

УДК 532.517:536.242:544.012:622.244:519.6

ПРОЦЕДУРЫ И ИНСТРУМЕНТАРИЙ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ И МЕХАНИЗМОВ ТРАНСПОРТА ШЛАМА ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ОЧИСТКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Харламов Сергей Николаевич¹,
kharsn@mail.ru

Джангхорбани Мехран¹,
mehr.janghorbani@gmail.com

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

Актуальность работы вызвана необходимостью идентифицировать, понять, прогнозировать и контролировать физические механизмы, сопровождающие процесс очистки скважин от бурового шлама. Риск некачественной очистки создает условия, обостряющие процессы заклинивания трубы, управления скважиной, снижения скорости бурения, износа бурового специального оборудования, особенно при увеличении количества отверстий, пробуренных под большими углами. Такие экстремальные ситуации характерны для протяженных горизонтальных скважин. В настоящее время они получили широкое распространение в силу своей повышенной производительности и исключительной эффективности в способах достижения определенных продуктивных пластов. Все это характеризует проблему поиска и разработки эффективных методов очистки скважин как одну из важнейших задач современного бурения.

Цель: глубже понять явления в масштабе модели и фактически разработать методы прогнозирования процессов при гидравлической очистке горизонтальных скважин от шлама для определения приоритетов будущих научных и практических разработок процессов очистки.

Методы: современные методы теоретического и экспериментального моделирования течений твердых частиц с потоком вязкой среды в ограниченных областях, характерных для задач нефтегазовой отрасли; практические методы исследования таких вопросов, как седиментация, коагуляции, течение реологически сложных вязких сред в затрубном пространстве скважин с произвольной образующей ее ствола.

Результаты. Представлен обзор и анализ современных экспериментальных и теоретических результатов моделирования процесса засорения продуктами выработки горизонтальных скважин. Численно исследованы процессы и механизмы транспорта шлама на базе оригинальных редко используемых в практике приложений математических моделей. По результатам мониторинга процессов сформулировано множество критериальных связей и эмпирических правил, которыми руководствуются при техническом проектировании элементов оборудования и прогнозах оптимальных режимов гидравлической очистки. Критически оценены возможности моделей, методов, инструментария опытного оборудования для регистрации, прогноза и управления режимами поступательно-вращательного движения смесей в скважинах с криволинейной образующей стенки. Даны объяснения противоречивости наблюдаемых и рассчитанных процессов при гидравлической очистке в рамках используемого оборудования.

Ключевые слова:

Шлам, частицы, скважина, очистка, моделирование, гидродинамика, реология, структура, напряжения.

Введение

Засорение рабочих элементов бурового оборудования продуктами выработки ухудшает качество и эффективность их функционирования. Последние 30–40 лет для нефтегазовой отрасли отмечены разнообразными достижениями, многочисленными внедрениями новых технологий, препятствующих накоплению шлама. В этом смысле умение воздействовать на реологические свойства бурового раствора имеет большое значение. Поэтому понятно желание инженера-механика идентифицировать, понять, прогнозировать и контролировать физические механизмы, приводящие к возникновению засорения. Однако скважинную среду чрезвычайно трудно моделировать в лаборатории. Она характеризуется высокими давлениями, температурными напорами, пространственными изменениями структуры многофазного потока и подвижностью элементов технологического оборудования. В настоящее время накоплен большой объем эмпирической информации о динамической картине процесса засорения, сформулировано множество эм-

пирических правил, которыми руководствуются при техническом проектировании элементов оборудования. Эти правила основаны на корреляциях между измерениями в модельном масштабе и наблюдениями рабочих параметров и процессов.

Необходимость глубже понять явления в масштабе модели привела исследователей к созданию ряда уникальных экспериментальных стендов для моделирования транспорта сложной среды. Причем к ряду крупнейших стендов следует отнести опытную установку, размещенную в университете Талса, штат Оклахома, США [1, 2]. Основными элементами такой установки являются: 1) испытательная секция, которая включает большую, обычно прозрачную трубу с эксцентрично расположенной внутренней вращающейся трубой; 2) средство для изменения угла наклона испытательного участка (обычно с использованием гидравлических домкратов); 3) жидкостный насос (как правило, центробежного типа) и винтовой насос для добавления продуктов выработки частиц твердой фазы; 4) набор систем, позволяющих разделять состав выработки на дистальных участках измерительной

области; 5) устройства записи и измерений, представляющие собой камеры с замкнутым контуром, датчики давления, анемометры и т. п.; 6) резервуары, трубы и фитинги. Заметим, что при планировании и постановке экспериментов длину испытательной секции выбирают достаточно протяженной, чтобы при измерениях исключить влияние возмущений на структуру развитого потока от эффектов входа/выхода. Для дисперсных систем моделирование скважинных условий с хорошей точностью обеспечивается на длинах порядка $x > 50D$, где x – локальная осевая независимая переменная, D – гидравлический диаметр. При этом закономерности движения выработки определяются по серии данных измерений структуры вязкого ламинарно-турбулентного потока.

С учетом сказанного, целью экспериментальных исследований процесса транспортировки шлама на базе указанного оборудования является понимание и контроль явлений и механизмов этого сложного процесса. Необходимость представления таких результатов диктуется соображениями, что новые научные и экспериментальные возможности позволяют значительно пополнить объем знаний об особенностях и закономерностях транспорта шлама и очистки скважин. И эти сведения помогут расставить приоритеты будущих научных разработок.

Проблемы исследования транспорта шламов

Прогноз процессов в вертикальных скважинах

Блицэкскурс в историю проблем поиска и построения решений по интенсификации очистки скважин от шламов показывает, что эти вопросы составили предмет исследований с первых попыток анализа вертикальных скважин в 1940-х гг. Главная цель этих исследований заключалась в получении критериальных связей, определяющих процесс осаждения дисперсных частиц сферической формы в несущей среде с ньютоновскими свойствами. Такое допущение о буровом растворе представляется достаточно грубым. Поэтому прогноз осаждений и коагуляции частиц в аномально вязких диспергируемых потоках, к каковым относится раствор с псевдопластическими реологическими свойствами, по соотношениям для ньютоновских систем не представляется корректным. И первым, кто обратил на это внимание, был Р. Пиготт [3], который предложил течение бурового раствора в вязкой области структуры гидродинамического пограничного слоя описывать с помощью кажущейся вязкости, а в инерционной зоне (с доминированием турбулентных эффектов процессов переноса) – моделью раствора со свойствами ньютоновской среды. Причем существенного отличия влияния реологии (при ньютоновском и аномально вязком характере деформаций) в турбулентном процессе не обнаружено.

Далее Х. Холл и соавторы [4], предполагая раствор бингамовской средой, эмпирически сформулировали зависимость между коэффициентом сопротивления трения и числом Рейнольдса для дисперсных частиц сферической и дискообразной формы при турбулентном и ламинарном режимах течения, что позволило исследовать изменения скорости скольжения частиц в реальных условиях течения смеси. Сравнивая результаты его эмпирических уравнений с

результатами натуральных экспериментов, было обнаружено, что корреляционные соотношения для режима ламинарного течения весьма успешны, но не удовлетворяются связи, ориентированные на прогноз турбулентных условий с точностью порядка 15 % и более.

К. Уильямс и соавторы [5] сосредоточили свои усилия на детальном изучении процессов влияния подвижности внутренней стенки буровой трубы и определении минимального значения ее скорости вращения, необходимой для удаления шлама из ствола скважины, а также на проблемах влияния различных свойств бурового раствора на его несущую способность. Для этого авторы провели полномасштабные натурные лабораторные эксперименты, которые сводились к следующему. Такие эксперименты выполнялись в испытательной 150-метровой скважине с использованием алюминиевых дисков разных размеров. Это исследование заслуживает внимания, поскольку в нем было использовано 23 разнообразных флюида с различной плотностью от 8,33 ft/gal (вода) до 14,8 ft/gal и вязкостью от 1 до 200 сП. Заметим, что это был первый эксперимент, в котором использовалась вращающаяся буровая труба с минимальным значением скорости вращения порядка 200 ft/min. Также экспериментами установлено, что с вращающейся буровой колонной можно добиться эффективного удаления выработки и при значительно более низких скоростях вращения (например, 124 ft/min при использовании воды и менее при использовании более тяжелых и более вязких растворов). Чтобы объяснить эти результаты, были проведены лабораторные эксперименты, где было замечено, что частицы дисперсной фазы в форме диска ведут себя совершенно иначе, чем в форме сферы, поскольку их скорость скольжения резко изменяется в зависимости от их ориентации в потоке (в 1,5 раза для ламинарного потока; в 13 раз для турбулентного режима). Установлено, что частицы в форме диска имели тенденцию сосредотачиваться в области твердой стенки, ближе к границам, где профиль скорости уменьшается. А в условиях турбулентного закрученного потока профиль скорости приобретал специфическую параболическую форму, характерную для ламинарного течения, что говорило о формировании условий ламинаризации течения с подавлением напряжений Рейнольдса у стенки (стабилизирующий механизм крутки) и интенсификации течения в ядре. При комбинации этих процессов дисперсные частицы более эффективно транспортировались из скважины. Также стоит отметить, что весьма важным при удалении выработки было установление факта: при получении значения параметра (отношения продольного размера частицы к соответствующему поперечному) меньше 0,167 транспортировка становилась чрезвычайно проблематичной, поскольку частицы шлама имели тенденцию перестраиваться в пространный течениях при их обтекании диспергируемой средой. Все это показывает, что вопросы удаления частиц выработки потоком еще недостаточно изучены и требуют дополнительных исследований.

Е. Хопкин [6] попытался в рамках простой лабораторной методики для качественного определения вязкости жидкости, известной как «вязкость в воронке», проанализировать эффективность процесса очистки буровым раствором. Этот метод определения качественного значения вязкости широко используется в промышленности. Измерения вязкости осуществляется за время (в секундах), необходимое для того, чтобы *кварт* (1 кв \approx 0,95 л) бурового раствора «выпал» из стандартной воронки, называемой *воронкой Марша*. Заметим, что в момент публикации [6] обычно использовали буровые растворы с вязкостью воронки, превышающей 200 с/кв, с целью достижения эффективной очистки отверстий (с концентрацией менее 5 % в затрубном пространстве). Однако, поскольку практическое использование в очистке аномально вязких буровых растворов нежелательно – они дороги в изготовлении, увеличивают нагрузки на пласт и буровое оборудование, снижают скорость бурения, в [6] выполнены лабораторные эксперименты с 52 разнообразными частицами произвольной формы (различной сферичности) и 13 различными буровыми растворами с вязкостью воронки от 26 до 1000 с/кв. В результате опытов обнаружено, что существует выраженная корреляция между вязкостью воронки и пропускной способностью буровых растворов. Поскольку вязкость воронки тесно связана с пределом текучести жидкости, предполагается, что деформируемые среды «с высокой вязкостью при небольшой скорости сдвига» – наилучший объект для очистки вертикальных отверстий. Современное производство буровых растворов использует этот принцип. Такие буровые жидкости имеют низкую вязкость в областях с высокой скоростью сдвига, например, при прохождении сквозь насадку долота, и, следовательно, требуют меньшей мощности насоса. А в областях с низкоскоростным потоком кольцевого пространства будут проявляться высокие вязкости, способствующие очистке отверстий.

Попытки сформулировать надежную корреляцию для предсказания скоростей скольжения твердых частиц выработки были продолжены У. Цейдлером [7]. Он пришел к выводу, что для чисел Рейнольдса $Re > 1500$ экспериментальные результаты скоростей осаждения частиц начинают существенно отличаться от предсказанных по формулам, учитывающим их сферическую форму. То же самое наблюдалось в режимах с числами Рейнольдса $Re < 2$, характерных для ползущего потока. Другим важным результатом указанных исследований является факт невозможности 100 %-го выноса выработки из скважины в силу особенностей ее взаимодействия со стенкой в условиях вращения и слабой инерционности частиц шлама в непосредственной ее окрестности. Обобщение данных позволило сформулировать корреляционное уравнение для прогноза максимального количества извлекаемой выработки, включающей частицы произвольной геометрии при турбулентном течении водного потока. Кроме того, У. Цейдлером [7] представлены связи для случаев очистки в режимах вращения бурильной трубы. Однако эти результаты тре-

буют дополнительного анализа из-за больших погрешностей в оценках реальных процессов.

