

УДК 504.61-536.252

ТРАНСПОРТ ШЛАМА БУРОВЫМ РАСТВОРОМ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ. ЧАСТЬ 1. МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Харламов Сергей Николаевич¹,
kharsn@mail.ru

Джанхорбани Мехран¹,
mehran.janghorbani@gmail.com

Зайковский Всеволод Викторович²,
4lk4st@gmail.com

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

¹ Филиал Томского нефтепроводного управления АО «Транснефть – Западная Сибирь»,
Россия, 634050, г. Томск, ул. Набережная р. Ушайки, 24.

Актуальность исследования связана с разработкой технических решений для бурения скважин с горизонтальными окончаниями, при которых очистка кольцевого пространства от частиц пробуренного шлама в условиях гидротранспорта представляется технологически и экономически высокоэффективной по сравнению с другими, например, механическими способами.

Цель: разработка вычислительной методики/подхода к детальному прогнозу и глубокому пониманию физического механизма влияния гидротранспорта на интенсивность очистки скважин. Причем стратегия такого исследования ориентирована на выбор условий течения и реологических параметров модели, при которых полученные подробные теоретические сведения об эволюции динамической структуры потока следует использовать при разработке расчетных методов и формулировке рекомендаций инженерному персоналу для предупреждений аварийных ситуаций.

Объект: новый класс вязких течений дисперсных сред, индуцированных внешними и внутренними силами, характерными для функционирования специального оборудования, обеспечивающего движение бурового раствора со сложной реологией в скважине через эксцентричное кольцевое межтрубное пространство.

Методы исследования соответствуют анализу гидродинамики и массопереноса при сложных сдвиговых течениях гетерогенных сред в пространственных областях с произвольной образующей ствола скважины, а также уяснению физической картины и условий очистки.

Результаты. Данная работа представляет собой первую часть исследований, посвященных решению комплексных проблем, сопровождающих гидротранспорт реологически сложных смесей по скважинам с протяженным горизонтальным участком и их очистке от бурового шлама. В первой части представлены данные по обоснованному моделированию гидродинамики вязкой дисперсной смеси в рамках обращения к полным уравнениям, описывающим законы сохранения массы, импульса для выявления особенностей, установления закономерностей течения в эксцентричной области кольцевого межтрубного пространства, а также поиска путей интенсификации процесса очистки в условиях реального бурения. Предполагается, что вязкостно-инерционно-гравитационное движение жидкости типа Гершеля–Балкли с твердыми частицами (песка) выполняется в условиях развивающегося по пространству ламинарно-турбулентного, прямого и закрученного (методом подвижной стенки) течения. Отмечается, что формирование режимов с активным и консервативным действием внешних и внутренних сил позволяет проводить эффективную очистку межтрубного пространства. Выполнен анализ системы определяющих уравнений математической модели гидродинамики и массопереноса на предмет возможности учета изменений нелинейности теплофизических свойств, устойчивости к возмущениям на границах области течения и раздела фаз. Отмечается, что предсказание молярных процессов проводится в рамках современных статистических моделей RANS-метода и эйлерово-лагранжева подхода к описанию движения гетерогенных сред, реализованного в ПО ANSYS CFD. Показано, что в условиях реального бурения математическая модель успешна по определению спектра локальных и интегральных параметров гидродинамики и массопереноса в широком диапазоне изменений условий бурения, позволяющих уяснить эффекты седиментации частиц на нижнюю стенку, динамику отрыва вихрей и перенос частиц в низкорейнольдсовую область с взвешенным состоянием структуры смеси и инерционную зону ядра потока. Отмечается, что на интенсивность гидротранспорта вниз по потоку заметное влияние оказывают условия входа фаз, реологические характеристики раствора. Расчетами установлены области течения с удовлетворительным согласием динамических характеристик течения по предлагаемой модели с имеющимися опытными данными, например, напряжению трения, радиальным распределениям компонент вектора скорости раствора по длине скважины при различных углах отклонения ее ствола от вертикали. Более того, результаты настоящей работы следует учитывать при изложении материала второй части как дополнения к исследованию гидротранспорта по предложенной методике реального бурения горизонтальных скважин при оптимальных реологических свойствах раствора.

Ключевые слова:

скважина, горизонтальный участок, эксцентричность, бурение, моделирование, гидродинамика, реология, шлам, очистка.

Введение

Трудности очистки скважин с протяженными горизонтальными участками большей частью связаны с

отсутствием информации об особенностях пространственных процессов переноса массы, импульса и теплоты, формирующих скорости бурения, течения промывочной жидкости, изменений рео-, физико-

химических и механических свойств смеси (шлама и жидкости) в технологическом процессе. Накопление бурового шлама в донной части межтрубного пространства ведёт к ряду серьёзных технических проблем. Поэтому безаварийное бурение вынуждает персонал часто останавливать процесс и осуществлять очистку скважины. Эти трудоемкие и достаточно длительные операции могут занимать несколько суток. Поэтому крайне важно иметь результаты с детальным решением задачи очистки скважины при самом бурении и подробное описание условий, способствующих экстенсификации процесса накопления шлама. Однако уяснение особенностей и установление закономерностей движения твердых частиц через межтрубное эксцентричное пространство, образованное бурильной колонной и стенками скважины в разнообразных режимах, довольно сложны и возможны только в рамках комплексного физико-математического и численного моделирования с привлечением моделей и методов механики гетерогенных сплошных сред. Эти модели составляют основное содержание специальных программных комплексов, представленных, например, в ПК ANSYS CFD, и вполне успешно способны исследовать рассматриваемые проблемы [1, 2].

Учитывая сказанное, в настоящей работе поставлены следующие цели – разработать численную методику для всестороннего анализа физического механизма влияния гидротранспорта на интенсивность очистки скважин в реальных условиях бурения, привлекая современные математические модели гидродинамики, реализованные в ANSYS CFD (Computational Fluid Dynamics); оценить возможности методики для точного и детального прогноза взаимосвязанных эффектов молекулярного и молярного процессов переноса массы и импульса в реологически сложных гетерогенных средах при бурении; выдать практические рекомендации инженерам-нефтяникам по оптимальным подходам к моделированию бурения, способствующим повышению качества очистки горизонтальных стволов скважин.

Библиографические данные по проблеме моделирования транспорта шлама и очистки скважин

Важно подчеркнуть, что с тех пор, как Х. Бильгесу с соавт. [3] обратились к использованию эйлерового подхода для моделирования процесса накопления и очистки от шлама стволов скважин ряд исследователей повторили эту попытку. Было установлено, что данный подход весьма эффективен при анализе процессов, реализованных на небольших лабораторных установках в довольно широком диапазоне их функционирования. Здесь следует отметить результаты следующих авторов: С. Хан с соавт. [4] и С. Хяофенг с соавт. [5] изучали эффект вращения внутренней трубы вдоль своей собственной оси; Р. Руки с соавт. [6] применили этот подход для промысловых жидкостей на основе пены; Т. Офей с соавт. [7] исследовали влияние разных параметров на процесс очистки; М. Камяб с соавт. [8] моделировали процесс бурения с колонной гибких труб; С. Снеха с соавт. [9] выполнили расчеты и привели оценки эффективности

очистки при использовании буровых растворов на основе воды и углеводорода; О. Хейдари с соавт. [10], в отличие от других исследователей, предпочитавших расчет структуры течения жидкой фазы по $k-\varepsilon/k-\omega$ моделям турбулентности, применили более сложную и «гибкую» модель турбулентности для рейнольдсовых напряжений; Б. Панг с соавт. [11] использовали реологическую модель Гершеля–Балкли для описания свойств неньютоновской жидкости, которая хорошо соответствует изменению реологии большинства буровых растворов. К этому времени эйлеровский подход был достаточно обоснован и верифицирован в жидкостно-жидкостных средах и адаптирован в исследованиях течений дисперсных систем с частицами твердой фазы. Причем особенности смесей описывались в рамках моделей, основанных на положениях кинетической теории гранулярного строения. В этом направлении выделяются исследования, выполненные по моделям Д. Гидаспоу [12] и М. Сиамлал, Т. Обриен [13]. Заметим, что другие авторы моделировали процесс очистки с помощью лагранжева подхода, который позволяет рассчитать траекторию и местоположение разных частиц твердой фазы. Этот подход значительно требовательнее с точки зрения вычислительных ресурсов, но даёт более полную картину процесса. Первыми применили его У. Мме с соавт. [14], которые также изучили эффекты влияния геометрической формы частиц на их транспорт. Эти исследования были продолжены Э. Епелле с соавт. [15], которые также отметили, что различия расчетов между этими подходами незначительные. С. Ахшик с соавт. [16] использовали оба подхода для моделирования гидродинамики трёхфазной смеси и доказали, что подходы и методы вычислительной гидродинамики в рамках ПК ANSYS CFD способны давать надёжные результаты. В целом сравнения с экспериментальными данными, полученные этими авторами, позволяют утверждать, что результаты моделирования локальных и интегральных процессов отличаются от реальных в пределах 1...12 %, например, по концентрации шлама и перепаду поля давления. Однако важно отметить, что все указанные авторы использовали режим стационарного течения при моделировании гидродинамики смеси, в то время как хорошо известно, что процесс накопления шлама является по сути неустановившимся и по мере накопления шлама поле скорости жидкой фазы существенно меняется по пространству. Все эти особенности способны активно влиять на процесс седиментации частиц. В силу сказанного, в данной статье обосновывается оригинальная математическая модель для прогноза гидротранспорта смеси бурового раствора с частицами шлама в скважинах, основанная на эйлери-лагранжевом подходе для описания развивающегося по пространству сложного сдвигового течения в условиях прямого и закрученного движений с привлечением алгоритма (strong coupling), учитывающего детали внутри- и межфазного взаимодействия между капельной жидкостью и твердыми частицами.

