli and its application to petroleum engineering problems. PhD thesis. – Louisiana, 1989. – 231 p.
51. Vaziri E., Simjoo M., Chahardowli M. Application of foam as drilling fluid for cuttings transport in horizontal and inclined wells: a numerical study using computational fluid dynamics // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 194. – № 11 (November, 107325). – P. 1–16. URL: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107325> (дата обращения 15.05.2022).
52. CFD modeling of particle settling in drilling fluids: Impact of fluid rheology and particle characteristics / M.A. Abdelrahman, A.H. Ibelwaleed, S.N. Mustafa, K. Hamidreza, A. Ramadan // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – V. 199. – № 4 (April, 108326). – P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108326>
53. Харламов С.Н., Джанхорбани М. Процессы транспорта шлама при очистке скважин с произвольной ориентацией буровых труб, содержащих эксцентрично расположенное круглое ядро с подвижной стенкой: проблемы, результаты, перспективы (обзор) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 131–149.

Поступила 04.06.2022 г.

Информация об авторах

Харламов С.Н., профессор, доктор физико-математических наук, профессор отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Джанхорбани М., аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 504.61:532.542: 536.252

OPTIMIZATION OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF DRILLING MUD INTENSIFYING TRANSPORTATION AND CLEANING OF HORIZONTAL WELLS FROM CUTTINGS

Sergey N. Kharlamov¹,
kharsn@mail.ru

Janhorbani Mehran¹,
mehr.janghorbani@gmail.com

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of this article is associated with the practical need for effective well cleaning in modern drilling especially in the case of extended horizontal sections, in which it is important to control dynamic pressure, which is very sensitive to changes in the rheological properties of drilling fluids described by complex deformation processes in viscous-plastic systems. For the most part, these are Herschel–Bulkley type fluids with three-constant parameters, each of which can significantly affect the pressure field drop and the ability of the solution to carry cuttings through the specific geometry of the eccentric annular space of horizontal wells. The study of the complex influence of the parameters of the rheological model is valuable and relevant for optimizing the cleaning process and preventing well control situations due to the danger of an excessive increase in pressure drop in the working units of the equipment.

The purpose of the work is to determine the degree of influence of changes in the parameters of the Herschel–Bulkley model on the pressure field drop; to clarify the hydrodynamic features accompanying the internal flow of a rheologically complex medium; to issue practical recommendations for the improvement of cleaning and removal of cuttings from horizontal wells at minimum values of pressure drop, using the optimal combination of the range of changes in the rheological properties of the drilling fluid.

The object of study is a well with a ten-meter horizontal eccentric section, in which the flow is carried out in conditions that are really close to the actual drilling parameters (in situ).

Methodology is based on complex physical-mathematical and computer modeling of processes in the mechanics of homogeneous and heterogeneous continua, widely tested on internal rheologically complex flows, as well as successfully validated and verified results under appropriate conditions and close to flow regimes, heat and mass transfer performed by other authors on the analysis of technological processes of drilling and cleaning wells.

Results. Numerical modeling of the hydrodynamics of a laminar dispersed flow of a mixture of a non-Newtonian liquid with solid particles in an annular eccentric pipe has been performed. Within the framework of a real drilling process with characteristic conditions of a viscous-inertial-gravitational incompressible isothermal flow of a viscous-plastic medium with spherical sand particles the authors carried out a detailed parametric analysis of the spatial effects that determine the intensity of mass transfer due to changes in the rheophysical, geometric and hydrodynamic properties of the flow and well sizes. The processes that determine and increase the efficiency of cleaning are studied by analyzing the fact: increase in the number of particles that left the geometry during the characteristic hydrodynamic time of the process; controlling the mechanisms of momentum and mass transfer in the mixture, as well as controlling the increase in pressure drop. Numerical modeling corresponded to scenarios of mixture flow with different parameters of geometry (lengths, diameters and eccentricity of pipes) and drilling fluid (non-Newtonian rheology). It was established that complete cleaning of the well when using solutions of the Herschel–Bulkley type in the drilling mode (in situ) in the laminar mode is impossible. In practice of applied research, recommendations are proposed for effective cleaning by correcting the rheophysical properties of the solution. It is shown that the most effective method for improving cleaning is the method of controlling the eccentricity of the annular space, as well as the method of controlling the geometric parameter, which is the ratio between the pipe diameters. Practical recommendations boil down to the need to control the eccentricity in the range of $\epsilon < 15\%$. It was determined that from the parameters of the Herschel–Bulkley model, the flow index is the most important in terms of well cleanout management. It creates a high viscosity «conveyor belt» that is able to quickly transport cuttings particles through the geometry.

