

УДК 532.517:536.242:544.012:622.244:519.6

## ПРОЦЕССЫ ТРАНСПОРТА ШЛАМА ПРИ ОЧИСТКЕ СКВАЖИН С ПРОИЗВОЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИЕЙ БУРОВЫХ ТРУБ, СОДЕРЖАЩИХ ЭКСЦЕНТРИЧНО РАСПОЛОЖЕННОЕ КРУГЛОЕ ЯДРО С ПОДВИЖНОЙ СТЕНКОЙ: ПРОБЛЕМЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ (ОБЗОР)

Харламов Сергей Николаевич<sup>1</sup>,  
kharsn@mail.ru

Джангхорбани Мехран<sup>1</sup>,  
mehrnan.janghorbani@gmail.com

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** работы вызвана необходимостью современной оценки решения проблем: моделирования течений смеси вязкой жидкости с твердыми частицами и взаимодействия ее со стенками устройств, предназначенных для бурения; очистки скважин с произвольной ориентацией буровых труб с эксцентрично расположенным вращающимся ядром.

**Цель:** уяснение методов управления процессами транспорта шлама из скважин с участками вертикально-горизонтального сочленения в рамках комплексных численных и экспериментальных исследований; выдача рекомендаций в практику процессов очистки.

**Методы.** Теоретические и практические методы исследований из смежных областей гидродинамики и тепломассопереноса реологически сложных вязких сред при решении задач о влиянии режимов течения, вращения стенок эксцентричного ядра на расположение и поведение частиц дисперсного потока, а также правомерность идеализаций явлений в смесях; методы исследований процессов, характеризующих перемещение частиц сквозь жидкость совместно, в общей массе, как это происходит при осаждении, а также в режимах: неподвижности частиц, соответствующих плотно упакованному слою; относительного движения частиц и жидкости, осложненного турбулентностью; движения частиц относительно друг друга при сложном сдвиговом течении несущей среды.

**Результаты.** Представлен обзор результатов исследований процессов в скважинах и бурильных колоннах. Проанализированы достоинства отдельных критериальных связей поведения шлама. Уясняется правомерность допущений, возможностей ряда моделей турбулентности и их замыкающих связей в определении структуры, теплогидродинамических и диффузионных свойств смеси, условий и механизмов образования, накопления, осаждения, транспорта и отделения частиц шлама от жидкости, в которой они взвешены. Отмечается, что в приложениях очень популярны исследования транспорта шлама в полях действия центробежных массовых сил (гравитации, вращения), вызывающих изменение плотности частиц в режимах сальтации, включающих серии отрывов/присоединений частиц, чередующихся с ударами о стенку трубного ядра. Наблюдения процесса взаимодействия твердых и жидких частиц бесконтактными средствами регистрации могут служить информацией для валидации и верификации современных RSS-моделей турбулентности (Reynolds Shear Stresses) с опорной базой из  $kL/\epsilon$ -уравнений для кинетической энергии турбулентности ( $k$ ) и ее интегрального масштаба ( $L$ )/скорости диссипации ( $\epsilon$ ). Они корректно предсказывают изменения в анизотропной неоднородной структуре сложного турбулентного течения смеси частиц шлама и жидкости. Отмечены достоинства разработок универсального алгоритма очистки скважин с выдачей сведений о: формировании шлама в произвольной точке затрубного пространства; получении минимальной скорости, обеспечивающей его образование и удаление. Сформулированы направления перспективных исследований; даны рекомендации по эффективной очистке отверстий.

### Ключевые слова:

Шлам, скважина, очистка, моделирование, гидродинамика, реология, структура, напряжения, массовые силы.

### Введение

Очистка скважин от бурового шлама существенно зависит от многих параметров, в числе которых выделяются группы, характеризующие физические свойства, режимы течения, геометрию области движения смеси, определяемую конструктивными особенностями участков с вертикально-горизонтальными сочленениями стволов скважин. Прогноз очистки в этих зонах затруднен из-за высокой нелинейности эффектов и механизмов, определяемых: конвективно-диффузионным взаимодействием при переносе импульса, тепла и массы шлама; трансформациями структуры несущей среды; фазовыми переходами и реологическими изменениями в смеси. Известно [1], что при вязкостном режиме течения шлам в горизонтальном или высокоугольном стволе скважины про-

ходит весьма небольшое расстояние и затем падает с общей массой выработки на нижней стороне затрубного пространства. Неэффективная очистка этих участков усиливает внутренние силы, напряжения, кольцевое давление, что провоцирует разрыв пласта и ведет к возникновению режима аварийного управления. Препятствием этому может служить организация мер по интенсификации процессов транспорта шлама. Так, в горизонтальных скважинах проблему очистки решают следующими способами [2]: механическая скорость бурения искусственно ограничивается с целью минимизации шлама до количества, которое может обрабатывать буровой раствор за один цикл; бурение выполняется с остановом в режимах, при которых буровой раствор циркулирует несколько раз, при этом бурильная колонна вращается на месте с целью

генерации вихревых эффектов; в технологический процесс включают применение таблеток (раствор с объемом 50–100 баррелей) с низкой вязкостью, интенсифицирующих инерционные процессы. Накопленные этими способами данные привлекают для верификации математических моделей.