В целом анализ публикаций по проблемам организации очистки вертикальных скважин периода 80-х гг. XX в. позволяет отметить, что основное внимание исследователей сводилось к формулировке связи, описывающей скорость скольжения частиц шлама (известной как единственный определяющий фактор в очистке вертикальных скважин) вариацией между скоростями жидкости и твердых частиц смеси. Установлено, что скорость скольжения зависит от числа Рейнольдса частицы, которое в рамках теории подобия и анализа размерностей имеет вид (1):

$$Re = \frac{D_s V_s \rho_f}{\mu} \quad (1)$$

Здесь D_s – диаметр частиц; V_s – средняя скорость скольжения частиц; ρ_f ; μ – плотность и вязкость жидкости соответственно. Изменения V_s в широком диапазоне значений Re отражают критериальные связи следующего вида:

$$V_s = \begin{cases} \frac{g D_s^2 (\rho_s - \rho_f)}{18 \mu} & \text{соотношение Стокса, при } Re < 2 - \quad (2) \\ 9 \left(\frac{D_s (\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{0,5} & \text{соотношение Реттингера, при } Re > 1500 - \quad (3) \\ \frac{13,42 (\rho_s - \rho_f)^{0,782} D_s^{1,35}}{\rho_f^{0,218} \mu^{0,564}} & \text{соотношение Цейдлера, при } 2 < Re \leq 15 - \quad (4) \\ \frac{13,88 (\rho_s - \rho_f)^{0,612} D_s^{0,836}}{\rho_f^{0,388} \mu^{0,224}} & \text{соотношение Цейдлера, при } 15 < Re \leq 80 - \quad (5) \\ \frac{17,88 (\rho_s - \rho_f)^{0,516} D_s^{0,548}}{\rho_f^{0,484} \mu^{0,032}} & \text{соотношение Цейдлера, при } 80 < Re \leq 1500 - \quad (6) \end{cases}$$

Заметим, что зависимости (2)–(6) сформулированы для ньютоновских сред и сферических частиц, но с помощью понятий *эквивалентной вязкости* их можно использовать и для неньютоновских жидкостей с произвольной геометрической формой частиц. Однако такое обобщение не лишено трудностей, по существу, приводящих к неопределенностям и противоречивости оценок эффектов течения жидкости, сопровождающих транспорт выработки. Поэтому представляется целесообразным подробнее остановиться на аспектах моделирования реологии аномально вязких сред, весьма осложняющих прогноз транспорта шлама даже в сравнении с более простым случаем несжимаемого течения.

Прежде всего, напомним, что ньютоновский реологический закон для несжимаемой жидкости связывает девиаторную часть тензора напряжений (касательных/сдвиговых напряжений) с симметричным тензором скоростей деформации в виде $\bar{\tau} = \mu \bar{S}$.

Причем динамический коэффициент вязкости (μ) зависит от локальных значений температуры (T) и давления (P), состава смеси, но не зависит от $\bar{\tau}$ или \bar{S} . Для простых типов аномально вязких сред можно записать связь (7):

$$\bar{\tau} = \eta \bar{S}, \quad (7)$$

принимая неньютоновскую динамическую вязкость скалярной величиной и функцией $\eta = \eta(\bar{\tau}, \bar{S}, T, P)$. Выбор различных эмпирических реологических законов (моделей жидкости) для описания зависимости скаляра η от тензорных параметров $\bar{\tau}$ или \bar{S} составляет одну из проблем обобщения, поскольку как скалярная функция тензора – вязкость η – должна зависеть только от инвариантов \bar{S} , что есть суть таких особых комбинаций компонентов \bar{S} , которые преобразуются как скаляры при вращении системы координат:

$$I_1 = (\bar{S}; \delta) = \sum_i \dot{S}_{ii}; \quad I_2 = (\bar{S}; \bar{S}) = \sum_i \sum_j \dot{S}_{ij} \dot{S}_{ji};$$

$$I_3 = \det(\bar{S}) = \sum_i \sum_j \sum_k \varepsilon_{ijk} \dot{S}_{1i} \dot{S}_{2j} \dot{S}_{3k},$$

δ – единичный тензор. Так как в нашем случае первый инвариант – $I_1=0$ (несжимаемая жидкость), то для замыкания (7) требуется связь от остальных инвариантов – $\eta = \eta(I_2, I_3)$. Ее получение связано с необходимостью учета многих деталей жидкости, описываемого процесса и сопряжено со сложностями теоретического и экспериментального характера. Учитывая, что для многих простых потоков типа аксиального течения в трубах, тангенциального течения в области между концентрическими цилиндрами имеем $I_3=0$ (и не слишком существенен для других потоков), допускают, что замыкание вязкости соответствует функции $\eta = \eta(I_2)$. Именно для этого частного случая и были предложены эмпирические (практические) модели $\eta = \eta(\bar{\tau}, \bar{\tau})$, в которых вязкость зависит от потока количества движения и отвечает процессу со сложной геометрией:

- вязкопластическая модель (8) жидкости (модель Бингама–Шведова)

$$\bar{\tau} = \left\{ \mu_0 + \frac{\tau_0}{[0,5(\bar{S}; \bar{S})]^{0,5}} \right\} \bar{S} \text{ при } 0,5(\bar{\tau}; \bar{\tau}) > \tau_0^2$$

$$\text{и } \bar{\tau} = 0, \quad \bar{S} = 0 \text{ при } 0,5(\bar{\tau}; \bar{\tau}) < \tau_0^2 \quad (8)$$

и жидкость типа Гершели–Балкли (9), как частный случай модели Бингама –

$$\bar{\tau} = \tau_0 + k \bar{S}^n; \quad (9)$$

- степенная модель (жидкости Оствальда–Вейля) типа (10)

$$\bar{\tau} = \left\{ m \left[0,5(\bar{S}; \bar{S}) \right]^{n-1} \right\} \bar{S}, \quad (10)$$

где m, n – модельные константы.

Заметим, что практическая польза от указанных модельных связей заключается в возможности описания реофизических особенностей изменения неньютоновской вязкости, η , своим общим видом. На это указывают слагаемые в фигурных скобках модели (8), (10). Поэтому, вводя η в соответствующие реологические связи (вместо μ), а также необходимые замыкания в соответствующей системе координат для членов $(\bar{\tau}; \bar{\tau})$ или $(\bar{S}; \bar{S})$, будем иметь замыкания математических моделей к описанию деформационных процессов в общем случае учета влияния изменений реологии рабочей жидкости на транспорт шлама.

В вопросах уяснения характера влияния геометрии частицы на процесс очистки полезна рекомендация Х. Уоделла [8] по учету эквивалентной сферичности частицы в виде параметра – отношения площади поверхности сферы с объемом, подобным рассматриваемой частицы, к площади поверхности частицы, которая формулируется в виде (11):

$$\psi = \frac{\pi^{1/3} (6V_p)^{2/3}}{A_p}, \quad (11)$$

где V_p – объем частицы; A_p – площадь поверхности частицы. Заметим, что соотношения (2)–(6) стоит считать корректными при небольших значениях эквивалентной вязкости. В случае анализа процессов с аномально вязкой реологией и нетривиальной формой частиц (например, дискообразной, часто встречаемой в буровых шламах), а также осложненных вращением бурильной трубы, эти уравнения следует применять с осторожностью при контроле точности процессов. Учитывая эти особенности, Т. Зиферман с соавторами [9] провели полное исследование процесса транспортировки шлама в вертикальных скважинах (на экспериментальной установке длиной 140 ft) и оценили влияние на эффективность процесса следующих параметров: реологических свойств бурового раствора (с примесями нефти и воды); скорости в кольцевом пространстве (от 4 до 200 ft/min); размера частиц выработки; плотности жидкости (12–15 ft/gal); скорости вращения (0–200 об/мин); скорости бурения; эксцентриситета бурильной трубы и размера кольцевого пространства. Исследование ориентировано на серию вопросов: установление необходимости повышения/понижения вязкости бурового раствора для очистки скважины; определение значений требуемой скорости для предотвращения чрезмерного накопления продуктов выработки в затрубном пространстве; поиск диапазона изменений кольцевой скорости для зон замедленного бурения; уяснение связи между ростом массы бурового раствора и транспорта шлама; снижение кольцевой скорости, интенсивности вращения бурильной трубы; изменение эксцентриситета, размера кольцевого пространства и их влияние на выработку; а также транспорт шлама с кольцевой скоростью порядка 100–120 ft/min, а также при каких

условиях по скоростям и составу «идеального» бурового раствора это возможно.

Результаты (Зиферман и соавторы [9]) процесса транспорта буровых шламов в вертикальных скважинах показали: 1) наиболее важными, влияющими на эффективность транспорта шламов, являются скорость потока и реологические свойства раствора; 2) скорости потока около 50 ft/min вполне достаточны для эффективной очистки скважин; 3) корреляционные связи имеют погрешности порядка 10–15 % при ламинарном режиме и 25 % – при турбулентном; 4) плотность раствора слабо влияет на процесс очистки скважин; 5) вращение трубы наряду с остальными факторами незначительно влияет на процесс очистки. Детальные исследования сложных реологических систем позволили У. Цейдлеру уточнить предложенные ранее уравнения для определения скорости скольжения частиц. Так, в [10] им было предложено новое уравнение (11) для расчета скорости скольжения частиц выработки и поля концентрации частиц для вида числа Рейнольдса в потоке жидкости со степенной реологией:

$$Re = \frac{\rho_s v_s^{2-n} d_s^n}{k C^{n-1}}. \quad (11)$$

Здесь k и n – коэффициенты (9); d_s – эквивалентный диаметр частицы; C – коэффициент, определяемый формой частицы.

Р. Томас и соавторы [11] проверили уравнения Цейдлера и пришли к выводу, что они хорошо описывают процесс только при высоких скоростях потока и если скорость потока в два и более раз превышает скорость свободного падения частиц. Было установлено, что при данных условиях погрешность уравнений Цейдлера по концентрациям составила порядка 8 %. Но при невысоких скоростях потока погрешность увеличивалась до 90 %. Погрешность определения скорости скольжения составила 3...15 %-ую величину, причем на ее рост влияла интенсификация процесса течения. Также в [11] отмечено, что вращение трубы способствует процессу очистки, но: 1) этот эффект значителен только при низких скоростях потока; 2) для каждой скорости потока есть определенный уровень скорости вращения, выше которого обнаруженный эффект не увеличивается с ростом значений крутки трубы. По нашему мнению, в данных процессах проявляются механизмы вихревого перехода, способствующие реламинаризации потока, требующие детального исследования.

С. Хуссейни и соавторы [12], продолжая это направление исследований, проанализировали влияние размера частиц на погрешность уравнения Цейдлера и пришли к выводу, что эти уравнения достоверны лишь при определенных размерах частиц (больше 0,79 см диаметра). Наряду с этим исследование подтвердило заключение Е. Хопкина. Так, анализируя бингамовскую жидкость, в [12] показано, что эффекты от изменений компонент тензора скоростей деформаций проявляются заметнее в сравнении с изменениями пластической вязкости в диапазоне низких значений скоростей потока. В условиях интенсивного

течения с высокими компонентами вектора скорости влияние реологических процессов заметно ослабевало. Все это позволило считать, что с точки зрения эффективности очистки скважин предпочтительнее выглядят растворы, представляющие собой псевдопластические среды, с высоким пределом текучести.

В заключение данной части стоит отметить, что по данным результатам, спектру фиксируемых геометрических и физических особенностей, сопровождающих транспорт, нельзя с определенной уверенностью считать, например, какие механизмы будут определять течение шлама в сложной конфигурации скважины, поскольку проблематично фиксировать структуру и состав примеси в кольцевой области. Также требуются детальные исследования по уяснению механизмов седиментации и коагуляции частиц шлама в конкретных условиях течения на других криволинейных участках скважины.

