

УДК 504.61:532.542: 536.252

К ПРОБЛЕМЕ УСТАНОВЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ ВРАЩЕНИЯ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ

Харламов Сергей Николаевич¹,
kharsn@mail.ru

Джанхорбани Мехран¹,
mehran.janghorbani@gmail.com

Брыксин Максим Радиславович²,
Maxbryksin@mail.ru

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

² Филиал общества с ограниченной ответственностью «Газпром инвест Томск»,
Россия, 634034, г. Томск, пр. Ленина, 39.

Актуальность исследования определяется необходимостью детального моделирования эволюции динамической структуры вязкой смеси, изменений объёмной концентрации пробуренного шлама в кольцевом межтрубном пространстве скважины, которая постоянно накапливается в процессе бурения, а также контроля ее критических значений, приводящих к проблемам функционирования специального оборудования.

Цель работы состоит в численном моделировании в рамках методов вычислительной гидродинамики (computational fluid dynamics – CFD) развивающегося по времени и пространству процесса накопления шлама во внутренних системах с эксцентричным неподвижным ядром (трубах, каналах) при различных условиях течения буровых растворов типа Гершеля–Балкли, отличающихся произвольным изменением их реологических свойств, уяснении особенностей процесса накопления шлама, а также определении интенсивности засорения и момента времени для очистки скважин.

Методы исследования рассматриваемых процессов основаны на комплексном подходе к физико-математическому и компьютерному моделированию гидродинамики и конвективного массопереноса в гетерогенных неоднородных сплошных средах, осложнённых реологическими неьютоновскими эффектами, и комбинированном прямом и опосредованном анализе возможностей построенной модели к прогнозу сути процессов очистки и бурения скважин путем сопоставления результатов моделирования с имеющимися экспериментальными данными.

Результаты демонстрируют особенности влияния реологических параметров на скорость накопления шлама в кольцевом межтрубном пространстве и закономерности выноса/осаждения частиц пробуренной породы при изменении режимов течения смеси. Оценены возможности метода исследования гидротранспорта в рамках ПО ANSYS ЭЛ – подхода посредством CFD-DEM модели при прогнозе перепада поля давления в скважине, эволюции динамической структуры смеси в зависимости от интенсивности загромождения межтрубного пространства шламом, изменений средней массовой скорости на входе в скважину в сравнении с имеющимися экспериментальными данными. Численно определены и рекомендованы в практику условия для расчета максимальной рекомендуемой продолжительности бурения при произвольных комбинациях значений технологических и реологических параметров бурового раствора.

Ключевые слова:

Скважина, горизонтальный участок, кольцевые потоки, реология, бурение, жидкость Гершеля–Балкли, моделирование, гидродинамика, массоперенос, транспорт, очистка.

Введение

При бурении наклонно-направленных скважин не всегда возможны режимы вращения бурильной колонны. Известно, что при сложных траекториях ствола скважины, включающих короткие криволинейные изгибы, при бурении боковых стволов и протяженных горизонтальных участков вращение бурильной колонны ведёт к возникновению значительных изгибающих сил в ее элементах. Все это приводит к негативным последствиям функционирования и целостности дорогостоящего технологического оборудования. С другой стороны, следует учитывать, что в наклонных участках скважины всегда присутствует эксцентricность (e) бурильной колонны относительно продольной оси скважины. И особенно в случаях, когда $e > 60\%$, а также при ламинарном течении бурового раствора со свойствами жидкости типа Гершеля–

Балкли (ГБ), полная очистка кольцевого пространства от частиц пробуренных пород на базе неьютоновских жидкостей только гидравлическим способом невозможна. Следовательно, для недопущения формирования условий чрезвычайного роста объёмной доли шлама в кольцевом пространстве после бурения определенного участка скважины персоналу придётся прекращать бурение и проводить ее механическую очистку (шаблонировку). Время, потраченное на шаблонировку, хотя и необходимо, но все же нежелательно в экономическом смысле. Поэтому сокращение частоты таких операций имеет высокое значение с экономической точки зрения. Стоит отметить, что чрезмерное уменьшение числа таких шаблонировок, конечно, ведёт к ряду серьёзных технических проблем, связанных с ростом концентрации частиц в кольцевом пространстве. Это могут быть, например,

процессы увеличения перепада давления, которые негативно воздействуют на продуктивный пласт или прихват бурильной колонны. В силу сказанного, оптимизация периодичности и частоты механической очистки имеет ключевое значение для экономичности и эффективности бурения любой скважины. Особенно при бурении горизонтальных участков, где эксцентricность достигает своих максимальных значений и гидравлическая очистка является самой проблематичной. В настоящее время изучение особенностей гидродинамики ламинарного течения смеси неньютоновской жидкости с частицами твёрдой фазы через эксцентричное кольцевое пространство между двумя горизонтальными трубами и установление закономерностей такого течения ценны для уяснения механизмов, сопровождающих реальный процесс бурения в рамках ряда физических допущений к численной модели рассматриваемой проблемы транспорта шлама и очистки скважин с горизонтальным участком. Основу исследования составляют следующие задачи:

- установление особенностей процесса накопления шлама при пространственном изменении реологических свойств жидкостей типа ГБ;
- оценка влияния малых значений концентраций шлама на перепад поля давления с целью уяснения факта: могут ли значения перепада давления служить критерием прогноза критической загрузки скважины шламом;
- предложение метода в качестве инженерной методики для оптимизации продолжительности бурения/периодичности очистки при произвольных комбинациях технических и реологических параметров технологического процесса бурения.

Отдельные библиографические сведения по проблеме

Вопрос об эффективности очистки скважин впервые был рассмотрен Р. Пиготтом в 1941 г. в [1], где он пытался найти скорость скольжения твёрдых частиц в жидкостях типа Бингама при ламинарном ($Re < 0,05$, посредством закона Стокса) и турбулентном ($Re > 2000$, посредством закона Риттингера) течениях. В дальнейшем это исследование было продолжено другими авторами, такими как К. Виллиамс и Г. Брюс [2], И. Хопкин [3], У. Цейдлер [4], Т. Цифферман с соавт. [5] и Р. Томас с соавт. [6]. Все эти экспериментальные работы были сфокусированы на жидкостях типа Бингама, т. е. глинистых растворах, которые представляли собой основной тип растворов при бурении неглубоких вертикальных скважин. В работе С. Окраджни и Дж. Азара [7] впервые рассмотрен процесс гидротранспорта в наклонно-направленных скважинах (ННС). Указанные авторы установили существование трех различных зон в ННС по механизму гидротранспорта: 1 случай соответствует углам наклона от вертикали до 45° . Для этих условий показано, что здесь эффективнее всего ламинарное течение и важно увеличивать отношение динамического напряжения сдвига (ДНС)/пластическая вязкость; 2 случай соответствует условиям наклона участков скважины от вертикали в диапазоне от 45° до 55° . В таких конфигурациях может быть эффективным как ламинарное,

так и турбулентное течение и данная зона является самой проблематичной с точки зрения очистки; 3 случай характерен для скважин с углами наклона от вертикали в диапазоне от 55° до 90° . Здесь для гидротранспорта эффективен турбулентный режим течения, но изменения реологических свойств раствора не играют большой роли. Подобные исследования, в которых рассматривалось влияние различных параметров, например размера частиц и скорости вращения бурильной колонны, на процесс гидротранспорта, были проведены также М. Мартином с соавт. [8] во Франции, Дж. Фордом с соавт. [9] и Дж. Педеном с соавт. [10] в Великобритании. Работу Т. Беккер с соавт. [11] можно считать ключевой, так как их выводы до сих пор часто рассматриваются как определяющие правила очистки скважин. А. Мартинс с соавт. [12] в своей работе показали, что при горизонтальном бурении с эксцентricностью скважины полная очистка скважины невозможна. Результаты М. Дуан с соавт. [13] указывают на физическую особенность процесса. Установлено, что количество частиц в кольцевом пространстве стабилизируется только после достаточно длительного времени, даже в случае с вращением. Причем требуется порядка 30–60 циклов расчета течения, чтобы стабилизировать количество шлама в канале и процесс достиг условий установившегося состояния. Наряду с экспериментальными исследованиями начиная с конца 1980-х появились работы, основанные на механическом анализе сил, действующих на частицы, и законах сохранения массы и импульса между разными слоями течения. Такие исследования ставили цель ответить на следующие вопросы.

1. Какой должна быть скорость течения для определённой конфигурации геометрического пространства скважины, меньше значения которой начинается формироваться слой осаждаемых частиц?
2. Какой будет конечная толщина данного слоя?

Первый известной работой по этой теме было исследование, опубликованное А. Гавинье и Дж. Собей [14]. В нем предлагается, что геометрия течения состоит из двух частей: в нижней лежит неподвижный слой частиц (хотя через его поры раствор может течь), в верхней части раствор течет свободно. Позднее модель, представленная в [14], была доработана Д. Нгуен и С. Рахман [15], которые на основании экспериментов заметили, что при различных условиях течения в кольцевом пространстве могут существовать разные режимы течения и транспорта частиц. Первый результат из [15] сводится к тому, что при низких скоростях течения внизу существует неподвижный слой частиц (1 слой) с постоянной концентрацией. Над этим слоем образуется подвижный дисперсный слой (2 слой) из состава частиц и раствора. Здесь концентрация частиц меняется по вертикальной оси. И, наконец, 3 слой сверху – зона свободного течения раствора, в котором нет частиц твёрдой фазы. Второй результат [15] показывает, что при стремлении скорости течения к турбулентному режиму частицы перемещаются из среднего слоя в верхний и там образуется зона турбулентной суспензии. При этом первый и второй слои все ещё существуют (имеется три специ-

фических слоя). Третий результат [15] показывает, что если наблюдается дальнейшее увеличение скорости течения раствора, то нижний слой постоянно разрушается (вследствие динамической деструкции) и наконец исчезает. Тогда остается только дисперсный слой внизу и зона турбулентной суспензии наверху (имеется только два специфических слоя). Четвертый результат [15] сводится к тому, что при достаточно больших скоростях второй слой также может исчезнуть. Тогда везде формируются условия для течения турбулентной суспензии (смеси твердых частиц и раствора) (один специфический слой). На основании полученных результатов была разработана первая компьютерная модель, представленная Л. Зо с соавт. [16], которая позволила уяснить суть эффектов, определяющих течение смеси и слоя осевших частиц, а также характер влияния изменений разных параметров гидродинамического процесса транспорта смеси на толщину отложений. В дальнейшем К. Сузана с соавт. [17] разработали модель, по которой проведено моделирование неустановившегося течения смеси по всей длине горизонтальной скважины (1200 м) и были получены данные о пространственном изменении толщины слоя. Заметим, что в зоне свободного течения при перепаде давления по длине скважины в исследовании [17] концентрация шлама всегда была порядка 52 %. Ряд других авторов, таких как, например, Х. Чо с соавт. [18] и И. Озбаюгулу с соавт. [19], разработали свои оригинальные модели. В итоге сравнение с имеющимися экспериментальными результатами показало, что их модели способны предсказать изменения толщины слоя шлама с погрешностью меньше 15 % и перепад давления с погрешностью меньше 20 % при концентричном положении буровых труб. Но в случае с эксцентричностью скважины модель сильно недооценивает влияние эксцентричности на толщину слоя частиц, хотя эксперименты указывали на значительное влияние на процесс изменений эксцентриситета трубы. Стоит отметить, что все указанные модели до сих пор используются в профессиональных ПО при ряде физических допущений, что влияет на точность результатов, особенно при значительных значениях эксцентриситета труб. Из представленных результатов видно, что повышение точности расчета процессов очистки связано с необходимостью решения следующих задач:

- выяснения механизмов влияния на структуру течения смеси межтрубного пространства, установления особенностей и закономерностей транспорта частиц шлама в реальных условиях бурения, приводящих к изменению толщины отложений по длине трубы;
- учета специфического характера действия внешних и внутренних сил, формирующих поле скорости раствора и частиц в скважине.

