

УДК 504.61:532.542:536.252

ЧИСЛЕННЫЙ ПРОГНОЗ ДВИЖЕНИЯ СМЕСИ ВЯЗКОЙ КАПЛЕВОЙ ЖИДКОСТИ С ТВЕРДЫМИ ЧАСТИЦАМИ ВО ВХОДНОЙ ОБЛАСТИ ЭКСЦЕНТРИЧНЫХ КОЛЬЦЕВЫХ ТРУБ И ИХ ОЧИСТКИ ОТ ШЛАМА

Харламов Сергей Николаевич¹,
kharsn@mail.ru

Джанхорбани Мехран¹,
mehran.janghorbani@gmail.com

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

Актуальность исследования определяется необходимостью: понимания особенностей гидродинамики сдвиговых потоков в геометрических конфигурациях рабочего пространства с изменениями формы поперечного сечения и поверхностей стенок; детализации внутри- и межфазных процессов переноса импульса, массы при течении дисперсных сред со сложной реологией в полях действия специфических внутренних и внешних сил в кольцевых эксцентричных трубах; установления возможностей моделей, подходов, методов прогноза эволюции структуры течения смесей; выработки практических рекомендаций персоналу по эффективной очистке рабочих участков скважины, ее отверстий от шлама.

Цель работы состоит в исследовании в рамках методов CFD особенностей пространственного ламинарного и турбулентного течения смеси бурового раствора с твердыми частицами в коаксиальной и эксцентричной входной области скважины, а также в установлении закономерностей сложного сдвигового течения, сопровождающих транспорт шлама по стволу скважины и очистку ее горизонтальных участков.

В качестве **объекта** исследования выбрана скважина с десятиметровой горизонтальной эксцентричной секцией, в которой течение осуществляется в условиях, реально близких к фактическим параметрам бурения (*in situ*).

В методах исследования преобладают подходы комплексного физико-математического и компьютерного моделирования процессов в механике гомогенных и гетерогенных сплошных сред, широко апробированные на классе внутренних сложных сдвиговых течений, а также успешно прошедшие валидацию и верификацию результатов в соответствующих условиях и близких к режимам течений, тепло- и массопереноса, выполненных другими авторами по анализу технологических процессов бурения и очистки скважин.

Результаты. Представлен критический анализ современного состояния проблем компьютерного моделирования процессов транспорта шлама в технологиях бурения. Отмечены особенности, эффекты, формируемые наличием вращения бурильной трубы, оказывающие влияние на структуру течения. Детально сформулирована задача о гидродинамике и массопереносе турбулентного развивающегося по пространству дисперсного потока каплевой жидкости с твердыми частицами шлама в коаксиальных эксцентричных трубах произвольной реологии, методы ее исследования. Приведены замечания к формализму замыканий определяющих уравнений модели в рамках CFD. Расчетами выявлены закономерности изменений локальных и интегральных параметров течений и массопереноса, связанные с увеличением кольцевых, среднемассовых скоростей, возникающих в результате уменьшения живого сечения потока из-за накопления шлама. Определены тенденции к регуляризации эффектов, формирующих очистку. Раскрыты особенности изменений структуры сложного течения смеси в рамках зйлеро-во-зйлерова и зйлеро-лагранжевого подходов. В заключение представлены предложения инженерного прогноза течений во входном участке скважины. Прикладная ценность результатов определяется возможностью внесения ряда обобщений, включающих неопределенности, вызванные учетом деталей геометрической и гидродинамической конфигураций задачи, а также использованием параметров реальных режимов бурения и очистки.

Ключевые слова:

Скважина, бурение, вращение, моделирование, гидродинамика, реология, кольцевые потоки, транспорт, очистка.

Введение

Опирающиеся на реальные и точные данные особенностей бурения скважин технологические операции по их очистке от шлама определяют задачу современного бурения. Причем в сравнении с относительно ясным анализом механизмов и закономерностей выноса продуктов выработки по вертикальным зонам скважины установление соответствующих особенностей в направленных участках требует глубокого изучения нетривиальных обменных процессов переноса импульса, массы, теплоты, особенно в условиях расширенного охвата скважины. Также стоит отметить, что эта проблема осложняется тем, что информация о гидродинамике и тепло- и массопереносе смесей во входных участках коаксиально-

эксцентричных труб, стагнации и эволюции потока в донной части весьма приближенна. Управление гидродинамическими процессами с учетом общего характера интегрального распределения параметров течения, например, перепада поля давления, сопротивления трения, важно в выработке решений персоналу по оптимальному управлению оборудованием. Но в таких общих для функционирования оборудования условиях целесообразен учет особенностей влияния изменений образующей ствола скважины, что будет требовать репликации процесса бурения, транспорта продуктов выработки, которые в лабораторном анализе весьма сложны и дорогостоящи. Все это ставит задачи поиска «гибких» способов прогноза аспектов течений вязких смесей в скважинах/трубах с эксцен-

тричными ядрами в рамках методов математического моделирования. Указанные методы – методы вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics, CFD). Они опираются на отдельные полевые данные/результаты лабораторных экспериментов с целью валидации модельных положений, верификации полученных численных результатов с помощью мощных ПЭВМ. А также представляют собой универсальный инструмент изучения очистки в сопряженных внутренних системах со сложной геометрической и гидродинамической конфигурацией задачи.

Краткий экскурс в историю аспектов моделирования задачи очистки показывает, что начало 2000-х гг. ознаменовано активным использованием методов и моделей CFD в решении рассматриваемых проблем с обращением к мелкомасштабным экспериментам для качественной верификации результатов изменений локальных и интегральных параметров, прогнозирующих физическую реальность явления. 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] позволило повысить точность результатов, считать математическое описание более универсальным. Однако данные обобщения поставили перед исследователями актуальную проблему поиска путей снижения компьютерного времени/ресурсов вычисления, которые многократно возросли. Естественно, что детализация импульсного и диффузионного переносов скаляра в сложной по составу и структуре смеси, проникновение в суть диффузионных механизмов молярного обмена в рамках феноменологического и статистического методов описания физических явлений, а также попытка моделирования твердой гранулированной фазы в концепциях эйлерово-эйлерова и эйлерово-лагранжева методов повысили внимание к точности воспроизводства процессов, особенно в специфических зонах течений гетерогенной смеси, на границах взаимодействия фаз [4, 5]. Учет возможностей подходов показывает, что, несмотря на относительную простоту моделирования очистки скважины от шлама в рамках эйлерово-эйлерова подхода, можно рассчитывать на принципиальное понимание сути определяющих механизмов переноса при течении реологически сложной среды в кольцевой эксцентричной зоне. И, следовательно, получить представление о возможных путях повышения точности и эффективности очистки скважин в реальных условиях.

Учитывая вышесказанное и опираясь на современные достижения в прогнозе гидродинамики гетерогенных сред во внутренних системах, связанные с идеями эйлерово-эйлерова/эйлерово-лагранжева подходов, в настоящей работе была поставлена цель: в рамках методов CFD исследовать особенности пространственного течения смеси бурового раствора с твердыми частицами в коаксиальной и эксцентричной входной области скважины; установить особенности и закономерности течения, сопровождающие транс-

порт шлама по стволу скважины и очистку ее горизонтальных участков. В качестве объекта исследования выбрана скважина с десятиметровой горизонтальной эксцентричной секцией, в которой течение осуществляется в условиях, реально близких к фактическим параметрам бурения (*in situ*). В методах исследования преобладают подходы комплексного физико-математического и компьютерного моделирования процессов в механике гомогенных и гетерогенных сплошных сред, широко апробированные на классе внутренних сложных сдвиговых течений, а также успешно прошедшие валидацию и верификацию результатов в соответствующих условиях и близких к режимам течений, тепло- и массопереноса, выполненных другими авторами. Прикладное значение результатов представляется актуальным и ценным, особенно с точки зрения внесения ряда обобщений, исключающих неопределенности, вызванные учетом деталей геометрической и гидродинамической конфигурации задачи, а также параметров реальных режимов бурения и очистки.

Отдельные библиографические сведения по проблеме

Анализ публикаций по аспектам моделирования процесса транспорта шлама показывает, что самое раннее использование CFD в качестве инструмента исследования было выполнено Н. Bilgesu et al. в [6], где для изучения влияния на бурение частиц шлама, грязевых свойств раствора на транспорт смеси в вертикальных и горизонтальных скважинах использовался эйлеровский подход. Результаты оказали заметное влияние на использование указанного подхода другими исследователями, которые пытались смоделировать влияние различных параметров на процесс транспорта шлама, одним из которых было *вращение бурильной трубы*. В действительности вращение трубы в горизонтальных скважинах представляет собой сочетание коаксиального и эксцентричного движения, и, как в дальнейшем было показано, это способствует улучшению очистки сечений. Однако создание орбитального движения в лабораторных условиях чрезвычайно трудно. И вполне понятно, что экспериментальные результаты этого направления весьма редки. В то же время течения в коаксиальных трубах, несмотря на относительно меньшую информативность в части очистки пространства скважины, гораздо легче воспроизвести в лабораторных условиях. И, естественно, этот вопрос был актуален для исследователей. Например, S. Nan et al. [7] также использовали эйлеровский метод для установления особенностей влияния коаксиального вращения трубы на транспорт частиц шлама в скважинах различной наклонности.

Необходимость детализации внутри- и межфазных процессов в смеси заставила строить решение задачи очистки отверстий в более полных постановках, в которых обращение к дискретному подходу прогноза процессов в твердой фазе является принципиальным. В этом смысле первый зарегистрированный случай применения лагранжевого подхода, предпринятый U. Mme et al. [8] с учетом влияния геометрического строения частиц шлама на интенсивность очистки

скважин, был ценен с точки зрения установления факта, что геометрия частиц шлама не принесла ожидаемого и, возможно, определяющего влияния на интенсификацию очистки. Хотя и указала на потребность контроля моделью этих значений, необходимости включения информации в формулировку соответствующих краевых условий задачи. Результаты указывают, что эти сведения ценны для постановки задачи в сравнении с физическим допущением, что транспорт смеси более эффективен, с заключением о структуре и составе смеси как совокупности сферических и жестких частиц. Исследования R. Rooki et al. [9] расширили использование CFD подхода для условий пенного бурения и показали, что это направление способно давать результаты, не превышающие 8 % -ой точности в изменении интегральных параметров в сравнении с имеющимися и соответствующими экспериментальными данными. В дальнейшем З. Ксао и др. [10] в рамках CFD показали, что, несмотря на инерционность гидродинамических процессов и их особое влияние на дисперсную фазу в эксцентричной зоне скважины, невозможно осуществить полную очистку сечения без обращения к механическим средствам. Эти исследования уникальны в том смысле, что они выполнены с учетом соединений трубного инструмента как части их геометрии и приводят к заключению, что в реальных условиях в этих областях частицы шлама интенсивно накапливаются. Далее С. Sun et al. [10, 11] вновь обратились к вопросу учета коаксиального вращения буровой трубы и показали, что данный режим вращения эффективен только при относительно низких значениях азимутальной компоненты вектора скорости и теряет свою эффективность по мере ее увеличения. Исследование Y. Demiralp [12] показало, что в прогнозе динамики сложных сдвиговых течений в скважине наиболее эффективна SST $k-\omega$ -модель турбулентности [1–5], т. к. позволяет получить достаточно точные результаты о процессе без существенных материальных затрат на реализацию модели и ее численного алгоритма. Именно это выделяет указанную модель в классе ее практических приложений и делает популярной среди инженеров-исследователей. Стоит отметить, что исследование [12] интересно тем, что оговаривает необходимость учета в процессах очистки *орбитального движения* бурильной трубы, которое до недавнего времени многими игнорировалось. Т. Ofei et al. [13] провели обширный анализ особенностей течения и очистки в условиях изменений таких переменных, как наклон отверстия, эксцентриситет трубы, скорость коаксиального вращения, тип буровой жидкости, интенсивность изменений кольцевой скорости и т. д. Их анализ показал, что моделирование в рамках CFD выступает весьма надежной альтернативой экспериментальным исследованиям и может, по крайней мере, качественно верно прогнозировать реальность процесса очистки отверстий. В своих последующих работах Т. Ofei et al. [14, 15] показали, что для различных сценариев результаты моделирования отличаются от экспериментальных данных в характерном диапазоне 1...12 %. Учитывая опыт применения CFD к моделированию рас-

сматриваемых течений, М. Kamyab et al. [16] оценили возможности эйлеровского подхода в CFD при прогнозе технологии бурения гибких труб (Coiled Tubing Drilling, CTD), где вращение труб невозможно, и попытались установить минимальную скорость транспортировки (Minimal Transport Velocity, MTV), необходимую для эффективной очистки рабочих участков скважины и ее отверстий.

Следует отметить, что к этому периоду преимущество практического использования двухпараметрических моделей турбулентности типа SST $k-\omega$, $k-L$ [1–4] уже сформировалось и дополнилось сведениями о корректности прогноза процессов в низкорейнольдсовых зонах донных течений каналов переменного по длине поперечного сечения в сравнении моделями типа $k-\varepsilon$ [1–3]. Это определило их выбор при прогнозе турбулентности моделями RANS метода в пристенной области, сложных течений с эффектами вихревой неустойчивости в узких кольцеобразных и эксцентричных зонах. Подчеркнем, что до сих пор все авторы для описания буровых жидкостей использовали каплевые среды, близкие по свойствам к воде. Однако Sayindla Sneha и др. в [17] выполнили теоретико-экспериментальные исследования по выявлению особенностей изменений эффекта перепада давления, наблюдаемого при течении различных буровых жидкостей с различной скоростью потока, в одной и той же конфигурации задачи. Было получено весьма удовлетворительное соответствие данных теории и опыта поведения поля давления. Заслуга исследования Омид Хейдари и др. [18] состоит в том, что в рамках эйлерова приближения в CFD оценены возможности замыканий определяющих уравнений движения моделями со скалярной величиной молярной вязкости и внесены обобщения на описание анизотропной турбулентности статистическими моделями второго порядка для одноточечных корреляций пульсаций вектора скорости моделями рейнольдсовых напряжений типа RSS- $k-\varepsilon$, $-\omega$, $-L$ [1–5]. Основным недостатком этого направления является слабая изученность вопроса достоверности замыканий определяющих уравнений модели в прогнозе процессов в гетерогенной смеси. Эта работа сопряжена со сложностями постановок экспериментов и поиска уточнений для замыканий членов высшего порядка в уравнениях в частных производных второго порядка соответствующих компонент полного тензора напряжений Рейнольдса. Справедливости ради стоит отметить, что в настоящее время эти данные немногочисленны и требуется кропотливый анализ для установления факта универсальности искомых замыканий [19]. В силу сказанного в настоящей работе при оценке достоверности рассматриваемых процессов используется технология тестирования результатов на классе различных типов внутренних течений, осложненных влиянием изменений физических, геометрических и других термодинамических деталей течения и характера изменений внутренних и внешних сил в сопряженной системе «внешняя среда – границы межтрубного пространства – рабочее тело». Также подчеркнем, что до сих пор отсутствуют в анализе процессов данные изменений