Отдельные проблемы моделирования процессов транспорта в геометриях ствола скважин, отклоненных от вертикальной плоскости

Учитывая опыт и результаты анализа особенностей транспорта выработки в вертикальных участках скважины, естественным и целесообразным представляется обращение к теоретико-экспериментальным исследованиям течений шлама в конфигурациях с общей криволинейной образующей ее ствола. Уяснение закономерностей таких течений наряду с разработкой эффективных методов очистки также позволит отобрать данные для построения новых и совершенствования имеющихся методов, методик прогноза гидродинамики вязких систем. Библиографический анализ работ этого направления показывает, что одними из первых исследователей, занимавшихся изучением процесса транспорта шламов в криволинейных скважинах, были П. Томрен и соавторами [13], К. Фудзи и М. Сато [14]. В частности, последняя работа посвящена экспериментам в скважинах с углами отклонения от вертикали порядка 45...60°. По результатам Фудзи и Сато [14] следует считать не вполне адекватными, поскольку процессы транспорта соответствуют высоким скоростям течения (более 3 м/с), которые очень редко встречаются в практике процессов бурения, а тестовый участок был достаточно коротким (около 3м) и не обеспечивал существование режима гидродинамически стабилизированного течения в стационарных условиях.

П. Томрен и соавторы [13] разработали экспериментальную установку длиной 40 ft с возможностями изменения угла наклона, подвижности внутренней стенки трубы и соосности ее положения. К исследованию процессов транспорта шлама привлекались реальные по свойствам растворы из месторождения в комбинации состава (вода; низко- и высоковязкий карбопол; высоко- и низковязкий бентонит) в условиях ламинарного, переходного и турбулентного режимов течения. Следует отметить, что все жидкости (за исключением воды) соответствовали группе неньютоновских сред со степенной реологической связью. Серия их измерений из 242 случаев привела к следу-

юшим выводам: 1) при углах наклона больше 40° , несмотря на скорость потока, эксперименты постоянно фиксировали процесс образования слоя шлама в нижней части кольцевого пространства. Причем шламы, находящиеся в составе этого слоя, очень трудно удалялись из скважины; 2) процесс транспорта шламов в условиях турбулентного режима отличался высокой и стабильной эффективностью в сравнении с ламинарными условиями; 3) обнаружено, что существует определенный уровень вязкости рабочей жидкости, при которой достигается эффективность транспортировки шламов. Так, в количественном выражении очистка под действием вязких сил значительно эффективнее в сравнении с попыткой ее управления инерционным механизмом за счет увеличения скорости потока. Также в части данного замечания показано, что жидкости при любой своей скорости необходима хотя бы минимальная вязкость для способности выносить частицы шлама. Более того, жидкости с большей вязкостью работают лучше, чем аналогичные системы с низкой вязкостью; 4) на наш взгляд, заключение по эффектам влияния вязкости представляется *самым спорным* (поскольку требуется детальная параметризация процесса с целью выяснения: при каких условиях анализировалось наложенное на поток вращение?). Так, показано, что вращение трубы не оказывает значительного влияния на процесс очистки скважин ни в ламинарном, ни в турбулентном режиме течения жидкости. Заметим, что данный вывод подтверждал заключение Т. Зиферманна при исследовании процессов в вертикальных скважинах и противоречил ранним заключениям о том, что эффект вращения трубы значителен лишь при ламинарном режиме течения, но не существенен в условиях турбулентного переноса импульса.

Здесь весьма важно отметить, что данные численных исследований закрученных внутренних течений [15–17], а также соответствующих результатов настоящего библиографического обзора позволяют все же судить о заметных изменениях локальных и интегральных параметров гидродинамических процессов (например, рис. 1–4) в областях с подвижной стенкой внутренней трубы. В частности, на это указывают картины пространственных распределений поля локальных компонент вектора скорости и давления при вращении стенки трубы ($Ro=W/U_0=10$) и динамике потока несжимаемой капельной жидкости при $Re=20$. Видно, что течение потока с вращением в проксимальной части ($x/R < 2,5$) способно формировать специфические эффекты с рециркуляционными зонами, препятствующими движению в аксиальном направлении. Это обстоятельство не следует игнорировать при моделировании процессов транспорта шлама в пристеночной части буровой колонны и стоит руководствоваться представлениями о возможностях моделей управлять конвективно-диффузионными процессами в средах с аномальной вязкостью и неоднородностью состава при более сложных сдвиговых течениях.

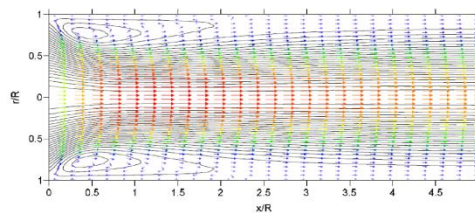


Рис. 1. Линии тока и векторное поле течения в трубе с вращающейся стенкой при значениях числа Рейнольдса $Re=20$ и Россби $Ro=10$

Fig. 1. Flow lines and vector flow field in a pipe with a rotating wall at $Re=20$, $Ro=10$

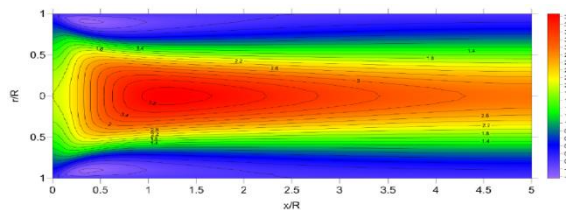


Рис. 2. Изолинии и поле осевой компоненты вектора скорости U/U_0 при $Re=20$, $Ro=10$

Fig. 2. Isolines and axial component field of the velocity vector U/U_0 at $Re=20$, $Ro=10$

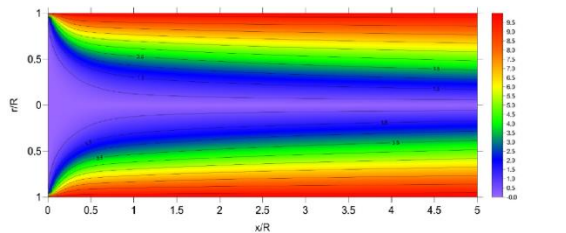


Рис. 3. Изолинии и поле тангенциальной компоненты вектора скорости W/U_0 при $Re=20$, $Ro=10$

Fig. 3. Isolines and tangential component field of the velocity vector W/U_0 at $Re=20$, $Ro=10$

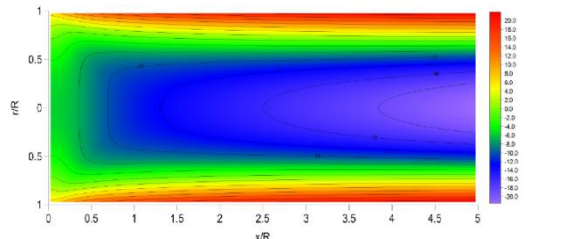


Рис. 4. Изолинии и поле давления $P/(U_0^2 \rho)$ при $Re=20$, $Ro=10$

Fig. 4. Isolines and pressure field $P/(U_0^2 \rho)$ at $Re=20$, $Ro=10$

Видно, что рассматриваемые вопросы требуют детального анализа и составляют предмет для перспективных приложений, поскольку мнение П. Томпсона и соавторов [13] не подтверждают и отдельные результаты из месторождений, где многократно наблюдался эффект значительного влияния вращения трубы на транспортировку шлама в наклонных скважинах. На практике этот процесс объясняют следующими механизмами. С увеличением угла наклона тангенциальное движение буровой трубы способно разрушить слой шлама в скважине. При этом частицы получа-

ют дополнительный импульс, диффундируют и мигрируют в жидкости, значительно повышая эффективность всего процесса очистки. К сожалению, большинство авторов не придавали этому эффекту должного внимания. Более того, моделирование вращения представляет нетривиальную задачу и требует качественного нового уровня описания гидродинамики вязких сред с неоднородной анизотропной структурой [15–17]. Заметим, что в настоящее время появились исследования, поддерживающие эту точку зрения (например, Б. Панг и др. [18], А. Буш и др. [19]).

Исследования С. Окранджи и соавторов [20] фокусировались на деталях процесса транспорта шламов в наклонных скважинах, использующих аномально вязкие среды и позволяющих определить влияние реологических свойств и параметров на очистку в рамках процессов, реализуемых на той же экспериментальной установке, что была использована Томреном и соавторами [13]. В ходе исследований С. Окранджи и соавторов [20] получены результаты, значительно отличающиеся от выводов П. Томрена и соавторов, более совпадающие с ранними исследованиями. Томрен и соавторы утверждали, что турбулентный режим течения для транспортировки шламов более эффективен в сравнении с ламинарным режимом течения при очистке скважины. Но, С. Окранджи и соавторы [20] заметили, что это справедливо только при углах наклона больше 55°. В скважинах с углами меньше 55° именно ламинарный режим течения создает технологические условия для эффективной очистки скважины.

Физику этого процесса можно объяснить подобно тому, что и наблюдали П. Томрен и соавторы. Так, при углах наклона более 40° появляются тенденции к образованию слоя шламов. На первой фазе этот слой был неподвижным и раствор обтекал его тяжелые фракции в условиях, характерных для ламинарного режима. Так как частицы шлама в пристеночной зоне течения слабо инерционны, они интенсивно осаждаются и группируются на неподвижном слое. В условиях турбулентного режима профиль аксиальной компоненты вектора скорости более заполненный в пристеночной области пограничного слоя из-за высоких значений турбулентной диффузии. Интенсивное перемешивание препятствует накоплению частиц у стенки и образованию слоя шлама. С другой стороны, С. Окранджи и соавторы [20] заметили, что турбулентное течение до определенной степени даже разрушает этот слой и, вследствие этих причин, является более эффективным для очистки, чем при ламинарном потоке в углах наклона, способствующих образованию слоя шламов. В работе С. Окранджи и соавторов [20] нашли подтверждение результаты других авторов, заметившие, что предел текучести является самым важным реологическим параметром для транспорта шламов. Но с переходом к турбулентному потоку эффект влияния этого параметра значительно ослабевает. Поэтому с точки зрения очистки шламов самыми эффективными жидкостями следует считать псевдопластические с высокими пределами текучести.

Различия в оценках результатов данных работ, полученных при использовании одной установки, можно объяснить разными способами определения перехода к турбулентности для неньютоновских жидкостей. Этот вопрос является предметом современного исследования. Например, поскольку П. Томрен и соавторы [13] не сообщают детали своего метода определения критической скорости, можно допустить, что в [13] на самом деле использовали ньютоновскую жидкость подобно другим исследователям. Некоторую определенность в этом вопросе добавляют сведения работы [20], дающие представления об определении критической скорости по эмпирическому уравнению вида (12):

$$V_c = \left[\frac{6464(12^n k)}{(1+3n)^2 \left(\frac{1}{2+n}\right)^{(2+n)(1+n)} 2,79 \rho L \left(\frac{ID-OD}{12}\right)^n} \right]^{\frac{1}{2-n}} \quad (12)$$

Здесь n , k – параметры уравнения степенного закона (9), ρ ; L – плотность жидкости и длина участка; OD , ID – внешний и внутренний диаметры трубы соответственно.

Теоретическое исследование А. Гавине и соавторов [21] фокусировалось на проблемах разработки модели, предсказывающей протяженность слоя шламов. Однако модель оказалась трудно реализуема в практических условиях функционирования специального оборудования в силу того, что имела параметры, недоступные для изменения на месторождении: эксцентричность, трение между частицами, межфазное натяжение и др. Все это составляет предмет дополнительного изучения задачи транспорта шламов на базе анализа механических сил, действующих на частицы. На наш взгляд, это направление и соответствующие экспериментальные результаты весьма перспективны для уяснения характера рассматриваемых проблем, но в рамках данной статьи детально не анализировались.

М. Мартин и соавторы [22] разработали очень простую критериальную полуэмпирическую связь прогноза минимальной скорости, необходимой для эффективной очистки скважины, в условиях угла наклона скважины меньше 45° следующего вида (13):

$$V_{\min} = \left[\frac{C[(\rho_s - \rho_l)g\mu]^{1/2}}{\rho_l} \right]^{2/3}, \quad (13)$$

где C – коэффициент, зависящий от угла наклона и вязкости, определяемый экспериментально. Стоит отметить, что в процессе выполнения экспериментов в лаборатории и на месторождениях также установлено: участок скважин в диапазоне изменений углов наклона порядка 30–60° является самым проблематичным для очистки. Это объясняется тем, что при этих углах образуемый слой шлама весьма неустойчив.