Их целью являются: 1) установление особенностей, влияющих на очистку: *шлама и скважины* (размер, форма и плотность частиц выработки; наклон, угловой диаметр и эксцентриситет); *физических* свойств несущей среды (плотность, вязкость жидкости); *механизмов* изменений термодинамических и фазовых процессов (гидродинамики и тепломассопереноса); *эксплуатационных* свойств деталей оборудования (скорость насоса, вращение трубы); 2) выдача сведений о *распределении шлама* в затрубном пространстве, коррекция инженерных методик и данных ECD (Equivalent Circulating Density-эквивалентная плотность циркуляции), которые обычно являются единственными и общедоступными для руководителя бурения.

Практика показывает, что все детали о процессах очистки дают методы: 1) *экспериментальные*, базирующиеся на специальном лабораторном оборудовании, и *in situ*; 2) *теоретические* (аналитические), полученные из классической механики; 3) *комплексные* (численные модели) исследования процессов переноса в гетерогенных неоднородных сплошных средах на базе полных дифференциальных уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии в смесях.

Обширность тематики рассматриваемых проблем, приведенная характеристика методов их исследования в той или иной мере связаны с общей гидродинамической направленностью данной работы и преследует *цель*: 1) проанализировать имеющиеся результаты по очистке скважин и транспорту шлама для определения путей повышения эффективности функционирования оборудования; 2) оценить достижения в комплексном физико-математическом моделировании и численном исследовании транспорта реологически сложных сред по замкнутым системам, областям с особенностями формы поверхности стенок и образующей ствола скважин, включающих зоны с участками вертикально-горизонтального сочленения; 3) выдать рекомендации о перспективах применения решений и операций, обеспечивающих надежность использования оборудования при бурении в данных условиях.

#### **Проблемы моделирования процессов транспортировки шлама в вертикальных скважинах**

Анализ принципов транспорта вязких дисперсных смесей показывает [3, 4], что доминирующими в переносе импульса смеси в вертикальных зонах скважин выступают аксиальные механизмы. Считается, что кольцевая скорость должна быть выше значений скорости осаждения частиц шлама, которая зависит: от *физико-химической природы и структуры* частиц (размера, формы и плотности шлама); *реологии* жидкости и расхода; *геометрии* области движения – отверстия трубы. Полезными для приложений высту-

пают результаты скорости осаждения шлама с частицами нерегулярной формы, предложенной С. Чиеном [4]:

$$v_s = 120.0(\mu_e / d\rho_f)[(1 + 0.0727d(\rho_e / \rho_f - 1)(d\rho_f / \mu_e)^2)^{0.5} - 1], \quad (1)$$

где  $v_s$  – скорость осаждения;  $\mu_e$  – вязкость раствора;  $d$  – диаметр частиц;  $\rho_f$  – плотность жидкости;  $\rho_e$  – плотность частиц. Заметим, что (1) корректна в расчетах без вращения стенки трубы для любых жидкостей. Формулировка критериальных связей типа (1) выполнена М. Рамсеем [5] при допущениях, что для очистки ближних вертикальных скважин коэффициент переноса шлама, определяемый как средняя скорость переноса шлама, нормированная на среднюю кольцевую скорость, должен превышать 0,5. На основании этих исследований достаточно просто рассчитывать оптимальный расход насоса для эффективной очистки скважины в вертикальном сечении ее ствола. Этот расход соответствует кольцевой скорости, при которой концентрация шлама в растворе не превышает 5 % по объему [6].

Анализ результатов данной части утверждает [2–6], что для эффективной очистки *вертикальной* скважины целесообразно поддерживать режимы, в которых скорость раствора доминирует над скоростью осаждения частиц. Кроме этого, для практики бурения каждой секции скважины ценно, что по связям типа (1) и привлечения данных по геометрии скважины и буровой колонны можно корректно предсказывать значения минимального расхода насоса.

#### **Исследования наклонных скважин с использованием опытного оборудования**

Как показывает общий анализ результатов [7, 8], прогноз очистки отверстий на базе методик, учитывающих особенности изменений поля скорости осаждения частиц шлама, не убедителен для скважин с высокоугольными отверстиями. Здесь шлам испытывает влияние эффектов от всего спектра сил, характеризующих процессы переноса импульса, тепла и массы в смеси, а не только от тех, что отвечают за гидравлическое сопротивление, что так характерно для большинства методик. Установлено, что при больших отверстиях частицы шлама концентрируются на их нижней стороне в виде слабоинерционной высоковязкой подложки, которая требует высоких значений скорости циркуляции бурового раствора для ее удаления из ствола скважины. Физика такого процесса довольно сложна, ведь при интенсификации функционирования оборудования, обеспечивающего очистку, создаются специфические условия воздействия на пласт, приводящие: к его размыву; подвижности частиц в слоях шлама; течению смеси в едином блоке и, наконец, выносу шлама из ствола. Такая динамика процессов при перемещении выработки пласта более соответствует очистке жидкостями с низкой вязкостью. Транспорт шлама в виде *квазиоднородной* смеси характерен для высоких значений кольцевой скорости. Однако в оперативном плане такая ситуация встречается редко. В силу сказанного, полезными для

практики прикладных исследований выступают следующие данные.