Физические допущения к построению модели внутреннего течения реологически сложной смеси

В настоящем исследовании рассматривается сценарий течения гетерогенной среды, включающей буровой раствор с частицами продуктов выработки породы, в режиме, отличающемся следующими особенностями, характерными для условий реального бурения. Так, предполагается, что движение капельной жидкости соответствует условиям развивающегося (по межтрубному эксцентричному пространству и стационарному по времени ламинарного или турбулентного) течения, которое осложнено нелинейностью теплофизических и морфологических свойств смеси, а также переменным во времени вводом частиц продуктов выработки во входном сечении скважины. Данное условие отвечает учету особенностей технологического процесса бурения и функционирующего оборудования, в частности, таких параметров, как скорости бурения, площади и диаметра долота, объема и плотности частиц, состава и строения породы. Принимается, что в качестве несущей среды выступают обычные буровые растворы с реологическими свойствами неньютоновской капельной жидкости. Учитывается, что течение осложнено эффектами седиментации частиц бурового шлама в нижней части межтрубного пространства. Осаждение частиц формирует слой, размеры которого много меньше поперечного сечения межтрубного пространства, но очень чувствительны к изменению крутящего момента буровой колонны. Это интенсифицирует процессы взаимодействия узлов оборудования с загромождением сечения частицами твердой фазы и вызывает неблагоприятные эффекты заклинивания и прихвата труб. Морфологию бурового раствора определяет модель жидкости Гершеля–Балкли. Плотность частиц шлама много больше плотности диспергированной составляющей смеси. Более того, принимается, что частицы бурового шлама сферичны по форме, инертны, их доля в смеси определяется порядком $\alpha_p < O(10^1)$, а эффект от их соударений друг с другом пренебрежимо мал. Предполагаем, что проточный режим пространственного изотермического несжимаемого течения капельной жидкости вязкостно-инерционно-гравитационный, стационарный по условиям входа в скважину, осложненный нестационарными эффектами загрузки твердых частиц на входе в скважину. Распределение загрузки монодисперсных частиц соответствует однородному профилю постоянной интенсивности за единицу времени рабочего процесса. При указанных условиях представляется важным: численно исследовать особенности изменений структуры потока; уяснить закономерности определения критических (минимально рекомендуемых) динамических параметров шлама по скважине; получить сведения об оптимальных/безаварийных условиях функционирования оборудования при бурении.

Формулировка математической модели процесса гидротранспорта смеси

Поскольку рассматриваемый процесс бурения сопровождается нестационарным характером простран-

ственного вязкостно-инерционно-гравитационного реологически сложного движения смеси по эксцентричным трубам с горизонтальной и наклонной ориентацией, определяющими уравнениями математической модели гидродинамики выступают законы сохранения массы (1), импульса (2), которые для условий несжимаемости вместе с соответствующими замыканиями (3), (4) имеют вид [17–21]:

$$\frac{\partial(\alpha \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \rho_f \mathbf{v}_f) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha \rho_f \mathbf{v}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \rho_f \mathbf{v}_f \mathbf{v}_f) = -\alpha \nabla p + \nabla \cdot (\alpha \boldsymbol{\tau}^s) + \mathbf{S}_f + \alpha \rho_f \mathbf{g}; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\tau}}^s &= \boldsymbol{\tau}_L + \boldsymbol{\tau}_T, \quad \boldsymbol{\tau}_L = 2\mu \dot{\mathbf{S}} - \frac{2}{3}(\mu \nabla \cdot \mathbf{v}_f) \mathbf{I}, \\ \dot{\mathbf{S}} &= 0,5[\nabla \mathbf{v}_f + (\nabla \mathbf{v}_f)^T], \quad \mathbf{S}_f = \sum_{i=1}^2 \mathbf{F}_{f,i} / V; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^2 \mathbf{F}_{f,i} = \mathbf{F}_a + \mathbf{F}_D, \quad \mathbf{F}_a = -\frac{1}{6} \pi d^3 \rho_f \mathbf{g}. \quad (4)$$

В записи уравнений (1)–(4) принимается: α – объемная доля жидкой фазы; в источниковом члене $\mathbf{S}_f$ доминируют силы, ответственные за эффекты плавуности и сопротивления ($\mathbf{F}_a, \mathbf{F}_D$) соответственно. Описание реологических свойств вязкой среды проводится в рамках соотношений кинетической теории гетерофазного гранулярного течения. Причем при определении индивидуальных компонент тензора вязких напряжений используется RANS-подход статистической теории турбулентности [1–6], где $\boldsymbol{\tau}^s$ – тензор эффективных напряжений в смеси – представляет собой суперпозицию соответствующих параметров при ламинарном (L) и турбулентном (T) процессах переноса импульса жидкой фазы (3). Более того, допускаем, что молярные процессы описываются соотношением Буссинеска в виде (5):

$$\boldsymbol{\tau}_T = 2\mu_t \left[\dot{\mathbf{S}} - \frac{1}{3} k \cdot \mathbf{I} \right], \quad (5)$$

где $k = \frac{\overline{\rho_f u'_i u'_i}}{2}$, $i = 1, 3$ – кинетическая энергия турбулентности; $\dot{\mathbf{S}}, \mathbf{I}$ – тензоры скоростей деформаций жидкой фазы и единичный тензор актуальных (или осредненных по Рейнольдсу при анализе турбулентных режимов течения смеси) величин соответственно.

В рамках модели течения неньютоновской жидкости типа Гершеля–Балкли [22] эффективную вязкость μ в (3) определяем в виде (6):

$$\left\{ \begin{aligned} \mu &= \mu_{\text{пред}}, \quad \dot{\mathbf{S}} < \frac{\tau_0}{\mu_{\text{пред}}} \\ \mu &= \frac{\tau_0 + \kappa [\dot{\mathbf{S}}^n - (\tau_0 / \mu_{\text{пред}})^n]}{\dot{\mathbf{S}}}, \quad \dot{\mathbf{S}} \geq \frac{\tau_0}{\mu_{\text{пред}}} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Добавим, что в модели принято, например, для несжимаемого течения смеси: $\mu = \mu(I_2)$,

$$I_2 = (\mathbf{S}; \mathbf{S}) = \sum_{i,j=1}^3 S_{ij} S_{ji},$$

где I_2 – второй инвариант тензора скоростей деформаций. Тогда эффективную вязкость неньютоновской среды можно представить в виде функциональной связи типа $\mu = \mu(\dot{\mathbf{S}}; \dot{\mathbf{S}})$ или $\mu = \mu(\boldsymbol{\tau}; \boldsymbol{\tau})$, где в рамках (6) принято: $\dot{\mathbf{S}}^2 = 0,5(\dot{\mathbf{S}}; \dot{\mathbf{S}})$, $\boldsymbol{\tau}_0^2 = 0,5(\boldsymbol{\tau}; \boldsymbol{\tau})$. Хорошо известно [1, 2, 23–25], что в рамках квази- и анизотропных течений турбулентные характеристики смешанного течения (μ_t) вполне корректно предсказываются по однофазной версии модели рейнольдсовых напряжений $RSS-k\omega/kL$, где опорной базой выступает двухпараметрические $k\omega$ - SST -, kL -модели, оригинальный вид которых представлен в [26–29]. Тогда, следуя идеям [23–26, 29, 30], рассматриваемые сложные сдвиговые течения можно успешно рассчитывать по многопараметрическим моделям RANS метода – моделям рейнольдсовых напряжений RSS -модели (7) с опорной двухпараметрической гидродинамической ($k\omega$ - SST , kL) базой (8). Общий вид таких моделей, согласно [23, 24, 29], следующий:

$$C_{ij} = D_{ij} + P_{ij} + R_{ij} + \varepsilon_{ij}; \quad (7)$$

$$C_r = D_r + P_r + \varepsilon_r. \quad (8)$$

Здесь индексы « i, j » ($i, j = 1, 3$) отвечают, соответственно, напряжениям Рейнольдса ($\overline{u'_i u'_j}$); « r » – формальный параметр конкретного диссипативного уравнения опорной базы, определяющий обращение к дифференциальному уравнению переноса, например, для ω , ε или L . Другие символы характеризуют механизмы переноса напряжений $\overline{u'_i u'_j}$ (и признака r) вследствие конвекции (C), диффузии (D), порождения (P), перераспределения (R), диссипации (ε), детальную запись которых можно найти, например, в [29].

