



ISSN 2712-8008

Том / Volume 22 №2 2022

Домашняя страница журнала: <http://vestnik.psturu/geo/>

НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЕ



УДК 622+504.61:532.542:536.252

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2022

Аспекты компьютерного моделирования процессов транспорта и очистки от шлама горизонтальных участков скважин

С.Н. Харламов, М. Джанхорбани

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

Aspects of computer modeling the processes of transport and cleaning from cuttings in horizontal well sections

Sergey N. Kharlamov, Mehran Janghorbani

National Research Tomsk Polytechnic University (30 Lenin av., Tomsk, 634050, Russian Federation)

Получена / Received: 15.02.2022. Принята / Accepted: 31.05.2022. Опубликовано / Published: 21.12.2022

Ключевые слова:

скважина, бурение, кольцевые потоки, эксцентricность, вращение, ядро, моделирование, гидродинамика, реология, неоднородность, турбулентность, замыкания, шлам, транспорт, седиментация, очистка.

Актуальность исследования связана с необходимостью формирования ясных представлений о факторах успешного выполнения буровых операций и внесения ряда обобщений в существующие методики прогноза транспорта и очистки скважин с горизонтальным участком с учетом особенностей и закономерностей течения бурового раствора в реальных режимах бурения. Исследованы особенности пространственного течения смеси бурового раствора с твердыми частицами в коаксиальной и эксцентричной областях скважины; установлены закономерности развивающегося установившегося течения смеси по скважине; обоснованы рекомендации в практику прикладных расчетов интенсификации процесса очистки скважин гидравлическими методами. В качестве объекта исследования выбрана скважина с 12-метровой горизонтальной эксцентричной секцией, в которой течение осуществляется в условиях, реально близких к фактическим параметрам бурения. Универсальным ключом к уяснению особенностей и выявлению закономерностей рассматриваемых в работе процессов выступают методы механики неоднородных сплошных сред для вязких гомогенных и гетерогенных смесей, вычислительной гидродинамики (CFD) объединенные идеями комплексного физико-математического и численного исследования внутренних течений реологически сложных вязких сред. Установлено, что частицы способны оказывать существенное влияние на структуру осредненного и пульсационного течения капальной жидкости, их осаждение приводит к формированию неоднородной анизотропной структуры течения, для расчета которой требуются современные модели турбулентности второго порядка для напряжений Рейнольдса. Показано, что в донной области межтрубного пространства имеется зона с эквивалентными скоростями фаз, где проявляются эффекты снижения интенсивности молярного переноса при росте размеров пласта отложений. Для условий реального бурения характерны процессы, сопровождающие ламинизацию и стабилизацию течения смеси по всей длине скважины, вблизи границы неподвижного слоя осевших частиц наблюдается формирование узкого слоя их взвешенного состояния. Причем принос частиц шлама с поверхности пласта, а также их переход во взвешенное состояние в основном определяется конвективно-диффузионными механизмами, интенсивностью пульсационного движения вихрей с анизотропной структурой и наличием локальных областей с «умеренно высокими» скоростями потока, контактирующего с криволинейной неустойчивой к малым возмущениям поверхностью раздела. Отмечены условия формирования застойной зоны, в которой интенсивны седиментация и рост размеров отложений. Для внедрения в практику рекомендуются технология и алгоритм моделирования процесса взаимодействия двухфазных потоков со стенками эксцентричной трубы, основанные на демонстрации возможностей CFD, а также на заключении по совершенствованию критериальных связей определения минимальных скоростей течения бурового раствора с учетом коррекции параметров, характеризующих реологические особенности смеси, интенсивность турбулентности, геометрию межтрубного пространства и соединительных узлов.

Keywords:

well, drilling, annular flows, eccentricity, rotation, core, modeling, hydrodynamics, rheology, heterogeneity, turbulence, closures, cuttings, transport, sedimentation, cleaning.

The relevance of the study is related to the need to form clear ideas about the factors of successful drilling operations and make a number of generalizations to existing methods for predicting the transport and cleaning of wells with a horizontal section, taking into account the features and patterns of drilling fluid flow in real drilling modes. The features of the spatial flow of a drilling fluid with solid particles mixture in the coaxial and eccentric areas of the well were studied; regularities of the developing steady flow of the mixture along the well were established; recommendations for the practice of applied calculations of the intensification of the cleaning wells process by hydraulic methods were substantiated. A well with a 12-meter horizontal eccentric section was chosen as the object of study, in which the flow was carried out under conditions that were really close to the actual drilling parameters. The universal key to understanding the features and identifying the regularities of the processes considered in the work were the methods of mechanics of inhomogeneous continua for viscous homogeneous and heterogeneous mixtures, computational fluid dynamics (CFD) combined with the ideas of a complex physical-mathematical and numerical study of internal flows of rheologically complex viscous media. It was established that particles could significantly affect the structure of the averaged and pulsating flow of a droplet liquid, their settling led to the formation of an inhomogeneous anisotropic flow structure, the calculation of which required modern second-order turbulence models for Reynolds stresses. It was shown that in the bottom region of the annular space there was a zone with equivalent phase velocities, where the effects of a decrease in the intensity of molar transfer with an increase in the size of the sediment layer were manifested. Real drilling conditions were characterized by processes that accompany laminarization and stabilization of the mixture flow along the entire length of the well; near the boundary of the fixed layer of settled particles, a narrow layer of their suspended state was formed. Moreover, the bringing of cuttings particles from the reservoir surface, as well as their transition to a suspended state, was mainly determined by convective-diffusion mechanisms, the intensity of the pulsating small-scale movement of vortices with an anisotropic structure and the presence of local areas with "moderately high" flow velocities in contact with a curvilinear unstable to small disturbances section surface. The conditions for the formation of a stagnant zone, in which sedimentation and growth in the size of deposits were intense, were noted. A technology and algorithm for modeling the process of interaction of two-phase flows with the walls of an eccentric pipe were recommended for practice, based on demonstrations of CFD capabilities, as well as conclusions on improving the criteria relationships for determining the minimum drilling fluid flow rates, taking into account the correction of parameters characterizing the rheological features of the mixture, turbulence intensity, annulus geometry, space and connecting nodes.

© Харламов Сергей Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор (тел.: +007 (913) 104 58 57, e-mail: kharsn@mail.ru). Контактное лицо для переписки.
© Джанхорбани Мехран – аспирант, отделение нефтегазового дела, Инженерная школа природных ресурсов (тел.: +007 (923) 436 82 55, e-mail: mehran.janghorbani@gmail.com).

© Sergey N. Kharlamov – (Author ID in Scopus: 7003285087) – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor (tel.: +007 (913) 104 58 57, e-mail: kharsn@mail.ru). The contact person for correspondence.

© Mehran Janghorbani – PhD Student, Department of Oil and Gas Engineering, School of Natural Resources Engineering, (tel.: +007 (923) 436 82 55, e-mail: mehran.janghorbani@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Харламов С.Н., Джанхорбани М. Аспекты компьютерного моделирования процессов транспорта и очистки от шлама горизонтальных участков скважин // Недропользование. – 2022. – Т.22, №2. – С.73–84. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.2.4

Please cite this article in English as:

Kharlamov S.N., Janghorbani M. Aspects of computer modeling the processes of transport and cleaning from cuttings in horizontal well sections. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2022, vol.22, no.2, pp.73-84. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.2.4

Введение в проблему моделирования процессов транспорта и очистки скважин от бурового шлама

В настоящее время горизонтальные скважины представляют собой наиболее распространенный тип нефтяных и газовых скважин, бурение которых осложнено несовершенством технологий очистки криволинейных стволов от продуктов выработки. Управление очисткой путем контроля процессов транспорта шлама, осложненного взаимодействием вязкой смеси со стенками буровой трубы, способно снизить капитальные и текущие затраты на ремонт специального оборудования. И это составляет одну из основных задач современного бурения, которая опирается на вычислительные технологии и методы математического моделирования гидродинамики и сопряженного теплопереноса гетерогенных сред во внутренних системах. Причем в сравнении с относительно ясным анализом механизмов и закономерностей выноса продуктов выработки по вертикальным зонам скважины установление соответствующих особенностей в направленных участках требует детального изучения обменных процессов переноса импульса, массы, тепла, особенно в условиях расширенного охвата скважины. Все это ставит проблемы разработки универсальных моделей предсказания аспектов течений сложных по структуре вязких смесей в эксцентричных трубах в рамках методов вычислительной гидродинамики (CFD). В их числе анализ особенностей изменений локальных и интегральных свойств течения, например, перепада поля давления, сопротивления, напряжения трения, размера вихрей и интенсивности осредненного, пульсационного движения под действием устойчивых, переходных и ламинаризирующих эффектов. В силу многопараметричности, многомерности и многофакторности теоретического анализа рассматриваемых задач особое внимание следует уделять вопросам верификации результатов моделирования очистки. Так, в рамках методов и моделей CFD при исследовании рассматриваемых проблем популярно обращение к ресурсозатратным подходам, включающим концепцию дискретного фазового моделирования (Лагранжевый метод), а также более гибким статистическим моделям турбулентности второго порядка [1, 2] для учета эволюции «тонкой» структуры течения, геометрического строения частиц среды [3, 4]. В таких условиях исследователи сталкиваются с актуальной проблемой поиска путей снижения компьютерного времени и ресурсов вычислений, поскольку численное моделирование гидродинамики и теплопереноса в реологически сложной смеси в рамках эйлерово-эйлерова и эйлерово-лагранжева подходов повышают требования к точности расчета процессов в специфических зонах течений гетерогенной смеси эксцентричного межтрубного пространства скважины и границах взаимодействия фаз [4, 5]. В отсутствии надежных экспериментальных данных о локальных параметрах процессов переноса импульса, массы в смеси при реальных условиях бурения (*in situ*) универсальным инструментом оценки достоверности результатов может выступать интегральный анализ с комплексным прогнозом процессов очистки скважины от шлама в рамках эйлерово-эйлерова и эйлерово-лагранжева подходов. Это даст возможность проникнуть в суть определяющих механизмов реального бурения и течения реологически сложной смеси в кольцевой эксцентричной зоне, а также сформулировать условия эффективной очистки скважин.

Учитывая сказанное, в настоящей работе была поставлена цель – исследовать особенности пространственного течения смеси бурового раствора с твердыми частицами в коаксиальной и эксцентричной областях скважины; установить закономерности развивающегося установившегося течения смеси по скважине; выдать рекомендации в практику прикладных

расчетов интенсификации процесса очистки скважин гидравлическими методами. В качестве объекта исследования выбрана скважина с 12-метровой горизонтальной эксцентричной секцией, в которой течение осуществляется в условиях, реально близких к фактическим параметрам бурения. Универсальным ключом к уяснению особенностей и выявлению закономерностей рассматриваемых в работе процессов выступают методы механики неоднородных сплошных сред для вязких гомогенных и гетерогенных смесей, вычислительной гидродинамики (CFD), объединенные идеями комплексного физико-математического и численного исследования внутренних течений реологически сложных вязких сред. Актуальность исследования связана с формированием ясных представлений о факторах успешного выполнения буровых операций и внесения ряда обобщений в существующие методики прогноза транспорта и очистки скважин с учетом особенностей и закономерностей течения смеси в реальных режимах бурения.