Так, А. Йохо [7] обобщил результаты транспорта частиц шлама в критериальную связь, учитывающую динамику роста поверхностной скорости жидкости над пластом шлама:

$$V_a = [n / (2n + 1)] (\Delta p / KL)^{1/n} [0.5(r_0 - r)]^{(n+1)/n}. \quad (2)$$

Здесь (2) – связь Йохо для прогноза скорости жидкости над пластом шлама, где  $n$ ,  $K$  – показатель степени и коэффициент реологического закона соответственно;  $\Delta p$  – изменение давления;  $L$  – длина;  $r_0$ ,  $r_i$  – радиусы внутренней и внешней труб соответственно. Область применимости (2) отвечает условиям функционирования наклонных скважин при отсутствии вращения трубы и с растворами – со скоростями порядка 0,3–1,3 м/с; частицами с произвольной формой и размером ~6,36 мм; плотностью частиц ~2620 кг/м<sup>3</sup>.

Позднее А. Гавинье и И. Соби [9] применили физический подход и разработали модель, включающую порядка 50 взаимосвязанных уравнений, описывающих кольцевую геометрию, объемное поведение шлама и бурового раствора. Далее С. Окраджни [10], М. Мартин и др. [11] и Н. Браун и др. [8] использовали установку с ее составляющими (рис. 1) в Университете Талсы и British Petroleum (BP) для изучения особенностей влияния таких параметров, как реология среды, скорость циркуляции, геометрия буровой трубы, угла отверстия, а также таблеток низкой и высокой вязкости на транспорт шлама. Вместо шлама использовали керамические шары (порядка 6,4 мм с удельным весом 2,68), что аналогично продуктам выработки из силикатных образований [9]. Отметим, что эти идеи нашли продолжение в экспериментах: Дж. Форд и др. [12], Дж. Педен и др. [13], А. Мартенс и др. [14], А. Бассал и др. [15], А. Саассен [16]. Позднее были созданы установки в французском Институте нефти (IFP) [17], Японской национальной нефтяной компании (JNOC) [18] и Ближневосточном техническом университете (METU) [19]. Отдельные результаты исследований указанных проблем, представленные в [8, 10, 13–15, 19], показывают, что комплексные исследования по уяснению характера, деталей процесса очистки, выполненные в университете Талсы (США), вносят полезные дополнения в банк входных данных для моделирования и показывают корреляцию между отдельными переменными задачами о транспортировке шлама в определенных условиях. Данные [8, 10, 13–16, 19, 20] заставляют считать процесс с вращением трубы наиболее продуктивным, несмотря на то, что закрутка генерирует специфические динамические и тепловые нагрузки на детали оборудования, высокие значения которых способны обострять режимы возникновения аварийных и неблагоприятных ситуаций. Это дополнительные проблемы, усложняющие изменения режимов и параметров течений смесей. Как показывают опыты А. Гула и др. [21] (по установлению несущей способности азрированных буровых растворов в горизонтальных стволах скважин), при прямооточном течении смесей наиболее устойчивыми выступают структуры: 1) раз-

деленного (или *стратифицированного*) потока с гладкой или волнистой поверхностью; 2) пробкового потока с чередованием газовых пузырей в верхней части ствола (*пузырьчатого*); 3) потока со сплошным фрагментом выработки (*глобулярного*); волно-кольцевого (или *гребешкового*) потока (рис. 2). Установлено, что последний эффективен при транспортировке шлама (т. к. снижает сопротивление на 24 %, высоту шламowego слоя до 14 %).

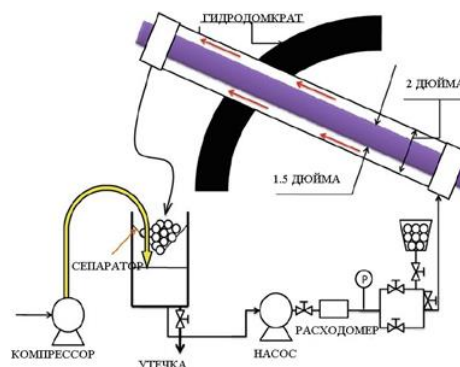


Рис. 1. Схема технологического процесса и составляющие экспериментальной установки [1]

Fig. 1. Scheme of technological process and the flow [1]



Рис. 2. Структуры потока (стратифицированный, пузырьчатый, глобулярный, гребешковый) по [21]

Fig. 2. Flow structures (stratified, elongated bubble, slug, annular) identified by [21]

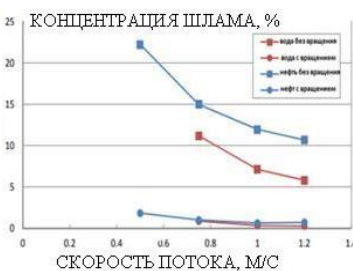


Рис. 3. Изменения концентрации шлама в зависимости от скорости течения смеси (буровой раствор с нефтяной или водной добавкой в качестве разбавителя) в турбулентном прямооточном и закрученном (способом вращающейся стенки) потоке [22]

Fig. 3. Variations of cuttings concentration depending on a mixture flow velocity (drill fluid with an oil or water additive as a diluent) in turbulent direct-flow and swirled (the way of rotated wall) stream [22]

Наложение крутки на прямооточное течение смеси может приводить к неоднозначным процессам, кото-