Прогресс в полномасштабном вычислительном моделировании процессов очистки связывают с работой Х. Билгесу [20]. С этого момента детальное численное моделирование стало предпочтительным направлением изучения процесса гидротранспорта. Первые вычислительные работы, например Н. Мишра

[21], С. Хан с соавт. [22], У. Мме с соавт. [23], Х. Джу с соавт. [24], Я. Демиралп [25], Т. Офей с соавт. [26], М. Камяб и В. Расули [27], Е. Эпеллэ и Д. Герогиоргис [28], были посвящены определению погрешности данного подхода. В них авторы моделировали течение смеси различных ньютоновских и неньютоновских жидкостей с частицами твердой фазы в турбулентном и ламинарном режимах с применением эйлера-эйлерова (ЭЭ) (где обе фазы рассматриваются как сплошная среда) и эйлера-лагранжева (ЭЛ) (где капельная фаза рассматривается как сплошная среда и частицы твердой фазы рассматриваются дискретно) подходов и пришли к выводу, что результаты обоих подходов в качественном отношении весьма схожи и отличаются от имеющихся экспериментальных данных на величину порядка 11 % (по расчёту скоростей фаз в коаксиальном и радиальном направлениях). При этом указанные авторы заметили, что ЭЛ подход становится трудоемким с увеличением числа частиц (выше 10–12 % по концентрации), т. е. когда в процессе расчета необходимо вычислять не только траектории каждой частицы, но и учитывать столкновения между ними. Поэтому можно предположить, что до 10 %-ой концентрации частиц ЭЛ подход представляется более подходящим для моделирования. Но после этого предела ЭЭ подход становится предпочтительным. Отметим, что так как по критерию Пиготта в расчетах принимают максимальную концентрацию шлама в кольцевом пространстве равной 5 %, то в данной работе моделирование течения смеси выполнено в рамках ЭЛ подхода. Анализ имеющихся публикаций [1–28] позволяет утверждать, что до 2017 г. достоверность результатов моделирования процессов транспорта и очистки в рамках методов вычислительной гидродинамики (ВГ) была достаточно хорошо доказана, чтобы рекомендовать их к решению задачи гидротранспорта. В частности, разные авторы, например О. Хейдари и соавт. [29], С. Саиндла и соавт. [30], изучили влияние эксцентриситета, Е. Эпелле с соавт. [31, 32], Б. Шао с соавт. [33], Ш. Гулраиз и К. Грей [34] рассматривали влияние размера и сферичности частиц, Б. Панг с соавт. [35], А. Буш с С. Йохансен [36] рассматривали влияние орбитального вращения внутренней трубы, М. Хук с соавт. [37] и М. Надери и Е. Хамечи [38] применили различные замыкания определяющих уравнений с целью уяснения особенностей влияния разных параметров задачи на гидротранспорт шлама. Эти исследования были сфокусированы на определении эффекта влияния различных параметров процесса бурения на гидротранспорт. Однако полное решение таких задач далеко от завершения, особенно в изучении вопроса оценки влияний реологических, динамических параметров смеси, геометрической конфигурации межтрубного пространства и ориентации ствола скважины на скорость накопления шлама. Решение этой задачи до сих пор отсутствует, хотя имеет большое практическое значение. В силу сказанного, в настоящей работе поставлена *цель*: провести численное моделирование в рамках методов вычислительной гидродинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD) развивающего-

ся по времени и пространству процесса накопления шлама во внутренних системах с эксцентричным неподвижным ядром (трубах, каналах) при различных условиях течения буровых растворов типа Гершеля–Балкли, отличающихся произвольным изменением их реологических свойств; уяснить особенности накопления шлама в практических режимах бурения, а также определить интенсивность засорения и моменты времени для очистки скважин.

Постановка задачи о гидродинамике смеси в горизонтально-наклонной скважине

Физические допущения

При построении численного решения задачи о течении реологически сложной вязкой смеси бурового раствора с твердыми частицами пробуренной породы в скважине с произвольной образующей ее ствола и эксцентрично расположенной бурильной трубой в рамках методов CFD ANSYS в настоящей работе приняты физические положения, упрощающие формулировку математической модели реального процесса гидротранспорта. Так, пренебрегая отдельными осложняющими процесс течения эффектами, которые не оказывают определяющего влияния на точность и качество анализируемого процесса, можно предположить, что результаты численного моделирования процесса бурения составят руководящие принципы инженерам для оптимизации технологического процесса бурения и интенсификации очистки горизонтальных участков скважины. Суть указанных допущений в следующем.

1. Монодисперсные частицы твердой фазы имеют сферическую форму. Важно отметить, что в условиях реального процесса бурения невозможно предсказать точный размер и форму частиц шлама, так как эти параметры определяются не только свойствами долота, но и особенностями структуры и свойств породы, а также временем пребывания частиц шлама в кольцевом пространстве скважины. В выраженных конвективно-диффузионных внутри- и межфазных взаимодействиях частиц смеси процессы деформации в растворе вызывают деструкцию частиц и способствуют формированию их сферической формы. Кроме того, известно, согласно данным Э. Эпелле [31, 32], что при несферичности частиц коэффициент лобового сопротивления зависит от ориентации частиц относительно течения. Также следует учитывать, что в реальном процессе монодисперсная среда из сферических частиц имеет наихудшие условия для гидротранспорта. Все это указывает, что в действительности время пребывания и процент оставшихся частиц в скважине будет меньше, чем может ожидаться в модельных прогнозах.
2. Муфты и замки между элементами бурильной колонны не рассматриваются в геометрической конфигурации области течения смеси. Это связано с тем, что муфты достаточно разнообразны по своим геометрическим параметрам и их моделирование сильно снижает возможность обобщений результатов расчета. Более того, включение их в

формулировку краевой задачи связано с известными дополнительными затратами на реализацию алгоритма интегрирования определяющих уравнений математической модели и построения их численного решения. Поэтому большинство исследователей в своих подходах при моделировании не включали их в анализ. Стоит отметить (например, Х. Джу [24]), что в процессе бурения шлам интенсивно накапливается и локализуется именно в областях рядом с муфтами. Так как представленное исследование ориентировано на уяснение эффекта влияния реологических и технических параметров на интенсивность очистки, присутствием муфт пренебрегается. Хотя при практическом применении результатов следует учитывать негативную роль муфт на гидротранспорт шлама.

3. Предполагается, что процесс течения смеси изотермический. Хорошо известно, что изменение поля температуры влияет на морфологию буровых растворов (например, Н. Маковой [39]) и особенности, значение, масштаб влияния теплообмена на очистку до сих пор изучается (см., например, С.Н. Амзин [40]). Несмотря на это, оценка влияния неизотермичности через изменение реологических свойств раствора в общем виде достаточно проблематична и усложняет задачу тепло- и массопереноса в гетерогенной смеси. Все это требует использования сопряженных методов тепло- и массообмена, статистического подхода к точному описанию процессов в открытой термодинамической системе (например, смесей с составом раствора, шлама, породы и элементов технологического оборудования), а также учета особенностей режимов течения и продолжительности бурения. Поэтому инженерам первоначально рекомендуется провести анализ с целью определения влияния изменений реологических свойств раствора на структуру течения в локальных зонах межтрубного пространства, например в донной части скважины, при интересующих их режимах или условиях. И затем по этой информации следует провести прогноз гидротранспорта и определить эффективность очистки особых областей скважины.
4. Шлам не меняет свойства раствора. Известно, что глинистые пробуренные частицы могут реагировать с водой бурового раствора и влиять на его свойства. Инженеры пытаются уменьшить данный эффект. Однако Э. Каю [41] уже показал, что влияние больших частиц песка при низких концентрациях на свойства растворов ГБ незначительно. Учитывая сказанное в данном исследовании этими эффектами пренебрегается.
5. Разрушение стенок скважины не рассматривается. Важно отметить, что в процессе бурения скважин целесообразен учет эффектов, вызванных изменением локальных геологических напряжений, механических свойств прилегающих пород, корки и амплитуды шоков, а также наличием вибрации самого бурового процесса. В таких условиях часть

стенок скважин постоянно разрушается и шлам оттуда попадает в кольцевое пространство. Так как масштаб этого процесса зависит от многих факторов, обобщение его при моделировании невозможно и поэтому в данной работе не рассматривается. Тем не менее следует иметь в виду, что результаты моделирования, скорее всего, будут преуменьшать итоговое значение концентрации шлама из-за этого допущения.

6. Столкновениями между частиц пренебрегается. Когда концентрация частиц превышает 10 % по объёмной доле, эти процессы становятся значительными. В таких условиях при построении численного решения целесообразно обращение к более сложным подходам и моделям (например, к модели ЭЭ KTGF или модели ЭЛ DEM, согласно, М. Межерихер с соавт. [42]). Заметим, в данной работе во всех случаях концентрация твёрдой фазы в канале была меньше 5 %, поэтому в расчетах принят более простой ЭЛ DPM подход (Discrete Particle Method).
7. Внешними силами, кроме сил гравитации, плавучести, градиента давления и сопротивления, оказывающими влияние на гидродинамику и массоперенос в вязкой смеси, пренебрегается. Заметим, что сила Саффмана (например, по данным [43]) считается важной при моделировании движения частиц с размером порядка микрона и меньше в режимах при низких числах Рейнольдса частицы. Броуновская сила также считается малой и приобретает значение в процессах, когда частицы имеют размер меньше микрона [44]. Также сила, обусловленная эффектом присоединенных масс, становится значительной, когда плотность раствора больше плотности частиц. Так как в рассматриваемом исследовании анализируется течение раствора с частицами диаметром 6 мм и плотностью в 2,5 раза больше плотности раствора, то принимается, что влиянием этих сил можно пренебречь.

Математическая модель

В данном исследовании гидродинамика двухфазной смеси капельной жидкости с твердыми частицами описывается в рамках ЭЛ подхода, реализованного в ПК ANSYS для связанной CFD-DEM модели, при котором течение жидкой фазы (как сплошной среды) предсказывается динамическими уравнениями Навье–Стокса, а течение твердых частиц (как дискретной фазы) моделируется на основе ньютоновского закона движения. При этом межфазные эффекты учитываются в соответствующих балансовых уравнениях законов сохранений массы, а также импульса для жидкости и твердых частиц слагаемыми, представляющими собой внешние силы, ответственные за конкретные физические механизмы межфазного взаимодействия. Указанные уравнения математической модели составляют дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка, которые в рамках представленных выше допущений имеют следующий вид [45–47].

Уравнение закона сохранения массы жидкой фазы (1):

$$\frac{\partial(\alpha\rho_f)}{\partial t} + \nabla(\alpha\rho_f\vec{v}_f) = 0. \quad (1)$$

Уравнение закона сохранения импульса жидкой фазы (2):

$$\frac{\partial(\alpha\rho_f\vec{v}_f)}{\partial t} + \nabla(\alpha\rho_f\vec{v}_f\vec{v}_f) = -\alpha\nabla p + \nabla\alpha\bar{\tau}^\Sigma - \bar{S}_f + \alpha\rho_f\vec{g}. \quad (2)$$

Здесь α – объёмная доля жидкой фазы; $\bar{S}_f = \sum_{i=1}^2 \frac{\bar{F}_{f,i}}{V}$ – источниковый член, включающий действие сил плавучести и сопротивления ($\sum_{i=1}^2 \bar{F}_{f,i} = \bar{F}_a + \bar{F}_D$, $\bar{F}_a = -\frac{1}{6}\pi d^3 \rho_f \vec{g}$).

Отметим, что в настоящем исследовании определение морфологических свойств вязкой среды выполняется с применением кинетической теории, предложенной к описанию гранулярного многофазного течения в рамках ПО ANSYS CFD. В частности принято, что в рамках RANS-подхода статистической теории турбулентности [48, 49] тензор эффективных напряжений в течениях смеси ($\bar{\tau}^\Sigma$) с ламинарным (l) и турбулентным (t) процессами переноса импульса жидкой фазы описывается в виде $\bar{\tau}^\Sigma = \bar{\tau}_l + \bar{\tau}_t$, где обозначено, что тензор вязких напряжений в условиях ламинарного течения ($\bar{\tau}_l$) есть (3):

$$\bar{\tau}_l = 2\mu \left[\bar{S} - \frac{1}{3}(\nabla \cdot \vec{v}_f)\bar{I} \right], \quad (3)$$

а соответствующий тензор при турбулентном течении ($\bar{\tau}_t$) имеет вид (4):

$$\bar{\tau}_t = 2\mu_t \left[\bar{S} - \frac{1}{3}k \cdot \bar{I} \right], \quad (4)$$

где $k = \frac{\bar{\rho}_f \overline{u'_i u'_i}}{2}$, $i = \overline{1,3}$ – кинетическая энергия (k) турбулентности пульсационного движения; $\bar{S} = \frac{1}{2}[\nabla\vec{v}_f + (\nabla\vec{v}_f)^T]$ – тензор скоростей деформаций жидкой фазы соответственно.

Причем динамическая вязкость (μ) для неньютоновской жидкости типа Гершеля–Балкли [50] определяется связью (5):

$$\begin{cases} \mu = \mu_{\text{пред}}, & \dot{S} < \frac{\tau_0}{\mu_{\text{пред}}} \\ \mu = \frac{\tau_0 + \kappa[\dot{S}^n - (\tau_0 / \mu_{\text{пред}})^n]}{\dot{S}}, & \dot{S} \geq \frac{\tau_0}{\mu_{\text{пред}}} \end{cases} \quad (5)$$

Кроме того, при формулировке вязкости в виде скалярной функции от тензора скоростей деформаций (\bar{S}) учитывается, что в смеси со свойствами несжимаемого течения имеет место $\mu = \mu(I_2)$, где $I_2 = (\bar{S}; \bar{S}) = \sum_{i,j=1}^3 \dot{S}_{ij} \dot{S}_{ji}$ – второй инвариант тензора деформаций. Это позволяет представить эффективную

вязкость неньютоновской среды в виде функций $\mu = \mu(\overline{S}; \overline{S})$ или $\mu = \mu(\overline{\tau}; \overline{\tau})$. В силу сказанного в (5) принято $\dot{S} = \sqrt{0,5(\overline{S}; \overline{S})}$, $\tau_0^2 = 0,5(\overline{\tau}; \overline{\tau})$.