Краткий обзор библиографических исследований

Тот факт, что в элементах бурильного оборудования протекают взаимосвязанные термодинамические процессы, составляющими которых являются: движение гетерогенной смеси; массоперенос; теплоперенос; реофизические эффекты, которые формируют по крайней мере 5 групп переменных величин: геометрические; гидрогазодинамические; тепловые; массообменные; физико-химические, ставит перед исследователями проблему формулировки математической модели в виде системы дифференциальных уравнений для законов сохранения массы, импульса, энергии индивидуальных составляющих фаз (или ее компонентов), которые используют замыкающие соотношения с феноменологическими параметрами о процессе и среде. Последние должны быть определены из эксперимента, что достаточно проблематично в силу многомасштабности процессов переноса в скважине. В таких условиях концепция комплексного теоретико-экспериментального исследования [3–5] очистки рабочих областей бурового оборудования в условиях широкого диапазона изменений гидрогазодинамических и теплодиффузионных параметров смеси в скважине становится особенно эффективной. Ясно, что методы математического моделирования в рамках software оказались востребованы при исследовании процессов переноса и транспорта шлама в горизонтальных скважинах. Учитывая эти обстоятельства, Vilgesu et al. [6] одним из первых осуществили применение аппарата вычислительной гидродинамики в рамках эйлерово-эйлерова (ЭЭ) подхода к анализу влияния на бурение специфики режима транспорта смеси жидкости с частицами шлама, изменения вязких свойств раствора в скважине с произвольной ориентацией ее ствола. Эти результаты мотивировали исследователей к анализу деталей нелинейных эффектов, сопровождающих и осложняющих течение смесей в трубах, например, посредством вращения буровой трубы. Поэтому Han et al. [7] также обратились к эйлеровскому подходу для выяснения особенностей влияния коаксиального вращения трубы на транспорт частиц шлама в произвольно наклонных скважинах. Необходимость оценок влияния изменений структуры частиц твердой фазы на интенсификацию очистки поставила перед Mme et al. [8] задачу прогноза очистки в рамках эйлерово-лагранжевого (ЭЛ) подхода. Однако в исследованном диапазоне изменений характерных параметров задачи результаты расчета не подтвердили ожидаемого влияния на интенсификацию очистки. Это привело к заключению, что реальные условия бурения сопровождаются нетривиальными эффектами, результирующее значение которых весьма чувствительно к заданию спектра сил, определяющих

гидродинамику, массоперенос в смеси со сложным структурным составом, характером внутри- и межфазного взаимодействия ее составляющих. Данные расчета Ксао и др. [9] утвердили во мнении, что для эффективной очистки отверстий необходима существенная интенсификация конвективно-диффузионных механизмов процесса переноса импульса и массы в смеси, и это предмет для оптимизации рабочих параметров процесса течения и массопереноса. В работе отмечается невозможность полной очистки сечения без обращения к механическим средствам. Причем отмечается, что моделирование течения смеси в межтрубном пространстве скважины с учетом соединений в реальных условиях бурения показывает интенсивное накопление частиц шлама в этих областях. В исследованиях Sun et al. [9, 10], Demiralp [11] показано, что в моделировании прямоточно-закрученных сложных сдвиговых течений (например, при учете коаксиального вращения буровой трубы [9,10], прогнозе турбулентности [11]) режим закрутки эффективен только при относительно низких значениях окружной компоненты вектора скорости и теряет свою эффективность по мере ее увеличения, а эволюцию развивающегося турбулентного потока успешно предсказывает SST $k\omega$ -модель турбулентности [1–5, 11], показывающая низкорейнольдсовы зоны пристеночных внутренних течений. Результаты цикла исследований Ofei et al. [12–14] показали гибкость моделей CFD в прогнозах различных режимов транспорта смеси, сценариев очистки межтрубного пространства при погрешности коррелирования интегральных параметров течения и массопереноса с соответствующими опытными данными в 1...12 %. Учитывая современный опыт применения CFD в решении проблем гидродинамики, Kamyab et al. [15] предприняли попытку оценить возможности ЭЭ-подхода в прогнозе технологии бурения гибких труб (CTD) в условиях, когда вращение труб невозможно, поставив задачу определения минимальной скорости транспортировки (MTV) смеси, необходимой для эффективной очистки скважины, при этом допуская, что буровой раствор обладает свойствами ньютоновской жидкости. Детальные теоретико-экспериментальные исследования по выявлению особенностей изменений эффекта перепада давления, наблюдаемого при течении различных буровых жидкостей (с допущением произвольности реологии) с различной скоростью потока, в одной и той же конфигурации задачи, выполненные Sayindla и др. в [16], показали, что обобщение методов моделирования на учет изменений реологических свойств смеси позволяют иметь хорошее соответствие данных теории и опыта в прогнозах поля давления. Также следует отметить результаты Хейдари и др. [17], которые оценили возможности замыканий определяющих уравнений движения моделями со скалярной величиной молярной вязкости в рамках ЭЭ-подхода в CFD и высказали рекомендации о необходимости включений моделей второго порядка для напряжений Рейнольдса типа $RSS-k-\epsilon, -\omega, -L$ [1–5, 18, 19] с целью более точного прогноза анизотропной структуры, характерной для реальных условий бурения и транспорта смеси по скважине. Анализ данных, представленных Эпелле и Героджоргисом [20, 21] по выявлению особенностей транспорта шлама, установления закономерностей интенсификации процесса очистки, показывает, что в рамках ЭЭ и ЭЛ подходов в описании турбулентности эффективна двухпараметрическая стандартная $k-\omega$ модель турбулентности [19]. Причем представлен важный для практики прикладных исследований результат, что оба подхода имеют ошибки прогноза интегральных параметров в диапазоне значений до 11 % при сравнении с соответствующими экспериментальными данными. Анализ структуры течения и расчет состава смеси в рамках ЭЛ-подхода при улучшенной версии замыканий к учету особенностей изменения формы и строения твердых частиц по моделям Syamlal – O'Brien [22], Gidaspow [23]

показали, что допущение о сферической форме частиц способно оказывать значительное влияние на результаты моделирования, вызывая падение давления на рабочем участке скважины до 11 %. В работах Акшика и Раджаби [24], Игнатенко и др. [25] предпринята успешная попытка адаптации ЭЛ-подхода к моделированию процессов переноса в газожидкостной смеси с твердыми частицами, часто используемой в приложениях бурения [24], а также учета коаксиального вращения внутренней трубы [25]. Расчеты показали [25], что режим закрученного течения формирует условия для вихревого течения при низких вязкостях и скоростях вращения. Последнее способствует падению давления, оказывает существенное влияние на транспорт твердых частиц по межтрубному эксцентричному пространству. Также в части анализа влияния на эффективность очистки скважин изменений реофизических свойств бурового раствора отметим результаты, выполненные Pang et al. [26, 27], на ньютоновских жидкостях типа Гершеля – Балкли. В частности, в [26] показано, что при снижении вязкости жидкости концентрация частиц шлама в кольцевой зоне сильно меняется. Аналогичные результаты наблюдались в [27] при использовании в качестве рабочей жидкости воды. Анализ этих сведений позволяет утверждать, что на течение шлама оказывают сильное влияние переходные процессы, обусловленные: нелинейностью изменений реологических свойств среды; строением и формой частиц; эффектами от наложения на прямоточное движение коаксиального и орбитального вращения буровой трубы. Все это требует корректного моделирования картины реального бурения и прогноза воздействия крутки бурильной трубы, уточнений влияния эффектов ее орбитального вращения. Отмеченная задача представляет перспективу для численного моделирования процессов бурения. Таким образом, обзор имеющихся публикаций [3, 6–27] позволяет выделить следующее.

1. ЭЭ- и ЭЛ-подходы CFD-метода удовлетворительно прогнозируют режимы очистки скважины с горизонтальными участками в среднем диапазоне погрешностей изменений интегральных параметров (например, корреляций теоретических и опытных значений поля давления) до 12 %. При этом затраты на предсказание процессов при обращении к ЭЛ-подходу существенно возрастают вследствие внесения деталей о строении частиц смеси и использования SST $k-\omega$ -модели турбулентности в описании процессов переноса импульса в низкорейнольдсовых областях межтрубного пространства.

2. Для учета изменений структуры и формы частиц смеси используются модели Syamlal – O'Brien [22], Gidaspow [23], которые в рамках рассматриваемых в настоящей статье гидродинамических режимов и геометрических конфигураций способны наиболее полно и точно в количественном отношении прогнозировать особенности течения смеси в скважине.

3. Установлено, что в указанных формулировках определяющих уравнений, их приближениях, а также допущениях о течении смеси под действием внешних и внутренних сил транспорт частиц шлама весьма чувствителен к особенностям, режимам, деталям течения жидкой фазы, ее реологии, изменению геометрии эксцентричного пространства скважины.

Физические допущения к моделированию транспорта смеси в скважине

Будем предполагать, что буровой раствор как вязкая каплеобразная жидкость с ньютоновской реологией полностью способен обеспечить транспорт частиц шлама через эксцентричное пространство скважины от забоя до поверхности. При этом учитывается, что его течение осложнено факторами осаждения частиц в донной части и формированием плотного слоя в виде пласта. Размеры пласта сильно зависят от условий и режима

функционирования технологического оборудования бурения, например, силы тяжести, увеличения крутящего момента бурильной колонны, которое формирует более высокое сопротивление, прилипания (или прихват) труб, а также проблем, обусловленных каротажем. Допускается, что толщина пласта много меньше ширины кольцевой области; на течение смеси в верхней области поперечного сечения оказывают влияние особенности процессов переноса импульса и массы в донной зоне. Кроме того, принимаем, что изменение угла наклона скважины является одним из основных факторов эффективности транспорта шлама в конфигурации пространства с эксцентричностью бурильной трубы. Кольцевое пространство проточной области отличается асимметричностью и существенной узкостью под бурильной трубой, что существенно затрудняет процесс транспорта частиц через кольцевое пространство. Предполагается, что реологические свойства бурового раствора описываются моделью эффективной вязкости Гершеля – Балкли, и их изменение вследствие реакции на деформационные процессы, обусловленные динамикой потока, способно оказывать существенное влияние на операции по очистке скважин. Также принимается, что в процессе бурения горизонтальных скважин бурильная труба способна соприкоснуться с донной частью стенки скважины из-за веса бурильной трубы. Наконец допускаем, что технология построения численного решения математической модели будет опираться на положения механики неоднородных сплошных сред, методов вычислительной гидродинамики, теорий сопротивления и тепло- и массопереноса. При прогнозах механизмов, сопровождающих течение частиц жидкой и твердой фаз, внутри- и межфазных взаимодействий в процессах переноса импульса и массы в смеси бурового раствора и твердых частиц в эксцентричном кольцевом пространстве скважины учитывается, что твердые частицы шлама химически инертны и имеют сферическую форму диаметра d , доля объема, занимаемого дисперсной твердой фазой, имеет значения $\alpha_p < O(10^1)$, соударениями между частиц пренебрегают. Плотность материала частиц значительно превышает плотность несущей (жидкой капельной) среды. Принимаем также, что режим установившегося во времени течения смеси вязкостно-инерционный и осуществляется в условиях ее изотермического прямооточного движения по скважине. В указанных допущениях аспекты компьютерного моделирования связаны с установлением особенностей изменений структуры потока, минимальных значений скорости транспорта шлама по длине скважины и прогнозирования условий бесперебойного функционирования технологического оборудования.