рые при турбулентном режиме интенсифицируют переходы вихревой природы и ведут к ламинаризации и последующей турбулизации. Последние проявляются при перестройке прямого потока в закрученный и обратно. И обнаруживаются при затухании турбулентного переноса в потоках вязких сред, закрученным способом вращающейся стенки. Ниже, в наших исследованиях эти вопросы подробно анализируются. Также заметим, что Б. Вернер и др. [22] касался этой проблемы при экспериментах с транспортировкой буровых растворов с водной и нефтяной основой на оборудовании, используемом в норвежском секторе Северного моря. Было обнаружено, что буровые растворы на нефтяной основе со своими вязкоупругими свойствами лучше ведут себя на линейном участке в сравнении с заменой нефти на ньютоновскую жидкость, в которой отсутствуют нелинейные эффекты. Однако турбулизация процесса течения смеси, обусловленная закруткой потока способом вращающейся стенки внутренней трубы, приводила к эффектам, влияющим на структуру потока так, что это различие асимптотически исчезало (рис. 3). Все это демонстрирует необходимость корректного моделирования транспорта реологически сложных сред в полях действия центробежных и массовых сил. Опыт решения таких задач показывает, что на это способны лишь модели, напрямую учитывающие изменения анизотропной структуры турбулентности во вращающихся системах (отдельные детали вопроса представлены ниже).

#### Механистические модели транспортировки шлама и их анализ

Данные [7–10, 12, 15] значительно повысили интерес к теоретическим разработкам полной механистической модели и с учетом отдельных физических и технологических допущений позволяют объединить их в группы: двухслойные и трехслойные, а также их комбинации. Отметим, что одной из первых обсуждаемых моделей была двухслойная модель Гавинье и др. [23] в рамках предположения, что частицы выработки имеют тенденцию к выпадению на нижнюю часть наклонного ствола скважины. В модели допускается формирование пласта, который скользит вверх по затрубью. На наш взгляд, это очень сильное упрощение, которое позволяет обращаться к модели в условиях пренебрежения рядом важных факторов, определяющих динамику частиц. В силу этого, данные моделирования лишь качественно согласуются с имеющимися экспериментальными результатами (например, [9], рис. 4).

Попытка учесть реальную динамику процесса заставила З. Филипа и др. [24] искать пути расширения подхода Гавинье и Собби по многослойной модели: совершенствование двухслойной модели при допущении, что *верхний* слой следует рассматривать как гетерогенную суспензию шламов в жидкости, в то время как *нижний* подслой имеет более плотную структуру общего слоя шлама. Такая модель более универсальна и позволяет анализировать динамику частиц, находящихся во взвешенном состоянии в зо-

нах верхнего слоя. Определяемым параметром считалась объемная концентрация частиц шлама, которая оценивалась как количество частиц, взвешенных в жидкости. Опираясь на этот параметр Л. Лейзинг и др. [25], ставили цель – выдачу данных его изменения в рабочих условиях и установления его экстремальных значений в области исследования процессов. Оценивался характер изменений шлама от формы и размера частиц, реологии и теплофизических свойств. Результаты [26, 27] заставили искать пути построения альтернативных моделей с допущением, что по мере нарастания объема шлама кольцевое пространство со свободным течением над слоем шлама интенсивно сокращается. При этом увеличивается локальная скорость потока до уровня, когда она превышает минимальную скорость транспортировки. Так, с целью определения оптимальной высоты слоя шлама с эффективной его транспортировкой Р. Кларк и др. [26] разработал модель, учитывающую режимы переноса частиц с эффектами подъема и вращения. Установлено, что каждый отдельный механизм в общем балансе процессов переноса массы и импульса в элементарном объеме гетерогенной смеси будет доминирующим в определенном диапазоне изменений угла ствола скважины. Модель позволяет анализировать поведение шлама в зависимости от условий эксплуатации оборудования с учетом параметров: расхода, механической скорости бурения, физических и механических свойств бурового раствора (плотности, реологии), геометрических особенностей и конфигурации скважины (данных по углу, размеру отверстия, диаметру трубы), а также деталей изменений структуры и свойств шлама (данных по размеру, плотности, углу покоя, пористости пласта и т. д.). Сведения этого анализа иллюстрируют данные, представленные на рис. 5.

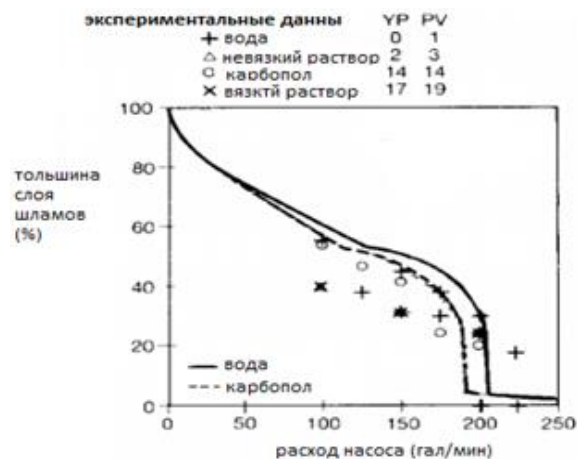
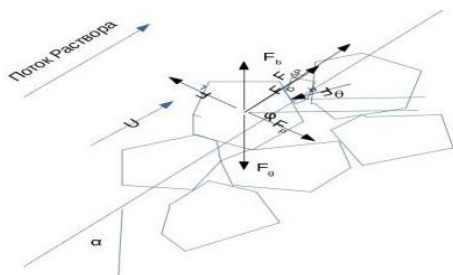