локальных параметров гидродинамической и диффузионной картины при течении смеси в скважине. Кроме того, авторы предпочитают использовать более простые модели RANS метода с целью удовлетворения положения «цена – качество – приемлемая точность» прогноза результатов, в частности деталей воспроизводства наиболее важных с практической точки зрения параметров задачи, таких как эффект снижения концентрации шлама и падения давления в общей зоне межтрубного эксцентричного пространства и горизонтального участка скважины. Касаясь материала современных публикаций с наиболее детальным исследованием особенностей транспорта шлама и выявления закономерностей интенсификации процесса очистки, отметим, что одно из самых глубоких исследований проблемы было предоставлено Е. Эпелле и Д. Героджоргисом [20], которые в рамках эйлерово-эйлерова и эйлерово-лагранжева подходов имитируют транспорт частиц шлама гидродинамическим потоком, описываемым с помощью стандартной $k-\omega$ -модели турбулентности [21]. Установлено, что в сравнении с экспериментальными данными оба подхода имеют ошибки прогноза интегральных параметров в диапазоне значений до 11 %. Однако эйлерово-лагранжевое описание позволяет точнее отслеживать процессы течения частиц твердой фазы за счет увеличения вычислительного времени, но оно существенно возрастает. В [22] продолжено исследование проблем транспорта и очистки скважин с привлечением модели, учитывающей изменения формы и строения частиц, где установлено, что, например, сферичность частиц оказывает значительное влияние на результаты моделирования, вызывая падение давления на рабочем участке скважины до 11 %. Учитывая это в [22], выбран эйлерово-эйлеровый подход и модель Syamlal-O'Brien [23] для имитации транспорта частиц в сравнении с распространённой моделью Gidaspow [24]. Такое заключение обусловлено тем, что модель Syamlal-O'Brien позволяет проще учитывать несферические особенности частиц. Вместе с этим стоит признать, что модель Gidaspow способна давать результаты аналогичные по точности модели Syamlal-O'Brien [23]. Также заметной в вопросах моделирования выступает работа С. Ахшика и М. Раджаби [25], в которой используется лагранжев подход для описания процессов в трехфазной газожидкостной смеси с твердыми частицами, часто используемой в приложениях бурения. Отметим, что, хотя это моделирование и отличается чрезвычайной трудоёмкостью и выполняется с использованием очень мелкой разностной сетки, сравнение с экспериментальными результатами показало, что технология CFD достаточно надёжна, чтобы справиться с самыми сложными режимами потока, например, неустойчивостями энтропийной природы, с которыми сталкиваются при буровых операциях. Наконец, Ю. Игнатенко и др. [26] вернулись к проблеме учета коаксиального вращения внутренней трубы и обнаружили, что это вращение создает вихри при низких вязкостях и скоростях вращения, что существенно влияет как на падение давления, так и на концентрацию транспорта частиц шлама.

В целом общий анализ имеющихся публикаций рассматриваемых проблем, уровня решений полной задачи указывает на то, что режим отдельного коаксиального вращения труб практически невозможен в технологиях бурения (большой частью из-за эксцентricности труб). Этот перспективный вопрос еще ждет своего решения. По нашему мнению, эффекты от этого режима игнорируются большей частью из-за сложностей изучения комплексного течения, нетривиальности формирования структуры потока в полях инерционных и массовых сил в зонах стабилизирующего и дестабилизирующего ламинарно-турбулентного взаимодействия при прямоточно-закрученном течении смеси. Особенности таких процессов составляют предмет отдельного исследования и подробно анализировались авторами ранее, например, в [27]. Кроме того, стоит отметить, что важным выступает направление анализа эффективности очистки скважин за счет изменений реофизических свойств бурового раствора. В этом отношении отметим исследования, выполненные В. Pang et al. [28, 29] на неньютоновских жидкостях типа Гершеля–Балкли. В частности, в [28] показано, что при снижении вязкости жидкости концентрация частиц шлама в кольцевой зоне колеблется. Аналогичные результаты наблюдались в [29] при использовании воды. Это приводит к заключению, что на транспорт шлама оказывают сильное влияние переходные процессы, обусловленные: нелинейностью изменений реологических свойств среды; строением и формой частиц; комплексным эффектом от коаксиального и орбитального вращений буровой трубы. Поэтому в условиях реального бурения прогноз от воздействия коаксиального вращения требует уточнений при наложении на течение орбитального вращения.

Таким образом, анализ имеющихся публикаций приводит к следующим заключениям:

1. Методы CFD дают результаты, которые в качественном отношении удовлетворительны в области ошибок 1...12 % в сравнении с имеющимися экспериментальными результатами в достаточно широком диапазоне изменений интегральных характеристик и сценариев течений.
2. В целом эйлерово-эйлеров и эйлерово-лагранжев подходы дают приемлемые результаты. При этом последний предлагает более детальную иллюстрацию особенностей процессов при транспорте и очистке скважин за счет значительно возросшей вычислительной стоимости исследований.
3. В прогнозах гидродинамики сложных сдвиговых течений смесей, особенно с точки зрения соотношений «надёжность – затраты – цена – качество результатов», преимуществом пользуется низкорейнольдсовая SST $k-\omega$ -модель турбулентности.
4. Обоснованным представляется применение моделей Syamlal-O'Brien [23], Gidaspow [24] для учета особенностей структуры и формы частиц смеси, результаты которых достаточно близки в рамках рассматриваемых в настоящей статье гидродинамических режимов и геометрических конфигураций области исследования задачи.

5. Процесс транспорта частиц шлама весьма чувствителен к особенностям и деталям течения жидкой фазы, геометрии скважины, особенно в режимах развития течения по пространству и в зонах с низкими значениями динамической и эффективной вязкости смеси.

Физико-математическое описание течения смеси в скважине с горизонтальным/наклонным участком

Ниже представлены некоторые положения, позволяющие подробно анализировать гидродинамику, силовое и динамическое взаимодействие между частицами каплевой и твердой фаз изотермического развивающегося течения по стволу скважины в полях действия реальных внешних и внутренних сил.

Основные допущения к моделированию

С целью общности формулировок определяющих уравнений предполагается, что буровой раствор в полной мере обеспечивает транспортировку измельченных пород (частиц шлама как продуктов выработки долотами) через кольцевое пространство скважины от забоя до поверхности. Если транспортировка частиц шлама становится затруднительной, возникают условия для седиментации и накопления частиц в виде пласта в донной части скважины. Причем укрупнение размеров слоя пласта требует анализа дополнительных комплексных эффектов в гидродинамике и массопереносе, сопровождающих технологические операции бурения. Это могут быть режимы, определяющие увеличение крутящего момента бурильной колонны, формирующие более высокое сопротивление, прилипание (или прихват) труб, а также проблемы, обусловленные каротажем. Отмечается, что на технологический процесс бурения и очистки существенное влияние оказывает сила тяжести. Именно с ее помощью в горизонтальных областях скважины формируется пласт. Кроме того, учитывая [4–6], слой осевших частиц имеет толщину много меньшую ширины кольцевой области и в своей верхней части поперечного сечения не оказывает влияния на движение гетерогенной среды. Считаем, что изменение угла наклона скважины является одним из основных факторов эффективности транспорта шлама в конфигурации пространства с эксцентricностью бурильной трубы. Кольцевое пространство проточной области отличается асимметричностью и существенной узкостью под бурильной трубой, что значительно затрудняет процесс транспорта частиц через кольцевое пространство.

Выполненный библиографический анализ проблем и указанные детали геометрической конфигурации межтрубного пространства позволяют отметить, что в принципе рассматриваемое течение требует системного исследования следующих своих особенностей и параметров: размера частиц шлама; реологических свойств бурового раствора и его режимов движения; изменений эксцентricитета бурильной трубы; влияния подвижности (вращения стенки) бурильной трубы. В силу этого допускается, что реологические свойства бурового раствора (в спектре внутренних сил) способны оказывать существенное влияние на операции по очистке скважин. Сам раствор выступает

как неньютоновская жидкость и описывается моделью эффективной вязкости Гершеля–Балкли.

Принимается, что в процессе бурения горизонтальных скважин бурильная труба способна соприкасаться с донной частью стенки скважины из-за веса бурильной трубы. В таких условиях из-за полной эксцентricности весьма важно для практики установить минимальные значения скорости транспорта шлама для прогнозирования эффективности бесперебойного функционирования специального технологического оборудования. Предполагается, что прогноз 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 эксцентricном кольцевом пространстве скважины выполняется с привлечением положений механики неоднородных сплошных сред, методов вычислительной гидродинамики и теорий сопротивления и тепло- и массопереноса. С этой целью вводятся допущения, что твердые частицы шлама химически инертны и имеют сферическую форму диаметра d . Принимается, что доля объема, занимаемого дисперсной твердой фазой, имеет значения $a_p < O(10^1)$, но соударения между частицами не учитываются. Плотность материала частиц значительно превышает плотность несущей (жидкой каплевой) среды. Также предполагается, что режим течения смеси вязкостно-инерционный и осуществляется в условиях ее изотермического прямолинейного движения по скважине.

С целью уяснения особенностей силового воздействия на частицы смеси в коаксиальной зоне скважины отметим, что возможные эффекты в процессах внутри- и межфазного обмена импульсом и массой в смеси определяются совокупным влиянием общего спектра внутренних и внешних сил. В их числе выделяем такие, как FD , [N] – сила сопротивления тяжелых (жидких/твердых) частиц при движении с их характерной локальной скоростью, UL , [m/s]; FSD , [N] – полная сила сопротивления частиц флюида восходящему потоку со скоростью, UM , [m/s]; FB , [N] – сила плавучести; FL , [N] – подъемная сила; FM , [N] – дополнительная подъемная сила (Магнуса); FS , [N] – дополнительная подъемная сила (Саффмена); FG , [N] – сила тяжести; FPL , [N] – сила реологических эффектов частиц смеси; FRC , [N] – сила реакции взаимодействующих твердых недеформируемых частиц; FPR , [N] – сила градиента давления; UM , [m/s] – характерная среднемассовая скорость смеси; a – угол отклонения образующей ствола скважины от вертикальной плоскости, $[^0]$; b – угол слоя частиц каплевой и твердой фазы, $[^0]$; c – угол контакта между частицами диффузионного слоя, $[^0]$; Gi , ($i=1-4$) – соответственно границы области течения смеси: входной зоны ($i=1$), верхней области межтрубного пространства ($i=2$), нижней ($i=3$) между трубами (донная часть эксцентricного пространства) и зоны выхода ($i=4$) потока из скважины. Детали распределений сил иллюстрирует рис. 1, где схематично представлена общая картина течения гетерогенной смеси (частиц каплевой фазы (синий оттенок), частиц газообразной

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

где τ, \dot{S} – тензоры напряжений и скоростей деформаций жидкой фазы, соответственно. Заметим, что в гетерогенных средах μ_{eff} также зависит от концентрации, формы и размера частиц. Реологию неньютоновских жидкостей описывают связи (6), (7):

- для вязкопластической (бингамовской) жидкости:

$$\mu_{eff} \equiv \mu_f = (\tau_0 + \kappa \dot{\Gamma}) \dot{\Gamma}^{-1}, \dot{\Gamma} = (0.5 \dot{S} \cdot \dot{S})^{0.5}, \quad (6)$$

- для жидкости модели Гершеля–Балкли:

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

Формализм замыканий определяющих уравнений математической модели в прогнозе турбулентных течений

Наши предварительные исследования широкого класса течений во внутренних системах, осложненных нелинейностью изменений рео- и теплофизических свойств рабочей среды, внешних инерционных и массовых сил, обусловленных вращением, тяжестью, а также неизотермичностью и нестационарностью «тонкой» структуры среды, прямыми и обратными переходами вихревой и тепловой природы, показали [1–4], что весьма надежными в прогнозах взаимосвязанных внутри- и межфазных процессов переносов тепла, массы и импульса в низкорейнольдсовых зонах выступают двухпараметрические модели RANS метода, которые составляют эффективную опорную базу с локальными свойствами турбулентности для моделей переноса рейнольдсовых напряжений RSS, таких как SST- $k\omega$ [21], $-kL$ [19], $-k\varepsilon$ [32], $-kL$ [33], $-k\tau$ [34]. Популярность в приложениях SST- $k\omega$ -модели вызвана тем, что модель сочетает в себе достоинства $k\varepsilon$ -модели в описании свободного течения и точном моделировании особенностей пристеночных эффектов $k\omega$ -моделью за счет модификаций ее функций. Полное обсуждение этих проблем можно найти, например, в [1–4, 35]. Учитывая специфику рассматриваемых в настоящей статье течений смесей и в силу допущения, что объемная концентрация твердой фазы является разбавленной (до 10 %), моделирование параметров турбулентности выполняется лишь для жидкой каплевой фазы смеси. В таких условиях представляется целесообразным остановиться на некоторых замечаниях применения RSS-модели с указанными выше опорными $k\omega, \varepsilon, L$ базами к расчетам неоднородной анизотропной структуры турбулентности в вязких средах с выраженными анизотропными скоростями пульсаций частиц, особенно в неравновесных турбулентных течениях смесей в эксцентричных межтрубных областях.

В RANS-подходе после осреднения по Рейнольдсу определяющих уравнений законов сохранений массы и импульса (1)–(4) привлекаются уравнения переноса напряжений Рейнольдса ($\overline{u'_i u'_j}$), которые в своей символической форме (краткой тензорной записи, в де-

картовых координатах) можно представить следующим образом (8):

$$C_{ij} = D_{ij} + P_{ij} + R_{ij} - \varepsilon_{ij}, \quad (8)$$

Здесь $C_{ij} = \frac{D\overline{u'_i u'_j}}{Dt}$ – конвекция ($\frac{D}{Dt}$ – субстанциональная производная); $D_{ij} = D^L_{ij} + D^T_{ij}$ – диффузия, причем $D^L_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} (\nu \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k})$ – молекулярная, D^T_{ij} – турбулентная; $P_{ij} = -\{ \overline{u'_k u'_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \}$ – порождение; $R_{ij} = \frac{p'}{\rho} (\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i})$ – перераспределение (корреляция пульсаций давления со скоростями деформаций); $\varepsilon_{ij} = 2\nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \cdot \frac{\partial u'_j}{\partial x_k}$ – диссипация. Для получения замкнутого вида системы уравнений (8) необходимы модельные представления для членов $D^T_{ij}, R_{ij}, \varepsilon_{ij}$, тогда как D^L_{ij}, P_{ij} могут быть рассчитаны точно. Все детали замыканий RSS-модели и особенности ее численной реализации, которые по соображениям громоздкости формулировок здесь опущены, можно найти в [35].