При выборе модели турбулентности в расчетах процессов в капельной среде следует учитывать, что в рамках принятых выше физических допущений, учитывающих особенности геометрической и гидродинамической конфигурации задачи, состав гетерофазной системы, значения объемной доли дисперсной фазы (до 10 %), течение рассматриваемой смеси будет отличаться анизотропными эффектами. Поэтому для выявления особенностей потока расчеты целесообразно выполнять по RSS -моделям турбулентности (в рамках ПК ANSYS CFD) с опорными k -, ω -, ε -, L -базами. Последние требуют модификаций на учет механизмов движения двухфазной среды, например, за счет уноса твердых частиц бурового шлама (как частиц пассивной примеси) вязкой жидкостью вследствие работы сил межфазного взаимодействия,

В настоящей работе моделирование и расчет состава смеси проводится в рамках положений Эйлера-Лагранжева (Л) подхода, в котором эффект внешних сил определяется комплексным влиянием силы межфазного взаимодействия. Причем в ней доминирует сила сопротивления $\mathbf{F}_D$. Также допускается [30–33], что выталкивающей силой можно прене-

бречь при малых значениях объемной доли частиц α_p . Тогда эволюцию динамической структуры и траектории частиц в кольцевом пространстве можно рассчитать по (9) с замыкающими связями типа (10), (11):

$$m_p \frac{\partial \mathbf{v}_p}{\partial t} = \mathbf{F}_v + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_{pres} + \mathbf{F}; \quad (9)$$

$$\mathbf{F}_v = (\rho_p - \rho_f) \mathbf{g} V_p, \quad \mathbf{F}_{pres} = -V_p \nabla p, \\ \mathbf{F}_D = \frac{c_d \rho_f A_p}{2} |\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p| (\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p); \quad (10)$$

$$c_d = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}, \quad Re = \frac{\rho_f d_p |\mathbf{v}_f - \mathbf{v}_p|}{\mu_f}, \\ A_p = \frac{\pi d_p^2}{4}, \quad V_p = \frac{\pi d_p^3}{6}. \quad (11)$$

В соотношениях (9)–(11) индексы « p, f » описывают твердые частицы и жидкость соответственно; $\mathbf{F}_D$ – сила гидродинамического сопротивления; $\mathbf{F}_{тяж}$ – сила тяжести, входящая в формулировку выталкивающей силы $\mathbf{F}_v$ (10). Заметим, что для общности условий математической постановки задачи в (9) $\mathbf{F}$ можно рассматривать как параметр, отвечающий за влияние сил Саффмэна/Магнуса, которыми здесь обоснованно пренебрегается; A_p , V_p – площадь и объем частицы соответственно.

Краевые условия задачи

Для численного интегрирования определяющих уравнений математической модели (1)–(11) используются следующие условия. Так, *геометрическую часть* формируют соотношения пространства: продольная длина (L), ширина и смещение (b) центра ядра относительно продольной оси внешней трубы. *Динамическая часть* содержит условия для задания: скорости потока на входе (U_0), интенсивности турбулентности (Tu), локальных свойств вихря – кинетической энергии (k) и скорости диссипации (ε) турбулентности, масштаба (L) энергосодержащих вихрей и т. п. *Диффузионная часть* отвечает заданию состава (α_i) входящей смеси. *Теплофизическая часть* связана с заданием физических свойств смеси: плотности несущей среды, материала частиц и их объемной доли α_p ; $\mu_f = \mu_f^0$, $\lambda_f = \lambda_f^0$ – динамической вязкости и теплопроводности жидкости соответственно; а также других структурных величин, характеризующих рассматриваемую смесь. *Начальные условия* для твердых частиц соответствуют заданию их распределений на входе в скважину за единицу времени с учетом условий рабочего процесса бурения в виде: $N_i(t) = N_i^0 + [(t-t_0)/\Delta t] * C$, здесь C – величина ввода i -й частицы за сек, $[c^{-1}]$, где $C = RS_d/V_p$, R – скорость бурения, S_d – площадь долота, V_p – объем частицы, N_i^0 – распределение i -й частицы в начальный момент времени. *Граничные условия* отвечают случаю изотермического течения и описывают параметры: на входе дисперсной смеси соответственно для Γ_1 , внешней границе кольцевой зоны для Γ_2 , стенке внутренней трубы Γ_3 , выходе Γ_4 . Так, на Γ_1 – однородные профили фаз (известные для процесса) по поперечному сечению, причем фазы находятся

в равновесии. На Γ_4 – условия непрерывности течения. На стенках (Γ_2, Γ_3) для несущей фазы принимаются условия прилипания для всех осредненных и пульсационных характеристик капельной жидкости; для твердых частиц – условия проскальзывания.

Детали численного решения

Геометрическая конфигурация горизонтального участка скважины представляет собой кольцевой канал с соосным расположением труб с параметрами: $D=20$ см, $d=12$ см – внешний и внутренний диаметры труб, что соответствует обычным размерам долот и бурильных труб в России и за рубежом для горизонтальных участков; длина скважины $L=6...10$ м отвечает протяженности порядка $(60...80)D_{гд}$ с целью исключения влияния на течение возмущений со входа, где $D_{гд}$ – гидравлический диаметр; эксцентricность $e=(75...85)\%$, что также характерно для горизонтальных участков и условий, когда бурильная труба лежит на своих муфтах на нижней стенке скважины (рис. 1).

Заметим, что для негоризонтальных секций с произвольным углом наклонности задание эксцентricитета невозможно. Это связано с тем, что данный параметр существенно зависит от геометрии скважин и бурильной колонны. Но, учитывая, что в идеале трубы должны быть расположены почти концентрично, то моделирование было выполнено при указанных выше значениях.

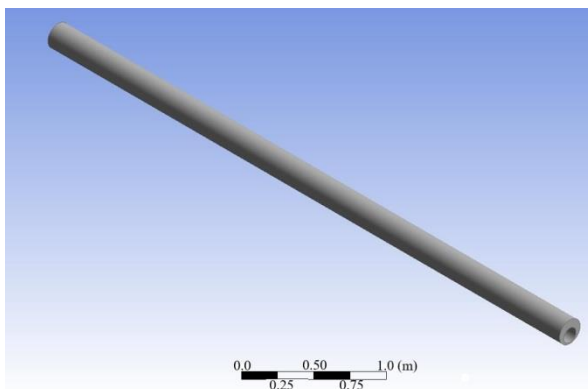


Рис. 1. Геометрия скважины с эксцентricной бурильной трубой

Fig. 1. Geometry of a well with eccentric drill pipe

Наши предварительные исследования по выяснению вида оптимальной разностной сетки для анализа особенностей гидродинамики дисперсного потока показали, что с точки зрения затрат на реализацию алгоритма, получения численного решения соответствующих уравнений математической модели и точности прогноза изменений локальных и интегральных параметров течения, массопереноса в смеси в особых зонах течения можно считать подходящей сетку с общим числом восьмиугольных ячеек порядка: 325.000 – для горизонтальных участков и 305.600 ячеек – для всех остальных случаев. Заметим, что на таких сетках погрешность расчета локальных значений полей скоростей при увеличении числа ячеек не

превысила 2 %. Вид такой разностной сетки показан на рис. 2.

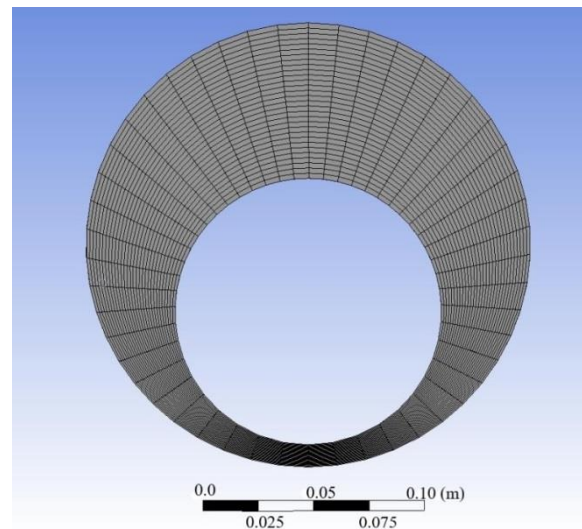


Рис. 2. Разностная сетка в поперечном сечении межтрубного пространства

Fig. 2. Difference mesh in the shell side cross-section

При построении численного решения уравнений (1)–(11), описывающих гидродинамику и массоперенос в смеси, используется алгоритм, отвечающий за реализацию блоков: 1) конечно-разностную аппроксимацию дифференциальных уравнений, сводящую уравнения к соответствующему дискретному аналогу; 2) построение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с искомыми величинами для динамической и диффузионной задачи в узловых точках расчетной сетки; 3) решение СЛАУ итерационным методом. Эти вопросы детально изложены, например, в [1, 2, 23–25, 29]. Для достижения требуемой точности интегрирования уравнений вводится критерий погрешности между решениями, получаемыми на двух последних итерациях ($m, m+1$), для соответствующих пространственных изменений искомых локальных параметров ($\Phi = \{v_f, v_p, v_i, v_j, k, \varepsilon, \omega, L\}$) и их интегральных значений (например, $\Phi_{wf} = \tau_{wf}$ – сопротивление трения), отвечающих виду (12):

$$\max_{i,j,k} \left\{ \frac{|\Phi_{i,j,k}^{m+1} - \Phi_{i,j,k}^m|}{\Phi_{i,j,k}^{m+1}} \right\} \leq \Delta_\Phi, \quad \Delta_\Phi = O(10^{-3}), \quad \% \quad (12)$$

При определении поля давления используется стандартная процедура PISO (расширение алгоритма SIMPLE [21, 34]), а также алгоритм Strong Coupling, ПО ANSYS CFD [21], учитывающий детали внутри- и межфазного взаимовлияния между частицами капельной жидкости и твердыми частицами.