Key words:

Well, drilling, modeling, hydrodynamics, rheology, viscous-plastic mixture, Herschel–Bulkley fluid, annular flows, transport, cleaning.

REFERENCES

1. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Filippov K.A. Mathematical modeling and research methods of horizontal wells hydrodynamic cleaning. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 8, pp. 53–73. In Rus.
2. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Numerical simulation of viscous – inertial laminar swirling flow in a circular tube with an eccentric round core. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 7–21. In Rus.
3. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Cthislennoe modelirovanie techeniy vyazkikh smesey boorovogo schlama i potoka syroy nefi na gorizontalnykh uchastkakh skvazhin s ekstsentrichnymi burilnymi trubami [Numerical modeling of the currents of viscous mixtures of drilling sludge and the flow of crude oil on horizontal sections of wells with eccentric drilling pipes]. *Novye vyzovy fundamentalnoy i prikladnoy geologii nefi i gaza-XXI vek. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s uchastiem inostrannykh uchenykh, posvyashchennoy 150-letiyu akademika AN SSSR I.M. Gubkina i 110-letiyu akademika AN SSSR i RAN A.A. Trofimuka / Section 2. Geologiya nefi i gaza. Podsection 3. Neftepromyslovaya geologiya* [New challenges of fundamental and applied geology of oil and gas-XXI century. Materials of the All-Russian Scientific Conference with the participation of foreign scientists, dedicated to the 150th anniversary I.M. Gubkin, the Academy of Sciences of the USSR and the 110th anniversary acad. A.A. Trofimuk, the Academy of Sciences of the USSR and the Russian Academy of Sciences. Section 2. Geology of oil and gas. Subsection 3. Oil and gas geology]. Novosibirsk, CPI NSU, 2021. pp. 221–224. DOI: 10.25205/978-5-4437-1248-2-221-224. Available at: http://gubkin-trofimuk2021.ipgg.sbras.ru/prepare_materials (accessed 15 May 2022).
4. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Procedures and instruments for monitoring processes and mechanisms of cutting transport in