Заметим, что важными для практики являются следующие дополнения по использованию RSS-модели в смесях. Отмечается, что для гетерогенных сред данная RSS-модель и ее версии должны быть модифицированы на учет механизмов движения двухфазной среды посредством увлечения твердых частиц шлама несущей каплевой жидкостью за счет сил межфазного взаимодействия, т. е. частицы рассматриваются как пассивная примесь. Поэтому в обобщениях модели на двухфазность течения в настоящем исследовании допускается (аналогично [36]), что твердые частицы подвержены турбулентным эффектам опосредованно через влияние флуктуаций в диспергированной (несущей) фазе смеси. В силу этого принимается, что наличие частиц дисперсной фазы будет способствовать подавлению энергии пульсационного течения. Последнее отвечает коррекции диссипативных членов опорной базы RSS-модели, представленных оригинальными уравнениями переноса, например, для k, ω, L . Подчеркнем, что отсутствие необходимых экспериментальных данных о параметрах рассматриваемых задач ввиду сложности постановки и реализации эксперимента ставит перед исследователями проблемы достоверности результатов. Поэтому в настоящей работе для возможных условий выполнено обращение к сравнению отдельных результатов применения RSS-модели другими авторами в прогнозах коаксиальных вязких потоков и сравнению с соответствующими данными, полученными при обращении к ПК ANSYS CFD. Этот путь следует рассматривать как этап опосредованного подтверждения корректности результатов, количественной и качественной оценки точности подходов, эффективности моделей и алгоритма построения численного решения определяющих уравнений задачи, суть которого изложена ниже.

Формулировка краевых условий задачи

Считаем, что геометрическая конфигурация коаксиальной зоны скважины определяется заданием формы и границ пространства (линейных размеров внешней и внутренней труб, эксцентриситеты).

Также заметим, что характерными размерами выступают: в группе *геометрических* параметров – продольная длина (L)/ширина (b) смещения центра ядра относительно продольной оси внешней трубы; в *динамической части* задачи – скорость на входе (U_0)/средняя по радиусу осевая составляющая скорости потока.

Формулировка *теплофизических свойств* связана с заданием: плотности *несущей* (капельной, *дисперсионной*) среды и материала частиц (твердой, *дисперсионной* 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; c_{pi} – удельных теплоемкостей фаз, а также других (механических, структурных) величин конкретной смеси.

Заметим, что в рассматриваемых условиях *сила межфазного взаимодействия* в основном обусловлена силой сопротивления \mathbf{FD} . Далее, согласно [1–6, 37], также принимается, что при *малых объемных долях* дисперсионной фазы *выталкивающей силой* можно пренебречь. В таком случае силу сопротивления \mathbf{FD} можно представить в виде:

$$\vec{F}_D = \frac{\rho_p f_D}{\tau_p} (\vec{v}_f - \vec{v}_p), \quad f_D = \frac{c_d}{24} \text{Re}_{fp} = 1,0 + 0,15 \text{Re}_{fp}^{0,687},$$

$$\text{при } \text{Re}_{fp} < 10^3. \quad (9)$$

Здесь f_D – степень отличия сопротивления одиночной частицы от закона Стокса. Также привлекаются другие связи, аналогично идеям, представленным в [38].

Граничные условия

В классе *внутренних* вязкостно-инерционных ламинарных и турбулентных течений в кольцевой области с аксиально расположенным ядром (смещение центров труб – $b=0$; центры – $O_2=O_1$) предполагается, что в условиях, развивающихся по пространству и *установившихся во времени* прямооточных течений на границах (Γ_i , $i=1-4$) формулируются следующие граничные условия.

Гомогенная среда

На входе (Γ_1) – $t \geq t_0$, $x=0$, $R_1 < r < R_2$: $u=U_0(r)$; $v=V_0(r)$; $w=W_0(r)$. Допускается, что входящий в межтрубное пространство поток может быть развитым (т. е. в качестве профиля осевой скорости $U_0(r)$ выбирается профиль: Пуазейля (ламинарный случай)/Прандтля–Кармана (турбулентный случай) либо однородный по сечению $u=U_0=\text{const}$, $v=0$, $w=W_0(r)$).

На выходе (Γ_4) – $t \geq t_0$, $x=L$, $R_1 < r < R_2$: $\frac{\partial \Phi_k}{\partial x} + \varepsilon \Phi_k = 0$, где $\Phi_k = \{u, v, w\}$. Учитывается, что $\varepsilon \neq 0$ (некоторое малое положительное число) только для $\Phi_k = w$.

На внешней границе кольцевой зоны (Γ_2) – $t \geq t_0$, $x \geq 0$, $r=R_2$: $u=v=w=0$.

На стенке ядра – внутренней трубы – (Γ_3) формулируются условия с заданием связей, представленных ниже.

В частности, в условиях прямооточного потока в коаксиальном канале – $t \geq t_0$, $x \geq 0$, $r=R_1$: $u=v=w=0$.

В случае режима с прямооточным течением имеем при $t \geq t_0$, $x \geq 0$, $r=R_1$: $w=0$.

Заметим, что при описании турбулентных режимов включаются соотношения, соответствующие условиям прилипания для всех пульсационных компонент вектора скорости, а также их одноточечных и двухточечных корреляционных моментов, описывающих локальные свойства турбулентных вихрей параметрами $k, \omega, \varepsilon, L$.

Гетерогенная среда

В общем случае расчета реологически сложного изотермического течения дисперсионной смеси (индексы соответствуют параметрам: жидкость « f », твердые частицы « p ») имеем следующие граничные условия.

На входе (Γ_1) – $t \geq t_0$, $x=0$, $R_1 < r < R_2$: допускаем, что распределения скоростей фаз однородны и сами фазы находятся в равновесии, т. е. $u_f=u_p=U_b$, $v_f=v_p=0$, $w_f=w_p=0$, кроме того, $\alpha_p=\alpha_b$ и $p=p_b$.

На стенках коаксиального пространства (внешняя труба Γ_2 , внутренняя труба Γ_3) принято:

условия прилипания для несущей среды – $u_f=v_f=w_f=0$; условия скольжения для дисперсионной фазы –

$$\frac{\partial u_p}{\partial r} = v_p = w_p = 0, \quad \frac{\partial \alpha_p}{\partial r} = 0.$$

На выходе (Γ_4) – $t \geq t_0$, $x=L$, $R_1 < r < R_2$: условия непрерывности течения для искомым переменных – $\frac{\partial \Phi_k}{\partial x} + \varepsilon \Phi_k = 0$, где $\Phi_k = \{u, v, w\}$, или отсутствия режима возвратного движения потока.

Детали краевых условий, формирующих сложные сдвиговые течения в рамках ПК ANSYS

При построении численного решения в ПК ANSYS его модуль *Design Modeler*, как часть *Ansys Workbench*, используется для создания специфической геометрической конфигурации объекта исследования – коаксиального канала с эксцентричным ядром типа – труба в трубе постоянного поперечного сечения. Геометрия объекта определена следующими значениями: внутренний цилиндр имеет диаметр $d=10$ см и 80%-й эксцентриситет $e(e=2b/(D-d))$ относительно внешней трубы с диаметром $D=20$ см; длина канала изменялась в диапазоне $L=8 \dots 12$ м, характерной для формирования автомодельного режима течения с 100-кратной величиной изменения гидравлического диаметра. Предварительный анализ показывает, что в рассматриваемых условиях течения смесей входная зона канала вполне достаточна для образования участка гидродинамической стабилизации. Исследования эволюции структуры на этих длинах ценно для уяснения факта влияния входных (как и со стенок) возмущений на гидродинамическую и диффузионную структуру смеси, а также установления особенностей изменений пласта, размеров отложений по

донному пространству, оценок эффектов их разрушения и последующего выноса шлама из скважины.

Решение гидродинамической части задачи требует задания следующих условий. На входе ($x=0$) имеем однородные профили для компонент вектора скорости осредненного течения и нормальных напряжений ($\overline{u'^2} = a_i k, a_1 = 0,96, a_2 = 0,48, a_3 = 0,56$), а также кинетической энергии турбулентных вихрей (k) и ее скорости диссипации (ε) ($k = 1,5Tu_0^2U_0^2, \varepsilon = 0,17 \frac{k^{1,5}}{L}$,

где Tu – интенсивность турбулентности, L – интегральный масштаб энергосодержащих вихрей, U_0 – характерная для процессов бурения скорость в области входа). На выходе ($x=L$) принято:

$\frac{\partial \phi}{\partial x} = 0$, где $\phi = U, V, W, \overline{u'_i u'_j}$. На стенках межтрубно-

го пространства в классе $k\varepsilon$ -моделей реализуются условия прилипания потока, отсутствия турбулентных пульсаций, для скорости диссипации условие

$$\varepsilon_w = 2\nu \left(\frac{\partial \sqrt{k}}{\partial r} \right)^2.$$

Особенности численного метода и алгоритма интегрирования определяющих уравнений

Решение системы уравнений, описывающих гидродинамику и массоперенос в смеси (1)–(8) с соответствующими замыкающими соотношениями, выполняется численно на основе операций и блоков, отвечающих за: построение разностной сетки расчетной области рассматриваемой задачи; детали конечно-разностной дискретизации дифференциальных уравнений, сводящей уравнения к соответствующему дискретному аналогу; формулировку системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) с искомыми переменными в узловых точках расчетной сетки; решение СЛАУ итерационным методом. Подробно эти вопросы изложены в [1–5]. В частности, расчеты по итерационному алгоритму решения определяющих уравнений динамической и диффузионной частей задачи выполняются с учетом требований к реализации

критерия сходимости и точности определения локальных и интегральных параметров течения на разностных сетках, размер которых определялся достижением требуемой погрешности. Для этой цели вводится соответствующий критерий малости между решениями, получаемыми на двух последних итерациях ($m+1, m$), для полей искомым параметров, отвечающий виду (10), (11):

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

$$\Delta_\Phi = O(10^{-2}). \quad (11)$$

Для иллюстрации характера влияния вложенности сеток и оценки тенденций повышения точности расчета поля давления в сложном вязкостно-инерционном внутреннем течении ниже приведены табл. 1, 2, в которых отражены сведения о способности прогноза перепада давления в условиях ньютоновского ламинарного ($Re=800$) и турбулентного ($Re=80000$) течений в коаксиальной эксцентричной трубе с использованием алгоритма CFD и их сравнений с известными данными соответствующих аналитических решений (12), (13) [39–41], а также результатами применения критериальных связей (для ламинарного (14) и турбулентного (15) режимов), полученных с использованием специального инженерного ПО [42, 43] и представленных ниже:

$$u = \frac{\Delta p}{4\mu L} \left[R_2^2 - r^2 + \frac{R_2^2 - R_1^2}{\ln(R_2 / R_1)} \ln\left(\frac{r}{R_2}\right) \right]; \quad (12)$$

$$\bar{U} = \frac{\Delta p}{8\mu L} \left(R_2^2 + R_1^2 + \frac{R_2^2 - R_1^2}{\ln(R_1 / R_2)} \right); \quad (13)$$

$$\Delta p = \frac{\mu \bar{U} L}{0,0209(R_2 - R_1)^2}; \quad (14)$$

$$\Delta p = \frac{\rho^{0,75} \bar{U}^{1,75} \mu^{0,25} L}{1396(R_2 - R_1)^{1,25}}. \quad (15)$$

Таблица 1. Влияние размера сетки на точность расчета перепада давления при ламинарном течении

Table 1. Grid size influence on accuracy of pressure drop calculation at laminar flow

Сетка и ее расширение Grid and its extension, $H=(r*\Theta*x)$ – размер/size	Перепад давления, полученный в рамках расчета CFD, Δp , Па Pressure drop obtained as part of CFD calculation, Δp , Pa	Погрешность определения Δp в рамках CFD и связи (13) согласно [41], % Error of Δp determination within CFD and (13) according to [41], %	Погрешность определения Δp в рамках CFD и связи (14) согласно [42], % Error of Δp determination within CFD and (14) according to [42], %
$H_1=40*40*200$	0,7880606	5,2	5,1
$H_2=40*40*300$	0,7878114	5,2	5,06
$H_3=50*40*200$	0,7884978	5,3	5,15
$H_4=40*50*200$	0,7865344	5,0	4,89
$H_5=40*60*100$	0,7861123	5,0	4,84
$H_6=40*60*50$	0,7864677	5,0	4,88
$H_7=50*60*50$	0,7869135	5,1	4,94

Отметим, что в табл. 1 отражены результаты для коаксиальных труб с параметрами: $\bar{U}=0,01$ м/с, $L=10$ м, $R_2=0,1$ м, $R_1=0,06$ м, $\mu=0,001003$ кг/мс, $Re=800$ с прогнозируемым перепадом давления по критериальным

связям (13), (14) – $\Delta p=(0,7490...0,7498)$, Па. В табл. 2 при течении с параметрами $\bar{U}=1,0$ м/с, $Re=80000$ прогнозируемый перепад давления при сопоставлении с данными инженерного подхода [42, 43], связи (15) со-

ставил $\Delta p=(1175...1185)$, Па. Результаты табл. 1, 2 свидетельствуют, что указанные сетки ($H_i, i = 4-8$) в классе рассматриваемых течений при определении их интегральных параметров, например перепада поля давления с невязкой в (1...2), %, вполне уместны и

дальнейшее их расширение представляется нецелесообразным, особенно с точки зрения экономичности численных схем, эффективности вычислительного алгоритма и затрат на его реализацию.

Таблица 2. Размер сетки и точность расчета перепада давления при турбулентном режиме

Table 2. Grid size and calculation accuracy of pressure drop in turbulent flow

Сетка и ее расширение Grid and its extension, $H=(r*\Theta*x)$ – размер/size	Перепад давления, полученный в рамках расчета CFD, Δp , Па Pressure drop obtained as part of CFD calculation, Δp , Pa	Погрешность определения Δp в рамках CFD и инженерного ПО согласно [43], % Error of Δp determination within CFD and engineering software according to [43], %	Погрешность определения Δp в рамках CFD и связи (15) согласно [42], % Error of Δp determination within CFD and (15) according to [42], %
$H_6=40*60*50$	1234,213	5,0	4,15
$H_5=40*60*100$	1234,601	5,1	4,19
$H_7=50*60*50$	1228,356	4,5	3,66
$H_8=50*70*50$	1227,705	4,5	3,6

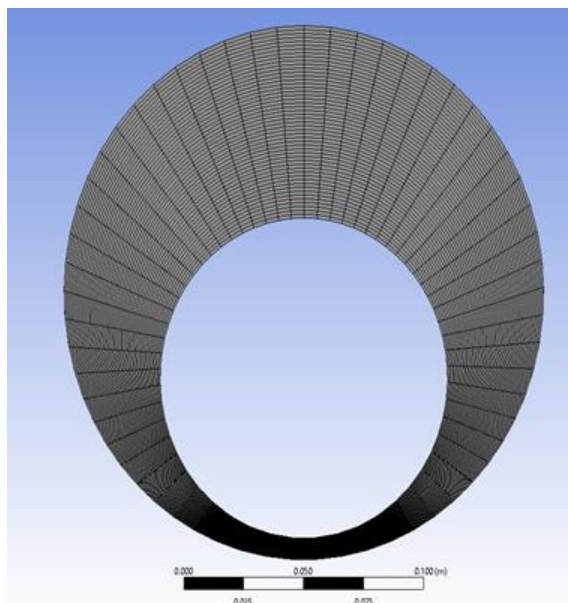


Рис. 2. Оптимальный вид разностной сетки, адаптированной к построению численного решения задачи, учитывающей тенденции поведения алгоритма, модели, метода расчета, с точки зрения соотношений «цена–качество–точность» результатов при прогнозе деталей очистки скважины от илама и его транспорта по межтрубному пространству

Fig. 2. High resolution mesh, optimized for CFD balancing computing resources vs exactness. Used in modeling the hydrodynamic well cleaning in the annulus

Опираясь на анализ сути и точности процессов по методу вложенных сеток, в работе установлено, что дальнейшее численное интегрирование определяющих уравнений предлагаемой модели оптимально на разностной сетке H_7 с общим числом узлов 137500, вид которой представлен на рис. 2. С целью иллюстрации особенностей адаптации разностной сетки к прогнозу процессов в узких пристеночных зонах высоких градиентов течения на рис. 3 приведена сетка специального вида со сгущением узлов в радиальном сечении (типа H_6). Такая сетка позволяет обеспечить попадание требуемого числа точек в область вязкого подслоя и будет вполне уместна в задачах, ориенти-

рованных на снижение затрат при построении численного решения, а также раскрытия особенностей переходных процессов в структуре турбулентного пограничного слоя и точной демонстрации гидродинамических эффектов, сопровождающих изменения пульсационной структуры в радиальных плоскостях.