Турбулентные характеристики смесового течения (μ_t) определяются по однофазной версии двухпараметрической $k\omega$ -SST модели сдвиговых напряжений RANS-подхода, представленной в работах Ф. Ментера [51, 52], которые связывают тензор турбулентных напряжений ($\overline{\tau}_t$) с компонентами тензора скоростей (\overline{S}) осредненного движения в виде (4). Заметим, что выбор указанной модели обусловлен необходимостью корректного расчета течений в широком диапазоне условий течения турбулентного потока, особенно в низкорейнольдсовых зонах межтрубного пространства, и устойчивостью численного решения в областях межфазного взаимодействия частиц смеси. Расчетами установлено, что по этим факторам $k\omega$ -SST модель имеет преимущества перед стандартными версиями $k\epsilon$, $k\omega$ -моделями, отдельный вид которых следующий (6)–(13) [48, 51–54]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i \omega)}{\partial x_i} = \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \\ + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь обозначено

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left[\max \left(\frac{k^{0.5}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right]^4 \right\}, \quad (8)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right), \quad (9)$$

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, SF_2)},$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \left[\max \left(\frac{k^{0.5}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right\}, \quad (10)$$

$$P_k = \mu_t \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \rightarrow \tilde{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta^* \rho k \omega), \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \beta^* = 0,09, \quad \alpha_1 = 5/9, \quad \alpha_2 = 0,44, \\ \beta_1 = 3/40, \quad \beta_2 = 0,0828, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\sigma_{k1} = 0,85, \quad \sigma_{k2} = 1, \quad \sigma_{\omega 1} = 0,5, \quad \sigma_{\omega 2} = 0,856. \quad (13)$$

Уравнение движения твердых частиц с учетом действия комбинации сил плавучести и тяжести, силы градиента давления и силы межфазного взаимодействия (сопротивления) соответствует виду (14), (15):

$$m_p \frac{\partial \vec{v}_p}{\partial t} = \vec{F}_v + \vec{F}_D + \vec{F}_{pres}, \quad (14)$$

где обозначено

$$\begin{aligned} \vec{F}_v = (\rho_p - \rho_f) \vec{g} V_p, \quad \vec{F}_{pres} = -V_p \nabla p, \\ \vec{F}_D = \frac{c_d \rho_f A_p}{2} |\vec{v}_f - \vec{v}_p| (\vec{v}_f - \vec{v}_p). \end{aligned} \quad (15)$$

Причем $A_p = \frac{\pi d_p^2}{4}$ – проекция площади частиц; $V_p = \frac{1}{6} \pi d_p^3$ – объем частицы; а c_d – коэффициент сопротивления, определенный по данным А. Александра и С. Морси [55] в виде (16):

$$c_d = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2}, \quad Re = \frac{\rho_f d_p |\vec{v}_f - \vec{v}_p|}{\mu_f}, \quad (16)$$

где коэффициенты a_i ($i = 1, 3$), значения которых не-универсальны относительно изменений чисел Рейнольдса, согласно данным [55], являются эмпирическими (табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты Александра и Морси
Table 1. Alexander and Morsi coefficients

Re _{min}	Re _{max}	a ₁	a ₂	a ₃
0	0,1	0	24	0
0,1	1	3,690	22,73	0,0903
1	10	1,222	29,1667	-3,8889
10	100	0,6167	46,50	-116,67
100	1000	0,3644	98,33	-2778
1000	5000	0,357	148,62	-47500
5000	10000	0,46	-490,546	578700
10000	–	0,5191	-1662,5	5416700

При построении численного решения рассматриваемой задачи используются следующие граничные условия. На входе изотермического стационарного течения дисперсной смеси в скважину (кольцевой эксцентричный канал) принимаются однородные профили фаз (известные для процесса с фиксированной загрузкой частиц) по поперечному сечению, а также, что фазы находятся в равновесии. На выходе – «мягкие» граничные условия (непрерывности течения). На стенках коаксиального пространства (внутренней и внешней трубы) выставляются следующие условия. Так, для диспергированной (несущей) фазы формулируются условия прилипания для всех осредненных и пульсационных характеристик капельной жидкости, для частиц шлама – условия проскальзывания. Для анализа процессов транспорта смеси в условиях реального режима бурения, соответствующего выработке породы при нестационарной и равномерной по времени загрузке твердых частиц, наряду с указанными условиями для развивающегося по пространству течения смеси в области входа задается соответствующий однородный по поперечному сечению профиль частиц, непрерывно поступающих в скважину.

С целью уяснения особенностей режимов течения смеси как реологически сложной среды в настоящем

исследовании принималось, что течение жидкостей типа ГБ в кольцевом пространстве при обыкновенных буровых условиях должно соответствовать ламинарному течению. Причем выбор параметров расчета подтверждался данными, сформулированными по критериальным связям, предложенными А. Буше [56], Г. Лио [57] в виде (17)–(21):

$$Re = \frac{4(2n+1)}{n} \left[\frac{7,48\rho v^{2-n} \left(\frac{d_2-d_1}{24}\right)^n}{\tau_0 \left(\frac{d_2-d_1}{24v}\right)^n + 0,0021k \left(\frac{2(2n+1)}{nc_a}\right)^n} \right], \quad (17)$$

$$c_a = 1 - \left(\frac{1}{n+1}\right) \times \frac{\tau_0}{\tau_0 + 0,0021k \left\{ \frac{0,0044q(2n+1)}{n\pi \left[\frac{d_2}{24} - \frac{d_1}{24}\right] \left[\left(\frac{d_2}{24}\right)^2 - \left(\frac{d_1}{24}\right)^2\right]} \right\}^n}, \quad (18)$$

$$Re_c = \left[\frac{8(2n+1)}{ny} \right]^{\frac{1}{1-z}}, \quad (19)$$

$$y = \frac{\log n + 3,93}{50}, \quad (20)$$

$$z = \frac{1,75 - \log n}{7}. \quad (21)$$

Здесь единицы измерений параметров отвечают системе США, т. е. v – скорость, [фут/с]; ρ – плотность [фунт/галлон]; q – дебит [галлон/мин]; k – индекс консистенции [сантипойз]; τ_0 – предел текучести [фунт/100фут²].

Особенности геометрической и гидродинамической конфигурации задачи

Исследуемая геометрия является кольцевым пространством между двумя эксцентричными трубами с диаметрами 20 и 12 см, а также их характерной длиной 10 м. Принимается, что эксцентricность канала равна 75 % (рис. 1).

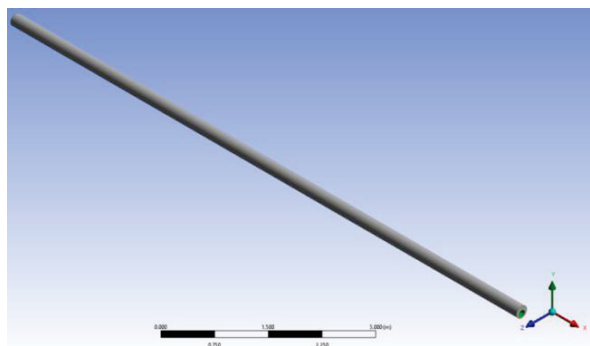


Рис. 1. Геометрия кольцевого цилиндрического канала с длиной 10 м и двух труб с диаметрами 12 и 20 мм при эксцентricности 75 %

Fig. 1. Geometry of an annular cylindrical channel with a length of 10 m and two pipes with diameters of 12 and 20 mm with an eccentricity of 75 %

Предполагается, что по этому каналу течет базовый полимерный раствор типа ГБ, приготовленный Р. Ахмедом и С. Мицка [58], с плотностью 1000 кг/м³ и реологическими параметрами, показанными в табл. 2.

Таблица 2. Реологические параметры исследуемого раствора

Table 2. Rheological parameters of the studied drilling fluids

Название раствора Fluid name	Предел текучести, Па Yield strength, Pa	Индекс консистенции, Па · с ⁿ Consistency index, Pa · s ⁿ	Индекс потока Flow index
XCD5	6,5	0,640	0,48

В качестве твёрдой фазы были использованы сферические частицы песка диаметром 6 мм и плотностью 2650 кг/м³, которые соответствуют скорости бурения с разными дебитами входящей жидкости в скважину. Диапазон исследуемых параметров показан в табл. 3.

Таблица 3. Диапазон исследуемых параметров

Table 3. Range of studied parameters

Индекс потока n /Flow index n	0,4, 0,48, 0,8
Индекс консистенции k , Па · с ⁿ Consistency index, Pa · s ⁿ	0,3, 0,64, 1,4
Предел текучести, Па/Yield strength, Pa	1, 6,5, 15
Скорость бурения, м/ч (частицы/с) Penetration rate, mph	5 (282), 10 (564), 20 (1128)

Приняты следующие граничные условия течения к построению численного решения в рамках ПО ANSYS CFD-DEM подхода. Раствор входит в канал со средней скоростью 2 м/с (velocity inlet) и на выходе давление равно нулю (pressure outlet), и поток не может возвращаться в канал (no back flow). Течение на стенках отсутствует. Кроме того, частицы также поступают в канал (с интервалом через несколько шагов по времени, в соответствии со скоростью бурения). Считается, что при взаимодействии частиц со стенками канала или после пересечения выходного сечения их траектории заканчиваются и они прекращают свое движение (Trap Boundary Condition). Заметим, что для указанных условий из (17)–(21) имеем $Re=1051$ и $Re_c=5881$, следовательно, течение является ламинарным.

Детали численного алгоритма и его верификация

Достоверность результатов моделирования оценивалась тестированием численного алгоритма, модели и метода на классе известных решений, установлении соответствия с имеющимися опытными данными, а также по информации о пригодности разностной сетки с точки зрения ее оптимальности, экономичности и эффективности к прогнозу особенностей гидротранспорта при сложном течении дисперсной смеси в трубах и каналах с эксцентричным ядром. В рамках метода вложенных сеток установлено, что оптимальной следует считать сетку, при которой точность расчета поля давления в контрольных объемах не превышала погрешности 2 %. Вид такой разностной сетки

ки иллюстрирует рис. 2. Кроме того, в литературе уже имеется ряд полуэмпирических уравнений для расчёта перепада давления в концентричном кольцевом пространстве для ньютоновских жидкостей при ламинарном и турбулентном режимах. Поэтому в работе использовался подход к тестированию алгоритма и сетки на течениях в концентричных кольцевых трубах, затем выполнялись расчеты течений в эксцентричных внутренних системах и устанавливалось соответствие расчетов с имеющимися (точными и опосредованными) экспериментальными данными. Принималось, что перепад давления при ламинарном течении вязких гомогенных сред в кольцевых областях можно рассчитать по соотношению (22), представленному Р. Шищенко и Б. Есьман [59]:

$$v = \frac{p}{8\mu l} \left(b^2 + a^2 + \frac{b^2 - a^2}{\ln(a/b)} \right). \quad (22)$$

Здесь a и b – радиусы внутренней и внешней труб; l – их длина; v – средняя скорость потока; p – перепад давления; μ – динамическая вязкость ньютоновского потока.

В нашем случае с концентричными трубами и водой ($V=0,01$ м/с, $l=10$ м, $b=0,1$ м, $a=0,06$ м, $\mu=0,001003$ кг/мс, $Re=800$) ожидаемый перепад давления составил величину 0,7490 Па.

Другое соотношение (23), представленное Б. Гуо [60], даёт похожие результаты:

$$p = \frac{\mu v l}{0,0209(b-a)^2}. \quad (23)$$

Здесь перепад давления равен 0,7498 Па. Видно, что по (22), (23) результаты довольно близки. Также в табл. 4. приведены результаты моделирования перепада давления на сетках различного размера при ламинарном течении ($Re=800$).

Таблица 4. Данные перепада давления при разных расширениях расчётной сетки

Table 4. Pressure drop at different grid sizes

Расширение (r*θ*z) Resolution (r*θ*z)	Перепад давления Pressure drop	% отличия от % of variation from	
		(22)	(23)
40*40*200	0,7880606	5,2	5,1
40*40*300	0,7878114	5,2	5,06
50*40*200	0,7884978	5,3	5,15
40*50*200	0,7865344	5	4,89
40*60*100	0,7861123	5	4,84
40*60*50	0,7864677	5	4,88
50*60*50	0,7869135	5,1	4,94

Представленные сведения позволяют считать разностную сетку с расширением 50*60*50, имеющую 137500 ячеек, оптимальной (рис. 2).

Стоит отметить, что для ламинарного течения жидкостей типа ГБ таких аналитических соотношений довольно мало, но есть эмпирические связи, например, приведенные в работах Б. Гуо [60], которые сформулированы для системы единиц США типа (24): v – скорость [фут/с]; ρ – плотность [фунт/галлон]; q – дебит [галлон/мин]; k – индекс консистенции

[сантипуаз]; τ_0 – предел текучести [фунт/100 фут²] и Δl – длина канала [фут]:

$$\Delta p = \frac{4k}{14400(d_2 - d_1)} \times \left\{ \frac{\tau_0}{k} + \left[\left(\frac{16(2n+1)}{nc_a(d_2 - d_1)} \right) \left(\frac{q}{\pi(d_2^2 - d_1^2)} \right) \right]^n \right\} \Delta l. \quad (24)$$

Причем константа c_a в (24) определяется по связи (18). Так, наши расчеты на указанной сетке показывают, что перепад давления равен 19316 Па/м, а по соотношениям (24) – $\Delta p=17818$ Па/м, т. е. разница между данными настоящего моделирования и указанными связями составляет 8,41 %.