М. Зибергер и соавторы [23] анализировали влияние изменений свойств растворов с нефтяным основанием на интенсивность очистки шламов в наклонных скважинах. Такие растворы очень широко поль-

зуются при бурении участков скважин, проходящих через продуктивный пласт, поскольку, в отличие от обычных растворов на основе воды, они не наносят вред продуктивному пласту. Обнаружилось, что такие растворы крайне неэффективны в задачах транспорта шламов, несмотря на анализ изменений их реологических свойств, режимов и скорости потока. Установлено, что даже при скоростях потока выше 220 ft/min (1,12 м/с), пределах текучести выше 22 Па проблемы с очисткой скважин ещё сохранялись и неоднократно создавали угрозу ее потери. Заметим, что это заключение достаточно известно. Так, ранее У. Нанс [24] рекомендовал не использовать эти растворы при бурении участков с диаметром выше 12 дюймов и наклоном выше 30°.

М. Зибергер, проводя ряд экспериментов, связывал причину этого явления со следующими процессами: 1) при повышении температуры растворы на масляной основе очень быстро и интенсивно теряют нелинейность в своих реологических связях и становятся менее вязкими; 2) снижение вязкости характерно и для высоких скоростей деформаций. Из работ П. Томрена и С. Окранджи также известно, что жидкости с низкой вязкостью очень плохо очищают скважину, несмотря на попытки увеличения скорости потока и его режима течения. В настоящее время из-за техногенных угроз окружающей среде гораздо реже используют растворы на нефтяной основе. Но результаты этих исследований подчеркивают, что подобные явления могут присутствовать при использовании обычных растворов, т. к. исчезает нелинейность в реологических свойствах при забое и этим можно объяснить существующие погрешности при сравнении результатов расчетов и данных опыта по очистке скважин. К сожалению, эти вопросы также еще недостаточно изучены, еще ждут своего решения и могут составить предмет для дальнейшего исследования.

Выявлению особенностей, определяющих расхождение в результатах ранних экспериментальных исследований, посвященных формированию условий оптимального режима для транспорта жидкости и очистки скважины, посвящена работа [25], выполненная на оборудовании университета Хериот Ватт, Шотландия. В рамках исследований по определению характерного минимального значения скорости, необходимого для полной и эффективной очистки кольцевого пространства, показано [25], что существуют два специфических механизма транспорта шламов в наклонных скважинах. *Первый* из них был выявлен в ранних исследованиях и заключался в том, что отдельные частицы, находящиеся в составе слоя шлама и испытывая на себе действие подъемных сил, скользили по слою шламов. *Второй* отличался тем, что по мере развития условий процесса и увеличения скорости потока эти частицы опять приходили во взвешенное состояние в жидкости и затем двигались вместе с ней вверх. В обоих случаях вращение буровой трубы отличалось тем, что приводило к уменьшению значения минимальной скорости потока, требуемой для очистки, а рост размера частиц приводил к увеличению ее соответствующего значения.

Наличие этих *двух механизмов* транспорта шламов вполне объясняет картину того, что отдельные авторы считали условия турбулентного потока более предпочтительными для очистки, другие, наоборот, связывали это с режимом ламинарного течения. Причиной этого различия может быть то, что такие эксперименты сильно отличаются, т. к. в них фиксируются условия определения режима течения жидкости, но пренебрегается оценками режима течения частиц и изменения структуры и состава смеси.

Исследование этих вопросов нашло продолжение в работе Дж. Педен и соавторов [26], где была использована концепция установления значений минимальной транспортной скорости (разработанная в Дж. Форд и соавторы [25]), посвященная изучению роли отдельных параметров в процессе транспортировки выработки по двухслойной модели. Минимальная транспортная скорость определялась как скорость, при которой движутся все частицы шлама. Это более совершенная в физическом смысле концепция минимальной скорости в сравнении тем положением, по которому ее следует связывать с понятием скорости проскальзывания (что справедливо только для вертикальных скважин) или со скоростью, характерной для переноса частиц шлама (в которой не учитываются различия в скоростях между взвешенными частицами и слоями частиц).

Ценными для приложений выступают данные ранних исследований, представленных Ю. Лу [27], в которых приводятся следующие полуэмпирические уравнения для определения этой минимальной скорости переноса, хорошо зарекомендовавшие себя (по данным [26]) в качественном и количественном отношении в прогнозе реальных процессов. Так, для частиц во взвешенном состоянии имеем (14):

$$\frac{V^2}{d_s \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \sin \varphi} = n_1 \left(\frac{d_s V \rho_f}{\mu} \right)^{n_2} \left(\frac{d_s}{b_{ca}} \right)^{n_3}. \quad (14)$$

Для частиц, находящихся в слоях шлама (15):

$$\begin{aligned} \frac{V^2}{d_s g \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) (\cos \varphi - f_s \sin \varphi)} &= \\ &= m_1 \left(\frac{d_s V \rho_f}{\mu} \right)^{m_2} \left(\frac{d_s}{b_{ca}} \right)^{m_3}. \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь n_i, m_i ($i = \overline{1,3}$) – коэффициенты опыта; φ – угол наклона; b_{ca} – расстояние между стенками внешней и внутренней труб; f_s – коэффициент трения между частицами и стенками труб.

При проверке приведенных выше уравнений было установлено, что очистка отверстия сильно зависит от режима потока. Причем турбулентность дает даже больший эффект, чем особенности поведения реологических свойств потока. Также установлено, что мелкие частицы лучше транспортируются жидкостями с низкой вязкостью, тогда как крупные частицы

эффективнее движутся в высоковязком потоке. Относительно эффекта вращения трубы отмечено, что он проявляется лишь в небольших кольцевых пространствах. Все это способствует пониманию того, что более ранние исследования очистки вертикальных участков скважин с большими значениями кольцевого зазора приводили к заключению об отсутствии влияния крутки стенки трубы на транспорт шлама.

Т. Беккер и соавторы [28] провели серию из 180 экспериментов на том же оборудовании, которое использовали П. Томрен и С. Окранджи для своих экспериментов, в попытке уяснить особенности изменений реологических свойств жидкости на процесс транспорта шлама. Было установлено, что реология способна оказывать наибольшее влияние при низких скоростях потока в скважинах по вертикальным и близким к вертикальным ориентациям ее ствола. В таких условиях наиболее важным для управления реологическим параметром выступает предел текучести. Т. Беккер и соавторы [28] предположили, что критическим параметром является отношение предела текучести к пластической вязкости, которое для степенных жидкостей, согласно Дж. Савинс [29], можно представить в виде (16):

$$\frac{YP}{PV} = \frac{2 - 2^n}{2^n - 1}, \quad (16)$$

где YP обозначает предел текучести; PV – пластическая вязкость; n – показатель в степенном законе (9).

Как указывалось ранее, при почти вертикальных углах и низких кольцевых скоростях более высокие значения этого отношения приводят к лучшей очистке отверстия. Также в [28] подтверждены ранее сделанные выводы, что ламинарный поток предпочтителен при углах от 0 до 45°, а при больших углах (особенно выше 60°) условия турбулентного потока следует считать более эффективными. Кроме того, также подтвержден тот факт, что в условиях турбулентного потока реология мало влияет на транспорт частиц выработки. И чтобы определить режим потока, авторы использовали следующее уравнение [30] типа (17), считая критическим значение числа Рейнольдса порядка 2200 для существования ламинарного потока:

$$Re = \frac{2,79[(OD - ID)/12]^n V^{2-n} \rho_f}{12^n K_a}, \quad (17)$$

где K_a – индекс согласованности степенного закона с поправкой на кольцевой поток.

Стоит отметить, что Т. Сифферман и Т. Беккер [31] провели один из крупнейших качественных экспериментов в исследовании проблем транспорта шлама, для завершения которого потребовалось четыре года, и изучили влияние следующих важных для практики 10 переменных: кольцевая скорость; плотность бурового раствора; реология; тип бурового раствора (на основе нефти или на водной основе); размер частиц; скорость бурения; скорость вращения буровой трубы; эксцентриситет буровой трубы; зазор в кольцевом пространстве и угол наклона скважины (подчеркнем, что учитывались только углы выше 45°).

Все это ориентировано на процессы в горизонтальных, а не в вертикальных и близких к вертикальным скважинах. Обнаружено, что скорость течения бурового раствора была единственным и наиболее важным фактором в транспортировке шлама, за которым следовали плотность бурового раствора, скорость вращения и угол наклона, в то время как эксцентриситет буровой колонны и реология бурового раствора оказывали незначительное влияние.

Эффект вращения и транспорт шлама

Несмотря на то, что вопрос о влиянии режима потока был более или менее хорошо изучен к середине 1990-х гг. (при заключениях ламинарный поток предпочтителен при углах наклона скважин ниже 45°, турбулентный поток – при углах выше 60°), роль вращения буровой трубы все еще оставалась предметом анализа, так как результаты лабораторных исследований отмечали его незначительность, в то время как результаты на месторождениях позволяли утверждать, что, на самом деле, это очень заметный эффект со значительным влиянием на очистку скважины. Поэтому Р. Санчес и соавторы [32] использовали протяженную (100 футов, 4 ½ дюйма буровая труба в 8” обсадной колонне) испытательную секцию для исследования влияния скорости вращения. Было выполнено более 600 испытаний со скоростью вращения от 0 до 175 об/мин, а также с изменением угла наклона скважины (40°, 65°, 80° и 90°), реологии бурового раствора, размера шлама и расхода бурового раствора. Результаты показали, что вращение буровой трубы дает очень существенный эффект, особенно при транспортировке небольших частиц. Весьма важно отметить, что данные результаты получены в предположении наличия орбитального вращения внутренней трубы, поэтому и обнаружено расхождение с другими результатами, полученными при анализе частного эффекта, обусловленного лишь коаксиальным вращением. Вращательное движение буровой трубы интенсифицирует процесс транспорта, захватывая больше частиц. Это приводит к снижению концентрации шлама (на 80 %) при меньших кольцевых скоростях и при более высоких углах наклона. Однако, его влияние снижается с увеличением кольцевой скорости и уменьшением наклона скважины. Но, оно никогда не становится пренебрежимо малым, даже при самом низком угле наклона в 40°.

Т. Ларсен и соавторы [33] предприняли попытку построения эмпирической модели для прогноза процесса, обеспечивающего условия транспорта шлама с минимальной кольцевой скоростью, необходимой для предотвращения развития эффектов *седиментации* частиц шлама в плотных слабо инерционных слоях, и следящего за эволюцией диффузионной структуры частиц шлама в кольцевом пространстве в условиях, если локальная скорость потока становится ниже этого характерного значения. Их уравнение справедливо только для неподвижных труб (при допущении эксцентриситета межтрубного пространства и расположения внутренней трубы на поверхности нижней стенки колонны) при углах выше 55°. В [33] исполь-

зовали рабочую транспортную среду с параметрами Бингамовской жидкости. Критическая скорость транспортировки соответствовала условиям шлама, находящегося во взвешенном состоянии, для которых наиболее важным фактором является расчет скорости скольжения. Скорость скольжения определяется функциональной связью от реофизических свойств, первоначально предложенной для расчета в вертикальных скважинах, но путем введения экспериментальных поправочных коэффициентов адаптирована на учет условий наклона и веса бурового раствора в виде (18), (19):

$$V_{slip} = 0,00516\mu_a + 3,006, \text{ если } \mu_a < 53 \text{ сП; } \quad (18)$$

$$V_{slip} = 0,02554(\mu_a - 53) + 3,28, \text{ если } \mu_a \geq 53 \text{ сП. } \quad (19)$$

Заметим, что $[V_{slip}]$ – ft/s. Вместе с тем авторами была проведена кропотливая работа по расширению возможностей применения критериальных связей путем введения отдельных эмпирических поправочных коэффициентов (например, на учет наклона скважины, веса бурового раствора, размера частиц и т. п.), имеющих вид (20)–(22):

- коэффициент учета веса бурового раствора:

$$C_{MW} = 1 - 0,0333(\rho_f - 8,7), \text{ при } \rho_f < 8,7, \text{ lb/gal;}$$

$$C_{MW} = 1, \text{ при } \rho_f \geq 8,7, \text{ lb/gal} \quad (20)$$

- коэффициент учета угла наклона:

$$C_{inc} = 0,0342\theta - 0,000233\theta^2, \quad (21)$$

- коэффициент учета размера частиц шлама:

$$C_{size} = -1,04D_{50} + 1,286. \quad (22)$$

Здесь D_{50} – средний размер частиц шлама, [in]. Причем, если расход насоса (Q_{pump}) меньше расхода (Q_{crit}), необходимого для обеспечения критической скорости, предлагается рассчитывать концентрацию частиц шлама (\bar{C}), входящих в слой шламов, с помощью следующего уравнения (23):

$$\bar{C} = 100 \left(1 - \frac{Q_{pump}}{Q_{crit}} \right) (1 - \varphi), \quad (23)$$

где φ – пористость слоя шламов.