Важные замечания по валидации модели, верификации численного алгоритма и работоспособности методики расчета задач гидротранспорта

Хорошо известно [1, 2, 11, 15, 16], что большинство современных буровых растворов являются неньютоновскими жидкостями. Заметим, что при обобщении

результатов расчетов практических режимов бурения для смесей с ньютоновской и неньютоновской реологией весьма важно установить диапазон изменений определяющих критериев задачи гидротранспорта. В нашем случае для формулировки критериев Бингама, Рейнольдса имеем соотношения типа (13)–(16) в форме, рекомендованной А. Буше [35], Г. Лию [36]:

$$Bi_{HB} = \left(\frac{\tau_0}{k} \right) \left(\frac{d_p}{|v_f - v_p|} \right); \quad (13)$$

$$Re = \frac{4(2n+1)}{n} \times \left[\frac{7,48 \rho v^{2-n} \left(\frac{d_2 - d_1}{24} \right)^n}{\tau_0 \left(\frac{d_2 - d_1}{24v} \right)^n + 0,0021k \left(\frac{2(2n+1)}{nc_a} \right)^n} \right]; \quad (14)$$

$$c_a = 1 - \left(\frac{1}{n+1} \right) \times \frac{\tau_0}{\tau_0 + 0,0021k \left\{ \frac{0,0044q(2n+1)}{n\pi \left[\frac{d_2}{24} - \frac{d_1}{24} \right] \left[\left(\frac{d_2}{24} \right)^2 - \left(\frac{d_1}{24} \right)^2 \right]} \right\}}; \quad (15)$$

$$Re_c = \left[\frac{8(2n+1)}{ny} \right]^{\frac{1}{1-z}}, \quad y = \frac{\log n + 3,93}{50}, \quad z = \frac{1,75 - \log n}{7}. \quad (16)$$

Заметим, что в связях (14)–(16) величины отвечают системе единиц изменений США, т. е. v – скорость, [фут/с]; ρ – плотность [фунт/галлон]; q – дебит [галлон/мин]; k – индекс консистенции [сантипуаза]; τ_0 – предел текучести [фунт/100 фут²]. В частности, ньютоновская жидкость имела изменение динамической вязкости в диапазоне 1–40 сПз. Такие значения соответствуют «кажущимся» вязкостям большинства растворов, используемым при бурении. Причина этого решения заключается в том, что для описания поведения буровых жидкостей существует ряд реологических моделей, три из которых широко используются (модель Бингама, степенного закона и Гершеля–Балкли). Каждая из этих моделей имеет свои индивидуальные параметры, которые не связаны друг с другом. Единственный способ связать их через формулировку кажущейся вязкости, подобно (6). Плотность буровых растворов имеет широкий диапазон, но для выполнения сравнений и выявления особенностей изменений гидродинамики растворов была принята плотность, подобная значению плотности пресной воды (1000 кг/м³).

Здесь отметим, что для проведения расчетов с оптимальными реофизическими свойствами (эти данные представляются в части 2 исследования указанной в настоящей работе проблемы моделирования гидротранспорта с учетом особенностей ее детально-

го анализа [37–42]) допускается, что твердую фазу определяют одномерные шарообразные частицы песка с плотностью $\rho_p = 2650$ кг/м³, диаметром $d_p = 6$ мм. Считается, что в области входа реальные скорости частиц равны нулю. Скорость бурения породы – $R = 10 \dots 12$ м/ч. Число частиц, загружаемых в эксцентричное пространство для случая горизонтального участка скважины, соответствует величине порядка 825...850, для всех остальных геометрических конфигураций – 800...820, что в рамках принятых значений их плотности и диаметра соответствует массе порядка 1,98 и 1,92 кг соответственно. Заметим, что такие значения частиц и их общей массы эквивалентны буровой выработке 0,024 и 0,023 м горной породы с доломом диаметра 20 см. Кроме того, принимается, что пористость породы равна нулю. И это считается наихудшей ситуацией с точки зрения очистки скважин. В расчетах (часть 2) моделируются процессы поступления раствора в скважину со скоростями входа: 1 м/с (или 320 гал/мин для данной геометрии); 1,5 м/с (480 гал/мин); 2 м/с (640 гал/мин); 2,5 м/с (800 гал/мин) и 3 м/с (960 гал/мин). Такие значения весьма характерны для бурения и с учетом задания вязкостей и морфологии раствора соответствуют режимам течения смеси при числах Рейнольдса в диапазоне $Re = 2000 \dots 240000$. Кроме того, учитывается, что углы отклонения ствола скважины от вертикали соответствуют значениям: 0°; 15°; 30°; 45°; 60°; 75° и 90°. Гидродинамическая конфигурация соответствует условиям прямоочного течения. Вращение труб не рассматривается, чтобы прогнозировать самые худшие случаи с точки зрения очистки скважин. Заметим, что данные условия встречаются при слайдинге, когда долото вращается только с помощью забойного двигателя для изменения угла наклона ствола.

Подчеркнем, что представленные в настоящей работе результаты (как сведения части 1 по фундаментальным особенностям формулировки вычисленной методики и алгоритма решения задачи гидротранспорта) демонстрируют суть численной реализации математической модели (1)–(11) с целью получения ее устойчивого решения, которое строится по алгоритму с отработкой следующих блоков. Так, первоначально рассчитывается течение жидкой фазы с привлечением блока Coupled, затем блок определения динамики частиц твердой фазы с выполнением глобальных итераций для линеаризации эффектов в расчетах фаз, обусловленных переменностью физических свойств и конвективно-диффузионными внутри- и межфазными процессами. В таком алгоритме устойчивость численного решения достигалась после 800...900 глобальных итераций на каждом временном слое. Причем погрешности расчета определяющих параметров модели принимают значения меньше 10^{-5} при обращении к ПО ANSYS FLUENT 2021 R1. Отметим, что в данной методике контроль за эффективностью процесса очистки следует проводить по параметру, ответственному за время, в течение которого все частицы проходят рассматриваемую геометрию и выходят из ствола скважины. С практической точки зрения анализ этого параметра важен для оптимиза-

ции очистки скважин, выдачи рекомендаций инженерному персоналу для уменьшения его значений. Также следует учитывать, что для практики важны сценарии уменьшения параметра, ответственного за время пребывания частиц при прохождении межтрубного пространства. Так, если при транспортировке смеси возникают процессы, при которых время пребывания частиц в межтрубном пространстве меньше или равно времени течения жидкой фазы (например, составляющим для рассмотренных скоростей течения значения 6, 4, 3, 2,4 и 2 с), тогда частицы пробуренной породы выносятся раствором из геометрии. Однако если с течением времени возникают режимы движения частиц, при которых это время превосходит время течения жидкой фазы, следует ожидать, что частицы будут накапливаться в донной части, причем тем интенсивнее, чем больше будет величина времени их пребывания в кольцевом канале. Такая ситуация требует оперативной остановки процесса бурения и проведения более частых операций по удалению загрязнений и очистке скважин от шлама.

Для глубокого анализа особенностей указанных течений важно детально анализировать и прогнозировать структурные изменения, сопровождающие транспорт рабочей смеси в особых областях рассматриваемого внутреннего течения в технологическом процессе бурения. А как отмечалось выше (стр. 5, физические допущения), этот процесс отличается сложными конвективно-диффузионными механизмами переноса импульса, массы в растворе. Поэтому чрезвычайно важно для инженера-исследователя иметь надежные данные о работоспособности модели, алгоритма, особенно при прогнозе динамики вихревых образований, интенсивности турбулентных пульсаций и их корреляций в рассматриваемых условиях течения, и прежде всего в низкорейнольдсовых областях течения – вблизи границ взаимодействия фаз и в окрестности поверхностей труб. Эти обстоятельства определяют необходимость моделирования процессов молярного переноса импульса в смеси с привлечением современных статистических моделей турбулентности второго порядка с транспортными дифференциальными уравнениями для напряжений Рейнольдса (RSS – Reynolds Shear Stresses) и двухпараметрической динамической опорной базой из дифференциальных уравнений для кинетической энергии турбулентности (k) и завихренности (ω) (например, уравнения RSS- $k\omega$ модели (7), (8) в рамках анализа данных [23–26, 29, 30]). Нами установлено, что эти модели позволяют иметь более точные распределения осредненных и пульсационных гидродинамических величин в кольцевом пространстве скважины, а также способны проникнуть в суть особенностей изменений неоднородной анизотропной структуры потока. Более того, на их основе возможно обоснованное совершенствование популярных в приложениях полуэмпирических методик, используемых в решении задач гидротранспорта и очистки скважин.