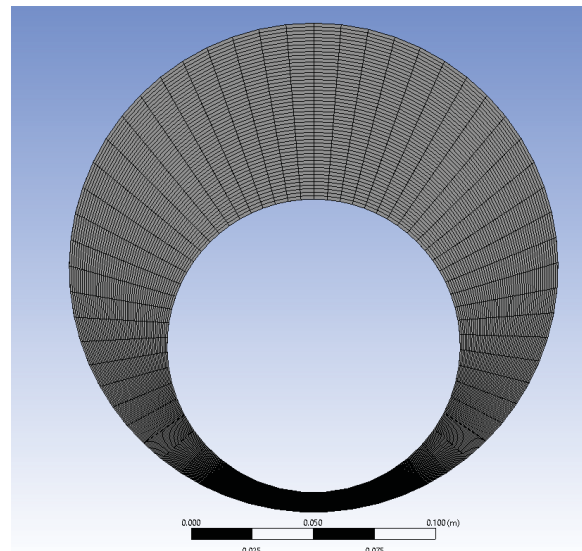


Рис. 2. Разностная сетка с расширением 50*60*50, включающая 137500 ячеек для расчета гидротранспорта в эксцентричной трубе

Fig. 2. Grid with a resolution of 50*60*50, including 137500 cells, for the calculation of cutting transportation in an eccentric pipe

К сожалению, эксцентричность влияет на перепад давления по-разному при различных значениях параметров, характеризующих величину отношения диаметров труб, реологических свойств и скоростях потока на входе в скважину (например, М. Хаджиисламоглу [61]). Кроме того, экспериментальных данных, отражающих моделируемые сценарии, также не было найдено. Но чтобы убедиться в корректности алгоритма решения привлекались экспериментальные данные из [58], которые соответствуют жидкости с параметрами: предел текучести – 3,7 Па; индекс консистенции – 0,425 Па·сⁿ; индекс потока – 0,645. Такое течение происходит в канале с геометрией: длина – 3,658 м; диаметры трубы – 35,05 и 17,15 мм; эксцентричность – 100 %. После моделирования этого сценария (с эксцентричностью 95 %) были получены результаты, представленные на рис. 3. Эти данные свидетельствуют о пригодности выбранного алгоритма и расчётной сетки к описанию деталей гидротранспорта реологически сложной среды.

Стоит отметить, что численное решение проводится в рамках ПО ANSYS FLUENT 2021 R1 на ПК с процессором Intel(R) Core (TM) i7-10750H CPU 2,59 ГГц, 16 ГБ оперативной памяти по алгоритму Hard Coupling, который соответствует выполнению следующих блоков расчета гидродинамики гетерогенной среды в процедуре установления численного решения с шагом по времени $\Delta t_y = 10^{-3}$ с.

1. Рассчитывается изменение поля скорости потока несущей фазы по пространству (до введения дискретной фазы).
2. Вводится дискретная фаза, вычисляются траектории частиц дискретной фазы.
3. Пересчитывается поле скорости капельной жидкости с использованием замыканий межфазных процессов в обмене импульсом (теплом и массой).

4. Пересчитываются траектории частиц в модифицированном поле скорости жидкой фазы.
5. Повторяются предыдущие два шага до тех пор, пока не будет достигнута сходимость численного решения (в нашем случае погрешность вычисления локальных значений в итерационном процессе составляет меньше 10^{-4} %).
6. Осуществляется переход на следующий временной шаг, и повторяются указанные операции численного интегрирования системы определяющих уравнений математической модели.

При определении поля давления был взят алгоритм PISO [62] вместо алгоритма SIMPLE [63]. Предварительные расчеты показывают, что оба алгоритма дают почти одинаковые результаты, но при PISO значительно быстрее достигается сходимость численного решения при использовании неортогональных расчетных сеток.

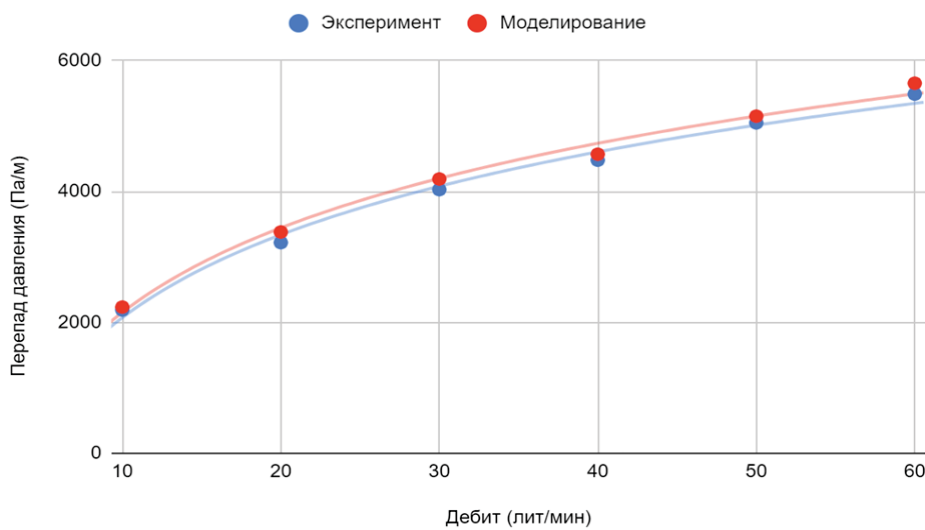


Рис. 3. Распределения перепада давления в зависимости от дебита. Сравнение экспериментальных результатов [58] с данными настоящего моделирования

Fig. 3. Distributions of differential pressure depending on production rate. Comparison of experimental results [58] with the data of the present simulation

Результаты и их обсуждение

Течение жидкостей ГВ в эксцентричном канале сопровождается двумя важными эффектами, уже известными из ранних работ (например, Е.В. Подрябинкин [64]). Эти два эффекта иллюстрируют данные, представленные на рис. 4. Из него видно, что с увеличением эксцентricности скорость потока в нижней части поперечного сечения межтрубного пространства уменьшается почти до нуля. Более того, в средней части поперечного сечения межтрубного пространства, удаленной от действия стенок, существуют сравнительно низкие скорости деформаций, что определяет зону высокой вязкости потока (рис. 4, картины слева). Подчеркнем, что комбинация этих эффектов определяет эффективность гидротранспорта: частицы твердой фазы, поступающие в зону высокой вязкости, продолжают двигаться по линиям тока частиц капельной жидкости, в то время как другие частицы шлама, попадая в донную область поперечного сечения трубы, теряют способность к переносу, осаждаются и образуют постепенно возрастающую в

размерах шламовую постель. Это следует из формулировки числа Стокса ($Stk = \tau_{pb} / \tau_{гд}$), представляющего собой отношение времени динамической релаксации частиц ($\tau_{pb} = (\rho_p^0 d_p^0) / (18\mu_f)$) к характерному гидродинамическому времени процесса ($\tau_{гд} = L / U_b$). Так, если $Stk \ll 1$, то имеет место динамически равновесное течение дисперсной среды. В этом случае частицы фаз имеют очень близкие значения скоростей и вся смесь движется по законам однофазной жидкости с эффективными свойствами, определяемыми морфологией неньютоновской жидкости по линиям тока частиц жидкой фазы. Но при $Stk \gg 1$ формируются условия течения, при которых частицы дисперсной фазы слабо реагируют на изменения динамики частиц жидкости, они следуют по своим индивидуальным траекториям и осаждаются от совокупного на них действия внешних сил и сил межфазного взаимодействия. В частности, из формулировки Stk следует, что в областях повышенной вязкости время релаксации будет меньше и, соответственно, число Стокса будет невелико. Причем, если его значение оказывается меньше

единицы, возникают признаки однофазного потока. Данные на рис. 5 демонстрируют пространственные особенности эволюции динамической структуры частиц в эксцентричной трубе. Следует отметить, что расчеты выполнены при течении жидкости XCD5 со средней скоростью в области входа, равной 2 м/с, и отвечают его состоянию на момент времени 240 с. Условия течения соответствуют сценарию развивающегося по пространству течения смеси с нестационарной

однородной по поперечному сечению межтрубного эксцентричного пространства загрузки частиц в области входа. Из рис. 5 видно, что частицы твердой фазы (показаны точками с характерным цветом, подчеркивающим скорость их движения) двигаются либо по зоне высокой вязкости, либо осаждаются в донной области трубы и там накапливаются (осевая скорость таких частиц мала, на что указывает синий цвет шкалы данных расчета).

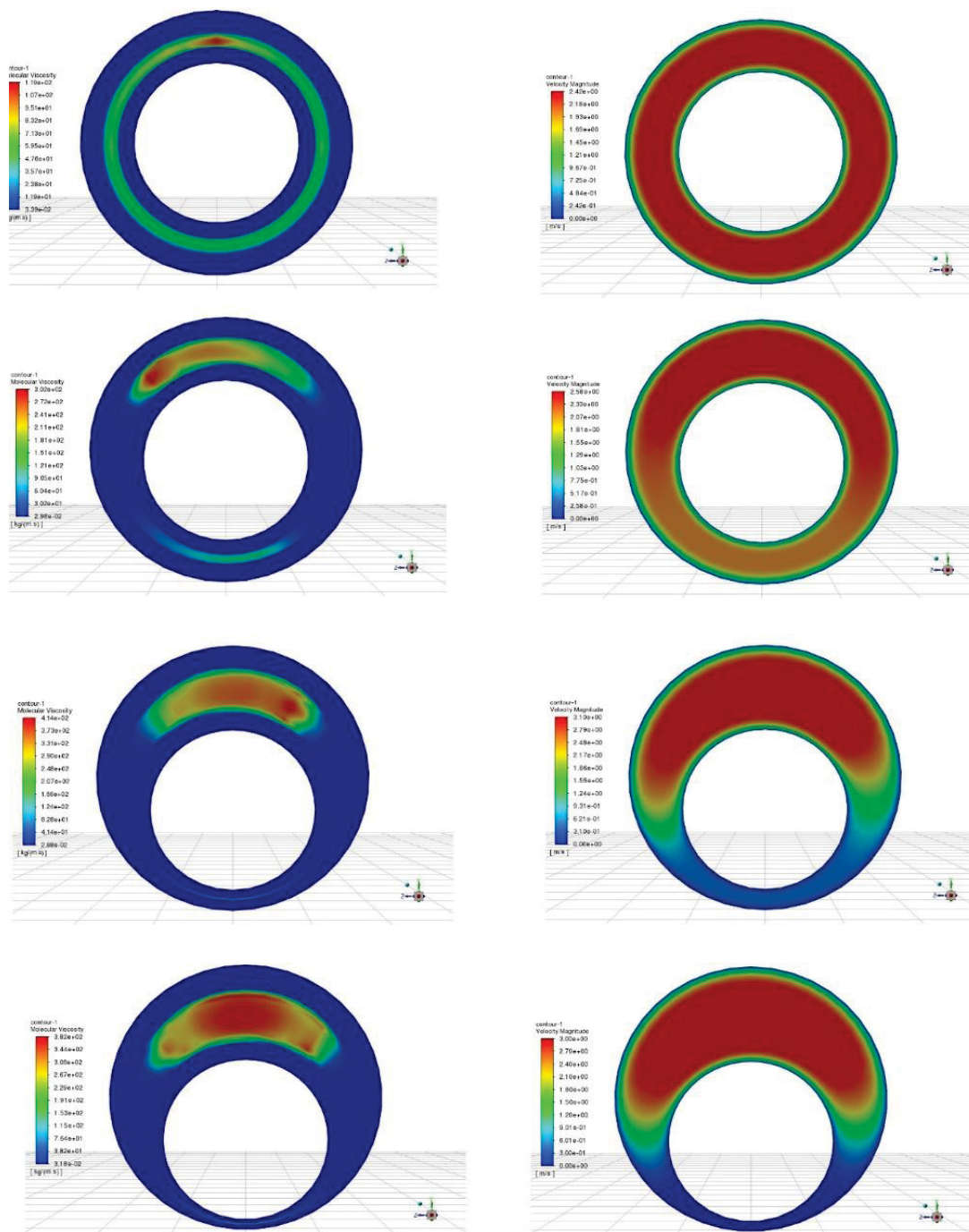


Рис. 4. Картины радиальных распределений эффективной вязкости (слева) и осевой компоненты вектора скорости потока (справа) в выходном сечении трубы при различных значениях эксцентricности (0, 20, 60 и 80 %). Расчеты отвечают течению жидкостью XCD5 со средней скоростью во входном сечении, равной 2 м/с

Fig. 4. Pictures of radial distributions of the effective viscosity (left) and the axial component of the flow velocity vector (right) in the outlet section of the pipe at various values of eccentricity (0, 20, 60 and 80 %). The calculations correspond to the XCD5 fluid flow with an average velocity in the inlet section equal to 2 m/s

Также из результатов расчета следует, что, во-первых, нельзя полностью очистить канал только гидродинамическим способом, т. к. в любом случае будут частицы, которые попадают в донную область канала, где отсутствует течение. Во-вторых, ширина зоны высокой вязкости определяет процент частиц, которые способны к транспортировке по длине трубы. Такие частицы могут выноситься потоком из межтрубного пространства скважины в процессе гидротранспорта. Это факт подчеркивает эффективность гидродинамической очистки. Как показано в [65–67], следствием изменений реологических параметров несущей жидкости, формирующих размеры зоны высокой вязкости, выступают эффекты, представленные в табл. 5.