Стоит отметить, что проблема реализации соотношений Ларсена (18)–(23) на практике состоит в том, что они не в полной мере отвечают процессам, сопровождающим эрозию и разрушение новых формирующихся слоев шламов в ситуациях останова/запуска специального бурового оборудования. Кроме того, следует учитывать, что при отсутствии работы насосов частицы оседают и формируют слой шламов, а это заставляет искать решения эффективной очистки, используя другие подходы, не ограничиваясь только представлениями о минимальной скорости. Учитывая это, А. Мартинс с соавторами [34] разработали корреляцию для прогнозирования высоты слоя выработки после циркуляции в течение определенного периода времени. Опыты показывают, что значение этого параметра экспоненциально уменьшается со временем и может описываться связью типа (24):

$$C_t = C_R + Ae^{(-t/\tau)}, \quad (24)$$

где C_R – концентрация частиц шлама, соответствующая условиям процесса достаточно большого временного периода; A – разрушаемая концентрация частиц шлама, τ – характерное время технологического процесса, определяемое в виде (25):

$$\tau = \sqrt{a(RPM + b)^c Q^d D / 8}, \quad (25)$$

где RPM – это скорость вращения; Q – расход насоса; D – диаметр скважины; a, b, c, d – экспериментальные параметры. Здесь важно отметить, так как авторы не позволяли трубе вращаться орбитально, уравнение (25) применимо только в ситуациях $RPM=0$. Поэтому целесообразна работа по построению связей, учитывающих орбитальное движение трубы, определению C_R с учетом факта, что их сумма представляет значение суммарной концентрации шлама, произведенного во время бурения. Выше отмечалось, что орбитальное движение бурильной трубы оказывает существенное влияние на процесс транспортировки шлама и его коаксиальное движение становится более эффективным в сравнении с заключениями предыдущих исследований.

Так, уяснение деталей этого процесса приводят З. Филиппа и соавторов [35] к заключению, что вихри Тейлора, генерируемые вращательными эффектами в кольцевом пространстве во время бурения, могут интенсифицировать процесс очистки от шлама. Результаты исследований отмечают, что вихри Тейлора (схематично представленные на рис. 5) образуются в условиях, когда локальное число Тейлора (Ta , определенное в виде (26)) превышает критическое значение ($Ta_{cr}=3414$) [36]:

$$Ta = 4(\rho\omega / \mu)^2 (b^4 OD^2 / (ID^2 - OD^2)), \quad (26)$$

где ω – угловая скорость, (рад/с); b – ширина кольцевого зазора, м; ID, OD – внутренний и внешний диаметры труб.

Заметим, что одними из первых результатов, затрагивающих проблему оценки влияния этих вихрей на транспорт шламов, были данные исследований Т. Локетта и соавторы [37]. Детализация исследований, выполненная в [35], позволила утверждать, что в рабочем диапазоне скоростей вращения стенки в процессе бурения аксиальный перенос импульса препятствует вихреобразованию и структура течения с вихревыми особенностями формируется только при $Re < 1000$. В [35] отмечено, что для процесса подъема и захвата частиц вихревым потоком важно значение показателя степенного реологического закона n в (9). Однако увеличение этого параметра приведет также к снижению влияния свойств жидкости (в смысле «разжижения при сдвиге»), что нежелательно, поскольку это способно интенсифицировать нагрузки на пласт, а также специальное оборудование для бурения. В указанном смысле, несмотря на то, что результаты [35] имеют относительно низкую практическую ценность, все же их следует привлекать к уяснению особенностей и противоречий, отмеченных в опубликованных более ранних работах другими исследова-

телями, в отношении роли коаксиального вращения труб в транспорте частиц шлама.

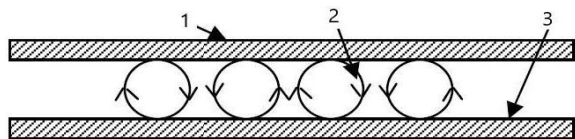


Рис. 5. Вихри Тейлора, образующиеся в кольцевом пространстве горизонтальных участков скважин [35]: 1 – внутренняя труба; 2 – вихри; 3 – внешняя труба

Fig. 5. Taylor vortices formed in the annular space [35]: 1 – inner pipe; 2 – eddies; 3 – outer pipe

Особенности новых технологий и детали их моделирования в процессах бурения

С 2000-х гг. бурение на депрессии стало новой технологией бурения истощенных пластов. Этот тип бурения использует легкую пену в качестве бурового раствора. А. Мартинс и соавторы [38] исследовали свойства пены применительно к транспортировке шлама с использованием новой испытательной секции экспериментальной установки, разработанной Petrobras, которая способна моделировать скважинные условия. Обращение к пенам обусловлено тем, что для них характерна *слабосжимаемость*. Незначительное число исследований, в которых пены используются в качестве рабочей среды, объясняется отсутствием специального оборудования для проведения опытов при высоких давлениях и температурных напорах, приводящих к существенному изменению реофизических свойств среды. Кроме того, ранее выполненные исследования показали, что пены действительно очень подходят для транспортировки частиц шлама, поскольку способны удерживать частицы во взвешенном состоянии даже в моменты выключения и последующего простоя оборудования (насосов). Однако для того, чтобы это имело место, соотношение концентрации газа и жидкости (известное как качество пены) в данной смеси должно составлять 94–98 % [39]. Поддержание этого соотношения чрезвычайно сложно в полевых условиях, и, естественно, при бурении пеной также образуется слой шлама. Следовательно, как и в случае с обычными буровыми растворами, важным для пенопластов является вопрос о готовности и способности эффективно разрушать слой осаждаемых частиц. Отметим, что в [38] предлагается эмпирическое уравнение для эрозии этого слоя в виде (27):

$$\frac{h}{OD} = a - b\alpha^c, \quad (27)$$

где h/OD – отношение высоты слоя шлама к диаметру скважины; α – коэффициент качества пены; a, b, c – эмпирические коэффициенты. По [40] можно представить реологические свойства пены как жидкости со степенным законом типа (7) с параметрами вида (28), (29):

$$n = 0,8242 \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^{0,5164}; \quad (28)$$

$$K = 0,0813 \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^{1,5909}. \quad (29)$$

Тогда можно написать (27) в виде (30), (31):

$$\frac{h}{OD} = a - b \text{Re}^c n^d; \quad (30)$$

$$\text{Re} = \frac{8OD^n V^{2-n} \rho_f}{K \left(2 \frac{(3n-1)}{n} \right)^n}. \quad (31)$$

Подчеркнем, что связи (30), (31) сформулированы для случая с неподвижной стенкой внутренней трубы и при отсутствии в составе смеси капельной жидкой фазы, а также фактора ее эксцентricности.

В дополнение к вопросу о бурении на депрессии отметим, что в 2000-х гг. также весьма популярной была технология бурения с гибкими трубами, включающая специфические проблемы с точки зрения очистки скважин в силу того, что в небольших кольцевых пространствах скорости течения ограничены. Кроме того, конструктивные особенности оборудования для данного бурения исключают наличие вращательной подвижности стенки трубы. В таких условиях для разрушения образующегося слоя шлама эффективна гидравлическая эрозия. Поэтому важно представлять, как долго и с помощью каких параметров потока жидкости этого можно добиться. С. Уокер и Дж. Ли [41], выполнив более 700 измерений процесса с переменными параметрами жидкости и размеров частиц шлама, обнаружили (подобно ранним исследованиям Мартинса), что функциональная связь параметров, ответственных за удаление шлама с течением времени, носит экспоненциальный характер. Причем наиболее важными факторами управления очисткой наклонных скважин являются скорость и вязкость рабочей жидкости. Установлено, что использование жидкостей с низкой вязкостью при перекачке с высокими скоростями в узких областях кольцевого зазора весьма продуктивно для очистки сечений специального бурового оборудования.

Последующие исследования Дж. Ли [42] имели своей целью выяснение сути комплексных проблем, возникающих при объединении технологий бурения с гибкими трубами и бурением на депрессии. Причем вместо пены использовалась воздушно-капельно-жидкостная (азированная) смесь. Обширные исследования позволили утверждать, что в случае трехфазного потока без вращения трубы: 1) существует характерная кольцевая скорость, ниже которой транспорт частиц шлама весьма затруднен по отношению к рассматриваемым условиям процесса (но отличного от случая транспорта с жидкими псевдопластичными растворами); 2) чтобы иметь какую-либо несущую способность, объемная доля жидких фаз должна составлять не менее 50 % (здесь уместно сравнение соответствующих процессов с пенами, показывающими,

что эта объемная доля должна быть лишь менее 8 %):
3) эрозия частиц шлама соответствует экспоненциальной зависимости, а время очистки может быть в виде (32):

$$t = \frac{V_0}{C_0 Q} \ln \left(\frac{V_0}{V_t} \right), \quad (32)$$

где V_0 – исходный объем частиц шлама в затрубном пространстве (м^3); V_t – количество частиц после циркуляции в течение времени t , [мин] при скорости потока с расходом Q , [$\text{м}^3/\text{мин}$]; C_0 – исходная концентрация частиц шлама в затрубном пространстве. Следует отметить, что (32) – это общее уравнение, и необходима работа по введению поправочных коэффициентов для учета свойств и режимных параметров бурового раствора, особенностей шлама, специфики потока и деталей геометрии. Указанное подчеркивает, что уточнение формы зависимости (32) может составить предмет перспективных исследований по очистке областей от шлама.

С. Наганави и соавторы [43] также исследовали процесс транспортировки шлама с использованием азрированного бурового раствора. Обнаружено, что для того чтобы шлам не загромождал сечение и не образовывался на границах кольцевого пространства, концентрация частиц в затрубной области должна быть менее 4 %. Этот факт следует считать подтверждением правила Пиготта, сформулированного еще 50 лет назад, что эффективная очистка отвечает условиям при концентрации шлама в затрубном пространстве в объеме меньше 5 %. Однако в [43] установлено, что для предотвращения повышения концентрации частиц в затрубном пространстве (выше 4–5 %-го критического уровня) необходимы достаточно высокие кольцевые скорости. И хотя добавление воздуха в систему несколько снизило это требование, очистку в горизонтальных сечениях определяет минимальная необходимая кольцевая скорость порядка 1,5 м/с. Все же эти скорости определенно высоки, но возможны на небольших участках скважины (например, кольцевая скорость 1,5 м/с будет соответствовать 570 галлонам в минуту в 8½-дюймовой скважине с пятидюймовыми бурильными трубами). Однако на других размерах отверстий их будет очень трудно получить (например, в 12,25-дюймовой скважине с пятидюймовыми бурильными трубами потребуются скорости потока порядка 1500 gal/min). Все это еще раз подтверждает тот факт, что практически невозможно предотвратить образование слоя частиц шлама в кольцевом пространстве в горизонтальных и близких к горизонтальным стволах скважин. В таких условиях решение проблемы очистки скважин заключается не в предотвращении образования слоя шлама, а в создании эффектов и механизмов для его быстрой и эффективной эрозии после бурения.

Далее П. Виейра и др. [44] также занимались исследованием азрированных систем, что позволило утверждать, что несмотря на то, что частицы транспортируются только жидкой фазой, кольцевая скорость жидкой фазы не является единственным и важ-

ным параметром их транспортировки, в данном процессе заметно влияние суммарной скорости потока обеих фаз. Это означает, что если достижение требуемых скоростей жидкости для предотвращения образования слоев шлама невозможно, эти требования можно скорректировать путем увеличения скорости воздушного потока. Однако следует помнить, что увеличение скорости воздушного потока приведет к снижению значения эффективной плотности и, следовательно, это не всегда практически целесообразно для рассматриваемого процесса. Кроме того, в [44] предлагается в практику исследований корреляционная связь для горизонтальных и квазигоризонтальных скважин, которая предсказывает требуемую скорость воздушного потока при данной скорости потока жидкости, препятствующей механизмам образования слоя шлама, в виде (33):

$$Q_g \geq \frac{11,5752}{B} \ln \left(\frac{A(ID^2 - OD^2)}{0,4085Q_l} \right) (ID^2 - OD^2) \frac{P_{BH}}{T_{BH}}, \quad (33)$$

где Q_g – расход газа, $\text{ft}^3/\text{мин}$; Q_l – расход жидкости, $\text{gal}/\text{мин}$; ID и OD – диаметры наружной и внутренней труб, [in]; P_{BH} – забойное давление, lbf/in^2 ; T_{BH} – забойная температура, °Ra; A , B – экспериментальные коэффициенты.