Математическая модель течения жидкости с частицами шлама в кольцевом эксцентричном пространстве скважины

Течение смеси капельной вязкой жидкости со сложной реологией с твердыми частицами при изотермическом установившемся ламинарном и турбулентном режимах в коаксиальных эксцентричных трубах с горизонтальной и наклонной ориентацией в поле действия силы тяжести описывается системой определяющих дифференциальных уравнений, представляющих законы сохранения массы (1), импульса (2)–(4), которые, согласно [28–30], имеют общий вид:

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

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

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

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

В записи уравнений (1) – (4) принято: индексы q и s характеризуют параметры жидкой и твердой фаз соответственно; ρ – плотность; \vec{v} – вектор скорости; S_q – источниковый член, который в данной постановке отсутствует; \dot{m}_{qp} – интенсивность перехода массы из p -й в q -ю фазу (в нашем случае отсутствует перенос из жидкой в твердую фазу, поэтому $\dot{m}_{pq} = \dot{m}_{qp} = 0$); τ_q – тензор напряжений q -й фазы; $\mu_q \zeta_q$ – коэффициенты сдвиговой и объемной вязкостей q -й фазы; p – давление, K_{pq} – коэффициент межфазного обмена импульсом; $\vec{F}_s, \vec{F}_{lift,s}, \vec{F}_{vm,s}$ – соответственно внешняя сила, подъемная сила, дополнительная сила виртуальной массы частиц твердой фазы (в нашем случае малы и ими пренебрегаем); p_s – относится к давлению, используемому всеми фазами; p_s – давление частиц твердой фазы; $K_{ls} = K_{sl}$ – коэффициент обмена импульсом между жидкой и твердой фазами. Видно, что определяющее влияние на динамику оказывают: вязкие эффекты; силы градиента давления, тяжести, сопротивления межфазных процессов.

Согласно виду реологического уравнения (3), используемого для замыкания уравнения (2) жидкой фазы с ньютоновской реологией, допускается, что в случае неньютоновской вязкопластической системы для формулировки модели Гершеля – Балкли имеем комбинацию параметров (5):

$$\mu_{eff} = \mu_{eff}(\tau, S, T, P), \quad (5)$$

где τ, S – тензоры напряжений и скоростей деформаций жидкой фазы соответственно. Заметим, что в гетерогенных средах μ_{eff} также зависит от концентрации, формы и размера частиц. В качестве частных формулировок реологии неньютоновских жидкостей (модели Гершеля – Балкли для сдвиговой вязкости $\mu_q = \mu_{eff}$) имеем (6):

$$\tau = \tau_0 + \kappa S^n, \mu_{eff} \equiv \mu_f = (\tau_0 + \kappa I^n)^{1/n}. \quad (6)$$

Модель турбулентности и ее особенности в прогнозе сложных внутренних течений смеси

Результаты предварительных исследований (см., например, [1–5, 18, 19, 31–35]) показали, что в прогнозах взаимосвязанных внутри- и межфазных процессов переноса тепла, массы и импульса в низкорейнольдсовых зонах в развивающихся течениях, весьма надежны двухпараметрические модели RANS-метода, которые составляют эффективную опорную базу для многопараметрических моделей переноса рейнольдсовых напряжений RSS (например, такие как SST- $k\omega$ [19], $-kL$ [18, 35, 36], $-k\epsilon$ [33], $-k\tau$ [34]). Как известно, общая (в индексной, краткой и символической для декартовых переменных) форма записи RSS-модели (7) с опорной двухпараметрической гидродинамической базой (8) согласно, например, [35], имеет вид:

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

$$C_f = D_f + P_f + \epsilon_f. \quad (8)$$

Здесь индексы i, j ($i, j = 1-3$) отвечают соответственно напряжениям Рейнольдса ($u'_i u'_j$), f – 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 $u'_i u'_j$ (и признака f) вследствие конвекции (C), диффузии (D), порождения (P), перераспределения (R), диссипации (ε), детальную запись которых можно найти, например, в [35]. Стоит отметить, что при решении вопроса о выборе соответствующей модели турбулентности в замыкании определяющих уравнений динамики жидкой фазы следует учитывать, что в рамках принятого допущения о геометрической и гидродинамической конфигурации задачи, составе гетерогенной смеси с относительно высоким значением объемной концентрации твердой фазы (до 10 %), в структуре течения смеси будут проявляться анизотропные эффекты. В таких условиях прогноз динамики разумно проводить с привлечением RSS-модели турбулентности (в рамках ПК *ANSYS CFD*) с опорными k , ω , ε , L -базами, модифицированными на учет механизмов движения двухфазной среды посредством увлечения твердых частиц шлама несущей капельной жидкостью за счет сил межфазного взаимодействия как частицы пассивной примеси. Отметим, что в обобщениях RSS-модели на двухфазность течения в настоящем исследовании допускается (аналогично [36]), что вовлечение твердых частиц в турбулентное движение смеси происходит только через влияние турбулентных пульсаций несущей жидкости. Поэтому учитывается, что присутствие частиц способствует уменьшению кинетической энергии турбулентных пульсаций. Последнее отвечает коррекции диссипативных членов опорной базы RSS-модели, представленных оригинальными уравнениями переноса, например, для k , ω , L . Из-за громоздкости замыкающих формулировок модели в данной работе они опущены, и детали можно найти, например, в [35].

Формулировка краевых условий

Численное интегрирование системы определяющих уравнений (1) – (6) и их замыкающих соотношений (7), (8) выполняется с использованием следующих условий. Так, в группе геометрических условий задаются детали конфигурации трубы: продольная длина (L), ширина и смещение (b) центра ядра относительно продольной оси внешней трубы; в динамической части задачи – скорость на входе (U_0) потока, параметры «тонкой» структуры (интенсивность турбулентности (T_0), локальных свойств вихря – кинетической энергии (k) и скорости диссипации (ε) турбулентности, масштаба (L) энергосодержащих вихрей и т.п.); в диффузионной части – состав (α) смеси. Теплофизическую картину определяет группа физических свойств смеси: задание плотности несущей (капельной, дисперсионной) среды и материала частиц (твердой, дисперсной фазы); α_p – объемной доли твердой фазы; $\mu_f = \mu_f^0$, $\lambda_f = \lambda_f^0$ – динамической вязкости и теплопроводности дисперсионной фазы (жидкости) соответственно; а также таких, как c_{pi} – удельные теплоемкости фаз, других (механических, структурных) величин конкретной смеси. Заметим, что в расчетах состава смеси в рамках используемых физических допущений и ЭЭ/ЭЛ-подходов спектр внешних сил определяется результирующим влиянием силы межфазного взаимодействия, которая обусловлена силой сопротивления F_D . Причем, как отмечалось выше (например, подобно [36–38]), допускается, что при малых α_p выталкивающей силой можно пренебречь. В таком случае динамику траекторий частиц шлама в межтрубном пространстве можно рассчитать по уравнению (9) с соответствующими замыкающими соотношениями (10) в виде:

$$\frac{d\bar{u}_p}{dt} = F_D(\bar{u}_f - \bar{u}_p) + \frac{\bar{F}_{\text{тяж}}(\rho_p - \rho_f)}{\rho_p} + \bar{F}_{\Sigma}; \quad (9)$$

$$F_D = \frac{18\mu_f c_d \text{Re}}{\rho_p d_p^2 24}, \quad \text{Re} = \frac{\rho_f d_p |\bar{u}_p - \bar{u}_f|}{\mu_f},$$

$$c_d = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}} + \frac{a_3}{\text{Re}^2}. \quad (10)$$

Здесь индексы p , f относятся к частицам шлама и жидкости соответственно; F_D – сила гидродинамического сопротивления; $F_{\text{тяж}}$ – сила тяжести; F_{Σ} – в силу общности постановки задачи характеризует другие возможные внешние силы, например, силы Саффмэна/Магнуса/плавучести, которыми в рамках высказанных допущений пренебрегается.

Граничные условия в условиях изотермического течения дисперсной смеси соответственно для Γ_p , $i = 1$ (вход), 2 (внешняя граница кольцевой зоны), 3 (стенка внутренней трубы), 4 (выход) связаны с заданием следующих связей для искомым параметров. На входе (Γ_1) – однородные профили фаз (известные для процесса) по поперечному сечению, а также то, что фазы находятся в равновесии. На выходе (Γ_4) – «мягкие» граничные условия (непрерывности течения). На стенках коаксиального пространства (Γ_2 , Γ_3): для диспергированной (несущей) фазы формулируются условия прилипания для всех осредненных и пульсационных характеристик капельной жидкости; для частиц шлама – условия проскальзывания.

Детали численного алгоритма

Численное интегрирование уравнений, описывающих гидродинамику и массоперенос в смеси (1)–(8) с соответствующими замыкающими соотношениями (9), (10), выполняется численно на основе операций, отвечающих за: построение разностной сетки расчетной области рассматриваемой задачи; конечно-разностную аппроксимацию дифференциальных уравнений, сводящей 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. Подробно эти вопросы изложены в предыдущих публикациях (см., например, [1–5, 35]). Для достижения требуемой точности интегрирования уравнений вводится соответствующий критерий малости между решениями, получаемыми на двух последних итерациях (m , $m+1$), для соответствующих пространственных изменений искомым локальных параметров ($\Phi = \{ \bar{u}_f, \bar{u}_p, u'_i u'_j, k, \varepsilon, \omega, L \}$) и их интегральных значений (например, $\Phi_{wf} = \tau_{wf}$ – сопротивления трения), отвечающих виду (11):

$$\max_{i,j,k} \left\{ \frac{|\Phi_{i,j,k}^{m+1} - \Phi_{i,j,k}^m|}{\Phi_{i,j,k}^{m+1}} \right\} \leq \Delta_{\Phi}, \Delta_{\Phi} = O(10^{-2}), \quad \% \quad (11)$$

Также анализ влияния вложенности сеток на точность результатов позволил установить оптимальный размер разностной сетки. Расчетами установлено, что для прогноза вязкостно-инерционно-гравитационного течения смеси с развитой турбулентностью вполне приемлема разностная сетка с общим числом узлов $1,5 \cdot 10^5$, вид которой, например, для эксцентриситеты $e = 0,8$ представлен на рис. 1. Наш опыт показывает, что при построении численного решения задачи данная плотность вполне удовлетворительна с целью учета тенденций поведения алгоритма, модели, метода расчета с точки зрения соотношений «цена – качество – точность» результатов при прогнозе деталей очистки скважины от шлама и его транспорта по межтрубному пространству при $\text{Re} = (0,08 \dots 5) \cdot 10^5$. Расчет поля давления выполняется с привлечением стандартной процедуры SIMPLE [39].