Рис. 4. Изменение скорости насоса в зависимости от толщины слоя шлама, предсказанной моделью Гавинье [9] (линии – расчет) и ее сравнение с экспериментами (значки – процессы с водой, низковязким и высоковязким растворами, карбополом)

Fig. 4. Relationship between pump output and cutting bed thickness predicted by the Gavignet method [9] (lines are calculations) and its comparison with experiments (symbols are processes with water, low viscous and highly viscous muds, carbopol)



**Рис. 5.** Схема результирующих сил с определяющим эффектом действия на частицы. Обозначения соответствуют [26], где  $F_D$  – сила сопротивления;  $F_b$  – сила плавучести;  $F_L$  – подъемная сила;  $F_g$  – сила гравитации;  $F_p$  – пластическая сила раствора;  $F_R$  – сила реакции;  $F_{\Delta p}$  – сила градиента давления;  $U$  – скорость потока;  $\alpha$  – угол скважины;  $\theta$  – угол контакта между частицами;  $\Phi$  – угол слоя шлама

**Fig. 5.** Scheme of the various forces acting upon a single cutting [26] where  $F_D$  – Drag Force;  $F_b$  – Buoyancy Force;  $F_L$  – Lifting Force;  $F_g$  – Force of Gravity;  $F_p$  – Fluid’s Plastic Force;  $F_R$  – Reactive Force;  $F_{\Delta p}$  – Pressure Gradient Force;  $U$  – Fluid velocity;  $\alpha$  – inclination angle;  $\theta$  – contact angle between cuttings;  $\Phi$  – cuttings bed resting angle

Уточненный расчет процессов, сопровождающих очистку отверстий, выполненный Дж. Фордом и др. [27] при обращении к оригинальному компьютерному пакету, говорит о наличии двух экстремальных режимов с минимальной скоростью переноса. *Первый* – с более низким значением, определяет движение шлама с вращением вдоль скважины. *Второй* – при более высоком значении формирует условия транспорта шлама вместе с промывочной жидкостью. Попытки обобщения расчетных данных в критериальные связи прогноза скорости переноса шлама, выполненные Т. Ларсеном и др. [28] и сведенные к виду (3), выглядят привлекательными с точки зрения учета геометрической нелинейности области исследования задачи при больших перемещениях шлама:

$$V_{cut} = R_p / \{36C_{conc} [1 - (D_{pipe} / D_{hole})^2]\}. \quad (3)$$

Здесь (3) – функция изменений скорости бурения ( $R_p$ ), массовой концентрации шлама ( $C_{conc}$ ), полученная при обобщении экспериментов и испытывающая опосредованное теплофизическое и геометрическое влияние дисперсной системы через вязкость, угол наклона, массу шлама. Результаты указывают на эффективность (3) в прогнозе процессов с неподвижной стенкой внутренней трубы и изменении угла наклона 55–90°.

Уточненный расчет процессов, выполненный Д. Нгуеном [29] по *трехслойным* моделям (неподвижного слоя частиц однородной концентрации; дисперсного слоя, в котором концентрация частиц изменяется; верхней зоны слоя с прозрачной областью потока жидкости), показал, что по мере увеличения скорости потока следует ожидать интенсификации механизмов генерации турбулентных вихрей, которые способны поднимать самые верхние частицы дисперсного слоя в область с режимом турбулентной суспензии. Это

повышает требования к моделированию механизмов турбулентной диффузии при переносах импульса и массы в гетерогенной смеси. Последние не вполне ясны, осложнены взаимодействием пульсаций полей скорости, состава и давления и составляют вопросы для перспективных исследований. Эти ограничения заставляют строить прогнозы процессов в рамках более простых режимов течений, изменений структур и слоев частиц. Так, А. Камп и др. [30] при исследовании течений твердо-жидкостных систем в наклонных и горизонтальных трубопроводах отдали предпочтение двухслойной модели. Последняя основана на данных П. Дорона [31], которые соответствуют процессам течений при переменных углах ствола скважины в горизонтальной плоскости и пренебрежении эффектами от вращения бурильной трубы. И вполне успешна при моделировании роста слоя шлама при бурении.

Анализ практических задач показывает, что проблеме очистки скважин и транспортировки шлама при колтюбинговом бурении (КБ) посвящено большое количество литературы (например, [15, 26, 28]). Причем в прогнозах размера области прохождения частицы до полного осаждения на нижнюю поверхность скважины, наиболее корректной представляется функциональная связь (4) в виде, предложенном Л. Лейзингом и др. [25]:

$$L_t = 18K\lambda^{n-1}U^n(D_0 - D_i)^{2-n}[(\rho_p - \rho_f)gd_p^2 \sin \theta], \quad (4)$$

где  $\lambda$  – коэффициент масштабирования;  $L_t$  – расстояние прохождения частиц;  $K$  – коэффициент степенной модели;  $n$  – степень степенной модели;  $g$  – ускорение свободного падения;  $d_p$  – диаметр частиц;  $U$  – скорость жидкости;  $D_0$  – диаметр внутренней трубы;  $D_i$  – диаметр внешней трубы;  $\rho_p$  – плотность частиц;  $\rho_f$  – плотность жидкости;  $\theta$  – угол наклона.