Р. Авила и соавторы [45] продолжали исследовать несущую способность многофазных систем, но они ограничивали свои исследования углами с отклонением от горизонта порядка 30°, 45°, 60°, а также учитывали орбитальное движение бурильной трубы. Результаты позволили сформулировать корреляционное уравнение по учету орбитального вращения бурильной трубы, приводящего к снижению скорости потока газа, необходимой для поддержания концентрации частиц шлама в затрубном пространстве в объеме меньше 1 %. Одним из главных результатов было подтверждение факта, что орбитальное вращательное движение влияет на транспорт шлама гораздо больше, чем режим соответствующего прямого потока. Отмечено, что добавление газа в систему снизило требования к значению скорости потока для жидкой фазы. И это также подтверждает ранее полученные результаты П. Виейра и др. [44].

М. Дан и соавторы [46] приняли во внимание фактор, который до сих пор игнорировался исследователями. Они заметили, что процесс очистки отверстий неодинаков для частиц произвольного размера и что теоретические модели, которые составляют основу многих приложений для бурения, не учитывают это обстоятельство. Последнее приводит к большим ошибкам в оценках деталей процесса. Анализ возможностей отдельных таких моделей, успешных при прогнозе транспорта частиц крупных размеров, показал существенное расхождение с данными опытов (до 80 %) при моделировании мелких частиц. Такие частицы трудно удалить из скважины. Они имеют наибольшую склонность к седиментации, коагуляции в слое шлама и нуждаются в детальном изучении. Стоит отметить, что поведение мелких частиц в слое неясно. Дан и др. в своих экспериментах использова-

ли только частицы трех размеров, самый мелкий из которых соответствовал 0,45 мм. Однако стандартное определение песка, основанное на ISO-14688, имеет диаметр от 0,063 до 2 мм, и необходимы дальнейшие исследования, чтобы выяснить, насколько изменение среднего диаметра частиц влияет на процесс очистки отверстия.

М. Озбайоглу и др. [47] вернулись к вопросу корректного прогноза критических значений кольцевой скорости течения и режима, препятствующего процессам образования слоя шламов. Исследование позволило выявить десять факторов, влияющих на эффективность очистки пространства, а на основе теории подобия сформулировать семь безразмерных комбинаций, составленных из параметров: концентрация частиц выработки (самостоятельно влияющая на транспортировку шлама); среднemasсовая скорость кольцевого потока; угол наклона; гидравлический диаметр; плотности жидкости и частиц шлама; геометрия частиц; вязкость; скорость вращения трубы и сила тяжести. В рамках безразмерного анализа сформулированы критериальные связи прогноза роста высоты слоя шлама и значений критической кольцевой скорости. Заметим, что данная зависимость в виде (34) имеет отдельные недостатки, влияющие на точность прогноза: 1) связь (34) сформулирована по данным измерений в тестовых участках с ограниченной продольной длиной. Заметим, что полномасштабные процессы транспорта шлама на оборудовании университета Тулса, США, соответствуют длине порядка 100 ft. Это исключает влияние возмущений на входе на характеристики процесса. В сравнении с этим, в [47] длина тестовой секции не превышает 15...40 ft, что заставляет учитывать конвективно-диффузионные нелинейные процессы в изменении структуры потока и вносить погрешности к значениям определяемых параметров пространственной задачи исследования; 2) внутренняя труба размещена эксцентрично и не способна к вращению; 3) частицы, использованные в эксперименте, имеют диаметр 3 мм. Это приносит неопределенность учета частиц более мелкого состава, вызывающих увеличение слоя шлама. Тем не менее предлагаемые ниже зависимости (34), (35) ценны для практики, и вид их может быть уточнен по мере детализации явлений, определяющих транспорт шлама:

$$\frac{A_{bed}}{A_{well}} = 0,7524 \left[\left(\frac{\rho v (D_o - D_i)}{\mu} \right)^{-0,1023} \times \right. \\ \left. \times \theta^{0,34} \left(\frac{v^2}{D_o - D_i} \right)^{-0,2933} C_c^{0,2108} \right]; \quad (34)$$

$$v_{crit} = 3,9835 \left[\theta^{0,0378} D_o^{0,4686} \times \right. \\ \left. \times ROP^{0,2343} (D_o + D_i)^{-0,2343} \times \right. \\ \left. \times \mu^{0,1137} (D_o - D_i)^{-0,022} \rho^{-0,1137} \right]; \quad (35)$$

где A_{bed} – площадь режущего слоя; A_{well} – поперечное сечение ствола скважины; ρ – плотность жидкости; v – кольцевая скорость; D_o – диаметр наружной трубы;

D_i – диаметр внутренней трубы; θ – угол наклона; C_c – концентрация частиц; ROP – механическая скорость проходки; μ – вязкость жидкости.

А. Гумати и Х. Такаши [48] исследовали несущую способность пен и установили, что она близка по реологическим свойствам к модели степенного закона. Это заключение способствовало разработке математической модели транспорта шлама и численному прогнозированию величины потерь давления в кольцевом пространстве для условий изотермического процесса. Результаты позволили установить, что в отличие от двухфазных систем пены фактически теряют свою несущую способность при увеличении кольцевой скорости. Физически это можно объяснить тем, что на самом деле пенопласты не транспортируют, а захватывают частицы шлама в силу своей высокой вязкости. И, являясь псевдопластичными жидкостями, они теряют свою вязкость в режимах при более высоких значениях кольцевых скоростей.

Новые технологии, инструментарий исследований и имитационное моделирование процесса очистки способствовали получению представлений об изменении поля давления на долоте в режиме реального времени. Практический опыт использования специального оборудования подтверждает, что это давление эквивалентно потерям давления в кольцевом пространстве. Поэтому разумно допустить, что оно опосредованно может быть связано с концентрацией шламов в затрубном пространстве. Это наводит на размышление, что в случае построения такой связи становится возможной оценка количества шламов в затрубном пространстве в режиме реального времени. Последнее составляет практическую ценность в вопросах выработки оптимальных решений по управлению оборудованием и составляет дополнительную современную проблему исследований процесса транспорта частиц шлама. Заметим, что М. Соргун и соавторы [49] получили очень интересные результаты в этой области исследований. Так, проведя более 700 испытаний, они получили ряд эмпирических уравнений, связывающих площадь слоя шламов с коэффициентом сопротивления трения Фаннинга для жидкостей с высокой и низкой вязкостью. Поскольку коэффициент сопротивления трения Фаннинга связан с падением давления соотношением (36):

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = \frac{f \rho v^2}{21,1(D_o - D_i)}, \quad (36)$$

по величине падения давления на участке длины ΔL можно определить площадь слоя шламов в этой секции. Заметим, что в (36) все единицы измерения даны в американской системе единиц измерения, которая приемлема в бурении в большинстве стран мира, а давление в [lbf/in²], длина в [ft], плотность в [lb/gal], диаметры в [in], скорость в [ft/s]. Также следует иметь в виду, что в действительности это уравнение не вполне корректно, поскольку применимо только для небольшого участка прямой трубы, тогда как геометрия скважины включает в себя несколько изгибов и изменений в диаметре. Это означает, что в общей ве-

личине изменения поля давления следует учитывать локальные потери на трение из-за изменений поля скорости. Поэтому, если вместо одного датчика давления в долоте будет использоваться несколько, ориентированных на учет особенностей процесса в особых локальных зонах, этот метод будет адекватным реальным условиям.

М. Соргун [50] разработал оригинальное уравнение прогноза перепада поля давления с учетом изменений особенностей геометрии и углов отверстий (от 60 до 90°) и рекомендовал его в практику прикладных исследований в виде (37):

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = 0,08 \left[\frac{A_{bed}}{A_{well}} + Re^{0,11} + +0,0007 Re R + C_c - 0,01\theta \right], \quad (37)$$

где A_{bed} и $A_{wellbore}$ – поперечные сечения режущего слоя и кольца; Re – число Рейнольдса, определенное по осевой скорости; C_c – концентрация шлама, поступающего в систему; θ – угол наклона от вертикали; ReR – число Рейнольдса, определяемое по тангенциальной скорости следующим образом (38):

$$ReR = \frac{2,025 \rho \omega (D_o - D_i) D_i}{\mu}. \quad (38)$$

Заметим, что все величины в (38) соответствуют нефтепромысловым единицам измерений, описанных выше; ω – это угловая скорость вращения, об/мин; μ – эффективная вращательная вязкость, рассчитанная по (39) для степенных жидкостей [51]:

$$\mu = k \left(\frac{1}{n} \right)^n \xi \left(\frac{1}{\omega} \right)^{1-n}, \quad (39)$$

где k и n – коэффициенты степенного закона, ξ определяется в виде (40):

$$\xi = \left(\frac{D_o^2 - D_i^2}{D_o^2} \right) \left(\frac{15}{\pi} \right)^{1-n} \left(1 / \left(1 - \left(\frac{D_o}{D_i} \right)^{-\frac{2}{n}} \right) \right)^n. \quad (40)$$

В ходе экспериментов [50] установлено, что вращение трубы эффективно при условиях ее эксцентричности. Это подчеркивает, что значительное влияние на процесс оказывает подвижность стенки трубы при относительно небольших скоростях прямоочного движения потока. Отдельные результаты показывают [15–17], что это отвечает условиям течения с критерием Россби, $Ro=W/U \leq 3$. Указанные проблемы слабо изучены и составляют предмет перспективных исследований при эксплуатации и проектировании скважин.

Прогресс процедур численного моделирования

В последнее десятилетие вычислительные методы получили дополнительный импульс изучения рассматриваемых проблем вследствие расширения базы экспериментальных данных о деталях очистки оборудования, совершенствования гидродинамических моделей. В этом направлении яркими представляются результаты, например, С. Нагавана и соавторов [52],

которые построили численное решение по имеющейся математической модели, тестировали результаты на лабораторных экспериментах с целью уточнения коэффициентов модели, а затем применили модель для прогноза потерь давления при бурении в реальной скважине. Сравнение с фактическими полевыми данными показало, что, хотя модель правильно предсказывала гидродинамические тренды поведения поля скорости, фактические значения не совпадали с экспериментом. Это объясняется нестабильностью и обвалом стенок ствола скважины.

В работах Ф. Жанга [53, 54] численное моделирование позволило обобщить результаты в диаграммы, полезные для анализа процессов в полевых условиях при прогнозировании изменений объемной концентрации шлама в стволе скважины. В дальнейшем соотношение сведений по диаграммам и данным измерений указало на погрешность результатов (до 20 %) при анализе влияния на процесс следующих факторов: наклона скважины; изменений вязкости и плотности рабочей жидкости; плотности частиц шлама; скоростей бурения, вращения стенки и кольцевого потока. Детали результатов работ Жанга [53], Жанга и соавторов [54] иллюстрируют данные, представленные на рис. 6.

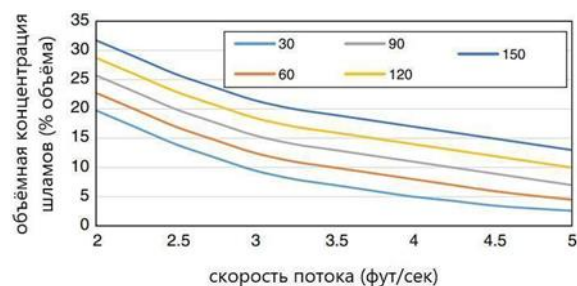


Рис. 6. Распределения полевых карт [54] об изменениях объемной концентрации шлама в зависимости от изменений скорости потока. Линии – углы наклонов от 45 до 50°, числа – скорости бурения, ft/h

Fig. 6. Field chart distributions [54] (the chart shown here is for inclinations from 45 to 50°). The numbers in the box represent drilling speed in feet per hour

Заметим, что при практическом использовании результаты рис. 6 должны быть скорректированы с использованием данных для поправочных коэффициентов для вращения буровой трубы, вязкости жидкости и плотности жидкости и частиц.