Учитывая это, авторы рекомендуют для гидротранспорта жидкости с малыми значениями индексов консистенции и потока, т. к. они улучшают перенос

частиц и одновременно уменьшают перепад давления. Результаты расчетов, представленные рис. 6–8, иллюстрируют эти особенности.

Таблица 5. Влияние реологических параметров на гидротранспорт

Table 5. Effect of rheological parameters on cuttings transport

Параметр Parameter	Эффект на ширину зоны высокой вязкости Effect on the width of hi-vis zone	Эффект на перепад давления Effect on pressure drop
Предел текучести (Yield strength)	Прямой (direct)	Прямой (direct)
Индекс консистенции (Consistency index)	Обратный (opposite)	Прямой (direct)
Индекс потока (Flow index)	Обратный (opposite)	Прямой (direct)

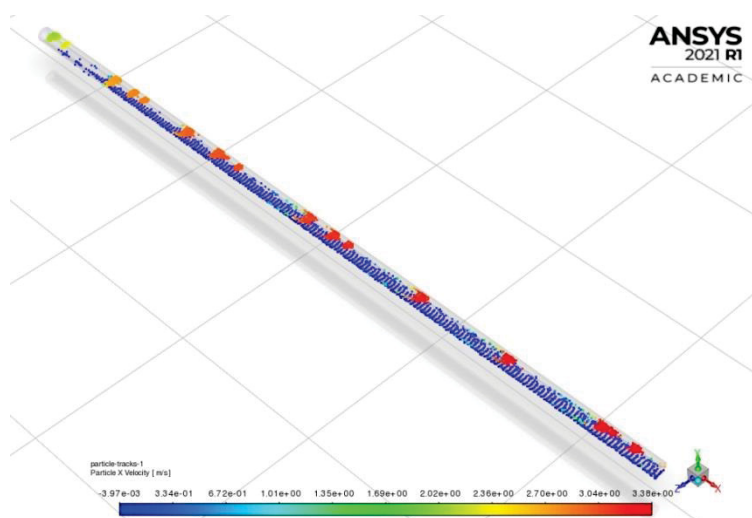


Рис. 5. Распределения осевой компоненты вектора скорости частиц твердой фазы при течении в кольцевой эксцентричной трубе

Fig. 5. Distribution of the axial component of the particle velocity vector of the solid phase during flow in an annular eccentric pipe

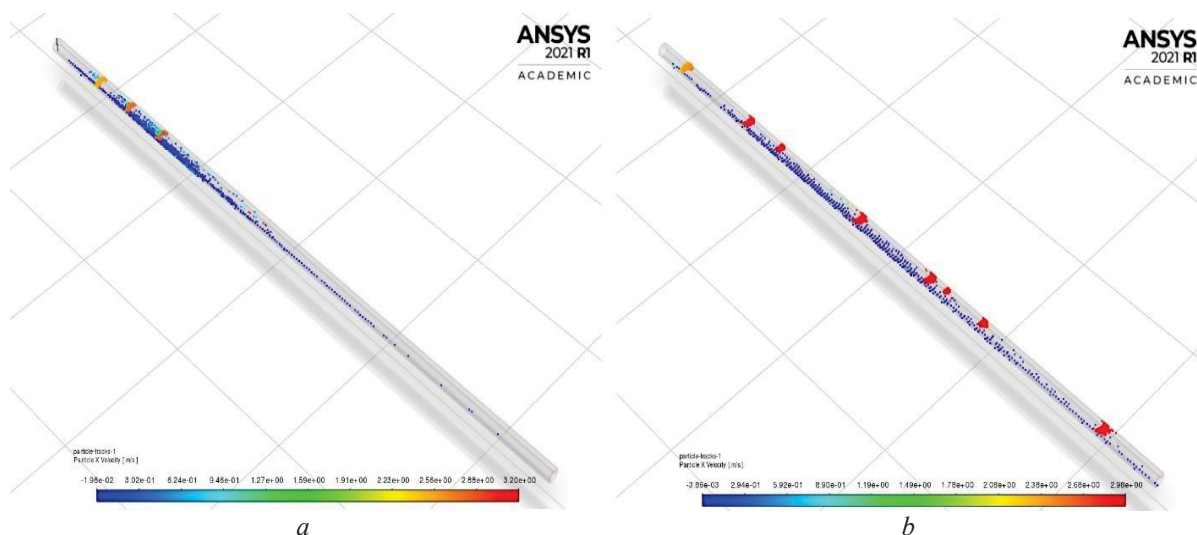


Рис. 6. Картины изменений осевой компоненты вектора скорости частиц твердой фазы при различных значениях предела текучести жидкости: а) $\tau_0=1$ Па; б) $\tau_0=15$ Па, после 100 с/20 циклов течения. Расчеты выполнены при течении жидкости XCD-5 в трубе с параметрами: скорость входа – 2 м/с; длина канала – 10 м; диаметр труб – 20 и 12 см; эксцентricность – 75 %

Fig. 6. Patterns of changes in the axial component of the particle velocity vector of the solid phase at different values of the liquid yield strength а) $\tau_0=1$ Pa; б) $\tau_0=15$ Pa, after 100 s/20 flow cycles. Calculations were performed with XCD-5 fluid flow in a pipe with the following parameters: entry speed – 2 m/s; channel length – 10 m; pipe diameter – 20 and 12 cm; eccentricity – 75 %

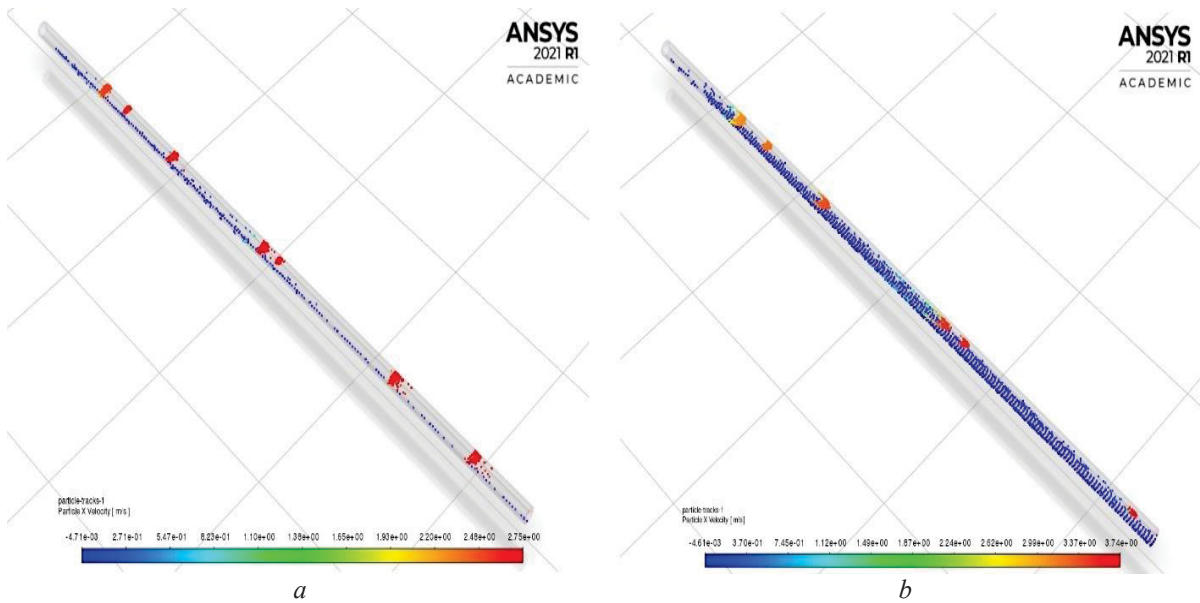


Рис. 7. Картины изменений осевой компоненты вектора скорости частиц твердой фазы при различных значениях индекса консистенции жидкости: а) $k=0,3 \text{ Па}\cdot\text{с}^n$; б) $k=1,4 \text{ Па}\cdot\text{с}^n$, после 100 с/20 циклов течения. Расчеты соответствуют условиям, указанным на рис. 6

Fig. 7. Patterns of change in the axial component of the particle velocity vector of the solid phase at different values of the liquid consistency index: а) $k=0,3 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$; б) $k=1,4 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$, after 100 s/20 flow cycles. The calculations correspond to the conditions indicated in Fig. 6

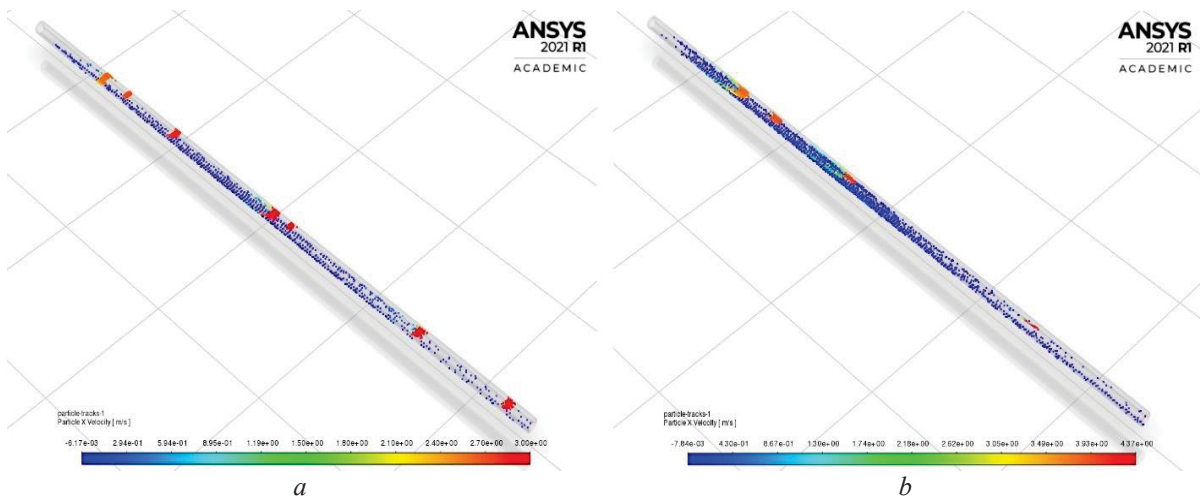


Рис. 8. Картины изменений осевой компоненты вектора скорости частиц твердой фазы при различных значениях индекса потока: а) $n=0,4$; б) $n=0,8$. Расчеты соответствуют условиям, указанным на рис. 6.

Fig. 8. Patterns of change in the axial component of the particle velocity vector of the solid phase at different values of the flux index: а) $n=0,4$; б) $n=0,8$. The calculations correspond to the conditions indicated in Fig. 6.

Расчеты показывают, что остановить процесс накопления шлама в скважине в условиях отсутствия вращения бурильной трубы только гидродинамическим способом маловероятно, т. к. динамика потока сопровождается постоянным ростом числа осаждаемых частиц в кольцевом пространстве со временем. Данные рис. 9 иллюстрируют особенности такого процесса при различных скоростях бурения.

Рис. 10–12 показывают влияние реологических параметров на скорость накопления шлама. Как отмечалось выше, расчетами установлено, что с повышением предела текучести и уменьшением индексов потока и консистенции наблюдается уменьшение скоро-

сти накопления шлама (интенсификация очистки скважин процессом гидротранспорта).

В качестве практических рекомендаций по применению результатов моделирования к прогнозу процесса бурения полезно учитывать следующие выводы. Так, расчеты демонстрируют, что течение само по себе не способно полностью очистить скважину. В таких условиях естественно возникает момент времени, когда масса пробуренного шлама становится несколько значительной в скважине, что может причинить технические проблемы при бурении. Согласно критерию Р. Пиготта [1], эту максимальную концентрацию определяют величиной в 5 % объема канала, после чего рекомендуется приостановить

бурение и провести механическую очистку (шаблонировку). Как уже сказано, этот процесс нецелесообразен в силу материальных затрат, поэтому оптимизация частоты его проведения способствует экономическому улучшению процесса бурения. Настоящие расчеты процесса очистки демонстрируют практическую значимость представленной методологии в том смысле, что, выбирая го-

ризонтальный участок скважины, например, длиной порядка одного километра, по данным расчета (табл. 6) можно спрогнозировать продолжительность бурения до момента, когда концентрация шлама в кольцевом пространстве не достигает 5 % при разных значениях реологических параметров бурового раствора с одной скоростью бурения (например, 10 м/ч).