З. Ванг и др. [32] также разработали *трехслойную модель*, которая может быть использована для прогнозирования толщины слоя шлама на основе измеренного значения *эквивалентной плотности циркуляции (Equivalent Circulating Density, (ECD))*. А Наганава и др. [33] предлагает одномерную двухслойную модель, которая предсказывает переходные и развивающиеся процессы при транспортировке шлама по всей длине скважины с учетом изменений концентрации выработки, скорости скольжения, высоты пласта выработки, *ECD* и кольцевого давления. Так, сравнение результатов моделирования по предлагаемой модели с соответствующими экспериментальными и данными *in situ*, полученными при *LWD (Logging While Drilling – каротаж при бурении)* из месторождения, выглядят вполне удовлетворительно.

В [34, 35] были усовершенствованы модели исследования процессов транспорта (двухслойная модель применена С. Прасун и др. [34] к пенам, шлам в кольцевой области – Ф. Жанг и др. [35]) и обнаружено, что двухслойная модель дает приемлемые результаты при низких качествах пены (70–80 %) и низких концентрациях вязкого полимера гидроксипропилцеллюлозы (НЕС), который используется в ремонтных работах. Но по мере увеличения качества пены и концен-

трации полимера результаты моделирования отклоняются от экспериментальных результатов. Данные [35] утверждают, что существуют четыре главных режима переноса шлама в кольцевом пространстве

(рис. 6), которые корректно предсказывает механистическая модель, учитывающая механизмы переноса массы, импульса, по соответствующим уравнениям законов сохранения смеси.

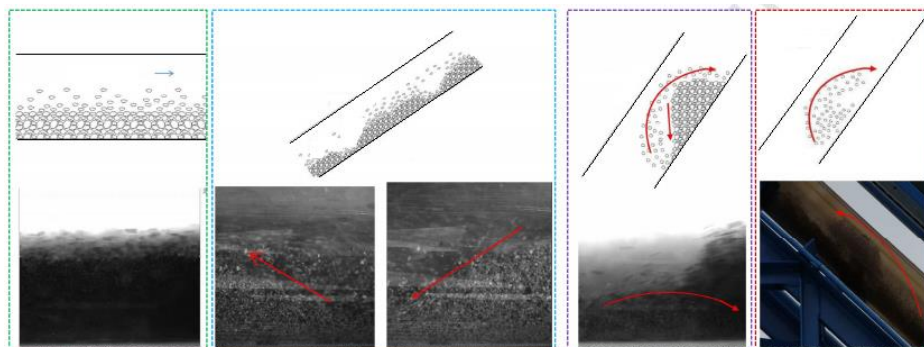


Рис. 6. Режимы переноса шлама, наблюдаемые Ф. Жангом и др. [35]

Fig. 6. Different modes of cutting transport observed by F. Zhang et al. [35]

Таким образом, анализ позволяет выделить ряд процессов, свидетельствующих о: необходимости и своевременности выполнения операций по очистке; предотвращении развития неблагоприятных и опасных ситуаций при бурении. К числу последних следует отнести: сведения о замедлении скорости бурения, данные увеличения расхода насоса; точные сигналы о необходимости полного останова процесса бурения и выдачу заданий по очистке скважины; определения размеров областей повышенных значений давления в кольцевом пространстве, что является результатом формирования слоя шлама и др.

#### Достижения и проблемы численного моделирования процессов транспорта шлама

В разделе представлен критический обзор и анализ математических моделей, расчетных схем, результатов численного моделирования гидродинамических и диффузионных процессов, связанных с взаимодействием двухфазных реологически сложных сдвиговых течений с подвижной стенкой круглого ядра, эксцентрично расположенного в замкнутом пространстве, характерном для инженерных задач транспорта буровой выработки из скважины, которые иллюстрируются решениями и картинками пространственных распределений локальных параметров в широком диапазоне изменений определяющих чисел Пекле (Pe), Рейнольдса (Re), Россби (Ro), Фруда (Fr), Шмидта (Sm).

Комплексный анализ моделирования физических явлений в смесях показывает, что А. Йохо и др. [36]

первоначально разработали оригинальную модель материального баланса (*Numerical Model Balance, (NMB)*), в которую включали данные о бурении (скорости механического бурения и насоса; геометрию долота и ствола, свойства бурового раствора) и осуществили прогноз процессов формирования профиля ствола скважины, параметров очистки. Установлено, что модель корректна в прогнозах процессов в областях с прямыми отверстиями, в частности, для углов отверстий с отклонениями не более  $10^\circ$  от вертикали.

Учитывая необходимость детального анализа, И. Кинг и др. [37] разработали универсальный код «ESTET» для исследования картины изменений поля скорости, давления, вязкости, эволюции напряжений. Для моделирования поведения шлама С. Кроу [38] использовал *лагранжев подход*, позволяющий отслеживать траектории движения твердых частиц в общем потоке выработки. Уравнения для несущей капельной среды описываются с использованием *эйлерова* подхода. Заметим, что при использовании *лагранжево-эйлерова* описания движения возникают проблемы при расчетах процессов с возрастанием концентраций частиц дисперсной фазы. Это связано с увеличением объема итераций и «иррегулярности» распределения траекторий отдельных дисперсных частиц. В таких условиях необходимо учитывать эффекты столкновения частиц и механизмы внутри- и межфазного обмена импульсом, энергией, что определяет рост объема вычислений [39].