С учетом сказанного, преимущества RSS-моделей [23–29] и возможности методики в решении задач гидротранспорта демонстрируют данные на рис. 3–12.

Это результаты численного расчета изменений динамической структуры капельной жидкости (с частицами песка) в условиях устойчивого турбулентного ($Re=(6...8) \cdot 10^3$) прямого ($\Omega=0$ об/мин, рис. 3–6, 11) и закрученного (методом подвижной стенки, $\Omega=10...30$ об/мин, рис. 7–10, 12) течений дисперсной смеси в коаксиальной и эксцентричной области межтрубного пространства скважины. Заметим также, что расчеты отвечают изменению параметров в выходном сечении скважины с общей длиной $L=12$ м, внешним и внутренним диаметрами соответственно $D=0,20$ м, $d=0,12$ м, и эксцентricностью $e=70\%$ и соответствуют условиям полностью установившегося изотермического турбулентного течения смеси с данными на входе: $U_0=1$ м/с, $Tu=10\%$, $\mu=1$ сПз, $Re=8 \cdot 10^3$. Причем эффект наложения крутки ($\Omega=30$ об/мин), осложняющий течение смеси вдоль оси скважины, иллюстрирует картины радиального распределения локальных осредненных и пульсационных гидродинамических параметров, представленные на рис. 7–10, 12.