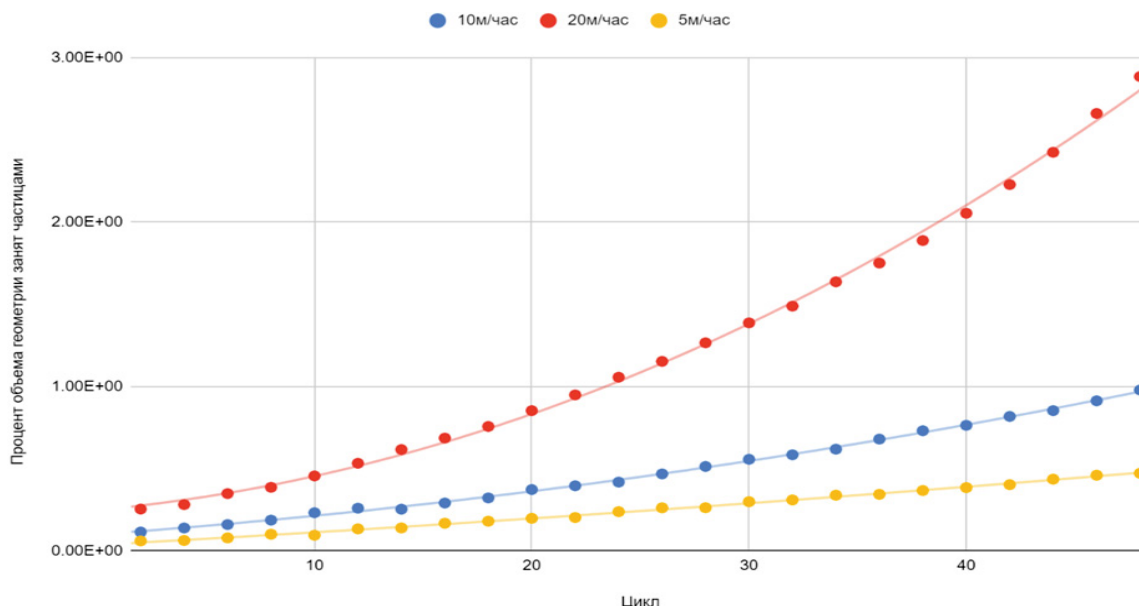


Рис. 9. Линии распределений накопления частиц твёрдой фазы в зависимости от времени при различных скоростях (5, 10, 20 м/ч). Расчеты выполнены в условиях: жидкость XCD-5; средняя скорость на входе – 2 м/с; длина трубы – 10 м; эксцентricность – 75 %

Fig. 9. Plots of accumulation of solid phase particles depending on time at different penetration rates (5, 10, 20 m/h). The calculations were performed under the following conditions: liquid XCD-5; average speed at the entrance – 2 m/s; pipe length – 10 m; eccentricity – 75 %

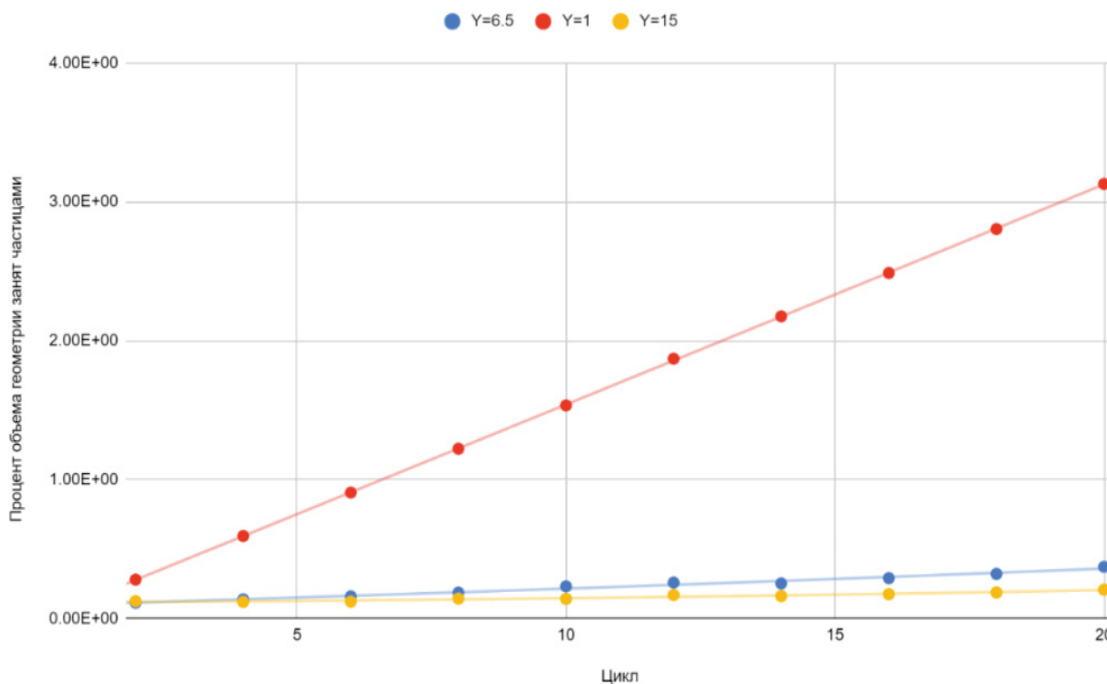


Рис. 10. Линии распределений накопления шлама в зависимости от времени при разных значениях предела текучести (обозначен Y, Па). Расчеты отвечают условиям, представленным на рис. 6

Fig. 10. Plots of cuttings accumulation depending on time at different values of the yield strength (indicated by Y, Pa). The calculations correspond to the conditions presented in Fig. 6

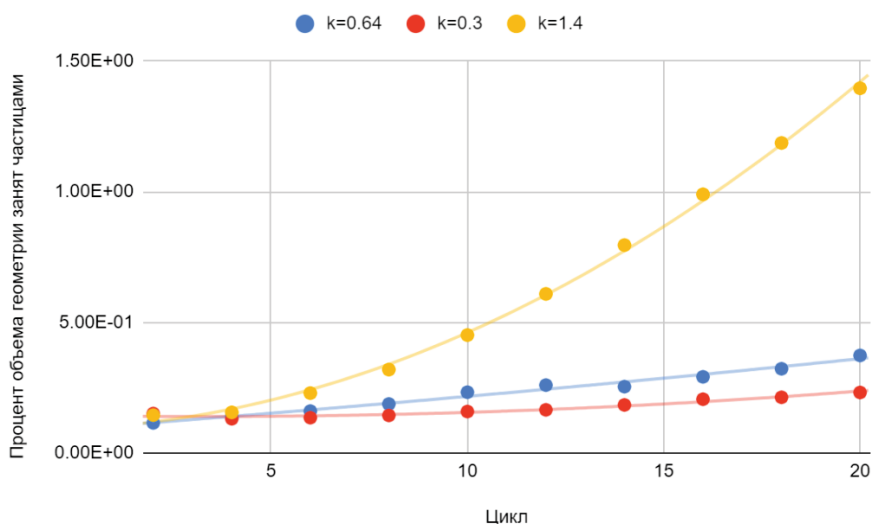


Рис. 11. Линии распределений накопления шлама в зависимости от времени при разных значениях индекса консистенции k . Расчеты отвечают условиям, представленным на рис. 6

Fig. 11. Plots of cuttings accumulation depending on time for different values of the consistency index k . The calculations correspond to the conditions presented in Fig. 6

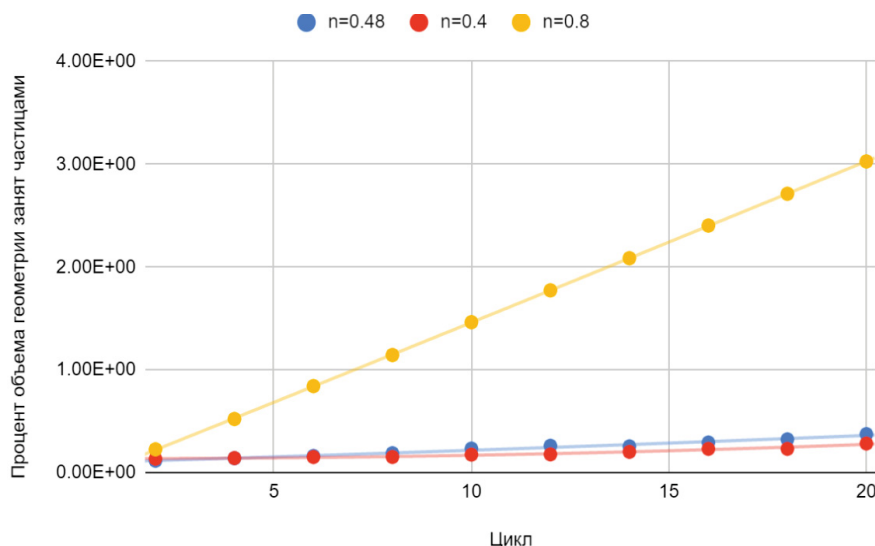


Рис. 12. Линии распределений накопления шлама в зависимости от времени при разных значениях индекса потока n . Расчеты отвечают условиям, представленным на рис. 6

Fig. 12. Plots of cuttings accumulation depending on time for different values of the flow index n . The calculations correspond to the conditions presented in Fig. 6

Таблица 6. Пример расчёта продолжительности бурения (скорость прохода – 10 м/ч, длина горизонтального участка – 1000 м и средняя скорость потока на входе – 2 м/с)

Table 6. Example of drilling duration calculation (penetration rate is 10 m/h, horizontal section length is 1000 m and average inlet flow rate is 2 m/s)

Передел текучести, Па Yield strength, Pa	Индекс консистенции, Па·с ⁿ Consistency index, Pa·s ⁿ	Индекс потока Flow Index	Продолжительность бурения, м Drilling duration, m
6,50	0,640	0,48	194
1	0,640	0,48	43
15	0,640	0,48	251
6,5	0,03	0,48	169
6,5	1,4	0,48	55
6,50	0,640	0,4	160
6,50	0,640	0,8	45

Подобные таблицы позволят инженерам рекомендовать эффективные частоты шаблонировки при разных условиях. Наряду с этим следует отметить, что таблицы типа табл. 6 являются результатами моделирования с физическими допущениями, представленными выше. Поэтому на практике отклонение от их результатов вполне возможно. Однако указанные таблицы являются полезными на стадиях разработки скважин, где ещё нет практических данных, и могут представлять исходную линию, которую далее в процессе бурения можно оптимизировать.

Последним рассмотренным нами вопросом является вопрос о влиянии частиц на перепад поля давления. Для этого результаты моделирования сравнивались с результатами однофазного течения. Некоторые данные такого анализа приведены в табл. 7.

Таблица 7. Влияние частиц на перепад давления

Table 7. Effect of particles on pressure drop

Жидкость Fluid	Объёмная доля частиц Particles volume concentration, %	Перепад давления относительно случая однородного потока без частиц Pressure drop compared to that of a particle free flow, %
XCD-5	2,88	99,2
$\tau_0=1$	3,75	99,3
$\tau_0=15$	0,21	94,3
$K=0,3$	0,23	90,3
$K=1,4$	1,4	97,2
$n=0,4$	0,28	95,5
$n=0,8$	3,03	99,1

Из этих данных видно, что при течениях с небольшими значениями объёмной доли частиц (меньше 5 %), характерных для практических условий бурения, присутствие частиц может влиять на перепад давления с точностью меньше 10 % (в большинстве случаев меньше 5 %). Учитывая, что при бурении существует ряд других параметров, которые гораздо значительнее влияют на перепад давления (например, изменения диаметра скважины, свойств бурового раствора), изменение перепада давления в результате накопления частиц, скорее всего, не будет проявляться до тех пор, пока их объёмная доля уже не достигнет опасных уровней.

Основные выводы

В настоящей работе представлены данные системного анализа и детального моделирования развивающихся по времени и пространству двухфазных течений смесей жидкостей типа ГБ с сферическими одномерными частицами. В итоге были получены следующие результаты.

1. С увеличением эксцентricности в нижней части скважины образуется некая мёртвая зона, где скорость потока очень низкая. Частицы пробуренного шлама, попадающие в эту зону, перестают двигаться и накапливаются, образуя слой шлама.
2. Главным механизмом гидротранспорта является зона высокой вязкости, и частицы, находящиеся в этой зоне, двигаются по линиям тока частиц жидкой фазы, в то время как другие частицы попадают в донную область скважины и там накапливаются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pigott R.J.S. Mud flow in drilling // *Drilling and production practice*. – New York, American Petroleum Institute, USA, 1941. – P. 91–103.
2. Williams C.E. Jr., Bruce G.H. Carrying capacity of drilling muds // *Journal of Petroleum Technology*. – 1951. – V. 3. – № 4. – P. 111–120.
3. Hopkin E.A. Factors affecting cuttings removal during rotary drilling // *Journal of Petroleum Technology*. – 1967. – V. 19. – № 6. – P. 807–814.
4. Zeidler U.H. An experimental analysis of the transport of drilled particles // *Society of Petroleum Engineers Journal*. – 1972. – V. 12. – № 1. – P. 39–48.
5. Drill cutting transport in full scale vertical annuli / T.R. Sifferman, G.M. Myers, E.L. Haden, H.A. Wahl // *Meeting of the Society of Petroleum Engineers of the American Institute of Mechanical Engineers*. – Las Vegas, Nevada, USA, January 1973. – P. 1–12.