- hydraulic cleaning of horizontal wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 22–40.
5. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I. Numerical modelling of a vortical investigation of heat transfer in fields of centrifugal mass forces in elements of the power equipment with a curvilinear wall. *The 5th Proc. of the International Forum on Strategic Technology (IFOST)*. Ulsan, South Korea, University of Ulsan, October, 13–15, 2010. pp. 105–109.
 6. Kharlamov S.N., Kudelin N.S., Dedeyev P.O. Hydrodynamic, heat and acoustic processes modelling in transport of rheologically complex viscous media technology in pipelines. *XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov: PGON2014 IOP Publishing IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 21*. Tomsk, Russia, 2014. pp. 1–6.
 7. Zhang F., Wang Y., Wang Y., Miska S., Yu M. Modeling of dynamic cuttings transportation during drilling of oil and gas wells by combining 2D CFD and 1D discretization approach. *SPE Journal*, 2020, vol. 25, Iss. 3, no. 6, pp. 21–42.
 8. Bilgesu H.I., Ali M.W., Aminian K., Ameri S. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores. *SPE Eastern Regional Meeting. Society of Petroleum Engineers*. Lexington, Kentucky, USA, October, 2002. 27 p.
 9. Han Sang-Mok, Young-Kyu Hwang, Nam-Sub Woo, Young-Ju Kim. Solid-liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, vol. 70, no. 3–4, pp. 308–319.
 10. Sun Xiaofeng, Kelin Wang, Tie Yan, Shuai Shao, Jianjun Jiao. Effect of drillpipe rotation on cuttings transport using computational fluid dynamics (CFD) in complex structure wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 255–261.
 11. Rooki Reza, Faramarz Doulati Ardejani, Moradzadeh A., Norouzi M. Simulation of cuttings transport with foam in deviated wellbores using computational fluid dynamics. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 263–273.
 12. Ofei Titus N., Irawan S., Pao W. CFD method for predicting annular pressure losses and cuttings concentration in eccentric horizontal wells. *Journal of Petroleum Engineering*, 2014, no. 4, pp. 110–120.
 13. Kamyab Mohammadreza, Vamegh Rasouli. Experimental and numerical simulation of cuttings transportation in coiled tubing drilling. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 29, pp. 284–302.
 14. Sayindla Sneha, Lund B., Ytrehus J.D., Saasen A. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 159, pp. 49–57.
 15. Heydari Omid, Eghbal Sahraei, Pål Skalle. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annulus using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 156, pp. 801–813.
 16. Kharlamov S.N., Fatyanov D.S. Investigation of natural raw materials turbulent flow structure in pipelines at confuser-diffuser section. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 53–67. In Rus.
 17. Kharlamov S.N., Fatyanov D.S. Simulation of viscous media spatial flows in the system of channels with sections of complex form junctions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 70–88. In Rus.
 18. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Engineering approaches' progress in calculation of inhomogeneous turbulence in pipelines. *Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*. Moscow, Russia, 2010. Vol. 2, pp. 798–805.
 19. Pang, Boxue, Shuyan Wang, Guodong Liu, Xiaoxue Jiang, Huilin Lu, Zhenjie Li. Numerical prediction of flow behavior of cuttings carried by Herschel–Bulkley fluids in horizontal well using kinetic theory of granular flow. *Powder Technology*, 2018, vol. 329, pp. 386–398.
 20. Gidaspow D. *Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions*. Sand Diego, Academic press, 1994. 467 p.
 21. Syamlal Madhava, O'Brien T.J. The derivation of a drag coefficient formula from velocity-voidage correlations. *Technical Note*. Morgantown, WV, US Department of energy, Office of Fossil Energy, NETL, 1987. pp. 1–11.
 22. Mme Uduak, Pål Skalle. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles. *International Journal of Petroleum Science and Technology*, 2012, vol. 6, no. 2, pp. 129–141.
 23. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle sphericity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 170, pp. 992–1004.
 24. Akhshik Siamak, Rajabi M. CFD-DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 160, pp. 229–246.
 25. Movahedi H., Jamshidi S. Experimental and CFD simulation of slurry flow in the annular flow path using two-fluid model. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 198, no. 3 (108224), pp. 1–19.
 26. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Vol. 1, 464 p.
 27. Yeoh G.H., Tu J. *Computational techniques for multi-phase flows*. 2-nd edition. Butterworth-Heinemann, Elsevier Ltd, Inc., 2019. 590 p.
 28. Crowe C.T. Review – numerical models for dilute gas-particle flows. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1982, vol. 104 (Sept.), pp. 297–303.
 29. Tanner R.I., Milthorpe J.F. Numerical simulation of the flow of fluids with yield stresses. *Proceeding of the International Conference on Numerical Methods in Laminar and Turbulent Flow* (Pineridge Press, Swansea), 1983, pp. 680–690.
 30. Mitsoulis E. Flows of viscoplastic materials: models and computations. *Rheology*, 2007, no. 135, pp. 66–78.
 31. Taibi H., Messelmi F. Effect of yield stress on the behavior of rigid zones during the laminar flow of Herschel–Bulkley fluid. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, vol. 57, no. 2, pp. 1109–1115.
 32. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
 33. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I., Alginov R.A., Pavlov S.A. Prospects of RANS models with multi-parameter effects at simulation of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface. *The 6th Proc. of the International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. Harbin, China, August 22–24, 2011. Vol. 2, pp. 787–791.
 34. Glushko G.S. *Differentsialnoe uravnenie dlya masshtaba turbulentnosti i raschet turbulentnogo pogrannichnogo sloya na ploskoy plastine* [Differential equation for turbulence scale and calculation of turbulent boundary layer on flat plate]. *Turbulentnye techeniya* [Turbulent flows]. Moscow, Nauka Publ., 1970. pp. 34–44.
 35. Launder B.E. On the computation of convective heat transfer in complex turbulent flows. *Journal of Heat Transfer*, 1988, vol. 110, pp. 1112–1128.
 36. Chien W.L., Lien F.S., Leschziner M.A. Computational modelling of turbulent flow in turbomachine passage with low-Re two-equation models. *Computational Fluid Dynamics*, 1994, vol. 1, pp. 517–524.
 37. Boyun Guo, Gefei Liu. *Applied drilling circulation systems: hydraulics, calculations and models*. Burlington, Gulf Professional Publ., 2011. 272 p.
 38. Chilton R.A., Stainsby R. Pressure loss equations for laminar and turbulent non-Newtonian pipe flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, vol. 124, no. 5, pp. 522–539.
 39. Madlener K., Frey B., Ciezki H.K. Generalized Reynolds number for non-Newtonian fluids. *Program of Propulsion Physics*, 2009, no. 1, pp. 237–250.
 40. Acary R.C., Fernandez N.E.D., Narbona R.G., Vigneaux P. A Well-balanced finite volume-augmented Lagrangian method for an integrated Herschel–Bulkley model. *Journal of Scientific Computing*, 2012, vol. 53, pp. 608–641.
 41. Morsi S.A., Alexander A.J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. *Journal of Fluid Mechanics*, 1972, vol. 55, no. 2, pp. 193–208.
 42. Di Giacinto, Sabetta R., Piva K. Effects of two-way interaction in gas flows with a loose set of particles. *Theoretical foundations of*