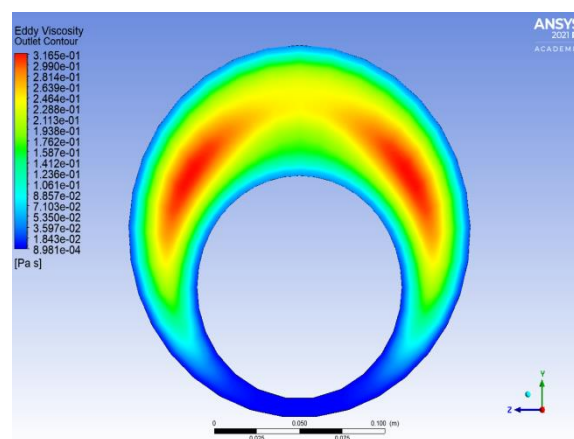


Рис. 3. Турбулентная вязкость при прямооточном течении

Fig. 3. Turbulent viscosity at the straight-through flow

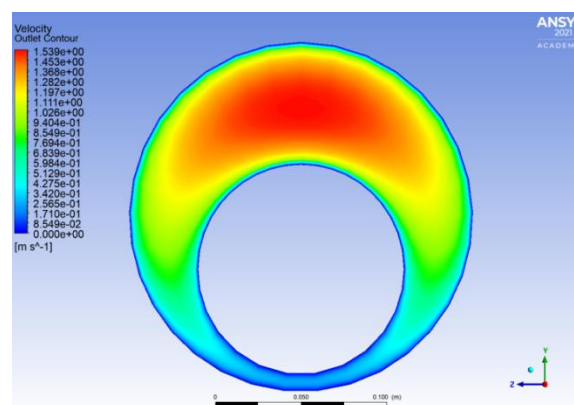


Рис. 4. Осевая компонента вектора скорости при прямооточном течении

Fig. 4. Velocity vector axial component at the straight-through flow

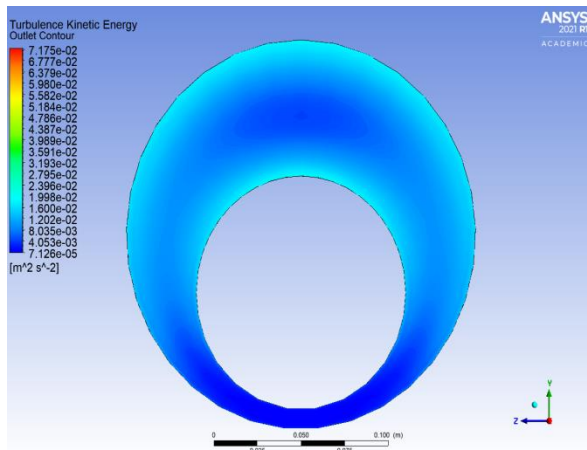


Рис. 5. Турбулентная кинетическая энергия при прямо-точном течении

Fig. 5. Turbulent kinetic energy

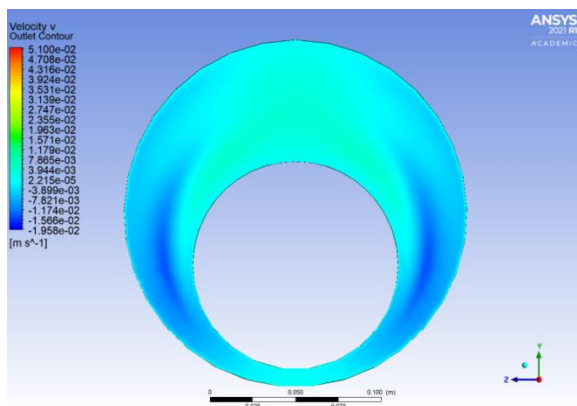


Рис. 6. Радиальная компонента вектора скорости при прямоточном течении

Fig. 6. Radial component of velocity vector

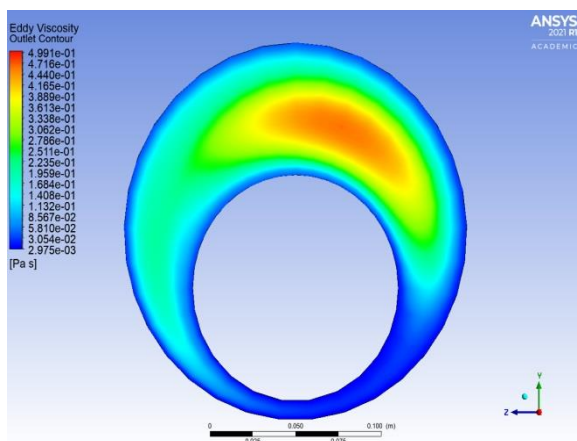


Рис. 7. Турбулентная вязкость при закрученном течении

Fig. 7. Turbulent viscosity at the swirling flow

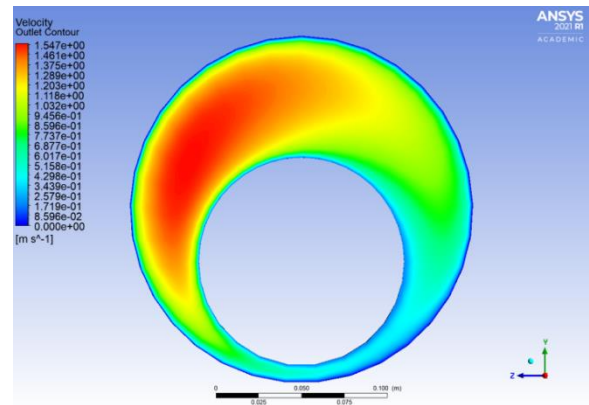


Рис. 8. Осевая компонента вектора скорости при за-
крученном течении

Fig. 8. Velocity vector axial component at the swirling flow

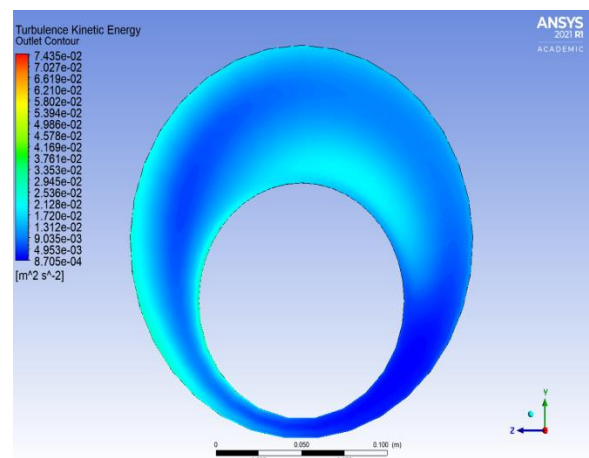


Рис. 9. Турбулентная кинетическая энергия при закру-
ченном течении

Fig. 9. Turbulent kinetic energy at the swirling flow

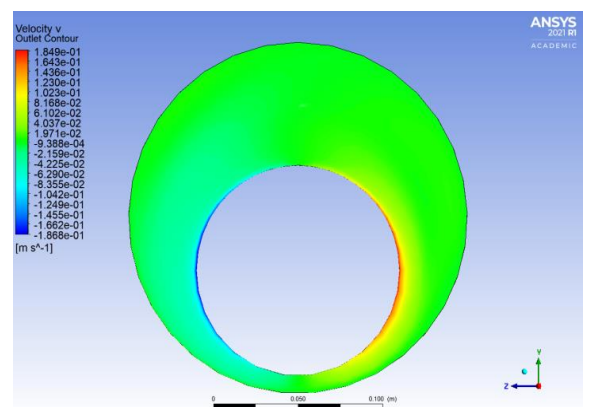


Рис. 10. Радиальная компонента вектора скорости при
закрученном течении

Fig. 10. Radial component of velocity vector at the swirling
flow

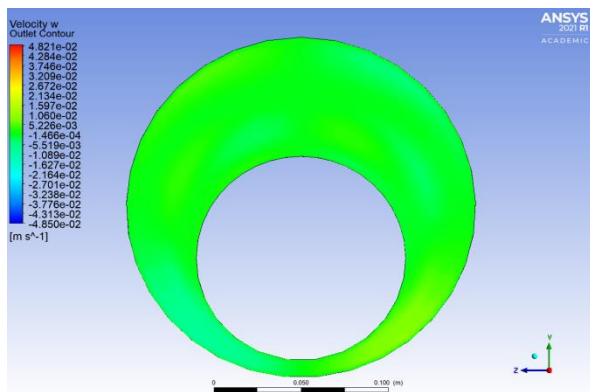


Рис. 11. Тангенциальная компонента вектора скорости (прямоточный поток $\Omega=0$)

Fig. 11. Tangential component of velocity vector (straight-through flow $\Omega=0$ rpm)

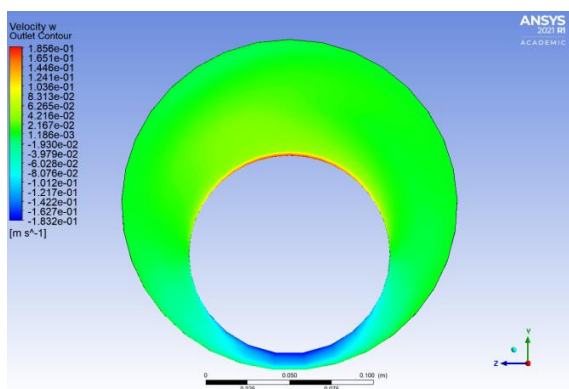


Рис. 12. Тангенциальная компонента вектора скорости (закрученный поток $\Omega=30$ об/мин)

Fig. 12. Velocity vector tangential component (swirling flow $\Omega=30$ rpm)

Анализируя особенности закрученного турбулентного течения, стоит отметить, что подобные режимы интересны для приложений, т. к. сопряжены с возможностью подавления турбулентности круткой и формированием условий для ламинаризации потока. Наши данные моделирования сложных сдвиговых течений в кольцевой области показывают (например, [29, 30]), что интенсивное вращение внутренней стенки приведет к структуре потока, в котором наблюдаются большие значения радиальных градиентов компонент вектора скорости, способные вносить возмущения в «постельный» слой шлама (в окрестности нижней стенки) и интенсифицировать процесс выноса твердых частиц из скважины, что ценно для очистки оборудования.

В целом анализ параметров, определяющих эволюцию структуры прямоточного потока в кольцевой области, указывает на существование особенностей в изменении поля скорости. Видно, что картины радиальных изменений молекулярной, молярной и эффективной вязкостей смеси неоднозначны из-за особенностей переноса импульса осредненного и пульсационного движения, направленных как на усиление возмущений течения в ядре потока, так и на их ослабление (при пассивной роли эффекта в демпфировании

турбулентности вязким пристеночным слоем). Также важно подчеркнуть, что кинетическая энергия турбулентности (рис. 5) проходит через все стадии преобразования по сечению кольцевого канала. Расчеты констатируют, что имеют место следующие физические эффекты, определяющие механизмы распределений параметров в радиальной плоскости по характеру изменений компонент вектора скорости (рис. 4, 6, 11): *выделение* турбулентной энергии из основного течения; *диффузия*; *конвективный* перенос; *вязкая* диссипация. Оцифровка высоких значений в исследуемых величинах (U_i , $i=1-3$; k , μ_t) подчеркивает не только роль размеров областей с интенсификацией конвективно-диффузионного переноса, но и способность потока к удержанию частиц от седиментации на дне скважины.

Законченное представление о необходимости привлечения сведений об эволюции динамической структуры по стволу скважины для выработки решений по интенсификации очистки/снижению размеров «постельной» зоны шлама дают данные о структуре закрученного потока (методом подвижной стенки). Так, из рис. 7–10, 12 следует, что закрутка приводит как к смещению зоны интенсивного движения, так и к относительному увеличению ее размеров в радиальной плоскости. Причем в зависимости от подвижности стенки с ростом Ω интенсифицируются радиальные «перетечки» вещества из донной части скважины. Последнее весьма ценно для практики, т. к. повышает значение прогнозов по предлагаемой вычислительной методике.

Более того, результаты части 1 указывают, что выявленный неоднородный характер турбулентности в данном классе течений является преобладающим на протяжении всей области, простирающейся до середины ядра (центральной части сечения скважины над буровой трубой). Полученные при моделировании пространственные распределения компонент тензора напряжений Рейнольдса позволяют утверждать, что течение сильно турбулентно в ядре. И несмотря на то, что градиент скорости основного осредненного течения относительно небольшой, влияние молекулярной вязкости не является пренебрежимо малым.

Также для уяснения роли нормальных напряжений Рейнольдса ($u_i'^2$, $i = 1, 3$) в изменении структуры и, соответственно, кинетической энергии турбулентности (k) и псевдозавихренности (ω) (как главных параметров при построении корректных замыканий для членов высшего порядка в $RSS-k\omega$ -модели турбулентности) отметим следующее. Расчеты указывают, что все значения степени турбулентности (Tu) возрастают от минимальных в срединной части поперечного сечения до максимальных в непосредственной окрестности стенок кольцевого пространства. Предварительные исследования развивающихся сложных сдвиговых течений [23–29] показывают, что такие результаты моделирования в скважинах хорошо согласуются с соответствующими опытными данными других авторов по анализу внутренних гомогенных и гетерогенных сред (например, [29]).

Кроме того, исследование особенностей течений в слоях, близких к стенкам, демонстрирует, что в вязком подслое, где перенос импульса жидкой фазы за счет пульсаций скорости пренебрежимо мал по сравнению с переносом за счет молекулярного трения, роль переноса нормальной составляющей осевой компоненты вектора скорости (u'^2) очень существенна. Эта особенность течения смеси ценна для практики приложений, поскольку относительно высокие значения пульсаций осевой компоненты вектора скорости способствуют интенсификации возмущений в пристеночном течении жидкой фазы. Все это позволяет утверждать, что изменение вязкости в этой области играет весьма активную роль в развитии турбулентности и может использоваться для разрушения «постельного» слоя шлама и перемещения его в ядро потока для выноса из скважины.

Заключение

1. В данной работе приведены результаты *первой части* исследований, посвященных решению комплексных проблем, сопровождающих гидротранспорт реологически сложных смесей по скважинам с протяженным горизонтальным участком и их очистке от бурового шлама. В результате детального численного моделирования течений в рамках ПО ANSYS CFD приведены данные по моделированию и обоснованию вычислительной методики к предсказанию гидродинамики и массопереноса в высоковязкой дисперсной смеси. Расчеты выполнены в рамках математической модели с полной системой нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка в частных производных по пространственным переменным. Данные уравнения представляют законы сохранения массы, импульса, описывающие динамику неоднородных гетерогенных сред, и позволяют установить: особенности движения частиц фаз, закономерности течения в эксцентричной области кольцевого межтрубного пространства, а также определить способы интенсификации процесса очистки скважин в условиях реального бурения.