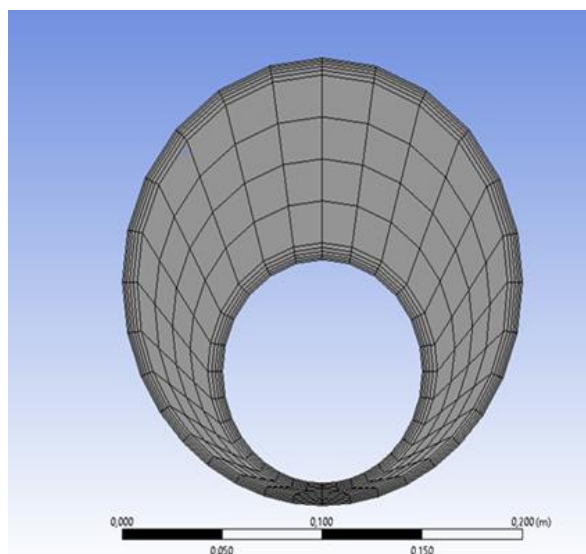


Рис. 3. Разностная сетка расчета течений в эксцентричной трубе ($e=0,8$) со сгущением узлов в пристеночных областях у внутренней и внешней труб

Fig. 3. Low resolution mesh with 80 % eccentricity. The mesh has a higher resolution near the walls

Заметим, что в пользу выбора сетки H_7 в расчетах вязких течений в эксцентричных коаксиальных трубах также говорят результаты рис. 4, где представлено распределение безразмерных значений относительного перепада давления ($\Delta p/\Delta p_0$, %) от изменений эксцентриситета (e , %). Данные рис. 4 подтверждают (например, [41, 44–46]) тенденцию снижения перепада давления с увеличением эксцентриситета ядра в условиях сохранения положений физического подобия течений (при расходе $Q=idem$).

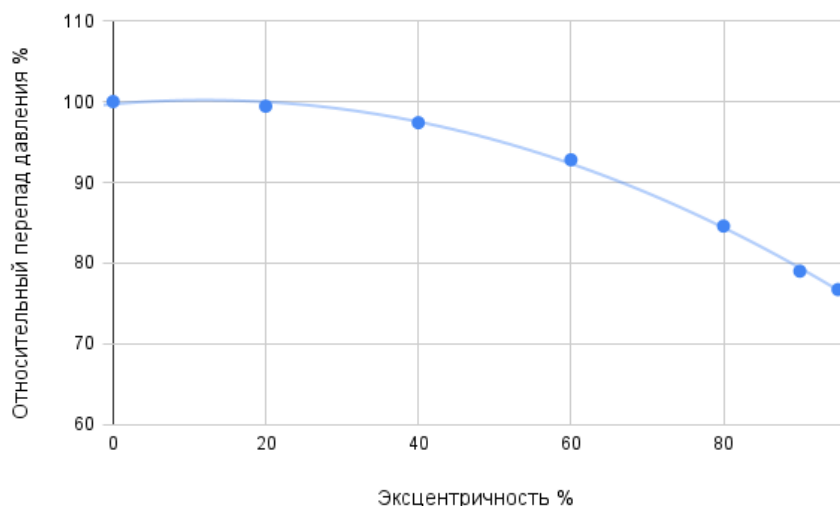


Рис. 4. Изменение безразмерного перепада давления ($\Delta p/\Delta p_0$, %) в зависимости от увеличения эксцентриситета ядра $e=2b/(D-d)$. Здесь точки отвечают настоящим расчетам течений в трубах при $Re=800$. Линия – аппроксимационная кривая результатов расчета, Δp_0 соответствует перепаду давления в осесимметричном канале, $D=2R_2$ – диаметр внешней трубы, $d=2R_1$ – диаметр внутренней трубы, b – смещение центров труб.

Fig. 4. Changes in dimensionless pressure drop ($\Delta p/\Delta p_0$, %) vs inner pipe eccentricity $e=2b/(D-d)$. Here: every point corresponds to modeling results obtained with $Re=80000$ and the line approximates the pressure drop; Δp_0 corresponds to the pressure drop in the axisymmetric channel; $D=2R_2$ is the outer pipe diameter; $d=2R_1$ is the inner tube diameter; b is the distance between pipe centers.

Хорошо известно (например, [41–46]), что на характер распределения $\Delta p/\Delta p_0$ влияют особенности 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 каплевой жидкости (воды) ставят задачу верификации полученных результатов на материале качественного их соответствия подобным процессам, выполненным другими исследователями. В этом отношении привлечение данных [41–46], отмечающих подобие изменений локальных и интегральных параметров в рассматриваемых системах, может служить частичным подтверждением корректности используемой вычислительной технологии прогноза процессов в скважинах, подхода и моделей расчета гидродинамики и массопереноса в смесях.

Рис. 5, 6 иллюстрируют факт точного численного прогноза структуры развивающегося турбулентного течения в круглой цилиндрической трубе, а также возможностей/достоинств описания нелинейных конвективно-диффузионных взаимодействий процессов переноса импульса по длине разными моделями RANS-метода (с оригинальными двухпараметрическими $k\omega$ -, $k\varepsilon$ -, kL -моделями, а также версиями RSS-модели с указанными опорными базами).

Заметим, что расчеты эволюции осредненной и пульсационной структуры течения по длине трубы и соответствующих изменений профилей поля безразмерной осевой скорости (U/U_0 , рис. 5), кинетической энергии турбулентности (рис. 6) выполнены для следующих режимных параметров: $Re=(0,1\dots 6)\cdot 10^5$, $D=0,005\dots 0,2$ м, $x_k=150\cdot D$, $Tu=(0,1\dots 10)$ %, рабочее тело – вода, воздух. Расчеты изменений структуры и сравнения с экспериментами [51, 52] приводят к следующему заключению.

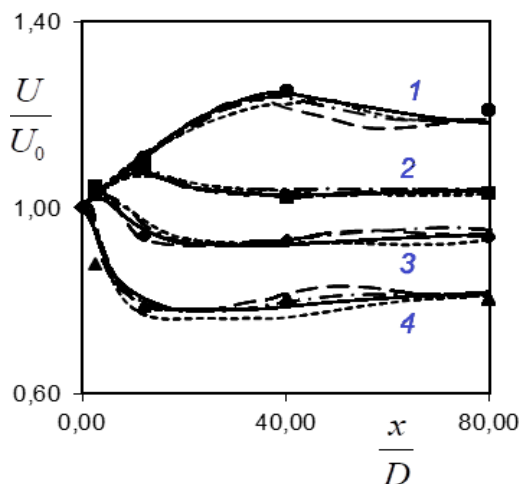


Рис. 5. Распределения осевой скорости по длине в выделенных точках по поперечной координате. Здесь линии: (—) – RSS-L [47, 48]; (—) – RSS- ε модель Н. Сима [49] M1; (- -) – RSS- ε С. Элгобашаи [50], M2; (- - -) – M3-модели (CFD ANSYS). Обозначения: значки – эксперимент [51]: 1 – $y/R=1$ (•); 2 – 0,3 (■); 3 – 0,15 (◆); 4 – 0,05 (▲)

Fig. 5. Distribution of axial velocity along the channel axis: (—) – RSS-L [47, 48]; (—) – RSS- ε model of N. Sima [49] M1; (- -) – RSS- ε of S. Elgobashi [50], M2; (- - -) – M3 (CFD ANSYS); – experiment [51]: 1 – $y/R=1$ (•); 2 – 0,3 (■); 3 – 0,15 (◆); 4 – 0,05 (▲)

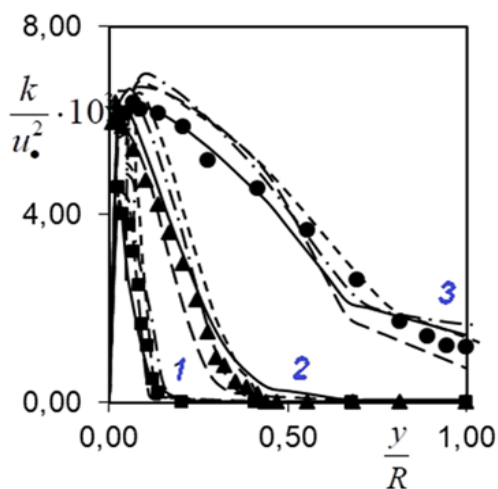


Рис. 6. Радиальные распределения безразмерной кинетической энергии турбулентности в выделенных сечениях по длине трубы x/D . Обозначения соответствуют данным длины трубы. Здесь линия – расчет, значки – эксперимент [52]: 1 – $x/D=3$ (■); 2 – 12 (▲); 3 – 41 (•); (—) – RSS-L; (— —) – M1; (- -) – M2; (— · —) – M3-модель (CFD ANSYS)

Fig. 6. Radial distribution of dimensionless turbulent kinetic energy vs radius. The numbers show the position along the flow axis, lines are calculations, symbols are experiments [52]: 1 – $x/D=3$ (■); 2 – 12 (▲); 3 – 41 (•); (—) is the RSS-L model; (— —) is the M1 model; (- -) is the M2 model; (— · —) is the M3 model (CFD ANSYS)

На расстояниях от входного сечения порядка $x=(30...60)D$ поток с развитой степенью турбулентности ($Tu \approx 10\%$) испытывает эффекты конвективно-диффузионного взаимодействия на оси течения (рис. 5, линия 1), свидетельствующие о стабилизации потока (наличие экстремума на линии 1). Видно, что используемые модели турбулентности (в ПК ANSYS CFD) с хорошей точностью предсказывают эти процессы. Практическая ценность этого результата сводится к заключению, что в случае подобных режимов течений в скважине при небольших эксцентриситетах ($e < 1\%$) расчет может корректно проводиться по более простым гидродинамическим моделям (например, типа пограничного слоя). Это позволит значительно сэкономить затраты построения решений о течении скважинной продукции в приближениях как однородных, так и гетерогенных вязких смесей. Кроме того, общие оценки вложенности сеток с целью выявления допустимой погрешности определения локальных параметров течения показали, что требуемый шаг установления по времени, обеспечивающий стабильность численного решения, составляет величину порядка 1^{-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 секунд времени течения смеси, что эквивалентно одной полной циркуляции потока по рассматриваемой геометрии.

Отдельные результаты расчета течений вязких сред по скважине и их обсуждение

Гомогенная среда

Предварительная работа по уяснению возможностей модели, метода расчета течений в трубах, определения путей повышения эффективности численного алгоритма, позволяет уяснить ряд эффектов, сопровождающих транспорт скважинной продукции в условиях бурения. Расчетами установлено, что в режиме турбулентного течения ($Re=80000$) в пристеночной области межтрубного пространства с размером порядка 1 мм могут применяться пристеночные функции при формулировке граничных условий для

кинетической энергии турбулентности, интегрального масштаба энергосодержащих вихрей и т. д. Эта область соответствует границам вязкого подслоя структуры пограничного слоя. Кроме того, из рис. 7 видно, что процесс стабилизации напряжения трения на поверхностях внешней (с радиусом R_2) и внутренней (с радиусом R_1) труб в верхней (линии 1, 2) и нижней частях (линии 2, 4) кольцевого межтрубного пространства начинается с $x > 5$ м для всех пристеночных зон. Причем расчеты подтверждают, что процессы переноса импульса в донной части поперечного сечения весьма близки качественно и количественно. Об этом свидетельствует совпадение расчетных линий (2, 4) изменений напряжений трения для поверхностей внешней (линия 2) и внутренней (линия 4) труб в масштабе абсолютных значений напряжений по оси ординат (рис. 7).

Характер изменений универсальной переменной y^+ по длине межтрубного пространства кольцевого эксцентричного канала в условиях, указанных аналогично рис. 7, для верхней и нижней частей поперечного сечения проиллюстрирован на рис. 8 линиями 1–4. Все обозначения аналогичны данным рис. 7.

Из рис. 8. видно, что размер области вязкого подслоя структуры турбулентного пограничного слоя в кольцевой зоне трубы соответствует условиям развивающегося течения, находится в пределах $y^+ < 10...30$. Это позволяет утверждать, что при указанных в постановке краевых условиях, характерных для реального бурения, осложняющие течение процессы седиментации частиц шлама в донной части трубы будут усиливать роль вязких эффектов, гасить турбулентные пульсации и способствовать ламинаризации потока. Такие процессы вызовут рост размера пласта отложений и будут вести к общему увеличению границ вязкого слоя. В таких условиях вполне разумным представляется использовать аппарат пристеночных функций для формулировки граничных условий параметров модели турбулентности и избежать проблем получения неустойчивого численного решения задачи.