Верификация численных результатов распределений локальных и интегральных параметров течения и массопереноса в трубах выполнялась с привлечением соответствующих и известных теоретических/

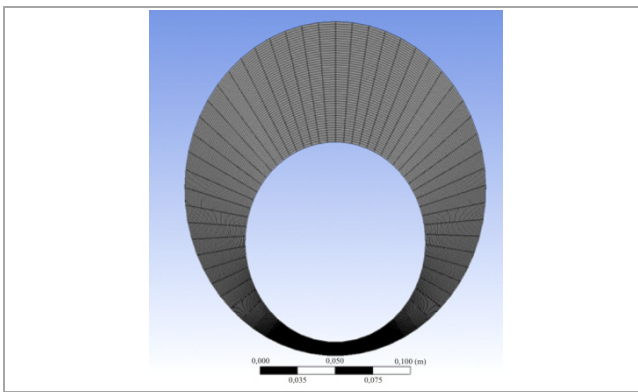


Рис. 1. Оптимальный вид разностной сетки, сгенерированной в рамках ПК ANSYS CFD, для условий транспорта и очистки горизонтальных участков эксцентричных труб в реальных условиях бурения

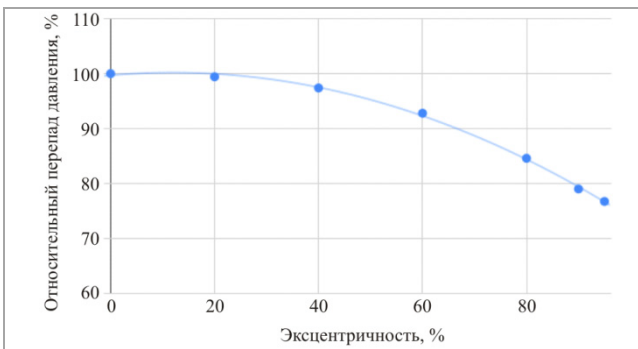


Рис. 2. Изменение безразмерного перепада давления ($\Delta p / \Delta p_0$, %) в зависимости от увеличения эксцентриситета ядра $e = 2b / (D - d)$

экспериментальных данных полей осредненных и пульсационных скоростей в гомогенных и гетерогенных внутренних течениях в коаксиальных и эксцентричных трубах, например, аналитических данных изменения поля скорости в ламинарном течении [40–42], а также результатов опосредованного анализа точности расчета перепада поля давления в эксцентричных трубах, выполненных при использовании инженерного подхода [43, 44] для турбулентного режима течения при $Re = (1...8) \cdot 10^4$, в конфигурации трубы с параметрами: $L = 10$ м, $R_2 = 0,1$ м, $R_1 = 0,06$ м, $\mu = 0,001003$ кг/мс. Сравнения результатов расчетов с данными инженерного прогноза (в рамках критериальных связей для перепада давления по software [43, 44]) свидетельствуют, что сетка с размером $H = (r \cdot \theta \cdot x) \equiv (50 \cdot 60 \cdot 50)$ при определении перепада поля давления с невязкой в (1–2) % вполне уместна, и дальнейшее увеличение узлов представляется нецелесообразным, особенно с точки зрения экономичности численных схем, эффективности вычислительного алгоритма и затрат на его реализацию. На рис. 2 представлено распределение безразмерных значений относительного перепада давления ($\Delta p / \Delta p_0$, %) от изменений эксцентриситета (e , %) что подтверждает (см., например, [42, 45–47]) тенденцию снижения перепада давления с увеличением эксцентриситета ядра в условиях сохранения положений физического подобия течений с расходом $Q = idem$. Заметим, что на рис. 2 точки отвечают настоящим расчетам течений в трубах при $Re = 80\ 000$. Линия – аппроксимационная кривая результатов расчета, Δp_0 соответствует перепаду давления в осесимметричном канале, $D = 2R_2$ – диаметр внешней трубы, $d = 2R_1$ – диаметр внутренней трубы, b – смещение центров труб.

Учитывая результаты анализа процессов в рамках подходов, выполненных в [42–47], отметим, что детальные сравнения характера распределения $\Delta p / \Delta p_0$ при бурении требуют учета особенностей изменений режима течения, реологии, физических свойств жидкости, а также параметров, определяющих геометрию канала и

их комбинаций (например, R_2/R_1 и т.д.). Отсутствие достоверных экспериментальных данных при течении капальной жидкости (воды) всегда ставит задачу верификации полученных результатов на материале качественного их соответствия подобным процессам.

Более того, наш опыт исследований гидродинамики при турбулентном течении гетерогенных сред в трубах с сложной формой поперечного сечения [1–5] показывает, что используемые RSS-модели турбулентности с $k-\omega/L$ -опорной базой (в ПК ANSYS CFD) с хорошей точностью предсказывают эти процессы. Кроме того, общие оценки вложенности сеток показали, что требуемый шаг установления по времени, обеспечивающий стабильность численного решения, составляет величину порядка 10^{-4} с. Эти данные получены при использовании компьютера Intel i7-8700 CPU (с 12 ядрами, 3,2 ГГц), для которого требовалось около 15 дней для моделирования 10 с времени течения смеси, что эквивалентно одной полной циркуляции потока по рассматриваемой геометрии.

Детали гидродинамического подобия процессов в скважинах, полезные в приложениях

Учитывая специфичность процессов переноса импульса, тепла, массы в рассматриваемой задаче, существенно осложненных многомерностью, многопараметричностью, многофакторностью эффектов внутри- и межфазного обмена между компонентами смеси при их сложном течении в эксцентричной области, стоит отметить, что для систематического анализа особенностей, установления закономерностей течений, а также выдачи заключений в практику важны формулировки ряда определяющих критериев подобия задачи. Эти данные позволяют локализовать участки пространства с нетривиальным характером изменений локальных/интегральных свойств смеси в условиях очистки скважин. В рассматриваемой гидродинамической и геометрической конфигурации развивающегося течения смеси наряду с критериями

Рейнольдса $\left(Re = \frac{\rho_f^0 U_0 (R_2 - R_1)}{\mu_f} \right)$, Фруда $\left(Fr^2 = \frac{g(R_2 - R_1)}{U_0^2} \right)$, Прандтля $\left(Pr = \frac{\mu_f c_f}{\lambda_f} \right)$, Шмидта $\left(Sm = \frac{\mu_f}{\rho_f D_{mix}} \right)$, Бингама $\left(Bn = \left(\frac{\tau_0}{\kappa} \right) \left(\frac{R_2 - R_1}{U_0} \right)^n \right)$, где τ_0 – предельное напряжение сдвига) имеют место критерии дисперсного потока [28–32], такие как Стокса $(Stk = \tau_p / \tau_{td})$, где τ_p – время динамической релаксации частиц $\left(\tau_p = \frac{\rho_p d^2}{18 \mu_f} \right)$, τ_{td} – характерное гидродинамическое время процесса ($\tau_{td} = L/U_0$), весовая доля частиц/загруженность $\left(M = \frac{\rho_p \alpha_b}{\rho_b} \right)$ и отношение изобарных теплоемкостей твердых частиц и жидкости $\left(\hat{C} = \frac{c_p}{c_f} \right)$. Тогда, анализируя режимы реального бурения

и соответствующие течения смеси в скважине, следует учитывать, что в условиях $Stk \ll 1$, возможны процессы, когда частицы шлама будут иметь скорости, равные движению диспергированной (капельной) жидкости. Такое состояние характерно для условий динамически равновесного течения смеси, при котором скорости фаз принимаются одинаковыми, а сам дисперсный поток можно описывать моделью однофазной среды со специфическими «эффективными» свойствами. В противном случае ($Stk > 1$) в потоке возникают эффекты, при которых частицы не чувствительны к изменениям свойств диспергированной среды из-за пренебрежимо малого влияния жидкой фазы на частицы шлама. Также при моделировании течения смеси полезно учитывать, что при весьма высоких значениях Stk расчеты следует проводить по модели замороженного

течения [48]. Последнее отвечает картине течения дисперсной среды с взвешенными частицами в представлении однофазного потока, причем с изменением критерия загрузки (M) может изменяться интенсивность влияния критерия Stk. Заметим, что в условиях неизотермического течения критерий теплоемкостей будет отвечать за интенсивность отличий между характерными временами тепловой и динамической релаксации дисперсной фазы.

Результаты расчета и их обсуждение

В рамках физических допущений к постановке задачи представим отдельные результаты исследования особенностей, закономерностей гидродинамики дисперсного потока, транспорта продуктов бурения по длине межтрубного пространства. Результаты численного моделирования отвечают реальному процессу бурения с массовым расходом $G = (23...24)$ кг/с реологически сложной смеси (ньютоновской/неньютоновской жидкости), близкой по свойствам к воде. Указанные значения G соответствуют средней скорости жидкости порядка $\bar{U}_f = 1$ м/с (или 373 г/мин) и скорости частиц твердой фазы (песка) порядка $\bar{U}_p = 1,596$ кг/с. Заметим, что значения G , \bar{U}_p адекватны наличию объемной доли песка порядка $\alpha_p = 1$ % или бурению пласта с 20%-ной пористостью со скоростью 100 футов/ч и полностью соответствуют нормам бурения. Допускается, что возникающие в потоке турбулентные эффекты поддерживаются интенсивностью турбулентности порядка $T_u = 1...10$ %. Указанные значения выбраны так, чтобы удовлетворить экстремальным условиям бурения, когда скорость проникновения (ROP) является относительно высокой, но скорость потока все еще является относительно низкой. Вместе с этим гидродинамическую и геометрическую конфигурации задачи бурения определяют значения следующих параметров. Для геометрии трубы принято: $x_k \equiv L = 10...15$ м; $R_2 = 0,1...0,2$ м; $R_1 = 0,06...0,12$ м; $e = 0,1...0,9$. Теплофизические свойства смеси описывают величины: для капельной жидкости – $\rho_f^0 = 998,2$ кг/м³, $\lambda_{of}^0 = 0,599$ Вт/(м·град); $\mu_{of}^0 = 0,001003$ кг/(м·с); $c_{of}^0 = 4,183$ кДж/(кг·град); для дисперсной фазы (частицы песка сферической формы) – $\rho_p^0 = 1650...2650$ кг/м³; $\lambda_{op}^0 = 1,13...0,50$ Вт/(м·град); $c_{op}^0 = 2,09...0,3$ кДж/(кг·град); $d_p^0 = 5...6$ мм. Гидродинамическая часть соответствует вязкостно-инерционно-гравитационному ламинарному и турбулентному режимам течения в диапазоне изменений критерия Рейнольдса: $Re = (0,8...1) \cdot 10^3, (0,1...1) \cdot 10^5$; Причем детализация изменений гидродинамической и диффузионной структур течения в скважине выполнена по данным о входящей в трубу смеси при: $\bar{U}_f = 0,1$ м/с ($Re = 800$); 1 (80000), а также при изменении таких

определяющих критериев, как Кэмерона $\left(X^+ = \frac{1}{Re} \frac{x}{L_0} \right)$, Шмидта (Sm), Прандтля (Pr), Фруда (Fr), Бингам (Bn), Стокс (Stk), весовая доля (M), теплоемкостей (\dot{C}), в следующем диапазоне численных значений: $X^+ \leq 0,5$ (ламинарный режим), $0,003$ (турбулентный режим); $Sm = 0,038$; $Pr = 6,8$; $Fr \leq 6,5$ (ламинарный режим), $0,9$ (турбулентный режим); $Bn = (0...5) \cdot 10^{-2}$; $\dot{C} = 0,5...0,07$; $M = 2,654...1,65$; $Stk \leq 0,053$ (ламинарный режим), $0,53$ (турбулентный режим); $\frac{\rho_f^0}{\rho_p^0} = (0,605...0,376)$;

$\alpha_p^0 \leq 1...10$ %. Заметим, что расчеты динамики течения смеси выполнялись в рамках ПК ANSYS CFD с использованием идей эйлерово-эйлерова подхода и указывают, что при прохождении смеси скважины и загрузке потока частицами наблюдается: 1) падение давления для указанных реальных условий бурения на величину 1047 фунтов на квадратный дюйм; 2) непрерывный рост толщины пласта частиц шлама по всей длине кольцевого межтрубного пространства на величину порядка 2,6 % и это удовлетворительно согласуется,