Следует отметить, что все представленные результаты численных расчетов процесса гидротранспорта выполнены в диапазоне изменений характерных параметров, отвечающих условиям реального бурения. Так, принято, что в качестве рабочей несущей среды использовалась вязкая каплеобразная жидкость со свойствами пресной воды и жидкость типа Гершеля–Балкли. Причем вязко-инерционно-гравитационное течение смеси осуществлялось в скважине, включающей горизонтальный/наклонный участок с геометрической конфигурацией межтрубного пространства с размерами: длиной $L = 6...12$ м; внешним и внутренним диаметрами труб – 0,2 и 0,12 м соответственно. Реологические свойства раствора имеют значения: плотность – 1000 кг/м^3 ; плотность частиц песка – 2650 кг/м^3 и их диаметр – 0,006 м; эксцентриситет скважины – $e=2b/(D-d)$ соответствует диапазону – 0...90 %; среднemasовая скорость потока в области

входа варьировалась в пределах – 1...3 м/с. Значения модельных констант жидкости типа Гершеля–Балкли лежат в рабочем диапазоне: предел текучести – 1...15 Па, индекс потока – 0,3...0,8; индекс консистенции – 0,3...1,8 Па·сⁿ; отношение диаметров канала – 0,5...0,7. Следует учитывать, что на интенсификацию неблагоприятных процессов, например, вызывающих заклинивание буровой колонны, оказывают влияние динамические процессы по генерации «мертвой» зоны, а также рост ее пространственных размеров. Последнее тесно связано с изменением эксцентриситетности пространства. Следовательно, контроль за высокой эксцентриситетностью – это важный признак поддержания безаварийного функционирования оборудования. Вместе с этим для достоверного прогноза рабочих механизмов гидротранспорта бурового шлама из скважины следует обратить внимание на корректность расчета параметров течения смеси в низкорейнольдсовых областях межтрубного пространства. Наш опыт расчета показывает, что математическая модель успешно прогнозирует изменения градиентов искомых величин при использовании разностных сеток с радиальным расположением узлов порядка $O(1,37...1,47) \cdot 10^5$. Это обеспечивает приемлемую точность расчета локальных параметров течения и массопереноса в смеси со значением порядка $O(10^{-5})$, что недостижимо в рамках использования любых других механистических, полуэмпирических моделей, а также инженерных методик по очистке скважин.

2. Расчетами установлены особенности изменений структуры прямого и закрученного (по методу подвижной стенки буровой трубы) положения, важные для практики инженерных исследований процессов бурения:

- При движении бурового раствора по коаксиальной и эксцентричной области межтрубного пространства скважины с протяженным горизонтальным участком в ее пристеночной (донной) зоне динамическая структура испытывает на себе активное влияние эффектов, направленных на развитие турбулентности. В сдвиговых процессах преобладает молекулярное трение. Причем в области вязкого подслоя проявляются особенности, характерные для вязкого демпфирования.
- В областях поперечного сечения, близких к ядру, проявляются особенности, обусловленные соизмеримостью молекулярного и молярного обмена импульсом в жидкой фазе. Причем здесь усиливаются диффузионные процессы, интенсифицирующие разрушение «постельного» слоя шлама. Именно в этой части радиального поперечного сечения скважины стоит учитывать механизмы переноса от максимального выделения турбулентной кинетической энергии на вынос шлама. Стоит отметить, что эта область очень чувствительна к изменению значений локальных чисел Рейнольдса турбулентности. Последнее также ценно для управления интенсивностью очистки.

- Анализ структуры в области ядра потока показывает, что эта зона с неоднородной анизотропной структурой турбулентных вихрей, для расчета которых следует обращаться к моделям турбулентности, естественным образом учитывающим динамику мольных образований по пространству скважины. И здесь расчеты процессов по численным методикам, опирающимся на модели, включающие понятие изотропной «скалярной» молярной вязкости, будут весьма приближенны, а рекомендации инженерному персоналу по организации безаварийного управления процессом бурения весьма условны.
3. В фундаментальном смысле результаты исследования (материала части 1 рассматриваемой проблемы) имеют особую ценность для определения представлений о возможностях вычислительной методики в прогнозе нетривиальных процессов в вязких пристеночных слоях сложного сдвигового течения смеси. Так, представленные сведения об эволюции структуры потока позволяют классифицировать распределения динамических параметров осредненного и пульсационного течения, режимы движения раствора, дают дополнительную полезную информацию о турбулентных течениях в эксцентричных областях скважины и о детальных изменениях пульсаций скорости в зонах, близких к стенке.
 4. В целом результаты расчета показывают, что процесс гидротранспорта по своей природе неоднозначен из-за многих дополнительных эффектов, осложняющих течение и массоперенос в силу специфики распределений динамических параметров и характера влияния внешних и внутренних сил на частицы смеси.
- С учетом сказанного, в следующем разделе настоящей работы (часть 2 по исследованию проблем гидротранспорта и очистки от шлама горизонтальных столов скважин) предполагается привести новые результаты, важные для приложений, в частности, очистки скважин в условиях *in situ*. А также проанализировать особенности процесса бурения в реальных условиях с учетом выбора оптимальных значений реологических свойств раствора, опираясь на заключения, характеризующие преимущества разработанной в части 1 оригинальной вычислительной методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харламов С.Н., Джанхорбани М. Численный прогноз движения смеси вязкой капальной жидкости с твердыми частицами во входной области эксцентричных кольцевых труб и их очистки от шлама // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 18–41.
2. Харламов С.Н., Джанхорбани М. Оптимизация реологических свойств бурового раствора, интенсифицирующая транспорт и очистку горизонтальных скважин от шламов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 8. – С. 91–108.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and waterbased drilling fluids / S. Sneha, B. Lund, J.D. Ytrehus, A. Saasen // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 159. – P. 49–57.
10. Heydari Omid, Eghbal Sahraei, Pål Skalle. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuluses using computational fluid dynamics (CFD) // Journal of petroleum science and engineering. – 2017. – V. 156. – P. 801–813.
11. 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.
12. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. – Sand Diego: Academic press, 1994. – 467 p.
13. Syamlal Madhava, T.J. O'Brien. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Т. 1. – 464 с.
18. Yeoh G.H., Tu J. Computational techniques for multi-phase flows. 2nd ed. – Butterworth-Heinemann: Elsevier Ltd, Inc., 2019. – 590 p.
19. Crowe C.T. Review- numerical models for dilute gas-particle flows // ASME Journal of Fluids Engineering. – 1982. – V. 104 (Sept.). – P. 297–303.
20. Siamak Akhshik, Mehdi Behzad, Majid Rajabi. On the particle-particle contact effects on the hole cleaning process via a CFD-DEM model // An International Journal of Particulate Science and Technology. – 2016. – № 1. – P. 1–31.
21. Ansys Fluent Users Guide 13. Fluent Incorporated, ANSYS Inc. – Canonsburg: PA, USA, 2010. – 230 p.

22. 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.
23. Харламов С.Н., Фатьянов 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.
24. Харламов С.Н., Фатьянов Д.С. Исследование структуры турбулентного потока природного сырья в трубопроводах с секцией переменного по длине поперечного сечения конфузородиффузорного типа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 53–67.
25. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Численное моделирование течений вязких смесей бурового шлама и потока сырой нефти на горизонтальных участках скважин с эксцентричными буровыми трубами // Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа – XXI век: Материалы Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых, посвященную 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.
26. 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.
27. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. – 1994. – V. 32. – № 8. – P. 1598–1605.
28. Esch T., Menter F.R. Heat transfer predictions based on two-equation turbulence models with advanced wall treatment // Turbulence, Heat and Mass Transfer. – 2003. – № 4. – P. 633–640.
29. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. – Томск: Томский государственный университет, 2001. – 448 с.
30. 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.
31. 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. – V. 1. – Pt. 1. – P. 175–179.
32. Ди Джачинто М., 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.
33. 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.
34. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 150 p.
35. Busch A. On particle transport and turbulence in wellbore flows of non-Newtonian fluids –findings from cuttings transport process analysis by means of computational fluid dynamics, rheometry and dimensional analysis. PhD Diss. – Norway, 2020. – 187 p.
36. Liu Gefei. Applied well cementing engineering. – Burlington: Gulf Professional Publ. Elsevier, 2021. – 621 p.
37. Харламов С.Н., Джангхорбани 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.
38. Подрябинкин Е.В. Моделирование течений ньютоновских и неньютоновских жидкостей в цилиндрическом зазоре: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2014. – 28 с.
39. Численный алгоритм для моделирования установившегося ламинарного течения неньютоновской жидкости в кольцевом зазоре с эксцентриситетом / А.А. Гаврилов, А.В. Минаков, А.А. Дектярев, В.Я. Рудяк // Вычислительные технологии. – 2012. – Т. 17. – № – С. 44–56.
40. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Численное исследование вязкостно-инерционного ламинарного закрученного течения в круглой трубе с эксцентричным круглым ядром // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 7–21.
41. Харламов С.Н., Джангхорбани М., Брыксин М.Р. К проблеме установления продолжительности бурения скважин в условиях отсутствия вращения буровой колонны // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 7–26.
42. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Bryksin M.R. Aspects of computer simulation of transport and cleaning processes from cuttings in horizontal well sections // Mathematical Models and Computer Simulations. – 2023. – V. 15. – № 3. – P. 502–519.

Поступила: 10.05.2023 г.

Прошла рецензирование: 28.05.2023 г.

Информация об авторах

Харламов С.Н., профессор, доктор физико-математических наук, профессор отделения нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Джангхорбани М., аспирант, отделение нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Зайковский В.В., начальник нефтеперекачивающей станции «Орловка», Филиал Томского нефтепроводного управления АО «Транснефть – Западная Сибирь».