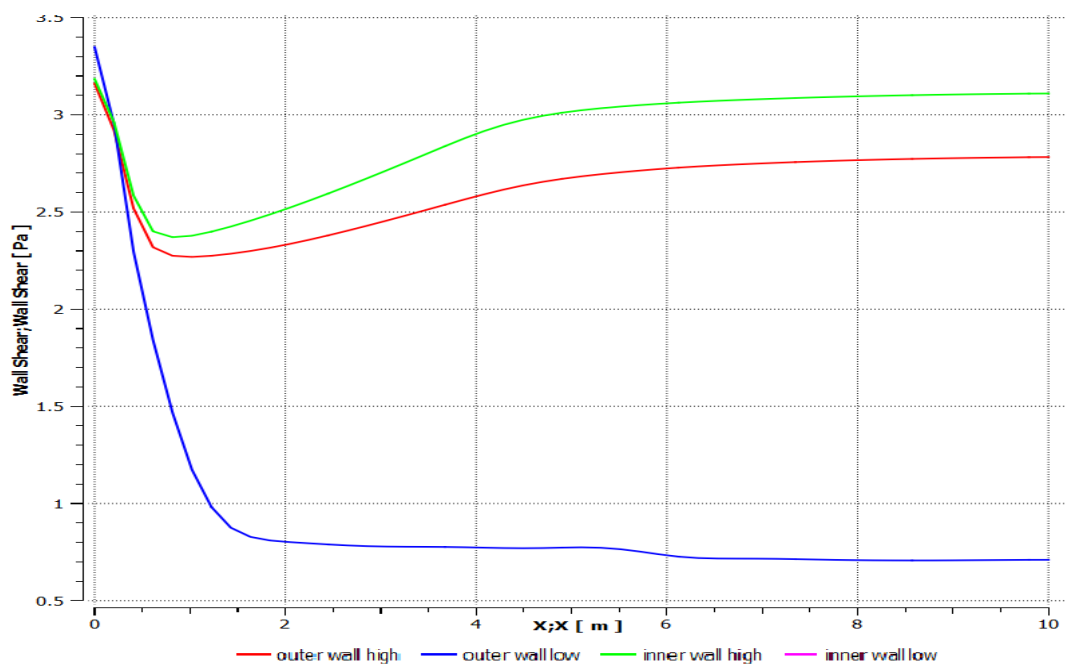


Рис. 7. Изменение напряжения трения на стенках кольцевого канала при турбулентном течении воды с параметрами: $Re=80000$; $Tu=10\%$, $L=10$ м, $R_2=0,1$ м, $R_1=0,06$ м. Здесь линии 1–4 соответствуют процессам, реализуемым на: 1 – outer wall high (стенка внешней трубы радиуса R_2 в верхней части поперечного сечения кольцевого межтрубного пространства); 2 – outer wall low (стенка внешней трубы радиуса R_2 в нижней части поперечного сечения кольцевого межтрубного пространства); 3 – inner wall high (стенка внутренней трубы радиуса R_1 в верхней части поперечного сечения кольцевого межтрубного пространства); 4 – inner wall low (стенка внутренней трубы радиуса R_1 в нижней/донной части поперечного сечения кольцевого межтрубного пространства)

Fig. 7. Changes in wall stress along the annulus walls during turbulent flow of water ($Re=80000$, $Tu=10\%$, $L=10$ m, $R_2=0,1$ m, $R_1=0,06$ m). The line names indicate their positions as follows: 1 – outer wall high (the upper wall of the outer tube); 2 – outer wall low (the lower wall of the outer tube); 3 – inner wall high (the upper wall of the inner tube); 4 – inner wall low (the lower wall of the inner tube)

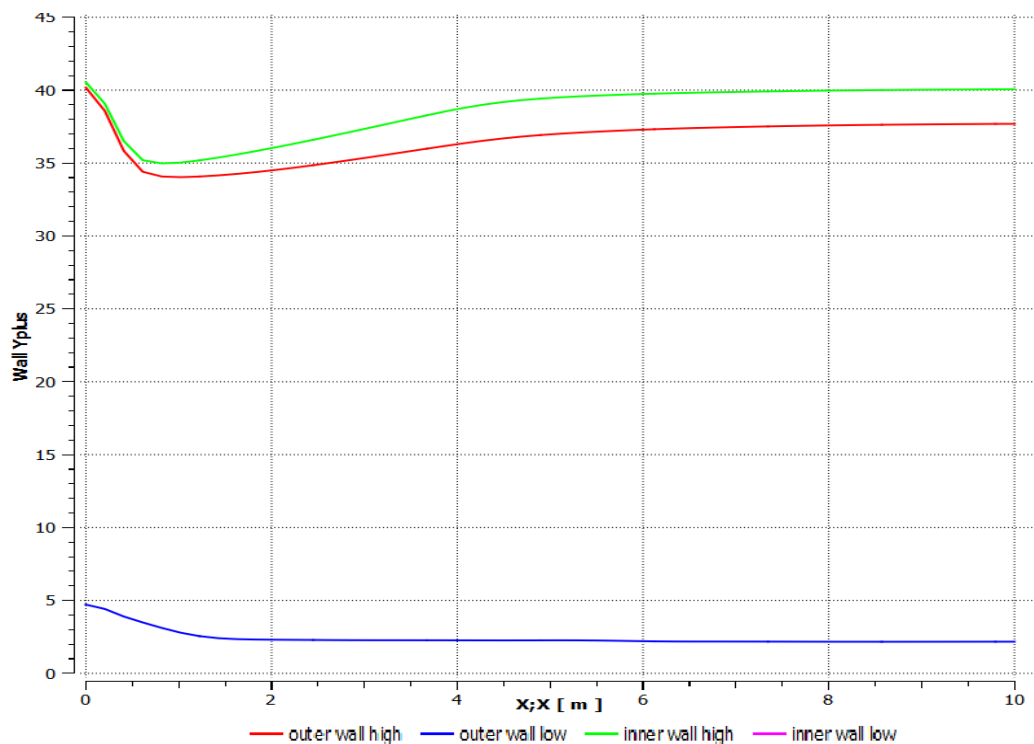


Рис. 8. Изменения универсальной переменной y^+ по длине межтрубного пространства в верхней и донной/нижней частях поперечного сечения кольцевой эксцентричной трубы. Обозначения аналогичны данным рис. 7

Fig. 8. Changes in y^+ along the walls of the annular channel. The figure legend is given in Fig. 7

Численное моделирование структуры двухфазного течения

Расчеты выполнены с учетом следующих формулировок краевых условий. На входе задается поток в условиях реального процесса бурения с массовым расходом воды (ньютоновской вязкой каплевой жидкости) порядка 23,49 кг/с, что соответствует средней скорости жидкости в 1 м/с (или 373 г/мин) и скорости частиц твердой фазы (песка) порядка 1,596 кг/с. Заметим, что такие условия соответствуют наличию 1 % объемной доли песка или бурению пласта с 20 % пористостью со скоростью 100 футов/ч, что находится в полном согласии с нормами бурения. Допускается, что турбулизация течения соответствует интенсивности турбулентности порядка 5–10 %. Указанные значения выбраны так, чтобы удовлетворить экстремальным условиям бурения, когда скорость проникновения (ROP) является относительно высокой, но скорость потока все еще является относительно низкой. Выходные условия отвечают режиму непрерывности течения. Предполагается, что стенки труб неподвижны и на них выполняются условия прилипания для всех значений гидродинамических параметров смеси. Для определения поля давления при решении уравнений Навье–Стокса использовался Phase-Connected SIMPLE алгоритм, который является обобщением SIMPLE алгоритма для многофазных потоков С. Патанкара [1–5].

Для установления особенностей процесса транспорта шлама в работе приняты допущения. В частности, расчеты динамики течения смеси выполнены с использованием идей эйлерово-эйлерова подхода и показывают, что при прохождении смесью скважины наблюдается падение давления на величину порядка 1047 фунтов на квадратный дюйм, а также наблюдается непрерывный процесс накопления шлама по всему объему кольцевого межтрубного пространства на величину порядка 2,57 %. Заметим, что такие значения находятся в удовлетворительном согласии с данными прогноза процесса и экспериментов, выполненными другими авторами (например, [53]). Кроме того, настоящие расчеты и данные анализа значений массового расхода смеси на выходе свидетельствует о 100%-м накоплении шлама в кольцевом пространстве. Этого следует ожидать, учитывая условия течения и характер совокупного действия внешних и внутренних сил, определяющих течение смеси. Однако можно предположить, что с увеличением продолжительности течения смеси по пространству канала частицы шлама перестанут накапливаться в донной части. В таком положении физические процессы сформируют условия в скважине, при которых система сил достигнет устойчивого состояния и скорость осаждения частиц будет эквивалентна скорости транспортировки смеси.

К закономерностям рассматриваемых процессов следует отнести тенденции в изменении локальных и интегральных параметров течений и массопереноса, связанные с увеличением кольцевых, среднемассовых скоростей, возникающих в результате уменьшения живого/пропускного сечения потока из-за накопления

шлама, а также эффекты конвективно-диффузионного взаимодействия процессов переноса, интенсифицирующие разрушение пласта частиц шлама, оседающих в донной части пространства скважины. В условиях установившегося во времени и развивающегося по пространству течения указанные особенности приобретают черты регулярного процесса с характерным повторением процессов в мелкомасштабном течении, вызывая седиментацию частиц, а динамика энергосодержащих вихрей несущей среды способствует выносу дисперсной фазы их скважины. Наш анализ библиографических источников, посвященных уяснению особенностей гидродинамики и массопереносу в смеси в межтрубном пространстве скважин, позволяет утверждать, что характер эффектов весьма чувствителен к особенностям изменений реологических и теплофизических свойств вязкой смеси. Такие исследования находятся в стадии своего развития и составляют предмет перспективных исследований, важных с прикладной и фундаментальной точек зрения, с целью уяснения интенсивности движений, установленных режимов и размеров зон устойчивого транспорта частиц и их седиментации в эксцентричных областях скважин в прямооточном и закрученном потоках смеси.

Некоторые детали изменений развивающейся структуры гетерогенного потока по межтрубному пространству скважины иллюстрируют результаты, представленные на рис. 9, 10. В частности, на рис. 9 приведена картина изменения поля осредненной осевой компоненты вектора скорости жидкой фазы в отдельных радиальных плоскостях, численные значения которых учитывают особенности геометрии межтрубного пространства посредством нормирующего комплекса для независимой переменной r . Причем значения радиальных плоскостей в донной части кольцевого канала (например, линия 5) соответствует нижняя область осевой симметрии внешней трубы с радиусом R_2 . Также из рис. 10 следует, что в данных условиях, подобно режиму однофазного течения (рис. 5), 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). Область большого максимума на участке течения трубы $x = 2 \dots 4$ м в радиальной плоскости с линией 3 свидетельствует о завершении процесса формирования участка стабилизации, после которого поток можно считать автономным. Как и ожидалось, используемые модели турбулентности гарантируют точность прогноза всех деталей развивающегося течения несущей фазы в кольцевом пространстве.

На рис. 10 представлены радиальные распределения осредненной осевой компоненты вектора скорости в отдельных по длине сечениях с шагом $\Delta x = 1$ м в коаксиальной эксцентричной трубе при течении с параметрами, приведенными на рис. 9. Здесь хорошо видно, что в условиях установившегося режима течения с постоянным расходом на входе движение в ди-

стальных областях трубы ($x > 6$ м) соответствует характеру развитого течения, о чем свидетельствует тенденция 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 нетривиальном процессе взаимодействий инерционных и вязких сил в поперечном сечении межтрубного донного пространства скважины следует ожидать интенсификации условий формирования застойной зоны, в которой будут активны процессы седиментации частиц, а также роста размеров отложений шлама. Все это приведет к тому, что 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.

В целом расчеты пульсационной структуры несущей жидкости и ее развития по стволу скважины указывают (рис. 5–10), что ее стабилизация существенно зависит от характера, структуры, размеров вихрей, имеет более протяженную зону стабилизации (до 8 м). Это позволяет говорить, что прогноз гидродинамики такой вязкой среды требует использования гибких моделей турбулентности с высокой чувствительностью к возмущениям с границ области течения и изменениям реологических и теплофизических свойств смеси. Также ниже приведены картины изменений турбулентной структуры двухфазного течения: поля осевой осредненной компоненты вектора скорости жидкой фазы (рис. 11); объемной доли дисперсной фазы (частиц песка, рис. 12) в условиях развивающегося вязкостно-инерционно-гравитационного течения по длине горизонтального участка скважины с условиями: $Re=80000$, $e=0,8$, $L=10$ м, $R_2=0,2$ м, $R_1=0,12$ м.

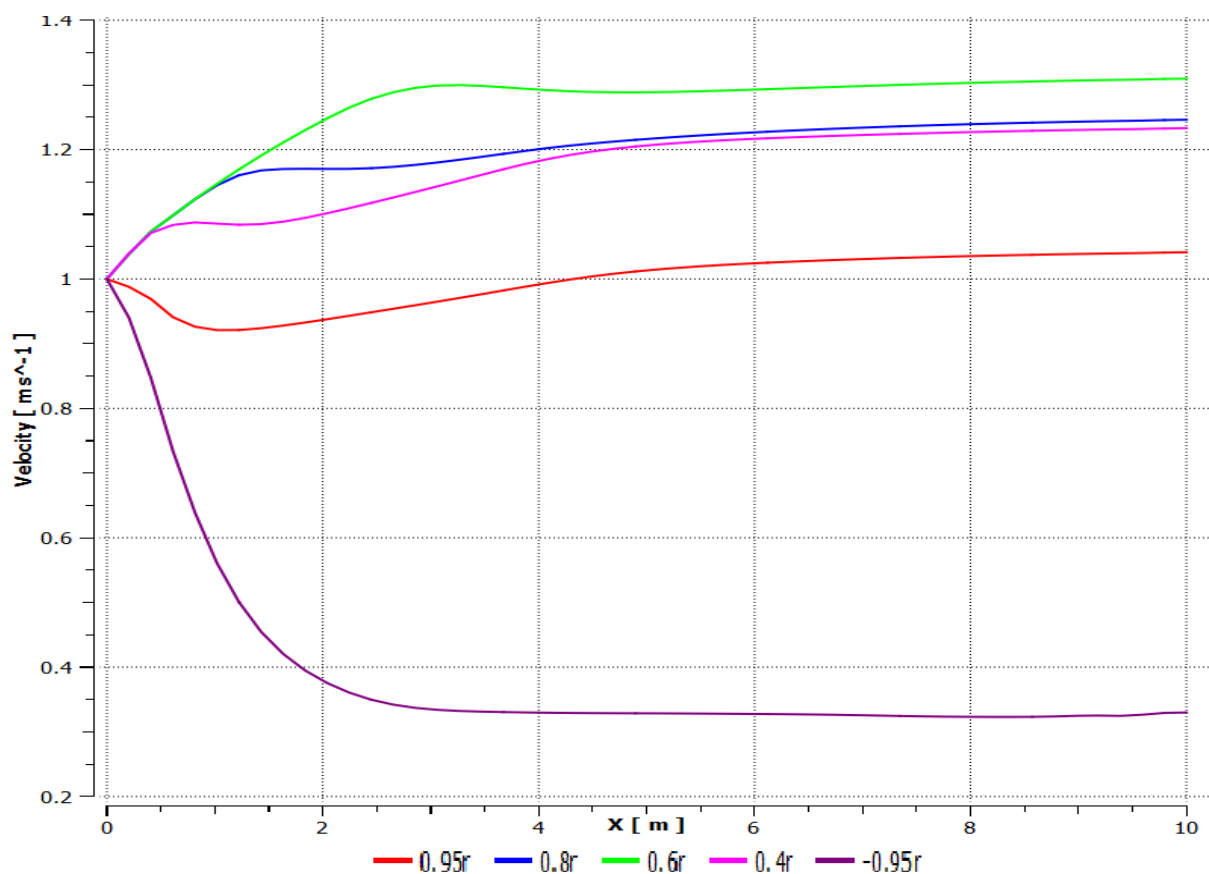


Рис. 9. Изменение осевой компоненты вектора скорости каплевой жидкости (воды) при турбулентном течении в протяженной кольцевой эксцентричной трубе в отдельных выделенных по радиусу сечениях. Здесь линии 1–5 соответствуют сечениям/цвету: 1 (красная) – $r/(b/e+R_1)=0,95$; 2 (синяя) – 0,8; 3 (зеленая) – 0,6; 4 (фиолетовая) – 0,4; 5 (розовая) – $(-0,95)$. 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

Fig. 9. Changes in the axial component of fluid velocity (water) during turbulent flow along the annular channel axis given at different radii. Lines 1–5 correspond to 1 (red) – $r/(b/e+R_1)=0,95$; 2 (blue) – 0,8; 3 (green) – 0,6; 4 (violet) – 0,4; 5 (purple) – $(-0,95)$. The geometrical parameters are $R_2=0,1$ m, $R_1=0,06$ m, eccentricity – $e=80$ %, distance between pipe centers – $b=0,032$ m