- engineering calculations*, 1982, vol. 104, no. 3, pp. 122–131. In Rus.
43. Miloshevich H. Modelling of two-phased turbulent flows in jets with burning particles and phase transition in them. *Proceedings of the 4th European CFD conference*. Athens, Greece, 1998. Vol. 1, Pt. 1, pp. 175–179.
 44. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. *Matematicheskie modeli neodnorodnoy anizotropnoy turbulentnostivo vnutrennikh sistemakh* [Mathematical models of inhomogeneous anisotropic turbulence at the internal flows]. Tomsk, Tomsk State University of Publ. house, 2001. 448 p.
 45. Mohammed A.R., Miska S.Z. Experimental study and modeling of yield power-law fluid flow in annuli with drillpipe rotation. *IADC/SPE Drilling Conference. OnePetro*. Houston, Texas, USA, 2008. pp. 1–16.
 46. Nakashima C.Y., Oliveira S. Jr., Caetano E.F. Calculation of pressure drop in narrow rotating annular clearances. *Revista de Engenharia Térmica*, 2008, vol. 7, no. 2, pp. 27–34.
 47. Xie L., Chaudhary S., Chen Z., Analysis of the effect of eccentricity on displacement of non-Newtonian fluids with a hybrid method. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition. OnePetro*. Houston, Texas, USA, 2015. No. 9 (September), pp. 1–13.
 48. Dokhani V., Yue Ma, Zili Li, Tie Geng, Mengjiao Yu. Effects of drill string eccentricity on frictional pressure losses in annuli. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 187, no. 106853, pp. 1–17.
 49. Hashemian Y., Yu M., Miska S., Shirazi S., Ahmed R. Accurate predictions of velocity profiles and frictional pressure losses in annular YPL-fluid flow. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2014, vol. 53, no. 6, pp. 355–363.
 50. Haciislamoglu M. *Non-Newtonian fluid flow in eccentric annuli and its application to petroleum engineering problems*. PhD thesis. Louisiana, 1989. 231 p.
 51. Vaziri E., Simjoo M., Chahardowli M. Application of foam as drilling fluid for cuttings transport in horizontal and inclined wells: a numerical study using computational fluid dynamics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 194, no. 11 (November, 107325), pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107325> (accessed 15 May 2022).
 52. Abdelrahman M.A., Ibnelwaleed A.H., Mustafa S.N., Hamidreza K., Ramadan A. CFD modeling of particle settling in drilling fluids: Impact of fluid rheology and particle characteristics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 199, no. 4 (April, 108326), pp. 1–13. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108326> (accessed 15 May 2022).
 53. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Cuttings transport in hole cleaning considering well orientation, pipe eccentricity and pipe rotation: Problems, results, prospects (survey)]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 131–149. In Rus.

Received: 4 June 2022.

Information about the authors

Sergey N. Kharlamov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Janhorbani Mehran, post-graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.