например, с имеющимися экспериментами [49]; 3) 100%-ное накопление шлама в эксцентричном пространстве, следуя анализу значений массового расхода смеси на выходе из трубы; 4) увеличение кольцевых, среднемассовых скоростей, возникающих в результате уменьшения живого сечения потока из-за накопления шлама, а также интенсификации механизмов конвективно-диффузионного переноса импульса и массы смеси; 5) усиление седиментации частиц в донной части скважины и деструкции верхней границы пласта. Указанные особенности иллюстрируют отдельные результаты расчетов, представленные на рис. 3–7. В частности эволюцию динамической осредненной и пульсационной структуры потока по длине трубы демонстрируют расчеты профилей осевой компоненты вектора скорости смеси $u = (1 - \alpha_p)u_f + \alpha_p u_p$ при использовании модели с транспортными уравнениями для напряжений Рейнольдса (RSS- $k\omega$) (рис. 3) и коэффициента скалярной молярной вязкости, предсказанного по двухпараметрической SST- $k\omega$ -модели (рис. 4), для турбулентного режима течения при $Re = 80\ 000$, $T_u = 5$ %, $R_1 = 0,2$ м, $R_2 = 0,12$ м, $e = 0,3$, $L = 10$ м, $M = 1,6$, $Stk = 0,5$. Расчеты показывают, что на характер, динамику, интенсивность седиментации частиц в донной части по длине горизонтального участка трубы оказывают влияние параметры: M (загрузка потока), сила тяжести (Fr), величина критерия Стокса. Так, при небольших значениях ($Stk \leq 0,1$) можно ожидать формирования в потоке условий, характерных для равномерного движения, когда твердые частицы могут поддерживать осевую скорость, близкую к диспергированной (капельной) средой. В этом процессе частицы интенсивно выносятся потоком, и профили осредненной осевой компоненты сохраняют в поперечном сечении структуру вязкостно-инерционно-гравитационного течения с небольшой асимметрией. Однако при увеличении значений критерия Стокса ($Stk > 0,1$) все заметнее начинают проявляться эффекты динамической неравновесности в фазах. Под их влиянием обостряется действие силы тяжести на транспорт частиц, которая способствует их осаждению на нижнюю стенку. Эти особенности способны вызывать не только нарушения симметрии в изменении осредненной, но и в пульсационной структуре течения смеси, приводящие к анизотропии турбулентности. При прогнозе этих процессов целесообразно обращение к многопараметрическим RSS-моделям турбулентности [1–5,35]. Анализ данных (см. рис. 3, 4) осевой компоненты и турбулентной вязкости в радиальных сечениях трубы с шагом $\Delta x = 1$ м показывает, что в проксимальной части ($x < 5...6$ м) наиболее выражены нелинейные механизмы конвективно-диффузионного переноса импульса и массы. На этом участке формируются условия с перестройкой поля скорости в режим автомодельного течения (рис. 5). В частности, на рис. 5 представлены изменения осевой компоненты вектора скорости капельной жидкости (воды) при турбулентном течения ($Re = 80\ 000$) в протяженной кольцевой эксцентричной трубе в отдельных выделенных по радиусу сечениях. Здесь линии 1–5 соответствуют сечениям/цвету: 1 (красная) – $A = r/(b/e + R_1) = 0,95$; 2 (синяя) – $A = 0,8$; 3 (зеленая) – $A = 0,6$; 4 (сиреневая) – $A = 0,4$; 5 (розовая) – ($A = -0,95$). Конфигурация трубы имеет параметры: $R_2 = 0,1$ м, $R_1 = 0,06$ м, эксцентриситет – $e = 80$ %, смещение центров внешней и внутренних труб – $b = 0,032$ м.

Результаты, приведенные на рис. 5, показывают, что развитие потока по длине скважины сопровождается сохранением особенностей однофазного течения. Об этом свидетельствует характер изменения линий 1–5 и наличие экстремумов в распределении осевой скорости. Подчеркнем, что ход таких эффектов имеет экспериментальное подтверждение (см., например, [1, 2, 35, 50, 51]). Кроме того, видно, что наблюдается стабилизация процессов переноса импульса на длинах $x > 6$ м. Причем в центральной области живого сечения (линии 1–4) сохраняются тенденции, сопровождающие развитие структуры течения с характерной перестройкой поля скорости в ядре (линии 2–4) и пристеночной области пограничного слоя (линии 1, 5).

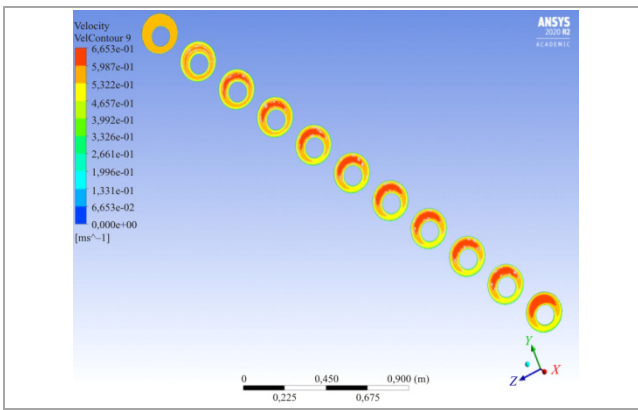


Рис. 3. Картина изменений поля осевой компоненты вектора скорости при турбулентном режиме течения смеси в эксцентричной трубе с горизонтальной секцией

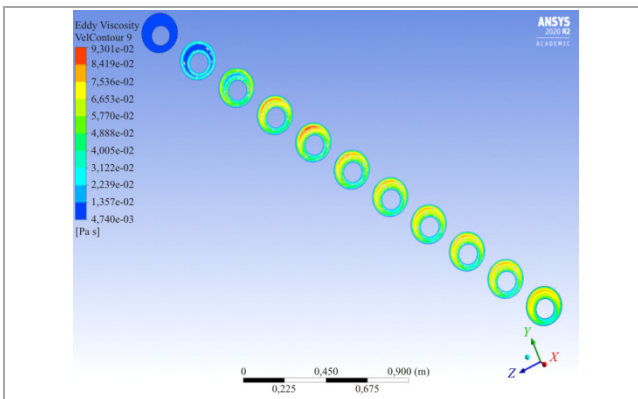


Рис. 4. Картина изменений молярной вязкости (RANS подход, SST- $k\omega$ – модель турбулентности) по длине эксцентричной трубы в условиях течения смеси с параметрами, представленными на рис. 3

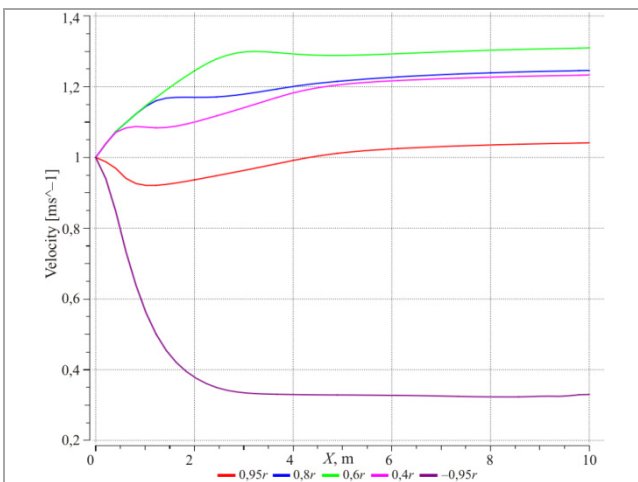


Рис. 5. Изменение осевой компоненты вектора скорости капельной жидкости (воды) при турбулентном течении в протяженной кольцевой эксцентричной трубе в отдельных выделенных по радиусу сечениях. Здесь линии 1–5 соответствуют сечениям/цвету: 1 (красная) – $A = r/(b/e + R_1) = 0,95$; 2 (синяя) – $A = 0,8$; 3 (зеленая) – $A = 0,6$; 4 (сиреневая) – $A = 0,4$; 5 (розовая) – $A = -0,95$. Конфигурация трубы имеет параметры: $R_2 = 0,1$ м, $R_1 = 0,06$ м, эксцентриситет – $e = 80$ %, смещение центров внешней и внутренних труб – $b = 0,032$ м

Область большого максимума на участке течения трубы $x = 2...4$ м (линия 3) свидетельствует о завершении процесса формирования участка стабилизации, после которого поток можно считать автомодельным. Это заключение о течении смеси в реальных условиях бурения ценно с практической точки зрения, так как позволяет исключить влияние на транспорт смеси возмущений со

входа в скважину и управлять процессом очистки по инженерным методикам, учитывающим особенности процессов переноса в радиальных плоскостях. В целом анализ результатов рис. 3–5 показывает, что однородный характер течения смеси даже со слабой интенсивностью турбулентности (при $x < 3$ м, см. рис. 3, 4) приводит к генерации процессов, интенсифицирующих течение в верхней части поперечного сечения межтрубного пространства. Рост турбулентной вязкости в пристеночных областях приводит к интенсивному перемешиванию потока и сопровождается тенденцией большей заполненности профиля осевой компоненты вектора скорости жидкой фазы. Следует учитывать, что по мере увеличения загрузки потока частицами, а также действия силы тяжести влияние радиальной компоненты вектора скорости будет пренебрежимо малым. И возникнут условия течения с отрицательной радиальной компонентой, интенсифицирующие накопление шлама. Более того, вязкие силы в донной части эксцентричной трубы будут доминировать над инерционными, что приведет к загромождению сечения шламом. Результаты изменений динамической структуры жидкости и частиц шлама (песка) в отдельных выделенных по длине поперечных сечениях эксцентричных труб, представленные на рис. 6 (а–е), демонстрируют эти особенности. Заметим, что расчеты выполнены для турбулентного режима течения смеси (песок, вода) при $Re = 10^5$, $T_u = 1$ %, $R_1 = 0,2$ м, $R_2 = 0,12$ м, $e = 0,8$, $L = 15$ м, $M = 1,5$, $Stk = 0,389$. Обращение к более протяженному участку горизонтальной секции скважины обусловлено необходимостью уяснения особенностей течения твердых частиц в условиях, осложненных возмущениями в несущей среде (вследствие низкой ее турбулизации в области входа), и последующей пространственной перестройкой осредненного и пульсационного потока под реальные условия в трубе с заданными параметрами.

Как следует из рис. 6 (а–е), зона стабилизации осевой скорости смеси по длине существенно увеличивается и превосходит соответствующий участок для диспергированной (капельной жидкости) фазы (см., например, для сравнения рис. 5). Причем на это оказывают влияние не только особенности изменений локальной структуры пульсационного течения в начальном участке (при $x < 5$ м) такие параметры, как напряжения Рейнольдса, кинетическая энергия турбулентности, псевдозавихренность, интегральный масштаб энергосодержащих вихрей и т.д.), но и эффекты в динамике частиц. Видно, что в проксимальной части трубы (при $x < 5$) намечаются тенденции к повышенной инерционности частиц у поверхности внутренней трубы, которые в сечениях выхода (см. рис. 6, е) будут способствовать седиментации частиц в донную область скважины (см. рис. 7), увеличивая размеры пласта. В частности, данные радиальных изменений объемной доли твердой фазы на рис. 7, соответствующие условиям течения рис. 4, указывают, что на границе взаимодействия частиц с несущей фазой имеется область течения взвешенных частиц. Из систематического анализа результатов расчетов следует, что при обтекании несущей средой границы раздела фаз (слоя из неподвижных частиц) возникают гидродинамические неустойчивости, следствием которых является диспергирование твердых частиц в жидкую фазу.