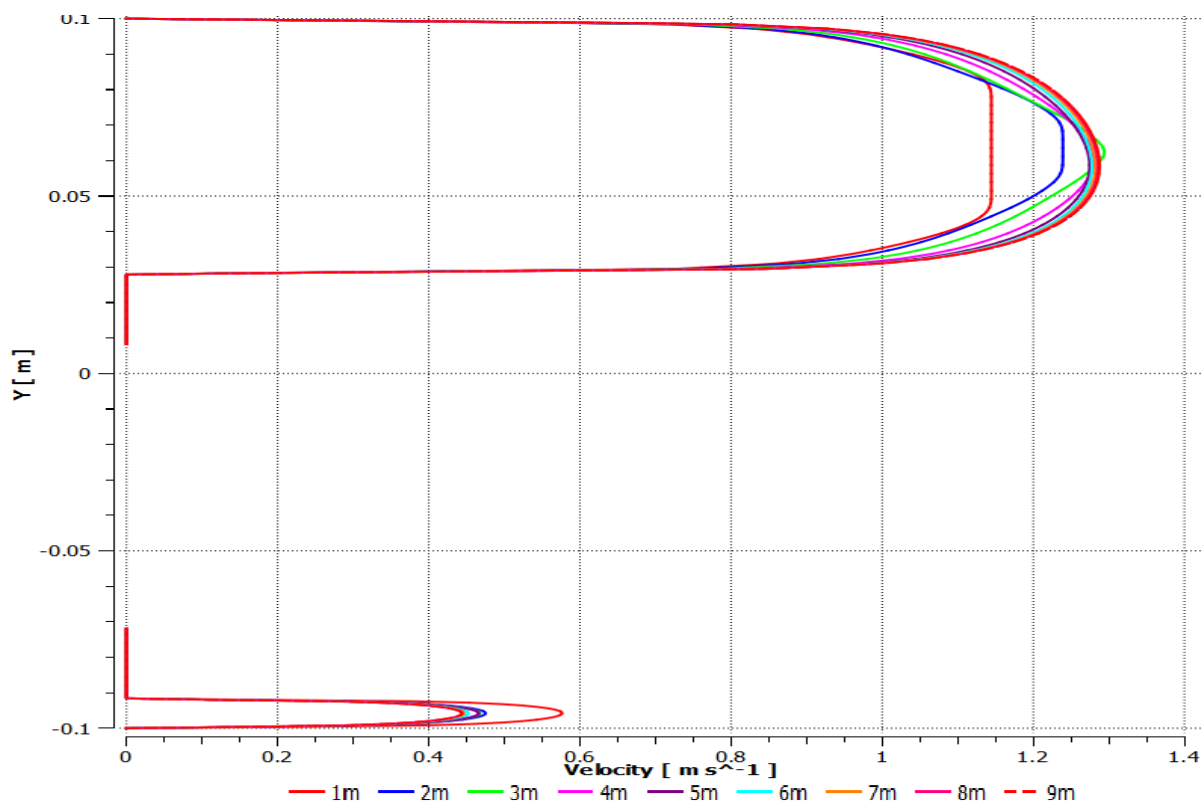


Рис. 10. Радиальные распределения осредненной осевой компоненты вектора скорости по длине кольцевой эксцентричной трубы. Расчеты выполнены в условиях течения и конфигурации канала аналогичных данным, представленным на рис. 9

Fig. 10. Radial distribution of the axial velocity component at different cross sections of the eccentric annular space. Channel geometry is the same as those given in Fig. 9

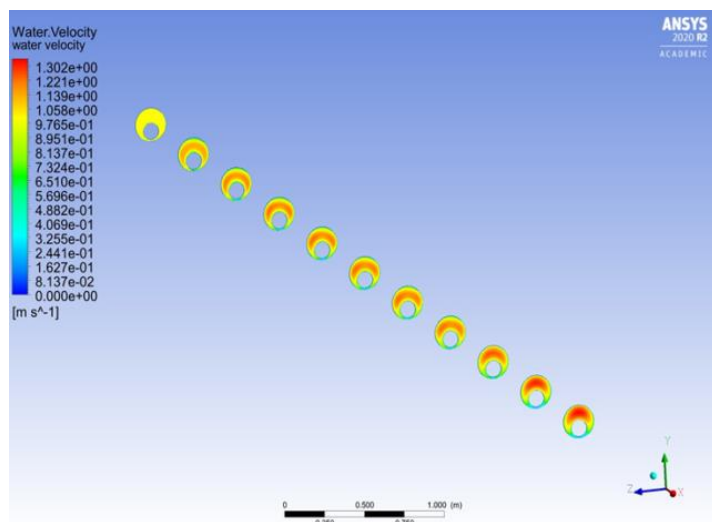


Рис. 11. Картины радиального изменения поля осевой компоненты вектора скорости каплевой жидкости (воды) в двухфазном течении по длине скважины с интервалом расположения радиальных сечений в 1 м. Расчеты выполнены для условий: $Re=80000$, $e=0,8$, $L=10$ м, $R_2=0,2$ м, $R_1=0,12$ м

Fig. 11. Patterns of the axial component of the water velocity vector of a two-phase flow given at 1-m intervals. Calculations were performed under: $Re=80000$, $e=0,8$, $L=10$ м, $R_2=0,2$ м, $R_1=0,12$ м

Из рис. 12 видно, что картины изменений поля скорости воды по мере развития течения в скважине на различных расстояниях от входа демонстрируют ее ускорение в верхней части кольцевого пространства (характерное затемнение контурных линий), а в донной области – торможение.

Из рис. 5–12 следует, что в рассматриваемых практических режимах бурения транспорт буровых смесей по скважинам с горизонтальными участками сопровождается яркими эффектами, определяемыми совокупным взаимодействием специфических внешних и внутренних сил, особенностями изменений пульсационной

структуры входящей в трубу смеси, а также геометрическими параметрами, отвечающими за смещение внутренней трубы и ее динамику в рабочем процессе (подвижность стенки, структуры дисперсной фазы и др.).

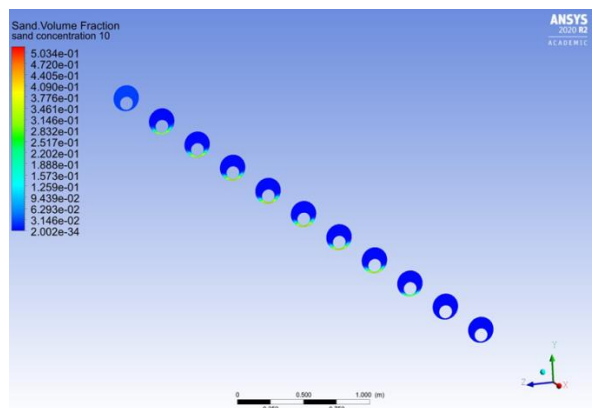


Рис. 12. Картины объемной доли дисперсной фазы (частиц песка) в условиях развивающегося вязкостно-инерционно-гравитационного течения двухфазной смеси по длине коаксиально-эксцентричного пространства горизонтального участка скважины с условиями : $Re=80000$, $e=0,8$, $L=10$ м, $R_2=0,2$ м, $R_1=0,12$ м

Fig. 12. Patterns of the volume fraction of the solid phase (sandstone particles) calculated using a transient simulation of two-phase flow of a viscous fluid acting under the influence of gravity under the following conditions: $Re=80000$, $e=0,8$, $L=10$ m, $R_2=0,2$ m, $R_1=0,12$ m

Установлено, что в подобных конфигурациях концентрация песка в кольцевом пространстве заметно снижается на участке скважина с длиной $x>6$ м (рис. 12). Последнее сопровождается существенным изменением структуры и физических свойств потока. Тогда логично допустить, что для получения картины устойчивости процессов течения и массопереноса при развитии течения завершение расчета должно отвечать контролю за полным отсутствием влияния нелинейных эффектов от изменений реологических свойств смеси, подстройкой пульсационной структуры течения к изменению осредненных динамических и диффузионных параметров. Последнее очень важно, т. к. в сложных сдвиговых течениях гетерогенных смесей выражены анизотропные эффекты распределений пульсаций поля скорости несущей среды. Что касается вопроса накопления шлама на стенках скважины в развивающемся потоке, то результаты показывают, что итерационный процесс за изменением локальных значений частиц твердой фазы следует заканчивать уже через несколько глобальных циклов, характеризующих проход смесью длины скважины L со скоростью U_0 с характерным гидродинамическим временем $\tau_{гд}$.

Также в настоящей работе проведены исследования по выявлению и обоснованию преимуществ эйлерово-эйлерова и эйлерово-лагранжева подходов при прогнозах структуры вязкостно-инерционных течений гетерогенных смесей в эксцентричных трубах.

С этой целью проведено моделирование рассматриваемых течений в рамках эйлерово-лагранжева подхода с привлечением уравнения к расчету траекторий сферических частиц [38] вида (16):

$$m_p \frac{\partial \vec{v}_p}{\partial t} = \vec{F}_v + \vec{F}_D + \vec{F}_{pres} + \vec{F}. \quad (16)$$

Здесь \vec{F}_v – комбинация сил плавучести и тяжести; \vec{F}_{pres} – сила градиента давления; \vec{F}_D – сила межфазного взаимодействия (сопротивления), \vec{F} – другие возможные внешние силы, например, подъемная сила Саффмэна, которыми в силу высказанных допущений можно пренебречь; индексы « p », « f » относятся к параметрам частицы и жидкости соответственно. Замыкания для (16) других параметров можно представить в виде (17)–(19), подобно (9) [38]:

$$\vec{F}_v = (\rho_p - \rho_f) \vec{g} V_p, \vec{F}_{pres} = -V_p \nabla p, \vec{F}_D = \frac{c_d \rho_f A_p}{2} |\vec{v}_f - \vec{v}_p| (\vec{v}_f - \vec{v}_p); \quad (17)$$

$$Re = \frac{\rho_f d_p |\vec{v}_f - \vec{v}_p|}{\mu_f}; \quad (18)$$

$$c_d = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}, \quad (19)$$

где $A_p = \frac{\pi d_p^2}{4}$ – проекция площади частиц; $V_p = \frac{1}{6} \pi d_p^3$ – объем частицы.

Наш опыт исследований двухфазных течений в скважинах показывает, что использование эйлерово-лагранжева подхода при прогнозе 10 с процесса развивающегося по пространству турбулентного течения смеси требует порядка 8 часов для расчета одного цикла. Расчеты утверждают, что при моделировании 10 секунд соответствующего течения концентрация частиц в канале составила 2,91 % (с общим числом частиц песка порядка 51797 при плотности частиц $\rho_p=2650$ кг/м³ и размером $d_p=6$ мм). В сравнении с данными расчета по эйлерово-эйлерову подходу, предсказывающему величину концентрации 2,57 %, видно, что хотя результаты находятся в ожидаемом диапазоне, отличие между ними достигает величины 11,6 %. К сожалению, отсутствие экспериментальных данных, необходимых для выполнения сравнений и установления соответствия данных теории (расчет) и опыта, не позволяет гарантированно утверждать о предпочтительной точности одного из подходов. Однако из-за своей большей универсальности считается, что эйлерово-лагранжев метод более надежен. Рис. 13 иллюстрирует картину динамики частиц в трубе.

Данные рис. 13 позволяют утверждать, что при малом количестве твердых частиц эйлерово-лагранжев подход будет предпочтителен. Но ясно, что с ростом числа частиц этот подход будет терять свои преимущества из-за громоздкости вычислений. Стоит отметить, что в любом случае оба подхода дают приемлемые результаты, коррелированные в диапазоне 12 % друг от друга. Это вполне достаточно для уяснения деталей, сопровождающих течение смеси и

транспорт шлама из скважины, согласно общим заключениям и требованиям по прогнозу интегральных свойств течений смесей. Также наши расчеты показывают, что в рамках ЭЛ подхода картина динамики частиц песка при течении смеси в кольцевой трубе (условия аналогичны данным, представленным на рис. 12) повышает информативность об особенностях изменений траекторий по длине ствола скважины. Видно, что на начальном участке при развитии поля скорости интенсифицируются эффекты, способствующие осаждению частиц на стенку. Причем эти процессы существенны на диффузионном начальном участке с толщиной δ_0 , которую можно оценить согласно [35] по связи $\frac{\delta_0}{\delta} \sim \frac{1}{Sm^{0.5}}$, где $Sm = v_f / D_{mix}$ – критерий Шмидта; $\delta = \delta(x)$ – толщина гидродинамического пограничного слоя; v_f – коэффициент кинематической вязкости жидкости; D_{mix} – эффективный коэффициент диффузии смеси. Заметим, что особенности изменения параметра δ существенно связаны с конвективно-диффузионными механизмами процесса переноса импульса в кольцевом пространстве, включают детали поведения течения в пристеночной части пограничного слоя и, особенно, в вязком подслое (данные изменений напряжения трения и универсальной переменной y^+ по рис. 6–8, 10–12).