3. Полная очистка скважины от пробуренного шлама невозможна только гидродинамическим способом. В конечном счете придётся проводить механическую очистку после определенного интервала бурения, чтобы избежать возможных технических сложностей.
4. Увеличивая ширину зоны высокой вязкости можно улучшать процесс гидротранспорта и уменьшать частоту механической очистки.
5. Операции уменьшения индексов потока и консистенции, а также увеличения предела текучести способствуют росту размеров зоны высокой вязкости и, следовательно, ведут к интенсификации гидротранспорта. Но рост значений предела текучести сопровождается увеличением перепада давления, поэтому целесообразно сосредоточиться в первую очередь на уменьшении индексов потока и консистенции.
6. Присутствие шлама в кольцевом пространстве влияет на перепад давления, но при небольших концентрациях это влияние мало по сравнению с влиянием других факторов (например, шум при бурении).
7. Моделирование гидродинамических процессов в условиях развивающегося по времени и пространству внутреннего течения реологически сложной вязкой среды является эффективным способом оценки скорости накопления шлама при разных условиях и, следовательно, может служить прогнозом частоты механической очистки на этапе разработки скважин. Также стоит отметить, что построенная модель эффективна в расчетах не только прямооточных, но и закрученных ламинарных и турбулентных течений смесей. В частности, при вращении бурильной трубы определение локальных свойств турбулентности стоит проводить по RSS- $k\omega/L$ модели, в которой расчет напряжений Рейнольдса проводится по соответствующим транспортным уравнениям в отличие от SST- $k\omega$ модели. Кроме того, известно [53, 54], что такие течения анизотропны, поэтому обращение к RSS модели выглядит обоснованным не только в расчетах течений гомогенных, но и гетерогенных сред в скважинах.

6. Thomas R.P., Azar J.J., Becker T.E. Drillpipe eccentricity effect on drilled cuttings behavior in vertical wellbores // *Journal of Petroleum Technology*. – 1982. – V. 34. – № 9. – P. 1929–1937.
7. Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells // *SPE Drilling Engineering*. – 1986. – V. 1. – № 4. – P. 297–308.
8. Transport of cuttings in directional wells / M. Martin, C. Georges, P. Bisson, O. Konirsch // *The SPE/IADC Drilling Conference*. – New Orleans, Louisiana, 15–18 March, 1987. – P. 1–25.
9. Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes / J.T. Ford, J.M. Peden, M.B. Oyenyin, Erhu Gao, R. Zarrough // *The SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. – New Orleans, Louisiana: Society of Petroleum Engineers, 23–26 September, 1990. – P. 1–30.
10. Peden J.M., Ford J.T., Oyenyin M.B. Comprehensive experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotation and eccentricity // *The SPE European Petroleum Conference*. – Hage, The Netherlands, 1–4 June, 1990. – P. 1–20.

11. Becker T.E., Azar J.J., Okrajni S.S. Correlations of mud rheological properties with cuttings-transport performance in directional drilling // Society of Petroleum Engineers Drilling engineering. – 1991. – V. 6. – № 1. – P. 16–24.
12. Martins A.L., Costapinto S.C. Evaluation of cuttings transport in horizontal and near horizontal wells-A dimensionless approach // SPE Latin America Petroleum Engineering Conference. – Caracas, Venezuela, 1992. – P. 1–7.
13. Critical conditions for effective sand-sized solids transport in horizontal and high-angle wells / D. Mingqin, S.Z. Miska, Mengjiao Yu, N.E. Takach, R.M. Ahmed, C.M. Zettner // SPE Drilling & Completion. – 2009. – V. 24. – № 2. – P. 229–238.
14. Gagniet A.A., Sobey I.J. Model aids cuttings transport prediction // Journal of Petroleum Technology. – 1989. – V. 41. – № 9. – P. 916–921.
15. Nguyen Desmond, Rahman S.S. A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells // SPE/IADC Asia Pacific Drilling Technology. – Kuala Lumpur, Malaysia, 1996. – P. 1–11.
16. Zou Longqing, Patel M.H., Guoyou Han. A new computer package for simulating cuttings transport and predicting hole cleaning in deviated and horizontal wells // International Oil and Gas Conference and Exhibition. – Beijing, China, 2000. – P. 1–12.
17. Simulation of transient cuttings transportation and ECD in wellbore drilling / C.S. Santos, S. Stuckenbruck, S.A.B Fontoura, A.L. Martins // Europec/EAGE Conference and Exhibition. – Rome, Italy, 2008. – P. 1–9.
18. Cho H., Shah S.N., Osisanya S.O. A three-segment hydraulic model for cuttings transport in coiled tubing horizontal and deviated drilling // Journal of Canadian Petroleum Technology. – 2002. – V. 41. – № 6. – P. 32–39.
19. Sensitivity analysis of major drilling parameters on cuttings transport during drilling highly-inclined wells / E.M. Ozbayoglu, S.Z. Miska, N. Takach, T. Reed // Petroleum science and technology. – 2009. – V. 27. – № 1. – P. 122–133.
20. 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.
21. Mishra Nekkhal. Investigation of hole cleaning parameters using computational fluid dynamics in horizontal and deviated wells. MSc thesis. – USA, 2007. – 76 p.
22. Solid-liquid hydrodynamics in a slim hole drilling annulus / Han Sang-Mok, Young-Kyu Hwang, Nam-Sub Woo, Young-Ju Kim // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2010. – V. 70. – № 3–4. – P. 308–319.
23. Mme Uduak, P. al 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.
24. Zhu Xiao-hua, Chao Sun, Hua Tong. Distribution features, transport mechanism and destruction of cuttings bed in horizontal well // Journal of Hydrodynamics. – 2013. – V. 25. – № 4. – P. 628–638.
25. Demiralp Yasin. Effects of drill-pipe whirling motion on cuttings transport performance for horizontal drilling. MSc Thesis. – USA, 2014. – 151 p.
26. Ofei Titus N., Shehab A. Alhemyari. 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. – Beijing, China, 11–12 August, 2015. – P. 1–8.
27. 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.
28. 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.
29. Heydari Omid, Eghbal Sahraei, Pål Skalle. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuli using computational fluid dynamics (CFD) // Journal of petroleum science and engineering. – 2017. – V. 156. – P. 801–813.
30. CFD modelling of observed cuttings transport in oil-based and water-based drilling fluids / S. Sneha, B. Lund, J.D. Ytrehus, A. Saasen // SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. – Hague, The Netherlands, 2017. – P. 1–12.
31. 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.
32. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: Effect of particle size polydispersity / E.I. Epelle, O. Winifred, J.A. Okolie, Wilberforce T., D.I. Gerogiorgis // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2022. – V. 208. – № 109795. – P. 1–12.
33. A study on non-spherical cuttings transport in CBM well drilling by coupled CFD-DEM / Shao Bing, Yifei Yan, Xiangzhen Yan, Zhiqian Xu // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. – 2019. – V. 13. – № 1. – P. 579–590.
34. Gulraiz Shiraz, Gray K.E. Study on the combined effect of thixotropy, particle shape, and particle size on cuttings transport in horizontal annuli // Powder Technology. – 2021. – V. 392. – P. 703–716.
35. 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.
36. Busch A., Stein T.J. Cuttings transport: on the effect of drill pipe rotation and lateral motion on the cuttings bed // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – V. 191. – № 107136. – P. 1–20.
37. Experimental study of cuttings transport with non-Newtonian fluid in an inclined well using visualization and ERT techniques / H.M. Mojammel, S. Imtiaz, S. Zendeheboudi, S. Butt, M.A. Rahman, P. Maheshwari // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. – Denver, Colorado, USA, 2020. – P. 1–15.
38. Naderi Meysam, Ehsan Khamehchi. Cutting transport efficiency prediction using probabilistic CFD and DOE techniques // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 163. – P. 58–66.
39. Маковей Н. Гидравлика бурения / пер. с рум. – М.: Недра, 1986. – 536 с.
40. Амзин С.Н. Математическое моделирование движения неньютоновских сред в каналах кольцевого сечения с учетом диссипации энергии: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 2004. – 24 с.
41. Cayeux E., Amare L. Effect of solid particle concentration on drilling fluid rheological behavior and its impact on pressure losses // SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition. – Hague, The Netherlands, 2019. – P. 1–39.
42. Mezhericher M., Tamir B., Avi L. Modeling of particle pneumatic conveying using DEM and DPM methods // Particulate Science and Technology. – 2011. – V. 29. – № 2. – P. 197–208.
43. Saffman Ph.G. The lift on a small sphere in a slow shear flow // Journal of fluid mechanics. – 1965. – V. 22. – № 2. – P. 385–400.
44. Li Amy, Goodarz Ahmadi. Dispersion and deposition of spherical particles from point sources in a turbulent channel flow // Aerosol science and technology. – 1992. – V. 16. – № 4. – P. 209–226.
45. Siamak Akhshik, Mehdi Behzad, Majid Rajabi. On the particle-particle contact effects on the hole cleaning process via a CFD-DEM model // An International Journal of Particulate Science and Technology. – 2016. – № 1. – P. 1–31.
46. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Т. 1. – 464 с.
47. FLUENT. Ansys Fluent Users Guide 13. Fluent Incorporated, ANSYS Inc. – Canonsburg, PA, USA, 2010. – 230 p.
48. Харламов С.Н., Джанхорбани 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.
49. 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.

50. Taibi H., Messelmi F. Effect of yield stress on the behavior of rigid zones during the laminar flow of Herschel–Bulkley fluid // Alexandria Engineering Journal. – 2018. – V. 57. – № 2. – P. 1109–1115.
51. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA Journal. – 1994. – V. 32. – № 8. – P. 1598–1605.
52. 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.
53. Харламов С.Н., Фатьянов Д.С. Исследование структуры турбулентного потока природного сырья в трубопроводах с секций переменного по длине поперечного сечения конфузorno-диффузорного типа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 8. – С. 53–67.
54. 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.
55. 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.
56. Busch A. On particle transport and turbulence in wellbore flows of non-Newtonian fluids –findings from cuttings transport process analysis by means of computational fluid dynamics, rheometry and dimensional analysis. PhD Diss. – Norway, 2020. – 187 p.
57. Liu Gefei. Applied well cementing engineering. – Burlington: Gulf Professional Publishing. Elsevier, 2021. – 621 p.
58. Ahmed R.M., Miska S.Z. Experimental study and modeling of yield power-law fluid flow in annuli with drillpipe rotation // IADC/SPE Drilling Conference. – 2008. – P. 1–18. DOI: 10.2118/112604-ms.
59. Шиченко Р.И., Есьман Б.И., Кондратенко П.И. Гидравлика промысловых жидкостей. – М.: Недра, 1976. – 294 с.
60. Guo Boyun, Gefei Liu. Applied drilling circulation systems: hydraulics, calculations and models. – Burlington: Gulf Professional Publishing. Elsevier, 2011. – 307 p.
61. Hacıislamoglu M. Non-Newtonian fluid flow in eccentric annuli and its application to petroleum engineering problems. PhD Diss. – USA, 1989. – 167 p.
62. Issa Raad I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting // Journal of computational physics. – 1986. – V. 62. – № 1. – P. 40–65.
63. Patankar S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. – New York: McGraw-Hill, 1980. – 150 p.
64. Подрябинкин Е.В. Моделирование течений ньютоновских и неньютоновских жидкостей в цилиндрическом зазоре: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Новосибирск, 2014. – 28 с.
65. Харламов С.Н., Джанхорбани 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.
66. Харламов С.Н., Джанхорбани М. Процессы транспорта шлама при очистке скважин с произвольной ориентацией буровых труб, содержащих эксцентрично расположенное круглое ядро с подвижной стенкой: проблемы, результаты, перспективы (обзор) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 131–149.
67. Харламов С.Н., Джанхорбани М. Процедуры и инструментальный мониторинга процессов и механизмов транспорта шлама при гидравлической очистке горизонтальных скважин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 22–40.

Поступила 10.07.2022 г.

Информация об авторах

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

Джанхорбани М., аспирант отделения нефтегазового дела Инженерной школы природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет.

Брыксин М.Р., инженер, Филиал общества с ограниченной ответственностью «Газпром инвест Томск».

UDC 504.61:532.542: 536.252

ON THE ISSUE OF ESTABLISHING THE DURATION OF WELL DRILLING WITHOUT THE DRILL STRING ROTATION

Sergey N. Kharlamov¹,
kharsn@mail.ru

Janghorbani Mehran¹,
mehran.janghorbani@gmail.com

Maxim R. Bryksin²,
Maxbryksin@mail.ru

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

² Branch of Gazprom Invest Tomsk Limited Liability Company,
39, Lenin avenue, Tomsk, 634034, Russia.