Заметим, что в настоящее время особенности этого сложного процесса взаимодействия фаз на границе раздела «пласт – поток» еще слабо изучены. Они перспективны с целью выяснения сути физических процессов, которые происходят на неустойчивой поверхности раздела и узкой зоне с высокими градиентами величин взаимодействующих фаз. Наш анализ процессов при гидродинамике смеси в рассматриваемых трубах позволяет отметить, что принос частиц шлама с поверхности пласта, переход частиц во взвешенное состояние в основном определяются конвективно-диффузионными механизмами, интенсивностью пульсационного мелкомасштабного движения вихрей с анизотропной структурой, а также “умеренно высокими” скоростями потока, контактирующего с криволинейной непроницаемой поверхностью раздела.

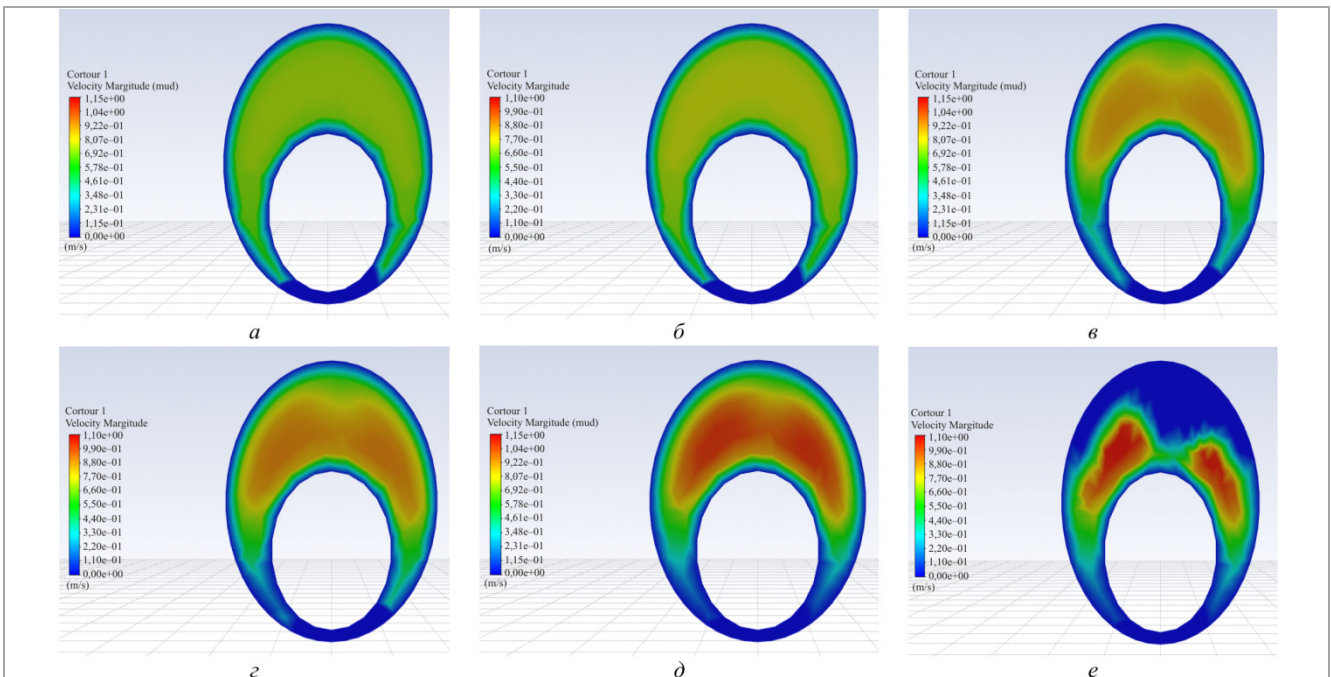


Рис. 6. Картины изменений (а-е) поля осевой компоненты вектора скорости в выделенных по длине поперечных сечениях эксцентричной трубы. Здесь жидкости отвечают рисунки: а – $x = 1$ м; б – $x = 5$ м; д – $x = 15$ м; песку – б – $x = 1$ м; г – $x = 5$ м; е – $x = 15$ м

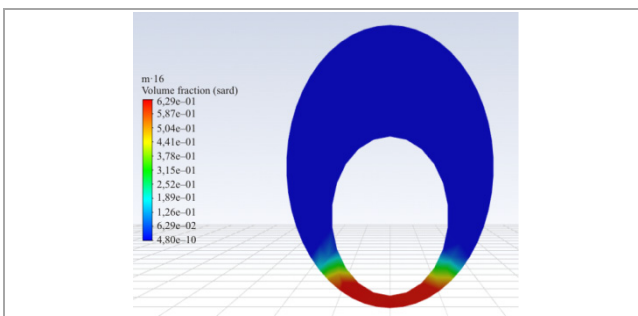


Рис. 7. Картина радиального распределения значений объемной доли твердых частиц (песка) в выходном сечении эксцентричной трубы. Расчеты отвечают течению смеси в условиях, аналогично представленным для рис. 4 в трубе при $L = 10$ м, $e = 0,8$

Заключение

1. В работе выполнено численное моделирование процесса транспорта смеси капельной жидкости, близкой по своим реологическим свойствам к воде, с твердыми частицами (песка) в условиях стационарного развивающегося турбулентного течения в коаксиальных эксцентричных трубах. Такое течение относится к классу исследований гидродинамики сложных сдвиговых потоков в скважинах с протяженным горизонтальным участком с целью получения результатов, полезных для выработки рекомендаций по их эффективной очистке в реальных условиях бурения. Движение смеси с взвешенными частицами шлама происходит в турбулентном режиме, которые способны оказывать существенное влияние на структуру осредненного и пульсационного течения капельной жидкости. Установлено, что осаждение частиц под действием внутренних и внешних сил приводит к формированию неоднородной анизотропной структуры течения, для расчета которой требуются совершенные модели турбулентности с уравнениями транспорта напряжений Рейнольдса [1–5, 35]. Наш опыт показывает, что такие модели более гибки в процессах, которые сопровождают течение смеси с эффектами отрыва/присоединения на границах раздела фаз и взаимодействия смеси со стенками скважины.

2. На процесс осаждения частиц диспергированная среда оказывает существенное влияние. Расчеты показывают, что в

пристеночной, донной областях межтрубного пространства имеется зона с эквивалентными скоростями фаз, проявляются эффекты снижения интенсивности молярного переноса при росте размеров пласта. Турбулентная миграция частиц на дно сопровождается уменьшением значений поперечной компоненты вектора скорости и локализацией по периметру бурильной трубы двух зон интенсивного движения частиц. В условиях реального бурения проявляются эффекты ламинаризации течения в донной части скважины, что интенсифицирует процесс стабилизации течения смеси на длинах порядка $x \approx 6$ м.

3. Вблизи границы неподвижного слоя осевших частиц наблюдается формирование узкого слоя их взвешенного состояния. Анализ указывает, что принос частиц шлама с поверхности пласта, переход частиц во взвешенное состояние в основном определяется конвективно-диффузионными механизмами, интенсивностью пульсационного мелкомасштабного движения вихрей с анизотропной структурой, а также «умеренно высокими» скоростями потока, контактирующего с криволинейной неустойчивой к малым возмущениям поверхностью раздела. Исследование этого вопроса может представлять отдельный интерес с целью выяснения физической сути процессов на границе взаимодействия фаз.

4. За участком гидродинамической стабилизации проявляются тенденции к заполненности профиля скорости в верхней части поперечного сечения при относительном его ускорении (из-за снижения сил вязкости) и одновременном торможении потока в донной части кольцевого сечения (из-за роста вязкого трения). В таком процессе результирующее влияние от взаимодействия инерционных, вязких и гравитационных сил в поперечном сечении межтрубного донного пространства скважины приводит к интенсификации условий формирования застойной зоны, в которой будут активны процессы седиментации частиц и роста размеров отложений шлама. В результате со временем уменьшение накопления шлама в этих областях гидравлическими средствами станет проблематичным и потребуются операции с применением механических средств, в частности таких, как вращение трубы для удаления шлама.

5. Детальный анализ результатов расчета сложного течения смеси в скважине с произвольной образующей ее ствола в большей мере выполнен с допущением о ньютоновском характере связи напряжений со скоростями деформаций в смеси, в то время как большинство буровых

растворов относятся к неньютоновским жидкостями (типа Гершеля – Балкли). Более того, при обобщении представленных результатов расчетов следует учитывать, что движение смеси по кольцевому межтрубному пространству в скважине больше соответствует ламинарному режиму и в редких случаях соответствует переходному (см. например, [52]). Справедливости ради отметим, что хотя в данной статье утверждается, что турбулентность способна улучшить процесс гидротранспорта шлама, при бурении с неньютоновскими жидкостями достижение турбулентности далеко не всегда возможно.

6. В качестве предложений в практику расчета очистки скважин от шлама можно рекомендовать обоснованный в настоящей работе подход, технологию и алгоритм моделирования процесса взаимодействия двухфазных потоков со стенками эксцентричного канала, основанный

на заключениях и демонстрациях возможностей континуального ЭЭ-подхода в прогнозах особенностей рассматриваемых течений. Результаты выполненных сравнений с экспериментальными данными, где это было возможно по ряду локальных и интегральных параметров, например, изменению структуры течения, перепаду давления по длине скважины, подтверждают высокую эффективность и обоснованность методики.

7. Кроме того, для решения технологических задач, рассматриваемых в настоящей работе, возможны рекомендации по совершенствованию критериальных связей определения минимальных скоростей течения бурового раствора с учетом коррекции параметров, характеризующих реологические особенности смеси, интенсивность турбулентности, геометрию межтрубного пространства и соединительных узлов, подобно [53–62].