Также интересные результаты получены Б. Вернером [55]. Долгое время считалось, что растворы на нефтяной основе не вполне пригодны для практической очистки и уступают растворам на водной основе. Результаты на месторождении указывают на закономерности, которые не соответствуют этому предположению. Отмечено, что существуют различия в способности буровых растворов на масляной и водной основе к очистке. Данные [55] показывают, что несущая способность обеих жидкостей полностью зависит от их реологических свойств. Однако в способности разрушать слой шлама буровые растворы на масля-

ной основе имеют явное преимущество. Этот результат следует включить в предмет перспективных исследований.

Анализ библиографических исследований показывает, что одной из самых больших проблем при изучении процессов транспортировки шламов в затрубном пространстве является тот факт, что из-за непрозрачности большинства буровых растворов чрезвычайно трудно визуально наблюдать за самим процессом и можно собирать только интегральную информацию (например, данные изменений массовой скорости жидкости, объёмной концентрации шламов и т. д.). Однако существуют случаи, когда знание об изменениях локальных параметров весьма полезно, особенно для валидации и верификации методов, оптимизации математических и численных моделей. Решению этих проблем способствует использование карбопола, который представляет собой прозрачную жидкость со степенным реологическим законом. Однако приготовить раствор карбопола, который был бы реологически идентичен определенной буровой жидкости в широком диапазоне скоростей сдвига чрезвычайно сложно. Из [55] известно, что две жидкости с одинаковыми реологическими профилями не обязательно ведут себя одинаково в экспериментах по очистке отверстий из-за различий в коэффициентах сопротивления трения. Таким образом, карбопольный метод неадекватен в исследованиях процессов транспорта шлама. Однако можно отметить, что существует технология, успешно использованная при изучении многофазных потоков в трубах и резервуарах и в последнее время рекомендуемая для анализа транспортировки частиц шлама. Это методика, известная как томография с электрическим сопротивлением, является относительно недорогой и не имеет ни одного из недостатков карбопольной методики. Так, например, М. Курейши и соавторы [56], А. Захид и соавторы [57] использовали эту технику для изучения трехфазного потока воздуха, воды и стеклянных шариков в кольцевом пространстве (на рис. 7 показано изображение данных структуры поперечного сечения трубы, полученное этим способом).

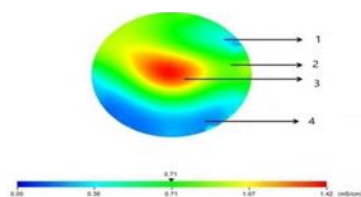


Рис. 7. Изображение томографии с электрическим сопротивлением, показывающее поперечное сечение кольцевого пространства, содержащего три разные фазы с разной электропроводностью, представленной разными цветами (по данным Курейши [56]: 1 – воздух; 2 – вода; 3 – труба; 4 – стеклянные частицы)

Fig. 7. ERT image showing the cross section of an annular space containing three different phases with different electrical conductivities represented by different colors. Data from M.F. Qureishi [56]: 1 – air; 2 – water; 3 – tube; 4 – glass particles

Отметим, что поле рассчитанных значений концентраций отвечает частям площади поперечного сечения (с пикселями разного цвета), а индивидуальный цвет отвечает различным и соответствующим значениям электрического сопротивления и, следовательно, характеризует разное вещество, которое подлежит очистке.

Заключение

Тенденции, возможности и перспективы

Проведенный анализ данных уровня и состояния проблем исследования процессов транспорта шламов в скважинах с произвольной образующей ее ствола позволяет отметить следующее.

1. Физические механизмы возникновения условий, обеспечивающих транспорт частиц произвольного размера и геометрии, в большой мере остаются необъясненными, несмотря на достаточно долгую историю их интенсивных исследований.
2. Явления процессов переноса массы, импульса в транспортируемой среде описываются нетривиальными соотношениями, богатыми нелинейными эффектами.
3. Процедуры расчета, методы наблюдений и их инструментарий ориентированы на анализ пространственных процессов в малоразмерных участках испытательных секций преимущественно в квазистационарных условиях, что создает проблемы обобщения развития явлений с конвективно-диффузионным взаимодействием в прямолинейном и закрученном движениях рабочей гомогенной и гетерогенной аномально-вязкой среды.
4. Моделирование вращательных течений бурового раствора еще находится в стадии идентификации, анализа, понимания и требует детальных разработок эффективных теоретических и экспериментальных методов их исследования.
5. Последние 30–40 лет рубежа XX–XXI вв. выявили определяющее влияние и роль реологических свойств рабочей жидкости на интенсивность и эффективность процесса очистки. В связи с этим в ближайшие годы внимание исследователей будет сосредоточено на вопросах: уяснения эффектов течения смеси в потоке, закрученном стенкой буровой трубы; построения новых и совершенствования имеющихся математических моделей эволюции размеров слоя и процессов в шламе; определения эффектов от изменения реологических свойств сред, интенсифицирующих очистку; калибровки критериальных связей и их параметров в реальных условиях транспорта шлама, способствующих поддержанию оптимального режима функционирования специального бурового оборудования.
6. Инструментарий экспериментального оборудования с уникальными полномасштабными установками для измерений деталей пространственного поведения локальных и интегральных параметров процесса: полей скоростей, компонентного состава смеси и взаимодействий между частицами,

способен дать уточнения результатов, полученных на базе малоразмерных систем. По-видимому, за это могут отвечать «тонкие» эффекты в мелко-масштабных структурах, порождаемые процедурой работы большей измерительной секции и связанные с диффузионным переносом, которые способны повысить восприимчивость (склонность) частиц шлама к эрозии. Более того, разрешающая способность инструментария (фото- и видеотехника), процедуры обработки данных и сами результаты численного моделирования процессов развития и затухания крутки по длине по оригинальным RANS-моделям второго порядка позволяют уяснить особенности переходов вихревой природы при течении аномально-вязких систем. А представления о структуре потока в зонах очистки расширяют данные метода томографии с электрическим сопротивлением.

7. В практической части особую ценность приобретают результаты анализа деталей процесса транспорта по критериальным соотношениям, обобщающим многочисленные серии опытов: минимальной скорости, необходимой для эффективной очистки скважины в условиях угла наклона скважины меньше 45° (13); минимальной скорости переноса для частиц во взвешенном состоянии (14) и слое шлама (15); скоростей скольжения, контролирующей эффективность транспорта и очистки (18), (19); параметры потока, препятствующие механизму образования слоя шлама (33); прогноза роста высоты слоя шлама (34) и значений критической кольцевой скорости (35); перепада поля давления и коэффициента сопротивления трения (36) и т. д.
8. В ряду актуальных и ждущих своего решения находятся проблемы: управления эквивалентной плотностью циркуляции [58]; увеличения крутящего момента, снижения скорости бурения и износа бурового оборудования, которые в рамках исследований очистки скважины определяют современную задачу бурения.
9. Общий анализ проблем представленного материала показывает, что наиболее плодотворными практическими шагами, обеспечивающими эффективность транспортировки шлама, будут: ограничение объема слоя шлама при бурении с помощью управления реологией бурового раствора и скоростями потока; эффективная эрозия данного слоя после бурения участка определенной длины. Причем последнее направление слабо изучено и опирается на отдельные результаты, описывающие процесс эрозии функциями экспоненциального вида, эмпирические коэффициенты которой требуют оптимизации на данных реального процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Miska S., Reed T., Kuru E. *Advanced cuttings transport study. Technical Report*. Tulsa, Oklahoma, USA, University of Tulsa, 2004. 284 p.

10. Бурение на депрессии с использованием гибких труб содержит свои сложности и является предметом повышенного интереса. Отдельные исследования посвящены разработке новых буровых растворов [59–62], анализу течений с внезапным изменением скорости потока [63], что без ясного анализа очистки невозможно.

Приоритеты будущих научных разработок

Выполненное исследование позволяет определить ряд приоритетных задач транспорта шлама, в основе которых лежит гидродинамический подход, как универсальный ключ к пониманию эволюции дисперсных потоков во внутренних системах, осложненных инерционными эффектами, турбулентностью, столкновениями частиц, реофизическими изменениями свойств смеси, суть которых сводятся к следующему.

1. Требуется детальное физико-математическое и численное моделирование гидродинамических и диффузионных эффектов, сопровождающих изменение поля давления в затрубном пространстве. Это крайне важно, т. к. мониторинг процесса увеличения перепада давления в кольцевой области может дать оценки наличия объема шлама в затрубном пространстве, характерного для реальных условий бурения.
2. Необходимо уяснить особенности влияния закрученного течения, обусловленного орбитальным движением буровой колонны, на транспорт шлама. Эти процессы почти не изучены и актуальны в разработках замыканий к построению многопараметрических турбулентных гидродинамических и диффузионных моделей течения шлама в данных условиях.
3. С целью практических приложений важно проанализировать и установить закономерности процесса подвижности/осаждения частиц шлама при сдвиговом движении жидкости в широком диапазоне изменений параметров, характеризующих изменение ее реологических свойств. В настоящее время установлено, что различные жидкости со специфической реологией демонстрируют совершенно разные возможности при очистке отверстий.
4. Провести тщательную коррекцию имеющихся опытных данных по комплексному моделированию процессов транспорта шлама при сравнении их с современным материалом, полученным на полномасштабных установках, а также с использованием систем с контактной/бесконтактной регистрацией параметров. Например, лазерной анемометрии, томографии с электрическим сопротивлением, которая обеспечивает точную и кратковременную визуализацию кольцевого пространства, и может иметь большое значение при верификации математических, численных и полуматематических моделей.

2. Yan T., Wang K., Sun X., Luan S., Shao S. State-of-the-art cuttings transport with aerated liquid and foam in complex structure wells. *Renewable and Sustainable Energy. Reviews*, 2014, vol. 37, pp. 560–568.