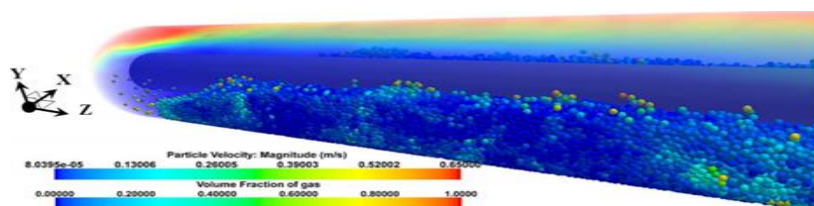
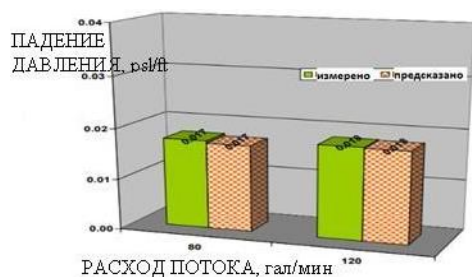


Рис. 7. Эволюция частиц шлама в кольцевом пространстве по лагранжево-эйлеровому подходу, представленному в [39]. Оцифровка данных расчета: скорости частиц [м/с]; объемной концентрации частиц [–], выполнена в масштабе значений, указанных на рис. 7

Fig. 7. Movement of cuttings in the annulus, modeled by using an Lagrange–Euler approach [39]

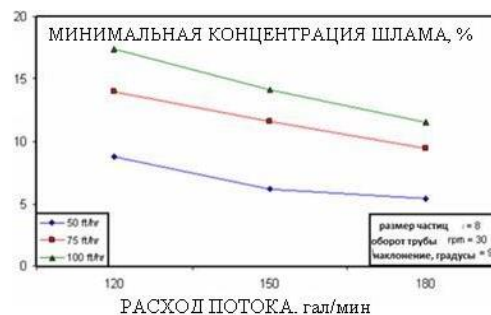
Так, данные С. Акшика и др. [39] на рис. 7 показывают, что используемая лагранжево–эйлерова модель и метод расчета *успешны* при прогнозе гидродинамики в дисперсных потоках. Отметим, что большинство исследователей, ссылаясь на указанные выше причины о громоздкости вычислений и проблемы линеаризации задачи, склоняются к пренебрежению учета взаимодействий между частицами, выполняют расчеты гидродинамических процессов в двухфазной среде с привлечением CFD-пакета и идей *эйлерово-эйлерова* метода, как описывает Н. Мишра [40].

Одно из первых исследований по CFD-пакету было выполнено Х. Билгесу и др. [41] с целью оценить влияние изменений кольцевой скорости на транспорт шлама. Причем физическая модель основана на допущениях, что поток представляется стационарным, изотермическим двухфазным со структурой из несжимаемой жидкости и инертных твердых частиц. Расчеты выполнены для четырех сред различной плотности жидкости и твердых частиц трех различных размеров. Данные моделирования говорят о наличии погрешности в расчетах локальных переменных задачи. Причем менее чем на 10 %, в сравнении с соответствующими параметрами встречающихся опытов. Х. Билгесу и др. [42] использовали CFD-код для определения влияния различных параметров, таких как: скорость жидкости, размер частиц шлама, скорость проникновения, наклон и вращение буровой трубы на концентрацию частиц в затрубном пространстве. В [42] использована встроенная многофазная CFD-модель ANSYS (детали физических допущений в [42]). Были проверены результаты этой модели на соответствие лабораторным, полученным ранее. Установлено, что эйлеровый подход более точен в отношении оценок изменений перепада поля давления (рис. 8). Далее Н. Мишра [40] также использовал CFD-пакет для определения влияния скорости жидкости, размера частиц выработки при бурении, вращения буровой трубы и угла наклона в отклоненных скважинах на транспорт шлама. Моделирование по *эйлеровому подходу* отвечает стационарному случаю течения. Установлено, что формирование слоев шлама наблюдается вблизи входного участка кольцевого пространства, а перенос шлама в кольцевом участке идет в виде слоистого потока (рис. 9).



**Рис. 8.** Сравнение результатов падения давления, предсказанного CFD-моделью и измеренного в эксперименте, в зависимости от изменений расхода (данные [41])

**Fig. 8.** Comparison of pressure drop vs pump output as predicted by CFD with experiments [41]



**Рис. 9.** Распределения концентраций частиц максимального размера в зависимости от изменений расхода потока, выполненного при моделировании в рамках численных методов, изложенных в [40]. Данные расчета отвечают: размер частиц выработки – 8 мм; вращение трубы – 30 об/мин; трубное отклонение – 90°

**Fig. 9.** Minimal cuttings concentration vs flow rate obtained by numerical methods [40]. Size of cutting particles is 8 mm; pipe rotation is 30 rpm; pipe inclination is 90°

В настоящее время исследователи все чаще обращаются к универсальным инструментам численного моделирования гидродинамики и тепломассопереноса в гетерогенной смеси – программному комплексу (ПК) ANSYS FLUENT. Это позволяет с единых позиций аппарата механики неоднородных сплошных сред детально по физическим эффектам, условиям на границах прогнозировать тепло- и массоперенос, гидро- и газодинамические, ламинарно-турбулентные явления в нескольких взаимодействующих между собой фазах.