The relevance of the research is determined by the need for detailed modeling the evolution of viscous mixture dynamic structure, changes in the volumetric concentration of drilled cuttings in the annular annulus of the well, which is constantly accumulated during drilling, as well as monitoring its critical values, leading to problems with the functioning of special equipment.

The purpose of the research is the numerical modeling within the framework of computational fluid dynamics (CFD) of cuttings accumulation developing in time and space in internal systems with an eccentric fixed core (pipes, channels) under various conditions of flow of Herschel–Bulkley type drilling fluids, characterized by an arbitrary change in their rheological properties; understanding the features of cuttings accumulation, as well as determining clogging intensity and the time for cleaning wells.

Methods for studying the processes under consideration are based on integrated approach to physical, mathematical and computer modeling of hydrodynamics and convective mass transfer in heterogeneous inhomogeneous continuous media complicated by rheological non-Newtonian effects; combined direct and indirect analysis of the capabilities of the constructed model to predict the essence of cleaning and drilling wells by comparing the simulation results with the available experimental data.

Results demonstrate the features of the influence of rheological parameters on cuttings accumulation rate in the annulus and patterns of removal/deposition of particles of drilled rock when changing the flow regimes of the mixture. The possibilities of the method for studying hydraulic transport within the framework of the ANSYS software EL approach using the CFD-DEM model in predicting the pressure drop in the well, the evolution of the dynamic structure of the mixture depending on the intensity of the annulus clutter with cuttings, changes in the average mass velocity at the well inlet in comparison with the available experimental data. The conditions for calculating the maximum recommended drilling time for arbitrary combinations of values of technological and rheological parameters of the drilling fluid are numerically determined and recommended for practice.

Key words:

Well, horizontal section, annular flows, rheology, drilling, Herschel–Bulkley fluid, modeling, hydrodynamics, mass transfer, transport, treatment.

REFERENCES

1. Pigott R.J.S. Mud flow in drilling. *Drilling and production practice*. New York, American Petroleum Institute, USA, 1941. pp. 91–103.
2. Williams C.E. Jr., Bruce G.H. Carrying capacity of drilling muds. *Journal of Petroleum Technology*, 1951, vol. 3, no. 4, pp. 111–120.
3. Hopkin E.A. Factors affecting cuttings removal during rotary drilling. *Journal of Petroleum Technology*, 1967, vol. 19, no. 6, pp. 807–814.
4. Zeidler U.H. An experimental analysis of the transport of drilled particles. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1972, vol. 12, no. 1, pp. 39–48.
5. Sifferman T.R., Myers G.M., Haden E.L., Wahl H.A. Drill cutting transport in full scale vertical annuli. *Meeting of the Society of Petroleum Engineers of the American Institute of Mechanical Engineers*. Las Vegas, Nevada, USA, January 1973. pp. 1–12.
6. Thomas R.P., Azar J.J., Becker T.E. Drillpipe eccentricity effect on drilled cuttings behavior in vertical wellbores. *Journal of Petroleum Technology*, 1982, vol. 34, no. 9, pp. 1929–1937.
7. Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells. *SPE Drilling Engineering*, 1986, vol. 1, no. 4, pp. 297–308.
8. Martin M., Georges C., Bisson P., Konirsch O. Transport of cuttings in directional wells. *SPE/IADC Drilling Conference*. New Orleans, Louisiana, March 15–18, 1987. pp. 1–25.
9. Ford J.T., Peden J.M., Oyeneyin M.B., Erhu Gao, Zarrouh R. Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes. *SPE annual technical conference and exhibition*. New Orleans, Louisiana, Society of Petroleum Engineers, 23–26 September, 1990. pp. 1–30.
10. Peden J.M., Ford J.T., Oyeneyin M.B. Comprehensive experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotation and eccentricity. *European Petroleum Conference*. Hage, The Netherlands, 1–4 June, 1990. pp. 1–20.
11. Becker T.E., Azar J.J., Okrajni S.S. Correlations of mud rheological properties with cuttings-transport performance in directional drilling. *Society of Petroleum Engineers Drilling engineering*, 1991, vol. 6, no. 1, pp. 16–24.
12. Martins A.L., Costapinto Santana C. Evaluation of cuttings transport in horizontal and near horizontal wells-A dimensionless approach. *SPE Latin America Petroleum Engineering Conference*. Caracas, Venezuela, 1992. pp. 1–7.
13. Mingqin D., Miska S.Z., Mengjiao Yu, Takach N.E., Ahmed R.M., Zettner C.M. Critical conditions for effective sand-sized solids transport in horizontal and high-angle wells. *SPE Drilling & Completion*, 2009, vol. 24, no. 02, pp. 229–238.
14. Gavignet A.A., Sobey I.J. Model aids cuttings transport prediction. *Journal of Petroleum Technology*, 1989, vol. 41, no. 09, pp. 916–921.
15. Nguyen Desmond, Rahman S.S. A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly

- deviated and horizontal wells. *SPE/IADC Asia Pacific Drilling Technology*. Kuala Lumpur, Malaysia, 1996. pp. 1–11.
16. Zou Longqing, Patel M.H., Guoyou Han. A new computer package for simulating cuttings transport and predicting hole cleaning in deviated and horizontal wells. *International Oil and Gas Conference and Exhibition*. Beijing, China, 2000. pp. 1–12.
 17. Santos C.S., Stuckenbruck S., Fontoura S.A.B., Martins A.L. "Simulation of transient cuttings transportation and ECD in wellbore drilling. *Europec/EAGE Conference and Exhibition*. Rome, Italy, 2008. pp. 1–9.
 18. Cho H., Shah S.N., Osisanya S.O. A three-segment hydraulic model for cuttings transport in coiled tubing horizontal and deviated drilling. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2002, vol. 41, no. 06, pp. 32–39.
 19. Ozbayoglu E.M., Miska S.Z., Takach N., Reed T. Sensitivity analysis of major drilling parameters on cuttings transport during drilling highly-inclined wells. *Petroleum science and technology*, 2009, vol. 27, no. 1, pp. 122–133.
 20. Bilgesu H.I., Ali M.W., Aminian K., Ameri S. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport in wellbores. *The Eastern Regional Meeting of the Society of Petroleum Engineers*. Lexington, Kentucky, USA, October 2002. 27 p.
 21. Mishra Nekkhal. *Investigation of hole cleaning parameters using computational fluid dynamics in horizontal and deviated wells*. MSc thesis. USA, 2007. 76 p.
 22. 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.
 23. Mme Uduak, Al 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.
 24. Zhu Xiao-hua, Chao Sun, Hua Tong. Distribution features, transport mechanism and destruction of cuttings bed in horizontal well. *Journal of Hydrodynamic*, 2013, vol. 25, no. 4, pp. 628–638.
 25. Demiralp Yasin. *Effects of drill-pipe whirling motion on cuttings transport performance for horizontal drilling*. MSc Thesis. USA, 2014. 151 p.
 26. Ofei T.N., Shehab A.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*. Beijing, China, 11–12 August, 2015. pp. 1–8.
 27. 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.
 28. 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.
 29. Heydari Omid, Eghbal Sahraei, Pål Skalle. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuluses using computational fluid dynamics (CFD). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 156, pp. 801–813.
 30. Sneha S., Lund B., Ytrehus J.D., Saasen A. CFD Modelling of observed cuttings transport in oil-based and water-based drilling fluids. *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*. Hague, The Netherlands, 2017. pp. 1–12.
 31. 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.
 32. Epelle E.I., Obande W., Okolie J.A., Wilberforce T., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: Effect of particle size polydispersity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, vol. 208, no. 109795, pp. 1–12.
 33. Shao Bing, Yifei Yan, Xiangzhen Yan, Zhiqian Xu. A study on non-spherical cuttings transport in CBM well drilling by coupled CFD-DEM. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 579–590.
 34. Gulraiz Shiraz, Gray K.E. Study on the combined effect of thixotropy, particle shape, and particle size on cuttings transport in horizontal annuli. *Powder Technology*, 2021, vol. 392, pp. 703–716.
 35. 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.
 36. Busch A., Stein T.J. Cuttings transport: on the effect of drill pipe rotation and lateral motion on the cuttings bed. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 191, no. 107136, pp. 1–20.
 37. Mojammel H.M., Imtiaz S., Zendejboudi S., Butt S., Rahman M.A., Maheshwari P. Experimental study of cuttings transport with non-Newtonian fluid in an inclined well using visualization and ERT techniques. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Denver, Colorado, USA, 2020. pp. 1–15.
 38. Naderi Meysam, Ehsan Khamehchi. Cutting transport efficiency prediction using probabilistic CFD and DOE techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 163, pp. 58–66.
 39. Makovei N. *Gidravlika bureniya* [Drilling hydraulics]. Translated from Romanian. Moscow, Nedra Publ., 1986. 536 p.
 40. Amzin S.N. *Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya nenyutonovskikh sred v kanalakh koltsevoogo secheniya s uchedom dissipatsii energii*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Mathematical modeling of the movement of non-Newtonian media in the channels of the annular section, taking into account the dissipation of energy. Cand. Diss. Abstract]. Voronezh, 2004. 24 p.
 41. Cayeux E., Leulseged A. Effect of solid particle concentration on drilling fluid rheological behavior and its impact on pressure losses. *SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition*. Hague, The Netherlands, 2019. pp. 1–39.
 42. Mezhericher M., Tamir B., Avi L. Modeling of particle pneumatic conveying using DEM and DPM methods. *Particulate Science and Technology*, 2011, vol. 29, no. 2, pp. 197–208.
 43. Saffman P.G. The lift on a small sphere in a slow shear flow. *Journal of fluid mechanics*, 1965, vol. 22, no. 2, pp. 385–400.
 44. Li Amy, Goodarzi Ahmadi. Dispersion and deposition of spherical particles from point sources in a turbulent channel flow. *Aerosol science and technology*, 1992, vol. 16, no. 4, pp. 209–226.
 45. Siamak Akhshik, Mehdi Behzad, Majid Rajabi. On the particle-particle contact effects on the hole cleaning process via a CFD-DEM model. *An International Journal of Particulate Science and Technology*, 2016, no. 01, pp. 1–31.
 46. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Vol. 1, 464 p.
 47. *FLUENT. Ansys Fluent Users Guide 13*. Fluent Incorporated, ANSYS Inc. Canonsburg, PA, USA. 2010. 230 p.
 48. 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.
 49. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I., Alginov R.A., Pavlov S.A. Prospects of RANS models with multiparameter effects at simulation of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface. *Proc. of the 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. Harbin, China, August 22–24, 2011. Vol. 2, pp. 787–791.
 50. Taibi H., Messelmi F. Effect of yield stress on the behavior of rigid zones during the laminar flow of Herschel–Bulkley fluid. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, vol. 57, no. 2, pp. 1109–1115.
 51. Menter F.R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 1994, vol. 32, no. 08, pp. 1598–1605.
 52. 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. 04, pp. 633–640.
 53. 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.
 54. 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.

55. 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.
56. Busch A. *On particle transport and turbulence in wellbore flows of non-Newtonian fluids –findings from cuttings transport process analysis by means of computational fluid dynamics, rheometry and dimensional analysis*. PhD Diss. Norway, 2020. 187 p.
57. Liu Gefei. *Applied well cementing engineering*. Burlington, Gulf Professional Publishing. Elsevier, 2021. 621 p.
58. Ahmed R.M., Miska S.Z. Experimental study and modeling of yield power-law fluid flow in annuli with drillpipe rotation. *IADC/SPE Drilling Conference*, 2008, pp. 1–18. DOI: 10.2118/112604-ms.
59. Shichenko R.I., Esman B.I., Kondratenko P.I. *Gidravlika promivochnykh zhidkostey* [Hydraulics of washing liquids]. Moscow, Nedra Publ., 1976. 294 p.
60. Guo Boyun, Gefei Liu. *Applied drilling circulation systems: hydraulics, calculations and models*. Burlington, Gulf Professional Publishing. Elsevier, 2011. 307 p.
61. Haciislamoglu M. *Non-Newtonian fluid flow in eccentric annuli and its application to petroleum engineering problems*. PhD Diss. USA, 1989. 167 p.
62. Issa Raad I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of computational physics*, 1986, vol. 62, no. 1, pp. 40–65.
63. Patankar S.V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. New York, McGraw-Hill, 1980. 150 p.
64. Podryabinkin E.V. *Modelirovanie techeniy nytonovskikh i nenytonovskikh zhidkostey v tshilindricheskom zazore*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Simulate flows of Newtonian and non-Newtonian fluids in a cylindrical gap. Cand. Diss. Abstract]. Novosibirsk, 2014. 28 p.
65. 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.
66. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Cuttings transport in hole cleaning considering well orientation, pipe eccentricity and pipe rotation: problems, results, prospects (survey). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no 7, pp. 131–149. In Rus.
67. Kharlamov S.N., Janghorbani M. Procedures and instruments for monitoring processes and mechanisms of cutting transport in hydraulic cleaning of horizontal wells. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 22–40. In Rus.

Received: 10 July 2022.

Information about the authors

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

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

Maxim R. Bryksin, engineer, Branch of Gazprom Invest Tomsk Limited Liability Company.