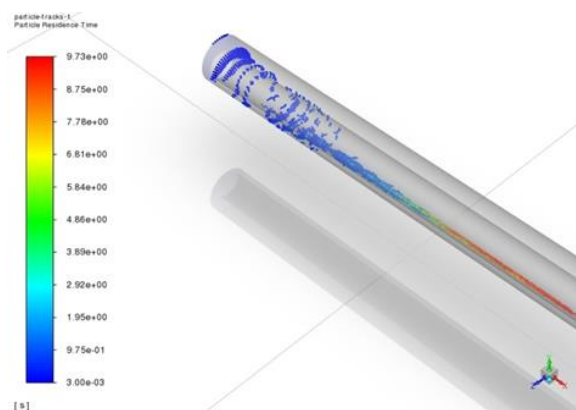


Рис. 13. Картина поведения частиц твердой фазы в развивающемся турбулентном течении на горизонтальном участке коаксиальной эксцентричной трубы. Условия течения аналогичны данным, представленным на рис. 12

Fig. 13. Pattern of behavior of solid particle positions in developing turbulent flow on horizontal section of coaxial eccentric pipe. Flow parameters are the same as given in Fig. 12

Выводы

В настоящем исследовании представлены данные численного моделирования гидродинамической и диффузионной структуры движения смеси каплевой жидкости с продуктами выработки в условиях реального процесса бурения скважин с горизонтальным участком. Эти данные позволяют осуществить прогноз нетривиальных конвективно-диффузионных, внутри- и межфазных эффектов, сопровождающих и осложняющих пространственное течение смеси бурового раствора по всей длине скважины с эксцентрич-

ным расположением бурильной трубы, и оценить не только интенсивность механизмов седиментации шлама в донной части поперечного сечения, но и предсказать размеры локальных областей с полным загромождением течения, требующих оперативной очистки. Так, прогноз особенностей изменений «тонкой» осредненной и пульсационной структуры в устойчивых вязкостно-инерционно-гравитационных ламинарных и турбулентных режимах течения смеси по модели, методу и алгоритму, определенных и реализованных в рамках CFD, следует считать вполне успешным, учитывая удовлетворительное в количественном и качественном отношении соответствие изменений локальных и интегральных свойств смеси с имеющимися экспериментальными данными. Видно, что предсказание изменений профилей падения давления, скорости, напряжений Рейнольдса, кинетической энергии турбулентности, интегрального масштаба энергосодержащих вихрей, псевдозавихренности, а также молярной вязкости в межтрубном эксцентричном пространстве, представленное в работе, позволяет в реальном процессе бурения предупредить неблагоприятные эффекты гидродинамического и диффузионного поведения смеси в кольцеобразной зоне скважины и ее донной части. В частности, результаты рис. 4–6, 9, сведения из табл. 1, 2 демонстрируют, что используемые численные методы и модели второго порядка для напряжений Рейнольдса и их выбранные опорные базы успешны для проведения прогноза полностью развитых и развивающихся течений в скважинах. Также из рис. 10, 12, 13 следует, что наличие эксцентричности ядра, отложений в кольцевом пространстве благоприятствует интенсификации течения в верхней части кольцевого пространства, накоплению шлама и росту размеров пласта продуктов буровой выработки. В таких условиях для практики ценно пожелание по организации режима течения с равномерным распределением потока в межтрубном пространстве, например, с закруткой бурильной трубы. Последнее может быть эффективно как для предотвращения условий прихвата, так и для улучшения транспорта частиц шлама по стволу скважины. Кроме того, представленные результаты полезны в прогнозах интенсивности очистки путем оптимизации изменений реологических свойств раствора за счет обращения к модели неньютоновской среды. Как известно [1–6], такие обобщения приведут к необходимости выяснения особенностей формирования потока во входной области скважины и роли входных возмущений на автоматический режим и его размеры. Наши результаты показывают, насколько важно точное предсказание длины участка стабилизации при течении реологически сложной смеси в установившемся по времени потоке, т. к. его размеры способны уточнить корректность использования инженерных методик транспорта и очистки с автоматическим приближением и внести обоснованные обобщения на условия развития течения. Кроме того, установление степени влияния эксцентричности геометрии, концентрации шлама, силы тяжести, расхода потока на отклонение радиального распределения

скорости в кольцевой зоне от симметричного профиля способствует корректному прогнозу эффектов стагнации течения в донной части (например, рис. 13), накоплению частиц песка (рис. 12) и формированию асимметричной динамической осредненной и пульсационной, неоднородной и анизотропной структуры (рис. 10).

Детали представленного в работе численного прогноза позволяют отметить следующее.

1. Хотя эйлерово-эйлеров подход, несомненно, способен давать результаты, вполне разумные и качественно достоверно согласующиеся с многочисленными данными других исследователей, вопрос получения полностью установившегося решения для таких открытых термодинамических систем, как «внешняя среда – стенка скважины с произвольной образующей ствола с эксцентричным ядром – рабочее тело как гетерогенная смесь», не тривиален.
2. Анализ библиографических источников показывает, что в настоящее время крайне мало данных о деталях развития по пространству процесса накопления шлама, определения условий формирования устойчивого режима седиментации частиц шлама определенного размера. В встречающихся публикациях не содержится ясных сведений: какими эффектами сопровождается процесс накопления шлама; будет ли этот слой формироваться инерционными силами, как предложено в [54], или в условиях подобно процессу для трехслойных моделей [55], или же частицы оседающего слоя подвержены процессам, характерным для поведения дюны с постоянным изменением границы слоя во времени и т. п.
3. Важно подчеркнуть, что до настоящего времени подавляющее число исследований рассматриваемых проблем было сфокусировано на анализе параметров очистки, учитывающих изменение реологических свойств транспортируемой среды, скорости потока, механических условий проходки (ROP), вращения трубы, а также изменений геометрической формы, размера частиц. Однако эти параметры следует рассматривать в комплексе с процессами эволюции диффузионной и гидродинамической структур смеси в донной части горизонтальных участков скважины. Описание этих процессов осложнено особенностями взаимодействия фаз в мелкомасштабном движении, трудностями понимания эффектов, сопровождающих деформацию границ пласта. Для уяснений этих процессов требуются дальнейшие детальные исследования процессов переноса фаз в рамках точных решений определяющих уравнений подобно, например, [3–5, 8, 10, 11, 13, 15, 16, 18, 20, 25, 26, 56–64]. Это позволит инженерам оптимизировать частоту и продолжительность технологических операций бурения.
4. Наш опыт исследования рассматриваемых проблем в рамках эйлерово-эйлерова подхода позволяет отметить его следующие недостатки:

- Требуется весьма протяженное время для моделирования даже одного цикла течения смеси, например, гидродинамика 10 секундного сложного сдвигового течения смеси на ПЭВМ с указанной выше конфигурацией составляет 15 дней.
 - Подход реализован на полуэмпирических идеях. Так, замыкающие математическую модель уравнения (например, предложенные Гидаспоу, Сиамлал, Вен-Иу и другими [35, 56–59]) основаны на кинетической теории движения частиц, требующей учета многих факторов с внесением погрешностей их формулировок. Вопросы установления диапазона изменений параметров, корректности привлекаемых упрощений и допущений еще не определены и ждут своего решения. Это может составить предмет для перспективных будущих исследований. Кроме того, в комбинации с проблемами замыканий определяющих уравнений процессов переноса импульса и массы моделями RANS-метода это направление следует рассматривать как приближенное, надежное лишь в определенных условиях.
 - Необходимо учитывать, что подход адаптирован к случаям описания смеси, в которой объемная доля твердой фазы не превышает 10 % и ее следует рассматривать (подобно диспергированной капельной жидкости) как сплошную среду.
5. Хотя эйлерово-лагранжев подход и не содержит недостатков эйлерово-эйлерова подхода, но с ростом числа частиц затраты на его реализацию существенно возрастают. Данный метод весьма трудоемкий, т. к. требуется большой объем оперативной памяти компьютера для расчёта локальных изменений траектории и положений сотни тысяч частиц. Наш опыт показывает, что на стандартных ПК предпочтителен эйлерово-лагранжев подход только для случаев течения смесей с числом частиц меньше 10^5 .

В итоге стоит подчеркнуть, что все представленные выше проблемы, сопровождающие: построение численного решения; анализ изменений полей локальных параметров ламинарных и турбулентных течений; установление закономерностей формирования участков стабилизации и интенсификации режимов транспорта песка из зон седиментации, указывают на большое влияние эффектов нелинейности внутри- и межфазных процессов переноса импульса, массы в смеси и на ее границах. Выполненные исследования осаждения и транспорта частиц дисперсной фазы в эксцентричном межтрубном пространстве подтверждают, что выбранная в рамках ПК *ANSYS CFD* технология моделирования установившихся по времени течений смесей вполне успешна. Она гарантированно воспроизводит особенности течения смеси в скважинах с горизонтальным участком и позволяет проводить эффективную очистку их отверстий в реальных условиях бурения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харламов С.Н., Фатьянов Д.С. Исследование структуры турбулентного потока природного сырья в трубопроводах с секцией переменного по длине поперечного сечения конфузочно-диффузорного типа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 53–67.
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.
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.
4. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Численное моделирование течений вязких смесей бурового шлама и потока сырой нефти на горизонтальных участках скважин с эксцентричными буровыми трубами // Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа – XXI век: Материалы Всероссийской научной конференции с участием иностранных ученых, посвященную 150-летию акад. АН СССР И.М. Губкина и 110-летию акад. АН СССР и РАН А.А. Трофимука. Секция 2. Геология нефти и газа. Подсекция 3. Нефтегазопромысловая геология. – Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2021. – С. 221–224. DOI: 10.25205/978-5-4437-1248-2-221-224
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.
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.
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. – V. 70. – № 3–4. – P. 308–319.
8. Mme U., Pål Skalle. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles // International Journal of Petroleum Science and Technology. – 2012. – V. 6. – № 2. – P. 129–141.
9. Simulation of cuttings transport with foam in deviated wellbores using computational fluid dynamics / R. Rooki, D.A. Faramarz, A. Moradzadeh, M. Norouzi // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2014. – V. 4. – № 3. – P. 263–273.
10. Xiao-hua Z., Sun C., Tong H. Distribution features, transport mechanism and destruction of cuttings bed in horizontal well // Journal of Hydrodynamics. – 2013. – V. 25. – № 4. – P. 628–638.
11. Effect of drillpipe rotation on cuttings transport using computational fluid dynamics (CFD) in complex structure wells / S. Xiaofeng, K. Wang, T. Yan, S. Shao, J. Jiao // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2014. – V. 4. – № 3. – P. 255–261.
12. Demiralp Yasin. Effects of drill-pipe whirling motion on cuttings transport performance for horizontal drilling. MSc thesis. – Louisiana, 2014. – 151 p.
13. 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.
14. 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, Xian, China, 20–21.09.2015). – Xian: China, 2015. – P. 1–8.
15. Ofei T.N. Effect of yield power law fluid rheological properties on cuttings transport in eccentric horizontal narrow annulus // Journal of Fluids. – 2016. – V. 7. – № 3. – P. 116–124.
16. Kamyab Mohammadreza, Vamegh Rasouli. Experimental and numerical simulation of cuttings transportation in coiled tubing drilling // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – V. 29. – P. 284–302.
17. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and water-based drilling fluids / S. Sneha, B. Lund, J.D. Ytrehus, A. Saasen // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 159. – P. 49–57.
18. Omid H., Sahraei E., Skalle P. Investigating the impact of drill-pipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annulus using computational fluid dynamics (CFD) // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 156. – P. 801–813.
19. 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. – Ulsan, South Korea, October, 13–15, 2010. – Ulsan, South Korea: University of Ulsan, 2010. – P. 105–109.
20. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. Transient and steady state analysis of drill cuttings transport phenomena under turbulent conditions // Chemical Engineering Research and Design. – 2018. – V. 131. – P. 520–544.
21. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. – 1994. – V. 32. – № 8. – P. 1598–1605.
22. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle sphericity // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 170. – P. 992–1004.
23. Madhava S., O'Brien T.J. The derivation of a drag coefficient formula from velocity-voidage correlations // Morgantown, WV: US Department of energy, Office of Fossil Energy, NETL, 1987. – P. 1–11.
24. Gidaspow D. Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions. – Sand Diego: Academic press, 1994. – 467 p.
25. Akhshik Siamak, Majid Rajabi. CFD-DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 160. – P. 229–246.
26. 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. – USA: American Society of Mechanical Engineers. Digital Collection, 2018. – № 51296 (V008T11A051). – 12 p.
27. Prospects of RANS models with effects multiparameter at modeling of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface / S.N. Kharlamov, V.Yu. Kim, S.I. Silvestrov, R.A. Alginov, S.A. Pavlov // Proc. of the 6th International Forum on Strategic Technology. – Heilongjiang, Harbin, China, 2011. – V. 2. – P. 787–791. DOI: 10.1109/IFOST.2011.6021139.
28. Numerical prediction of flow behavior of cuttings carried by Herschel-Bulkley fluids in horizontal well using kinetic theory of granular flow / Pang Boxue, Shuyan Wang, Guodong Liu, Xiaoxue Jiang, Huilin Lu, Zhenjie Li // Powder Technology. – 2018. – V. 329. – P. 386–398.
29. 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. – V. 174. – P. 201–215.
30. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Т. 1. – 464 с.
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. – Tomsk, Russia, 2014. – P. 1–6.
32. Launder B.E. On the computation of convective heat transfer in complex turbulent flows // Journal of Heat Transfer. – 1988. – V. 110. – P. 1112–1128.
33. Глушко Г.С. Дифференциальное уравнение для масштаба турбулентности и расчет турбулентного пограничного слоя на плоской пластине. Турбулентное течение. – М.: Наука, 1970. – С. 34–44.
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. – V. 1. – 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. – V. 1. – Pt. 1. – P. 175–179.
37. Ди Джачинто, Сабетта Р., Пива К. Эффекты двустороннего взаимодействия в газовых потоках с неплотным множеством частиц // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1982. – Т. 104. – № 3. – С. 122–131.
38. Morsi S.A., Alexander A.J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems // Journal of Fluid Mechanics. – 1972. – V. 55. – № 2. – P. 193–208.
39. Happel J., Brenner H. Low Reynolds number hydrodynamics with special applications to particular media. – New Jersey: Prentice-Hall, 1965. – 553 p.
40. Piercy N.A.V., Hooper M.S., Winney H.F. Viscous flow through pipes with cores // Journal of science. – 1933. – V. 15. – P. 647–676.
41. Шищенко Р.И., Есьман Б.И., Кондратенко П.И. Гидравлика промысловых жидкостей. – М.: Недра, 1976. – 294 с.
42. Boyun G., Liu G. Applied drilling circulation systems: hydraulics, calculations and models. – Burlington: Gulf Professional Publishing, 2011. – 272 p.
43. Pressure drop in piping elements. Software-Factory Schmitz, Schifferstadt, Germany. URL: <http://www.druckverlust.de/Online-Rechner> (дата обращения 15.02.2022).
44. 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. – V. 187. – № 106853. – P. 1–12.
45. Подрябинкин Е.В. Моделирование течений ньютоновских и неньютоновских жидкостей в цилиндрическом зазоре: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2014. – 28 с.
46. Accurate predictions of velocity profiles and frictional pressure losses in annular YPL-fluid flow / H. Yahya, M. Yu, S. Miska, S. Shirazi, R. Ahmed // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 2014. – V. 53. – № 6. – P. 355–363.
47. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Specific aspects of turbulent flow separation in nodes and junctions of pipelines // XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov. – Tomsk, Russia, 2014. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/21/1/012038.
48. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Engineering approaches' progress in calculation of inhomogeneous turbulence in pipelines // Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, 2010. – V. 2. – P. 798–805.
49. Сима Н. Модель напряжений Рейнольдса для течения в пристеночных областях с низкими числами Рейнольдса // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1988. – № 4. – С. 241–252.
50. Elghobashi S., Prud'homme M. Prediction of wall bounded turbulent flows with an improved Reynolds-Stress Model // Proceedings of the IV Symposium on Turbulent Shear Flows. – Karlsruhe, 1983. – P. 1.7–1.12.
51. Барбин Д. Турбулентное течение на начальном участке гладкой трубы // Техническая механика. – 1963. – № 1. – С. 34–41.
52. Grutzner H. Beitrage zur theoretischen und experuncntellen Untersuchung der Turbulenz. – Berlin: Akademik-Verlag, 1976. – 135 p.
53. Simulation of transient cuttings transportation and ECD in wellbore drilling / S.S. Costa, S. Stuckenbruck, S.A. Fontoura, A.L. Martins // Europec/EAGE Conference and Exhibition. – Italy, Rome, 2008 June 9 (OnePetro). – 11 p.
54. Gavignet A.A., Sobey I.J. Model aids cuttings transport prediction // Journal of Petroleum Technology. – 1989. – V. 41. – № 9. – P. 916–921.
55. Nguyen Desmond, S.S. Rahman A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells // SPE/IADC Asia Pacific Drilling Technology. – Malaysia, Kuala Lumpur: Society of Petroleum Engineers, 1996. – P. 1–15.
56. Ding Jianmin, Gidaspow D. A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow // AIChE journal. – 1990. – V. 36. – № 4. – P. 523–538.
57. Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flowfield / C.K.K. Lun, S.Br. Savage, D.J. Jeffrey, N. Chepurnyy // Journal of fluid mechanics. – 1984. – V. 140. – P. 223–256.
58. Gidaspow D., Bezburuah R., Ding J. Hydrodynamics of circulating fluidized beds: kinetic theory approach // Conference №920502-1. Department of Chemical Engineering. Illinois Institute of Technology. – Chicago, USA, 1991. – 360 p.
59. Esch T., Menter F.R. Heat transfer predictions based on two-equation turbulence models with advanced wall treatment // Turbulence, Heat and Mass Transfer. – 2003. – № 4. – P. 633–640.
60. 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. – V. 59. – № 2. – P. 196–213.
61. Мельник И.А., Харламов С.Н. К вопросу гидродинамического моделирования процессов восходящей миграции реологически сложных неоднородных флюидов из глубинных подземных коллекторов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 4. – С. 24–37.
62. Харламов С.Н., Джангхорбани М. Модели расчета процессов очистки нефтегазовых скважин от бурового шлама // Вестник Российской академии естественных наук (Западно-Сибирское отделение). – 2020. – Вып. 23. – С. 28–37.
63. 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.
64. Numerical study of parameters affecting pressure drop of power-law fluid in horizontal annulus for laminar and turbulent flows / F. Hicham, A. Hadjadj, A. Haddad, T.N. Ofei // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2019. – V. 9. – № 4. – P. 3091–3101.