Библиографический список

1. Харламов С.Н., Фатьянов Д.С. Исследование структуры турбулентного потока природного сырья в трубопроводах с секцией переменного по длине поперечного сечения конфузорно-диффузорного типа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 8. – С. 53–67. DOI: 10.18799/24131830/2020/8/2768
2. 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. DOI: 10.18799/24131830/2021/5/3187
3. 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. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3305
4. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Численное моделирование течений вязких смесей бурового шлама и потока сырой нефти на горизонтальных участках скважин с эксцентричными бурильными трубами // Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа – XXI век: материалы всерос. науч. конф. с участием иностранных ученых, посвященную 150-летию акад. АН СССР И.М. Губкина и 110-летию акад. АН СССР и РАН А.А. Трофимука / Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; Новосибирский государственный университет. Секция 2. Геология нефти и газа. Подсекция 3. Нефтегазопромысловая геология. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2021. – 276 с. DOI 10.25205/978-5-4437-1248-2-221-224
5. 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. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3423
6. 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. doi: 10.2118/78716-ms
7. 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. – Vol. 70, № 3–4. – P. 308–319. DOI: 10.1016/J.PETROL.2009.12.002
8. Mme U., Pål Skalle. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles // International Journal of Petroleum Science and Technology. – 2012. – Vol. 6, № 2. – P. 129–141.
9. Xiao-hua Z., Sun C., Tong H. Distribution features, transport mechanism and destruction of cuttings bed in horizontal well // Journal of Hydrodynamics. – 2013. – Vol. 25, № 4. – P. 628–638. DOI: 10.1016/S1001-6058(11)60405-9
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. – Vol. 4, № 3. – P. 255–261. DOI: 10.1007/s13202-014-0118-x
11. Demiralp Yasin. Effects Of Drill-pipe Whirling Motion on Cuttings Transport Performance for Horizontal Drilling. – MSc thesis, Louisiana State University, 2014. – 151 p.
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. DOI: 10.1155/2014/486423
13. Ofei T.N., Alhemyari S.A. Computational fluid dynamics simulation of the effect of drill pipe rotation on cuttings transport in horizontal wellbores using a Newtonian fluid // International Field Exploration and Development Conference (IFEDC 2015). – 2015. – P. 1–8. DOI: 10.1049/cp.2015.0582
14. Ofei T.N. Effect of yield power law fluid rheological properties on cuttings transport in eccentric horizontal narrow annulus // Journal of Fluids. – 2016. – Vol. 7, № 3. – P. 116–124. DOI: 10.1155/2016/4931426
15. Kamyab Mohammadreza and Vamegh Rasouli. Experimental and numerical simulation of cuttings transportation in coiled tubing drilling // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – Vol. 29. – P. 284–302. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.11.022
16. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and water-based drilling fluids / Sayindla Sneha, Bjørnar Lund, Jan David Ytrehus, Arild Saasen. // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – Vol. 159. – P. 49–57. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.08.069
17. Heydari Omid, Eghbal Sahræi, and 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. – Vol. 156. – P. 801–813. DOI: 10.1016/J.PETROL.2017.06.059
18. 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 Proceedings of the International Forum on Strategic Technology (IFOST). University of Ulsan, October, 13–15, 2010), University of Ulsan: Ulsan, South Korea, 2010. – P. 105–109.
19. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. – 1994. – Vol. 32, № 8. – P. 1598–1605.
20. Epelle Emmanuel I., Dimitrios I. Gerogiorgis. Transient and steady state analysis of drill cuttings transport phenomena under turbulent conditions // Chemical Engineering Research and Design. – 2018. – Vol. 131. – P. 520–544. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.11.023
21. Epelle Emmanuel I., Dimitrios I. Gerogiorgis. 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. – P. 992–1004. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.06.041
22. Syamlal Madhava, O'Brien T.J. The derivation of a drag coefficient formula from velocity-voidage correlations // Technical Note, US Department of energy, Office of Fossil Energy, NETL, Morgantown, WV., 1987. – P. 1–11.
23. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. – Academic press: Sand Diego, 1994. – 467 p.
24. Akhshik Siamak, and 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. – P. 229–246. DOI: 10.1016/J.PETROL.2017.05.012
25. Steady-state cuttings transport simulation in horizontal borehole annulus / Y. Ignatenko, O. Bocharov, A. Gavrillov, R. May // 37th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers. Digital Collection. – 2018. – № 51296 (V008T11A051). – P. 12.
26. 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. – Vol. 329. – P. 386–398. DOI: 10.1016/J.POWTEC.2018.01.065
27. Effect of orbital motion of drill pipe on the transport of non-Newtonian fluid-cuttings mixture in horizontal drilling annulus / Pang Boxue, Shuyan Wang, Xiaoxue Jiang, Huilin Lu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2019. – Vol. 174. – P. 201–215. DOI: 10.1016/J.PETROL.2018.11.009
28. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Т. 1. – 464 с.
29. Yeoh G.H. and Tu J. Computational Techniques for Multi-Phase Flows. – Elsevier Ltd, Inc., 2010. – 210 p.
30. Crowe C.T. Review-numerical models for dilute gas-particle flows // ASME Journal of Fluids Engineering. – 1982. – Vol. 104 (Sept.). – P. 297–303.
31. 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, 2014. – P. 1–6.
32. 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. – Vol. 2. – P. 787–791. DOI: 10.1109/IFOST.2011.6021139
33. Launder B.E. On the computation of convective heat transfer in complex turbulent flows // Journal of Heat Transfer. – 1988. – Vol. 110. – P. 1112–1128.
34. 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. – P. 517–524.
35. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. – Томск: Томский государственный университет, 2001. – 448 с.
36. 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. – P. 175–179.
37. Ди Джачинто, Сабетта, Пива. Эффекты двустороннего взаимодействия в газовых потоках с неплотным множеством частиц // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1982. – Т. 104, № 3. – С. 122–131.

38. Morsi S.A., Alexander A.J. An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems // *Journal of Fluid Mechanics*. – 1972. – Vol. 55, № 2. – P. 193–208.
39. Patankar S.V., Spalding D.B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows // *International Journal of the Heat and Mass Transfer*. – 1972. – Vol. 15. – P. 1787–1806.
40. Happel J., Brenner H. Low Reynolds number hydrodynamics with special applications to particular media. – New Jersey, Prentice-Hall, 1965. – 553 p.
41. Piercy N.A.V., Hooper M.S., Winney H.F. Viscous flow through pipes with cores // *Journal of science*. – 1933. – Vol. 15. – P. 647–676.
42. Шищенко Р.И., Есьман Б.И., Кондратенко П.И. Гидравлика промысловых жидкостей. –М.: Недра, 1976. – 294 с.
43. Вуонг Г., Liu G. Applied drilling circulation systems: hydraulics, calculations and models. – Gulf Professional Publishing, Burlington, 2011. – 272 p.
44. Pressure drop in piping elements. Software-Factory Schmitz, Schifferstadt, Germany [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.druckverlust.de/Online-Rechner> (дата обращения: 01.12.2022).
45. Effects of drill string eccentricity on frictional pressure losses in annuli / D. Vahid, Y. Ma, Z. Li, T. Geng, M. Yu // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 187, № 106853. – P. 1–12. DOI: 10.1016/J.PETROL.2019.106853
46. Podryabinkin E.V., Rudyak V.Y. Modeling of turbulent annular flows of hershel-bulkley fluids with eccentricity and inner cylinder rotation // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2014. – Vol. 23(2). – P. 137–147. DOI: 10.1134/S1810232814020064
47. Accurate predictions of velocity profiles and frictional pressure losses in annular YPL-fluid flow / Hashemian Yahya, Mengjiao Yu, Stefan Miska, Siamack Shirazi, Ramadan Ahmed // *Journal of Canadian Petroleum Technology*. – 2014. – Vol. 53, № 6. – P. 355–363. DOI: 10.2118/173181-PA
48. Турбулентные течения газозвесьи / А.А. Шрайбер, Л.Б. Гавин, В.А. Наумов [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1987. – 240 с.
49. Simulation of transient cuttings transportation and ECD in wellbore drilling / S.S. Costa, S. Stuckenbruck, S.A. Fontoura, A.L. Martins // *Europepec/EAGE Conference and Exhibition*. – 2008. – Jun 9 (OnePetro). – 11 p. DOI: 10.2118/113893-MS
50. Grutzner H. Beitrage zur theoretischen und experuncntellen Untersuchung der Turbulenz. – Akademic-Verlag Berlin, 1976. – 135 p.
51. Барбин Джоунс. Турбулентное течение на начальном участке гладкой трубы // *Техническая механика*. – 1963. – № 1. – С. 34–41.
52. Busch Alexander. 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 Dissertation. – Norwegian University of Science and Technology, 2020. – 187 p.
53. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Процедуры и инструментарий мониторинга процессов и механизмов транспорта шлама при гидравлической очистке горизонтальных скважин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2020. – Т. 331, № 12. – С. 22–40. DOI: 10.18799/24131830/2020/12/2936
54. 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. doi: 10.18799/24131830/2020/7/2725
55. 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. – P. 798–805.
56. Gavignet Alain A., Ian J. Sobey. Model aids cuttings transport prediction // *Journal of Petroleum Technology*. – 1989. – Vol. 41, № 9. – P. 916–921.
57. Nguyen Desmond, Rahman S.S. A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells // *SPE/IADC Asia Pacific Drilling Technology*. Society of Petroleum Engineers. – 1996. – P. 1–15. DOI: 10.2118/36383-MS
58. Esh 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.
59. Assessment of numerical methods for estimating the wall shear stress in turbulent Herschel–Bulkley slurries in circular pipes / D. Mehta, A.K.T. Radhakrishnan, J.B. van Lier, F.H.L.R. Clemens // *Journal of Hydraulic Research*. – 2021. – Vol. 59, № 2. – P. 196–213. DOI: 10.1080/00221686.2020.1744751
60. Чухлов А.С., Сальникова О.Л., Черных В.И. Оценка влияния геолого-физических характеристик залежей со сложным геологическим строением на условия притока углеводородов // *Недропользование*. – 2022. – Т. 22, № 1. – С. 9–14. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.1.2
61. Oney E., van Oort E. Modeling the effects of drill string eccentricity, pipe rotation and annular blockage on cuttings transport in deviated wells // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2020. – Т. 79, № 103221. – P. 101–112. Doi: 10.1016/j.jngse.2020.103221
62. Hicham F., Hadjadj A., Haddad A., Ofei T.N. Numerical study of parameters affecting pressure drop of power-law fluid in horizontal annulus for laminar and turbulent flows // *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. – 2019. – Vol. 9, № 4. – P. 3091–3101. DOI: 10.1007/s13202-019-0706-x