3. Pigott R.J.S. Mud flow in drilling. *Drilling and production practice*. New York, American Petroleum Institute, January 1941. pp. 91–103.
4. Hall H.N., Thompson H., Nuss F. Ability of drilling mud to lift bit cuttings. *Journal of Petroleum Technology*, 1950, vol. 2, no. 2, pp. 35–46.
5. Williams C.E. Jr, Bruce G.H. Carrying capacity of drilling muds. *Journal of Petroleum Technology*, 1951 vol. 3, no. 4, pp. 111–120.
6. Hopkin E.A. Factors affecting cuttings removal during rotary drilling. *Journal of Petroleum Technology*, 1967, vol. 19, no. 6, pp. 807–814.
7. 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.
8. Wadell H. Volume, shape, and roundness of quartz particles. *The Journal of Geology*, 1935, vol. 43, no. 3, pp. 250–280.
9. 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.
10. Zeidler U.H. *Fluid and drilled particle dynamics related to drilling mud carrying capacity*. Dr. Diss. Tulsa, 1974. 152 p.
11. 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.
12. Hussaini S.M., Azar J.J. Experimental study of drilled cuttings transport using common drilling muds. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1983, vol. 23, no. 1, pp. 11–20.
13. Tomren P.H., Iyoho A.W., Azar J.J. Experimental study of cuttings transport in directional wells. *Society of Petroleum Engineers. Drilling Engineering*, 1986, vol. 1, no. 1, pp. 43–56.
14. Fujii K., Sato M. Carrying capacity of liquid flowing through annulus of inclined pipes. *Journal of the Japanese Association of Petroleum Technology*, 1965, vol. 30, pp. 34–39.
15. Kharlamov S.N. Heat and mass transfer in facilities with a moving piston. *Heat Transfer Research*, 2007, vol. 38, no. 3, pp. 233–243.
16. 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. *Proc. of the the 5th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. Ulsan, Korea, October, 13–15, 2010. pp. 105–109.
17. 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 the 6th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2010)*. Harbin, China, August 22–24, 2011. Vol. 2, pp. 787–791.
18. Pang B., Wang S., Jiang X., Lu H. 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, no. 174, pp. 201–215.
19. Busch A., Johansen S.T. Cuttings transport: on the effect of drill pipe rotation and lateral motion on the cuttings bed. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, no. 4, pp. 107–136.
20. Okrajni S., Azar J.J. The effects of mud rheology on annular hole cleaning in directional wells. *Society of Petroleum Engineers. Drilling Engineering*, 1986, vol. 1, no. 4, pp. 297–308.
21. Gavignet A.A., Sobey I.J. A model for the transport of cuttings in highly deviated wells. *Society of Petroleum Engineers annual technical conference and exhibition*. New Orleans, LA, USA, 5 October 1986. pp. 916–921.
22. Martin M., Georges C., Bisson P., Konirsch O. Transport of cuttings in directional wells. *Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors drilling conference*. Society of Petroleum Engineers Drilling Conference. New Orleans, LA, USA March 1987. pp. 293–303.
23. Seeberger M.H., Matlock R.W., Hanson P.M. Oil muds in large-diameter, highly deviated wells: solving the cuttings removal problem. *Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors Drilling Conference*. New Orleans, Louisiana, February 1989. pp. 161–170.
24. Nance W.B. How to select oil mud applications. *Journal of the Petroleum Engineering Institute*, 1984, vol. 56, no. 1, pp. 854–867.
25. Ford J.T., Peden J.M., Oyeneyin M.B., Gao E., Zarrough R. Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes. *Society of Petroleum Engineers annual technical conference and exhibition*. New Orleans, LA, USA. September 1990. pp. 197–206.
26. 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*. The Hague, Netherlands, October, 1990. pp. 393–404.
27. Luo Y. *Non-Newtonian annular flow and cuttings transport through drilling annuli at various angles*. Dr. Diss. Edinburgh, UK, 1988. 311 p.
28. 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.
29. Savins J.G. Generalized Newtonian (pseudoplastic) flow in stationary pipes and annuli. *Transactions of the American Institute of Mechanical Engineers*, 1958, no. 213, pp. 325–332.
30. Craft B.C., Holden W.R., Graves E.D. *Well design: drilling and production*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall, 1962. pp. 73–79.
31. Sifferman T.R., Becker T.E. Hole cleaning in full-scale inclined wellbores. *Society of Petroleum Engineers. Drilling Engineering*, 1992, vol. 7, no. 2, pp. 115–120.
32. Sanchez R.A., Azar J.J., Bassal A.A., Martins A.L. The effect of drillpipe rotation on hole cleaning during directional well drilling. *Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors drilling conference*. Amsterdam, the Netherlands, March 1997. pp. 459–467.
33. Larsen T.I., Pilehvari A.A., Azar J.J. Development of a new cuttings-transport model for high-angle wellbores including horizontal wells. *Society of Petroleum Engineers. Drilling & Completion*, 1997, vol. 12, no. 2, pp. 129–136.
34. Martins A.L., Campos W., Liporace F.S., Wei X., Van Riet E.J. On the erosion velocity of a cuttings bed during the circulation of horizontal and highly inclined wells. *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Rio de Janeiro, Brazil, August 1997. pp. 1–8.
35. Philip Z., Sharma M.M., Chenevert M.E. The role of Taylor vortices in the transport of drill cuttings. *SPE India Oil and Gas Conference and Exhibition*. New Delhi, India, April 1998. pp. 1–8.
36. Taylor G.I. Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 1923, no. 223, pp. 289–343.
37. Lockett T.J., Richardson S.M., Worraker W.J. The importance of rotation effects for efficient cuttings removal during drilling. *Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors drilling conference*. Amsterdam, Netherlands, February 1993. pp. 861–867.
38. Martins A.L., Lourenco A.M.F., De Sa C.H.M. Foam properties requirements for proper hole cleaning while drilling horizontal wells in underbalanced conditions. *Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*. Brisbane, Australia, October 2000. pp. 1–11.
39. Beyer A.H., Millhone R.S., Foote R.W. Flow behavior of foam as a well circulating fluid. *The fall meeting of the Society of Petroleum Engineers of American Institute of Mechanical Engineers*. San Antonio, Texas, USA, October 1972.
40. Lourenço A.M., Martins A.L., Sa C.H., Brandao E.M., Shayegi S. Drilling with foam: stability and rheology aspects. *Engineering Technology and Commonwealth Engineering/Offshore Mechanics and Arctic Engineering 2000. Joint Conference on Energy for the New Millennium*. New Orleans, USA, 2000. pp. 14–17.
41. Walker S., Li J. The effects of particle size, fluid rheology, and pipe eccentricity on cuttings transport. *Society of Petroleum Engineers/Intervention and Coiled Tubing Association coiled tubing roundtable*. Houston, Texas, USA, April 2000. pp. 1–10.
42. Li J., Walker S. Sensitivity analysis of hole cleaning parameters in directional wells. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 2001, vol. 6, no. 4, pp. 356–363.
43. Naganawa S., Oikawa A., Masuda Y., Tetsuo Y., Hoshino M., Acuna P. Cuttings transport in directional and horizontal wells while aerated mud drilling. *International Association of Drilling*

- Contractors/Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Drilling Technology*. Jakarta, Indonesia, September 2002. pp. 1–8.
44. Vieira P., Miska S., Reed T., Kuru E. Minimum air and water flow rates required for effective cuttings transport in high angle and horizontal wells. *International Association of Drilling Contractors/Society of Petroleum Engineers drilling conference*. Dallas, Texas, USA, February 2002. pp. 1–12.
 45. Avila R., Pereira E., Miska S., Takach N., Saasen A. Correlations and analysis of cuttings transport with aerated fluids in deviated wells. *International Association of Drilling Contractors/Society of Petroleum Engineers Drilling Conference*. Dallas, Texas, USA, March 2004. pp. 1–12.
 46. Duan M., Miska S.Z., Yu M., Takach N.E., Ahmed R.M., Zetner C.M. Transport of small cuttings in extended reach drilling. *The International Oil & Gas Conference and Exhibition in China*. Beijing, China, December 2006. pp. 1–9.
 47. Ozbayoglu M.E., Saasen A., Sorgun M., Svanes K. Critical fluid velocities for removing cuttings bed inside horizontal and deviated wells. *Petroleum Science and Technology*, 2010, vol. 28, no. 6, pp. 594–602.
 48. Gumati A., Takahshi H. Experimental study and modeling of pressure loss for foam-cuttings mixture flow in horizontal pipe. *Journal of Hydrodynamics*, 2011, vol. 23, no. 4, pp. 431–438.
 49. Sorgun M., Aydin I., Ozbayoglu M.E. Friction factors for hydraulic calculations considering presence of cuttings and pipe rotation in horizontal/highly-inclined wellbores. *Journal of petroleum science and engineering*, 2011, vol. 78, no. 2, pp. 407–414.
 50. Sorgun M. Simple correlations and analysis of cuttings transport with newtonian and non-newtonian fluids in horizontal and deviated wells. *Journal of Energy Resources Technology*, 2013, vol. 135, no. 3, pp. 1–6.
 51. Bourgoyne A.T. Jr, Millheim K.K., Chenevert M.E., Young F.S. Jr. Applied drilling engineering. *Society of Petroleum Engineers*. Richardson, Texas, USA, 1991. pp. 145–155.
 52. Naganawa S., Sato R., Ishikawa M. Cuttings-transport simulation combined with large-scale-flow-loop experimental results and logging-while-drilling data for hole-cleaning evaluation in directional drilling. *Society of Petroleum Engineers. Drilling & Completion*, 2017, vol. 32, no. 3, pp. 194–207.
 53. Zhang F. *Numerical simulation and experimental study of cuttings transport in intermediate inclined wells*. Phd Thesis. Tulsa, 2015. 262 p.
 54. Zhang F., Miska S., Yu M., Ozbayoglu E., Takach N. A fast graphic approach to estimate hole cleaning for directional drilling. *Society of Petroleum Engineers. Drilling & Completion*, 2017, vol. 32, no. 1, pp. 51–58.
 55. Werner B. *The influence of drilling-fluid rheology on cuttings-bed behavior*. PhD Thesis. Trondheim, Norway, 2018. 116 p.
 56. Qureshi M.F., Ali M., Rahman M.A., Hassan I., Rasul G., Hassan R. Experimental Investigation of multi-phase flow in an annulus using electric resistance tomography. *SPE Kuwait Oil & Gas Show and Conference. Society of Petroleum Engineers*. Mishref, Kuwait, October 2019. pp. 1–11.
 57. Zahid A.A., Hasan A., Hassan I., Rahman M.A., Rushd S. Experimental investigation of volume fraction in an annulus using electrical resistance tomography. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 2019, vol. 24, no. 5, pp. 1–10.
 58. Zhang F., Filippov A., Miska S., Yu M. Hole cleaning and ECD management for drilling ultra-long-reach laterals. *Society of Petroleum Engineers Middle East Oil & Gas Show and Conference*. Manama, Bahrain, March 2017. pp. 1–8.
 59. Oseh J.O., Norddin M.M., Ismail I., Ismail A.R., Gbadamosi A.O., Agi A., Effect of the surface charge of entrapped polypropylene at nanosilica-composite on cuttings transport capacity of water-based muds. *Applied Nanoscience*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 61–82.
 60. Boyou N.V., Ismail I., Sulaiman W.R.W., Haddad A.S., Husein N., Hui H.T., Nadaraja K. Experimental investigation of hole cleaning in directional drilling by using nano-enhanced water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, no. 176, pp. 220–231.
 61. Alshalan M., Alolayan A., Al-Rubaii M.M., Moellendick T. A novel polymer to create a new approach of hole cleaning. *International Petroleum Technology Conference. International Petroleum Technology Conference*. Dhahran, Kingdom of Saudi Arabia, January 2020. pp. 1–10.
 62. Yeu W.J., Katende A., Sagala F., Ismail I. Improving hole cleaning using low density polyethylene beads at different mud circulation rates in different hole angles. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, no. 61, pp. 333–343.
 63. Zhu X., Shen K., Li B., Lv Y. Cuttings transport using pulsed drilling fluid in the horizontal section of the slim-hole: an experimental and numerical simulation study. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 20, pp. 1–22.

Поступила 16.11.2020 г./Received: 16 November 2020.

Информация об авторах

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

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

UDC 532.517:536.242:544.012:622.244:519.6

PROCEDURES AND INSTRUMENTS FOR MONITORING PROCESSES AND MECHANISMS OF CUTTING TRANSPORT IN HYDRAULIC CLEANING OF HORIZONTAL WELLS

Sergey N. Kharlamov¹,
kharsn@mail.ru

Mehran Janghorbani¹,
mehran.janghorbani@gmail.com

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

The article relevance is caused by the need to identify, understand, predict and control physical mechanisms that accompany well cleaning from drill cuttings. The risk of poor-quality cleaning creates conditions that exacerbate the processes of stuck pipe, well control, reduced drilling speed, and wear of drilling special equipment, especially when increasing the number of holes drilled at large angles. Such extreme situations are characteristic for long horizontal wells. Currently, they are widely used due to their increased productivity and exceptional efficiency in reaching certain productive formations. All this characterizes the problem of finding and developing effective methods for cleaning wells, as one of the most important tasks of modern drilling.

The main aim of this article is to better understand the phenomena and actually develop methods for predicting processes during hydraulic cleaning of horizontal wells from cuttings in order to determine the priorities of future scientific and practical development of cleaning processes.

Methods: theoretical and experimental modeling of flows of solid particles carried by the flow of a viscous medium in situations related to the cleaning of horizontal wells; practical research methods for issues such as sedimentation, coagulation and the flow of rheologically complex viscous media in the annulus of wells with arbitrary geometries.

Results. The paper introduces the review and analysis of modern experimental and theoretical results of modeling the process of cleaning horizontal wells. Based on the results of monitoring, the authors have formulated a number of criteria-based relationships and rules of thumb that guide technical design of equipment components and forecasts of optimal hydraulic cleaning conditions. The capabilities of models, methods, and tools of experimental equipment for recording, forecasting, and controlling the regimes of translational-rotational motion of mixtures in wells with a curved wall geometry are critically evaluated. The inconsistencies of the observed and calculated processes during hydraulic cleaning within the framework of the equipment used are explained.

Key words:

Cuttings, particles, well, cleaning, modeling, hydrodynamics, rheology, structure, stress.

Information about the authors

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

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