Поступила 20.04.2022 г.

Информация об авторах

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

Джангхорбани Мехран, аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 504.61:532.542:536.252

NUMERICAL PREDICTION OF FLOW OF VISCOUS DRIP LIQUID MIXTURE WITH SOLID PARTICLES IN INLET FIELD OF ECCENTRIC ANNULAR TUBES AND CLEANING THEM FROM SLUDGE

Sergey N. Kharlamov¹,
kharsn@mail.ru

Janhorbani Mehran¹,
mehr.janghorbani@gmail.com

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

The relevance of the research is determined by the need to understand the features of the hydrodynamics of viscous flows in the annular space between drillpipes and wellbore including changes in the shape of the cross section and wall surfaces; to detail intra- and interfacial processes of momentum and mass transfer during the flow of dispersed media with complex rheology in the fields of action of specific internal and external forces in annular eccentric pipes; to establish the capabilities of models, approaches, methods for predicting the evolution of the structure of the flow of mixtures; to develop practical recommendations for personnel on effective wellbore cleaning.

The aim of the research is to study, within the framework of CFD methods, the features of the three-dimensional laminar and turbulent flow of a mixture of drilling fluid with solid particles in the coaxial and eccentric inlet area of the well, as well as to establish the patterns of complex viscous flow accompanying the transport of cuttings along the wellbore and cleaning its horizontal sections.

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

Results. The paper introduces the critical analysis of the current state of the problems of computer modeling of cuttings transport processes in drilling technologies. The features and effects formed by the presence of rotation of the drill pipe, which affect the structure of the flow, are noted. The authors have formulated in detail the problem of hydrodynamics and mass transfer of a turbulent spatially developing dispersed flow of a liquid with solid particles of cuttings in coaxial eccentric pipes of arbitrary rheology, as well as methods for studying it. The paper introduces the remarks on the formalism of the closures of the constitutive equations of the model in the framework of CFD. Calculations revealed the patterns of changes in local and integral parameters of flows and mass transfer associated with an increase in the annular, mass-average velocities resulting from a decrease in the free flow cross section due to the accumulation of cuttings. The trends towards regularization of the effects that create the cleaning are determined. The features of changes in the structure of a complex flow of a mixture in the framework of the Euler-Eulerian and Euler-Lagrangian approaches are disclosed. In conclusion, proposals for engineering prediction of flows in the horizontal section of the well are presented. The applied value of the results is determined by the possibility of making a number of generalizations that eliminate uncertainties caused by taking into account the details of the geometric and hydrodynamic configurations of the problem, as well as using the parameters of real drilling and cleaning modes.

Key words:

Well, drilling, rotation, modeling, hydrodynamics, rheology, annular flows, transport, cleaning.

REFERENCES

1. Kharlamov S.N., Fatyanov D.S. Investigation of natural raw materials turbulent flow structure in pipelines at confuser-diffuser section. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 8, pp. 53–67. In Rus.
2. Kharlamov S.N., Fatyanov D.S. Simulation of viscous media spatial flows in the system of channels with sections of complex form junctions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 70–88. In Rus.
3. Kharlamov S.N., Janghorbani M., Filippov K.A. Mathematical modeling and research methods of horizontal wells hydrodynamic cleaning. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 8, pp. 53–73. In Rus.
4. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Chtislennoe modelirovanie tekhnicheskikh smesey burovogo shlama i potoka syrovoy nefi na gorizontalnykh uchastkakh skvazchin s ekstsentrichnymi burilnyimi trubami [Numerical modeling of the currents of viscous mixtures of drilling sludge and the flow of crude oil on horizontal sections of wells with eccentric drilling pipes]. *Novye vyzovy fundamentalnoy i prikladnoy geologii nefi i gaza – XX vek. Materialy Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s uchastiem inostrannykh uchennykh, posvyashchennoy 150-letiyu akademika AN SSSR I.M. Gubkina i 110-letiyu akademika AN SSSR i RAN AA. Trofimuka. Sec.2. Geologiya nefi i gaza. Pogsec. 3. Neftepromyslovaya geologiya* [New challenges of fundamental and applied geology of oil and gas – XXI century. Materials of the All-Russian Scientific Conference with the participation of foreign scientists, dedicated to the 150th anniversary of I.M. Gubkin, the Academy of Sciences of the USSR and the 110th anniversary acad. AA. Trofimuk. Section 2. Geology of oil and gas. Subsection 3. Oil and gas geology]. Novosibirsk, CPI NSU, 2021. pp. 221–224. DOI: 10.25205/978-5-4437-1248-2-221-224
5. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Numerical simulation of viscous – inertial laminar swirling flow in a circular tube with an eccentric round core. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 7–21. In Rus.
6. Bilgesu H.I., Ali M.W., Aminian K., Ameri S. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores. *SPE Eastern Regional Meeting, Society of Petroleum Engineers*. Lexington, Kentucky, USA, October, 2002. 27 p.
7. Han Sang-Mok, Young-Kyu Hwang, Nam-Sub Woo, Young-Ju Kim. Solid-liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2010, vol. 70, no. 3–4, pp. 308–319.
8. Uduak M., Skalle P. 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. Roooki Reza, Faramarz Doulati Ardejani, Ali Moradzadeh, Mahmood Norouzi. Simulation of cuttings transport with foam in deviated wellbores using computational fluid dynamics. *Journal of*

- Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 263–273.
10. Zhu Xiao-hua, Chao Sun, Hua Tong. Distribution features, transport mechanism and destruction of cuttings bed in horizontal well. *Journal of Hydrodynamics*, 2013, vol. 25, no. 4, pp. 628–638.
 11. Sun Xiaofeng, Kelin Wang, Tie Yan, Shuai Shao, Jianjun Jiao. Effect of drillpipe rotation on cuttings transport using computational fluid dynamics (CFD) in complex structure wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, vol. 4, no. 3, pp. 255–261.
 12. Demiralp Yasin. *Effects of drill-pipe whirling motion on cuttings transport performance for horizontal drilling*. MSc thesis. Louisiana, 2014. – 151 p.
 13. 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.
 14. 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)*. Xian, China, 2015. pp. 1–8.
 15. 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.
 16. Kamyab Mohammadreza, Vamegh Rasouli. Experimental and numerical simulation of cuttings transportation in coiled tubing drilling. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 29, pp. 284–302.
 17. Sneha S., Lund B., Ytrehus J.D., Saasen A. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 159, pp. 49–57.
 18. Omid H., Sahraei E., Skalle P. Investigating the impact of drill-pipe'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, pp. 801–813.
 19. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I. Numerical modelling of a vortical investigation of heat transfer in fields of centrifugal mass forces in elements of the power equipment with a curvilinear wall. *The 5th Proc. of the International Forum on Strategic Technology. IFOST*. Ulsan, South Korea, 2010. Ulsan, South Korea, University of Ulsan, October, 13–15, 2010, pp. 105–109.
 20. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. Transient and steady state analysis of drill cuttings transport phenomena under turbulent conditions. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, vol. 131, pp. 520–544.
 21. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605.
 22. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle sphericity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 170, pp. 992–1004.
 23. Syamlal Madhava, O'Brien T.J. *The derivation of a drag coefficient formula from velocity-voidage correlations*. Technical Note. Morgantown, WV, US Department of energy. Office of Fossil Energy, NETL, 1987. pp. 1–11.
 24. Gidaspow D. *Multiphase flow and fluidization: continuum and kinetic theory descriptions*. Sand Diego, Academic press, 1994. 467 p.
 25. Akhshik Siamak, Majid Rajabi. CFD-DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 160, pp. 229–246.
 26. Ignatenko Y., Bocharov O., Gavrilov A., May R. Steady-state cuttings transport simulation in horizontal borehole annulus. *37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. USA, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2018. No. 51296 (V008T11A051), 12 p.
 27. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I., Alginov R.A., Pavlov S.A. Prospects of RANS models with multi-parameter effects at simulation of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface. *The 6th Proc. of the International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. Harbin, China, August 22–24, 2011. Vol. 2, pp. 787–791.
 28. Pang Boxue, Shuyan Wang, Guodong Liu, Xiaoxue Jiang, Huilin Lu, Zhenjie Li. Numerical prediction of flow behavior of cuttings carried by Herschel-Bulkley fluids in horizontal well using kinetic theory of granular flow. *Powder Technology*, 2018, vol. 329, pp. 386–398.
 29. Pang Boxue, Shuyan Wang, Xiaoxue Jiang, Huilin Lu. 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.
 30. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Vol. 1, 464 p.
 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*. Tomsk, Russia, 2014. pp. 1–6.
 32. Launder B.E. On the computation of convective heat transfer in complex turbulent flows. *Journal of Heat Transfer*, 1988, vol. 110, pp. 1112–1128.
 33. Glushko G.S. *Differentsialnoe uravnenie dlya masshtaba turbulentnosti i raschet turbulentnogo pogrannichnogo sloya na ploskoy plastine* [Differential equation for turbulence scale and calculation of turbulent boundary layer on flat plate]. *Turbulentnye techeniya* [Turbulent flows]. Moscow, Nauka Publ., 1970. pp. 34–44.
 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, vol. 1, pp. 517–524.
 35. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. *Matematicheskie modeli neodnorodnoy anizotropnoy turbulentnosti vo vnutrennikh sistemakh* [Mathematical models of inhomogeneous anisotropic turbulence at the internal flows]. Tomsk, Tomsk State University of Publ. House, 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 Giacinto, Sabetta R., Piva C. Effekty dvukhstoronnego vzaimodeystviya v gazovykh potokakh s neploym mnozhestvom chastits [Effects of two-way 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.
 39. Happel J., Brenner H. *Low Reynolds number hydrodynamics with special applications to particular media*. New Jersey, Prentice-Hall, 1965. 553 p.
 40. Piercy N.A.V., Hooper M.S., Winney H.F. Viscous flow through pipes with cores. *Journal of science*, 1933, vol. 15, pp. 647–676.
 41. Schischenko R.I., Esmam B.I., Kondratenko P.I. *Gigralika promyvochnykh zshidkostey* [Hydraulics of washing fluids]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 294 p.
 42. Boyun G., Liu G. *Applied drilling circulation systems: hydraulics, calculations and models*. Burlington, Gulf Professional Publishing, 2011. 272 p.
 43. *Pressure drop in piping elements*. Software-Factory Schmitz, Schifferstadt, Germany. Available at: <http://www.druckverlust.de/Online-Rechner> (accessed 15 February 2022).
 44. 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.
 45. Podryabinkin E.V. *Modelirovaniye techeniy nyutonovskikh i ne-nyutonovskikh zhidkostey v tsilindrisheskom zazore*. Avtoreferat Diss. Kand. nauk [Simulate flows of Newtonian and non-Newtonian fluids in a cylindrical gap. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2014. 28 p.
 46. Hashemian Yahya, Mengjiao Yu, Stefan Miska, Siamack Shirazi, Ramadan Ahmed. 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.
 47. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Specific aspects of turbulent flow separation in nodes and junctions of pipelines. *XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov*. Tomsk, Russia, 2014. pp. 1–6.

48. 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.
49. Sima N. Model napryazheniy Reynoldsa dlya techeniya v pristenochnykh oblastiakh s nizkimi chislami Reynoldsa [Reynolds stress model for flow in wall regions with low Reynolds numbers. Theoretical foundations of engineering calculations]. *Teoreticheskie osnovy inzhenernykh raschetov*, 1988, no. 4, pp. 241–252. In Rus.
50. Elghobashi S., Prud'homme M. Prediction of wall bounded turbulent flows with an improved Reynolds-Stress Model. *Proceedings of the IV Symposium on Turbulent Shear Flows*. Karlsruhe. 1983. pp. 1.7–1.12.
51. Barbin J. Turbulentnoe techenie na nachalnom uchastke gladkoy trubyy [Turbulent flow in the initial section of smooth pipe]. *Tekhnicheskaya mekhanika*, 1963, no. 1, pp. 34–41.
52. Grutzner H. *Beitrage zur theoretischen und experuncntellen Untersuchung der Turbulenz* [Contributing to the theoretical and expert investigation of turbulence]. Berlin, Akademik-Verlag, 1976. 135 p.
53. 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*. Italy, Rome, 2008, June 9 (OnePetro). 11 p.
54. Gavignet A.A., Sobey I.J. Model aids cuttings transport prediction. *Journal of Petroleum Technology*, 1989, vol. 41, no. 9, pp. 916–921.
55. Nguyen Desmond, Rahman S.S. A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells. *SPE/ADC Asia Pacific Drilling Technology*. Malaysia, Kuala Lumpur, Society of Petroleum Engineers, 1996. 15 p.
56. Ding Jianmin, Gidaspow D. A bubbling fluidization model using kinetic theory of granular flow. *AIChE journal*, 1990, vol. 36, no. 4, pp. 523–538.
57. Lun C.K.K., Savage S.Br., Jeffrey D.J., Chepurny N. Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in Couette flow and slightly inelastic particles in a general flowfield. *Journal of fluid mechanics*, 1984, vol. 140, pp. 223–256.
58. Gidaspow D., Bezburuah R., Ding J. Hydrodynamics of circulating fluidized beds: kinetic theory approach. *Conferernce no. 920502-1. Department of Chemical Engineering*. Chicago, USA, Illinois Institute of Technology, 1991. 360 p.
59. 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.
60. Dhruv Mehta, Adithya K.T. Radhakrishnan, 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.
61. Melnik I.A., Kharlamov S.N. To the problem of hydrodynamic modeling of processes of upward migration of rheologically complex inhomogeneous fluids from deep underground reservoirs. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 4, pp. 24–37. In Rus.
62. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Models for calculation of oil and gas well cleaning processes from drilling sludge. *Bulletin of the Russian Academy of Natural Sciences (West Siberian Branch)*, 2020, Iss. 23, pp. 28–37. In Rus.
63. 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.
64. 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.

Received: 20 April 2022.

Information about the authors

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

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