UDC 504.61-536.252

TRANSPORTATION OF CUTTINGS BY DRILLING MUD IN HORIZONTAL WELLS. PART 1. MODELING THE STRUCTURE OF DISPERSED CURRENTS

Sergey N. Kharlamov¹,
kharsn@mail.ru

Mehran Janghorbani¹,
mehran.janghorbani@gmail.com

Vsevolod V. Zaykovskiy²,
4lk4st@gmail.com

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

² Branch of Tomsk Oil Pipeline Administration of «Transneft – Western Siberia» Joint Stock Company,
24, River Ushayka embankment, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is associated with the development of technical solutions for drilling wells with horizontal endings, in which cleaning the annulus from particles of drilled cuttings in hydraulic transport conditions seems technologically and economically efficient compared to other, for example, mechanical methods.

The aim of the article is to develop a computational methodology/approach to a detailed forecast and deep understanding of the physical mechanism of hydraulic transport influence on well cleaning intensity. Moreover, the strategy of such a study is focused on the choice of flow conditions/rheological parameters of the model, in which the obtained detailed theoretical information on the evolution of the dynamic flow structure should be used in the development of design methods and the formulation of recommendations to engineering personnel for emergency warnings.

The object of this study is a new class of viscous currents of dispersed media induced by external and internal forces, characteristic of the functioning of special equipment that ensures the movement of drilling mud with complex rheology in a well through an eccentric annular annulus.

Results. The given article is the first part of the study devoted to solving complex problems accompanying the hydraulic transfer of rheologically complex mixtures through wells with an extended horizontal section and their cleaning from drilling cuttings. The first part presents the data on reasonable modeling of hydrodynamics of viscous dispersed mixture within the framework of reference to full equations describing laws of mass conservation, impulse for detection of peculiarities, determination of flow regularities in eccentric area of annular annulus, as well as search for ways of cleaning intensification under conditions of real drilling. It is assumed that the viscous-inertial-gravitational flow of a liquid of the Herschel–Bulkly type with solid particles (sand) is carried out in conditions of laminar-turbulent, straight-flow and twisted (by the method of a movable wall) flow developing in the space. It is noted that the formation of modes with active and conservative action of external and internal forces allows efficient cleaning of the annulus. System of defining equations of mathematical model of hydrodynamics and mass transfer is analyzed for possibility of taking into account changes in nonlinearity of thermophysical properties, resistance to disturbances at boundaries of flow area and phase separation. It is noted that the prediction of molar processes is carried out within the framework of modern statistical models of the RANS method and the Euler–Lagrangian approach to describing the movement of heterogeneous media implemented in the ANSYS CFD software. It was shown that at real drilling conditions, the mathematical model is successful in determining the spectrum of local and integral parameters of hydrodynamics and mass transfer in a wide range of changes in drilling conditions, which make it possible to understand the effects of particle sedimentation on the lower wall, the dynamics of vortex separation and the transfer of particles to the low-Reynolds region with a suspended state of the mixture structure and the inertial zone of the flow core. It is noted that the intensity of hydraulic transport downstream is significantly influenced by the conditions of phase entry, mud rheological characteristics. The calculations established the flow areas with satisfactory agreement of dynamic characteristics of the flow according to the proposed model with available experimental data, for example, shear stress at the wall, radial distributions of the components of the fluid velocity vector along the length of the well at different angles of deviation of its borehole from the vertical. Moreover, the results of this article should be taken into account when describing the data of the second part, as an addition to the study of hydraulic transport according to the proposed technique of real drilling of horizontal wells with optimal rheological properties of the mud.

Key words:

well, horizontal section, eccentricity, drilling, modeling, hydrodynamics, rheology, cuttings, cleaning.

REFERENCES

1. Kharlamov S.N., Janhorbani M. Numerical prediction of flow of viscous drip liquid mixture with solid particles in inlet field of eccentric annular tubes and cleaning them from sludge. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6, pp.18 – 41. In Rus.
2. Kharlamov S.N., Janhorbani M. Optimization of rheological properties of drilling mud intensifying transportation and cleaning of horizontal wells from cuttings. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 8, pp. 91–108. In Rus.
3. Bilgesu H.I., Ali M.W., Aminian K., Ameri S. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores. *The Eastern Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers*. Lexington, Kentucky, USA, October, 2002. 27 p.
4. Han S.-M., Young-Kyu H., Nam-Sub W., Young-Ju K. Solid-liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, vol. 70, no. 3–4, pp. 308–319.

5. Xiaofeng S., Wang K., Yan T., Shao S., Jiao J. 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.
6. Rooki R., Faramarz D.A., 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.
7. 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, no. 4, pp. 110–120.
8. 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.
9. Sneha S., Lund B., Ytrehus J.D., Saasen A. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and waterbased drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 159, pp. 49–57.
10. 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, vol. 156, pp. 801–813.
11. 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.
12. Gidaspow D. *Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions*. Sand Diego, Academic press, 1994. 467 p.
13. 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.
14. Mne U., 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.
15. 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.
16. 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, vol. 160, pp. 229–246.
17. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Vol. 1, 464 p.
18. Yeoh G.H., Tu J. *Computational techniques for multi-phase flows*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, Elsevier Ltd, Inc., 2019. 590 p.
19. Crowe C.T. Review – numerical models for dilute gas-particle flows. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1982, vol. 104 (Sept.), pp. 297–303.
20. Siamak Akhshik, Mehdi Behzad, Majid Rajabi. On the particle-particle contact effects on the hole cleaning process via a CFD-DEM model. *An International Journal of Particulate Science and Technology*, 2016, no. 1, pp. 1–31.
21. *Ansys Fluent Users Guide 13*. *Fluent Incorporated, ANSYS Inc.* Canonsburg, PA, USA, 2010. 230 p.
22. 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.
23. 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.
24. 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.
25. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Chislennoe modelirovanie tekhnicheskikh vyazkikh smesey burovogo shlama i potoka syroy nefti na gorizontalnykh uchastkakh skvazhin s ekstsentrichnymi burilnymi troobami [Numerical modeling of the currents of viscoumixtures of drilling sludge and the flow of crude oil on horizontal sections of wells with eccentric drilling pipes]. *Novye vyzovy fundamentalnoy i prikladnoy geologii nefti i gaza – XXI vek. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s uchastiem inostrannykh utchenykh, posvyazhennoy 150-letiyu akademika AN SSSR I.M. Gubkina i 110-letiyu akademika AN SSSR i RAN A.A. Trofimuka. Sektsiya 2. Geologiya nefti i gaza. Podseksiya 3. Neftpromyslovaya 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. 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
26. 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.
27. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
28. Esch T., Menter F.R. Heat transfer predictions based on two-equation turbulence models with advanced wall treatment. *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, 2003, no. 4, pp. 633–640.
29. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. *Matematicheskie modeli neodnorodnoy anizotropnoy turbulentnosti vo vnutrennikh stromakh* [Mathematical models of inhomogeneous anisotropic turbulence at the internal flows]. Tomsk, Tomsk State University of Publ. house, 2001. 448 p.
30. 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.
31. 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.
32. Di Giacinto M., 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.
33. 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.
34. Patankar S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York, McGraw-Hill, 1980. 150 p.
35. Busch A. *On particle transport and turbulence in wellbore flows of non-Newtonian fluids – findings from cuttings transport process analysis by means of computational fluid dynamics, rheometry and dimensional analysis*. PhD Diss, Norway, 2020. 187 p.
36. Liu Gefei. *Applied well cementing engineering*. Burlington, Gulf Professional Publishing, Elsevier, 2021. 621 p.
37. 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.
38. Podryabinkin E.V. *Modelirovanie tekhnicheskikh nyutonovskikh i nenyutonovskikh zhidkostey v tshilindricheskom zazore*. Avtoreferat Diss. Kand. nauk [Modeling the currents of Newtonian and non-Newtonian liquids in a cylindrical gap. Cand. Diss Abstract]. Novosibirsk, 2014. 28 p.
39. Gavrilov A.A., Minakov A.V., Dektyarev A.A., Rudyak V.Ya. Chislenny algoritim dlya modelirovaniya ustanovivshikhsya laminarnykh tekhnicheskikh nenyutonovskikh zhidkostey v koltsevom zazore s ekstsentrisitetom [Numerical algorithm for simulation of steady laminar flow of non-Newtonian fluid in annular gap with eccentricity]. *Vyichislitelnye tekhnologii*, 2012, vol. 17, no. 1, pp. 44–56.
40. 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.

41. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Bryksin M.R. On the issue of establishing the duration of well drilling without the drill string rotation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 9, pp. 7–26. In Rus.
42. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Bryksin M.R. Aspects of computer simulation of transport and cleaning processes from cuttings in horizontal well sections. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 2023, vol. 15, no. 3, pp. 502–519.

Received: 10 May 2023.

Reviewed: 28 May 2023.

Information about the authors

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

Mehran Janghorbani, postgraduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Vsevolod V. Zaykovskiy, head of the oil pumping station «Orlovka», Branch of Tomsk Oil Pipeline Administration of «Transneft – Western Siberia» Joint Stock Company.