References

1. Kharlamov S.N., Fatianov D.S. Issledovanie struktury turbulennogo potoka prirodnogo syr'ia v truboprovodakh s sektsiei peremennogo po dl ine poperechnogo sechenia konfuzorno-diffuzornogo tipa [Investigation of natural raw materials turbulent flow structure in pipelines at confuser-diffuser section]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 53-67. DOI: 10.18799/24131830/2020/8/2768
2. Kharlamov S.N., Fatianov D.S. Modelirovanie prostanstvennykh techenii viazkiikh sred v sisteme kanalov s uchastkami soedinenii slozhnoi formy [Simulation of viscous media spatial flows in the system of channels with sections of complex form junctions]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 70-88. DOI: 10.18799/24131830/2021/5/3187
3. Kharlamov S.N., Dzhanghorkhani M., Filipov K.A. Matematicheskoe modelirovanie i metody issledovaniia gidrodinamicheskoi ochistki gorizonta l'nykh skvazhin [Mathematical modeling and research methods of horizontal wells hydrodynamic cleaning]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2021, vol. 332, no. 8, pp. 53-73. DOI: 10.18799/24131830/2021/8/3305
4. Kharlamov S. N., Dzhanghorkhani M. Chislennoe modelirovanie techenii viazkiikh smesi burovogo shlama i potoka syroi nefti na gorizonta l'nykh uchastkakh skvazhin s eksstentrichnymi buril'nymi 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 fundamental'noi i prikladnoi geologii i gaza - XXI vek. Materialy vsereossiiskoi nauchnoi konferentsii s uchastiem inostrannykh uchennykh, posviashchennuiu 150-letiiu akademika AN SSSR I.M. Gubkina i 110-letiiu akademika AN SSSR i RAN A.A. Trofimuka. Institut neftegazovoi geologii i geofiziki im. A. A. Trofimuka SO RAN; Novosibirskii gosudarstvennyi universitet. Sektsiia 2. Geologiya nefti i gaza. Podseksiiia 3. Neftegazopromyslovaia geologiya. Novosibirsk: IPTs NGU, 2021, 276 p. DOI 10.25205/978-5-4437-1248-2-221-224*
5. Kharlamov S. N., Dzhanghorkhani M. Chislennoe issledovanie viazkostno-inertsionnogo laminarnogo zakruchennogo techeniia v krugloi trube s eksstentrichnym kruglym iadrom [Numerical simulation of viscous-inertial laminar swirling flow in a circular tube with an eccentric round core]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 7-21. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3423
6. Bilgesu H.L., 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. DOI: 10.2118/78716-ms
7. 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. DOI: 10.1016/J.PETROL.2009.12.002
8. Mme 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.
9. Xiao-hua Z., Sun C., Tong H. Distribution features, transport mechanism and destruction of cuttings bed in horizontal well. *Journal of Hydrodynamics*, 2013, vol. 25, no. 4, pp. 628-638. DOI: 10.1016/S1001-6058(11)60405-9
10. 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. DOI: 10.1007/s13202-014-0118-x
11. Demiralp Yasin. Effects of Drill-pipe Whirling Motion on Cuttings Transport Performance for Horizontal Drilling. MSc thesis, Louisiana State University, 2014, 151 p.
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, no. 4, pp. 110-120. DOI: 10.1155/2014/486423
13. Ofei T.N., Alhemyari S.A. Computational fluid dynamics simulation of the effect of drill pipe rotation on cuttings transport in horizontal wellbores using a Newtonian fluid. *International Field Exploration and Development Conference (IFEDC 2015)*, 2015, pp. 1-8. DOI: 10.1049/cp.2015.0582
14. Ofei T.N. Effect of yield power law fluid rheological properties on cuttings transport in eccentric horizontal narrow annulus. *Journal of Fluids*, 2016, vol. 7, no. 3, pp. 116-124. DOI: 10.1155/2016/4931426
15. Kamyab Mohammadreza and 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. DOI: 10.1016/j.jngse.2015.11.022
16. Sneha Sayindla, Lund Bjørnar, Ytrehus Jan David, Saasen Arild. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 159, pp. 49-57. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.08.069
17. Heydari Omid, Eghbal Sahraei, and 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. DOI: 10.1016/J.PETROL.2017.06.059
18. 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 Proceedings of the International Forum on Strategic Technology (IFOST. University of Ulsan, October, 13-15, 2010), University of Ulsan, South Korea*, 2010, pp. 105-109. DOI: 10.1109/IFOST.2010.5667992
19. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598-1605. DOI: 10.2514/3.12149
20. Epelle Emmanuel I., Dimitrios I. Gerogiorgis. Transient and steady state analysis of drill cuttings transport phenomena under turbulent conditions. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, vol. 131, pp. 520-544. DOI: 10.1016/j.cherd.2017.11.023
21. Epelle Emmanuel I., Dimitrios I. Gerogiorgis. 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. DOI: 10.1016/j.petrol.2018.06.041
22. Syamlal Madhava, O'Brien T.J. The derivation of a drag coefficient formula from velocity-voidage correlations. *Technical Note, US Department of energy, Office of Fossil Energy, NETL, Morgantown, WV*, 1987, pp. 1-11.

23. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. Academic press: Sand Diego, 1994, 467 p.
24. Akhshik Siamak, and 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. DOI: 10.1016/J.PETROL.2017.05.012
25. Ignatenko Y., Bocharov O., Gavrilov A., May R. Steady-state cuttings transport simulation in horizontal borehole annulus. *37th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers. Digital Collection*, 2018, no. 51296 (V008T11A051), 12 p.
26. Boxue Pang, Wang Shuyan, Liu Guodong, Jiang Xiaoxue, Lu Huilin, Li Zhenjie. 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. DOI: 10.1016/J.POWTEC.2018.01.065
27. Boxue Pang, Wang Shuyan, Jiang Xiaoxue, Lu Huilin. Effect of orbital motion of drill pipe on the transport of non-Newtonian fluid-cuttings mixture in horizontal drilling annulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, vol. 174, pp. 201-215. DOI: 10.1016/J.PETROL.2018.11.009
28. Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznykh sred [Dynamics of multiphase media]. Moscow: Nauka, 1987, vol. 1, 464 p.
29. Yeoh G.H. and Tu J. Computational Techniques for Multi-Phase Flows. Elsevier Ltd, Inc., 2010, 210 p.
30. Crowe C.T. Review- numerical models for dilute gas-particle flows. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1982, vol. 104 (Sept.), pp. 297-303. DOI: 10.1115/1.3241835
31. Kharlamov S.N., Kudelin N.S., Dedeyev P.O. Hydrodynamic, heat and acoustic processes modelling in tranport of rheologically complex viscous media technology in pipelines. *XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Ussov: PGON2014 IOP Publishing IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 21*. Tomsk, 2014, pp. 1-6.
32. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I., Alginov R.A., Pavlov S.A. Prospects of RANS models with effects multiparameter at modeling of complex non-isothermal flows of viscous media in wells with any configuration of surface. *Proc. of the 6th International Forum on Strategic Technology*. Heilongjiang, Harbin, China, 2011, vol. 2, pp. 787-791. DOI: 10.1109/IFOST.2011.6021139
33. Launder B.E. On the computation of convective heat transfer in complex turbulent flows. *Journal of Heat Transfer*, 1988, vol. 110, pp. 1112-1128. DOI: 10.1115/1.3250614
34. 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, pp. 517-524.
35. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. Matematicheskie modeli neodnorodnoi anizotropnoi turbulentnosti vo vnutrennikh techeniakh [Mathematical models of inhomogeneous anisotropic turbulence in internal flows]. Tomsk: Tomskii gosudarstvennyi universitet, 2001, 448 p.
36. 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.
37. Di Dzhachinto, Sabetta, Piva. Effekty dvustoronnego vzaimodeistviia v gazovykh potokakh s neplotnym mnozhestvom chastits [Effects of bilateral interaction in gas flows with a loose set of particles]. *Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov*, 1982, vol. 104, no. 3, pp. 122-131.
38. 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. DOI: 10.1017/S0022112072001806
39. Patankar S.V., Spalding D.B. A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of the Heat and Mass Transfer*, 1972, vol. 15, pp. 1787-1806. DOI: 10.1016/0017-9310(72)90054-3
40. Happel J., Brenner H. Low Reynolds number hydrodynamics with special applications to particular media. New Jersey, Prentice-Hall, 1965, 553 p.
41. Piery N.A.V., Hooper M.S., Winney H.F. Viscous flow through pipes with cores. *Journal of science*, 1933, vol. 15, pp. 647-676. DOI: 10.1080/14786443309462212
42. Shishenko R.I., Es'man B.I., Kondratenko P.I. Gidravlika promyvochnykh zhidkostei [Fluid hydraulics]. Moscow: Nedra, 1976, 294 p.
43. Boyun G., Liu G. Applied drilling circulation systems: hydraulics, calculations and models. Gulf Professional Publishing, Burlington, 2011, 272 p.
44. Pressure drop in piping elements. Software-Factory Schmitz, Schifferstadt, Germany, available at: <http://www.druckverlust.de/Online-Rechner> (accessed 01 December 2022).
45. Vahid D., Ma Y., Li Z., Geng T., Yu M. Effects of drill string eccentricity on frictional pressure losses in annuli. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 187, no. 106853, pp. 1-12. DOI: 10.1016/J.PETROL.2019.106853
46. Podryabinkin E.V., Rudyak V.Y. Modeling of turbulent annular flows of hershel-bulkley fluids with eccentricity and inner cylinder rotation. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, vol. 23(2), pp. 137-147. DOI: 10.1134/S1810232814020064
47. Yahya Hashemian, Yu Mengjiao, Miska Stefan, Shirazi Siamack, Ahmed Ramadan. 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. DOI: 10.2118/173181-PA
48. Shraiber A.A., Gavin L.B., Naumov V.A. et al. Turbulentnye techeniia gazovzvesi [Turbulent gas suspension flows]. Kiev: Naukova dumka, 1987, 240 p.
49. Costa S.S., Stuckenbruck S., Fontoura S.A., Martins A.L. Simulation of transient cuttings transportation and ECD in wellbore drilling. *Europec/EAGE Conference and Exhibition*, 2008, Jun 9 (OnePetro), 11 p. DOI: 10.2118/113893-MS
50. Grutzner H. Beitrage zur theoretischen und experunctellen Untersuchung der Turbulenz. Akademik-Verlag Berlin, 1976, 135 p.
51. Barbin Dzhouns. Turbulentnoe techenie na nachal'nom uchastke gladkoi trubyy [Turbulent flow in the initial section of a smooth pipe]. *Tekhnicheskai mekhanika*, 1963, no. 1, pp. 34-41.
52. Busch Alexander. On particle transport and turbulence in wellbore flows of non-Newtonian fluids-Findings from acuttings transport process analysis by means of computational fluid dynamics, rheometry and dimensional analysis. PhD Dissertation. Norwegian University of Science and Technology, 2020, 187 p.
53. Kharlamov S.N., Dzhangkhorbani M. Protседury i instrumentarii monitoringa protsessov i mekhanizmov transporta shlama pri gidravlicheskoj ochildke gorizonta'nykh skvazhin [Procedures and instruments for monitoring processes and mechanisms of cutting transport in hydraulic cleaning of horizontal wells]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 22-40. DOI: 10.18799/24131830/2020/12/2936
54. Kharlamov S.N., Dzhangkhorbani M. Protsessy transporta shlama pri ochildke skvazhin s proizvol'noi orientatsiei burovykh trub, sodержashchikh ekscentrichno raspolozhennoe krugloe iadro s podvizhnoi stenкой: problemy, rezul'taty, perspektivy (obzor) [Cuttings transport in hole cleaning considering well orientation, pipe eccentricity and pipe rotation: problems, results, prospects (survey)]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*, 2020, vol. 331, no. 7, pp. 131-149. DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2725
55. 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. DOI: 10.2118/136292-MS
56. Gagniet Alain A., Ian J. Sobey. Model aids cuttings transport prediction. *Journal of Petroleum Technology*, 1989, vol. 41, no. 9, pp. 916-921. DOI: 10.2118/15417-PA
57. Nguyen Desmond, Rahman S.S. A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells. *SPE/IADC Asia Pacific Drilling Technology. Society of Petroleum Engineers*, 1996, pp. 1-15. DOI: 10.2118/36383-MS
58. 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.
59. Mehta D., Radhakrishnan A.K.T., Van Lier J.B., Clemens F.H.L.R. Assessment of numerical methods for estimating the wall shear stress in turbulent Herschel-Bulkley slurries in circular pipes. *Journal of Hydraulic Research*, 2021, vol. 59, no. 2, pp. 196-213. DOI: 10.1080/00221686.2020.1744751
60. Chukhlov A.S., Sa'lnikova O.L., Chernykh V.I. Otsenka vliianiia geologo-fizicheskikh kharakteristik zalezhei so slozhnym geologicheskim stroeniem na usloviia pritoka uglevodorodov [Influence evaluation of geological and physical characteristics of reservoirs with a complex geological structure on the conditions of hydrocarbons inflow]. *Nedropol'zovanie*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 9-14. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.1.2
61. Oney E., van Oort E. Modeling the effects of drill string eccentricity, pipe rotation and annular blockage on cuttings transport in deviated wells. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, vol. 79, no. 103221, pp. 101-112. DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103221
62. Hicham F., Hadjadj A., Haddad A., Ofei T.N. Numerical study of parameters affecting pressure drop of power-law fluid in horizontal annulus for laminar and turbulent flows. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 3091-3101. DOI: 10.1007/s13202-019-0706-x

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
 Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
 Вклад авторов равноценен.