В силу ограничений объема данной работы полная постановка задачи с *формулировкой* математической модели, системы уравнений для конкретных процессов в смеси опущена и может быть найдена, например, в [38, 43–47]. Упомянем, что основные допущения, используемые при описании транспорта шлама, сводятся к следующему [38, 43, 47]: среды взаимопроникающие, в общем случае состоящие из N вложенных многоскоростных и многотемпературных континуумов, описываемые соответствующими системами уравнений механики неоднородных сплошных сред. Каждый континуум представляет собой совокупность частиц, массы которых принадлежат к заданному интервалу масс; давление создается капельной жидкой средой; течение неустановившееся; частицы имеют сферическую форму; плотность материала частиц много больше физической плотности несущей среды; вязкие силы и теплопередача проявляются лишь при взаимодействии частиц с жидкой фазой; температура частиц постоянна по их объему; в турбулентных режимах мгновенные значения (составляющие вектора скорости, давления, температуры) являются случайными функциями времени и пространственных координат; механизм движения двухфазной среды заключается в увлечении твердых частиц несущей жидкой фазой за счет сил межфазного взаимодействия; твердые частицы представляют пассивную примесь; вовлечение частиц в турбулентное движение происхо-

дит через влияние пульсаций несущей фазы на движение частиц; присутствие частиц способствует экстенсификации кинетической энергии турбулентных вихрей.

3. Ванг [48] выполнил численное исследование процессов транспорта частиц шлама в условиях вращения буровой колонны в режимах ламинарного потока в рамках эйлера-эйлерова метода с использованием CFD-кода. Результаты сводятся к рекомендациям расчета толщины слоя шлама ( $h$ , с точностью не более 13 %) по уравнению многомерной регрессии с параметрами – плотность жидкости ( $\rho_l$ ), эксцентриситет ( $e$ ), объемная доля твердой фазы ( $f_s$ ), поток жидкости ( $q$ ), эффективная вязкость жидкости ( $\mu_v$ ), размер твердых частиц ( $d_s$ ) и скорость вращения буровой колонны ( $\omega$ ) вида (5):

$$h = 3,13(\ln \rho_l)_{-3,082} + 0,0266e_2 - 0,00684e - 606f_s^3 + 64,8f_s^2 - 2,00f_s - 0,00418\ln(\mu_v) - 0,00436d_s^2 + 0,0132d_s + 0,0253(\ln q)_{0,928} + 0,0352(\ln \omega)_3 - 0,463(\ln \omega)_2 + 2,022\ln(\omega) + 0,00218[\ln(q\omega)]_3 - 0,521[\ln(q\omega)]_2 + 0,410\ln(q\omega) - 3,93. \quad (5)$$

Заметим, что У. Мме и др. [49] смоделировали транспорт шлама в более широком диапазоне изменений условий течения по эйлеровому подходу для не-ньютоновской жидкости (со степенным законом для напряжений). Причем турбулентный перенос импульса описан Л.И. Зайчиком [47] по модели типа «кинетическая энергия турбулентных вихрей – скорость ее диссипации». Параметрический анализ выполнен при варьировании значений угла наклона скважины, коэффициента формы продуктов выработки и их размера. Установлено, что мелкие и более сферические частицы шлама более предрасположены к транспортировке, эффективнее уносятся потоком из ствола скважины. Кроме того, при очистке загрязненных отверстий использование растворов с низкой вязкостью представляется предпочтительнее для условий турбулентного режима течения в сравнении с ламинарным. Аналогичные заключения имеются у Х. Алкаум и др. [50]. Отмечается, что размер и сферичность частиц выработки оказывают существенное влияние на очистку. Подчеркивается, что сферические частицы (диаметром порядка 2,5 мм) эффективнее поддаются очищению.

Р. Осуэйи [6] получил удовлетворительное соответствие результатов CFD моделирования с опытными данными течений в устройствах, разработанных в Ближневосточном техническом университете и использованием воды. Установлено, что по мере увеличения скорости течения бурового раствора наблюдаются изменения структуры дисперсного потока (рис. 10).

Естественными для этих условий являются попытки сформулировать критериальные связи для определяемых критериев подобия. Так, опыт китайских инженеров-нефтяников (например, работы Sun B. и др. [51]), показывает, что перепад поля давления ( $\Delta p$ ), необходимый для транспорта шлама, весьма чувстви-

телен к действию определяющих чисел подобия – Рейнольдса ( $Re$ ), Фруда ( $Fr$ ), Россби ( $Ro$ ),  $\Theta$  – угла наклона и может быть аппроксимирован в виде [51]:

$$\Delta p / \Delta L = 100(\rho_l v D_h / \mu)^{1,0547} (v^2 / g D_h)^{0,1376} (0,1\theta)^{-0,0740} \times (10\omega D_h / v)^{0,1435} (100V_b / V_\omega)^{0,2877}. \quad (6)$$

режим потока	скорость бурения 60 ft/hr	скорость бурения 80ft/hr	лабораторные результаты
неподвижный слой, скорость потока = 2ft/sec			
подвижный слой, скорость потока = 4-6 ft/sec			

Рис. 10. Сравнение структур потока [6] при моделировании транспорта шлама с соответствующими лабораторными данными в режимах: неподвижный слой при скорости жидкости 2 фут/с; подвижный слой при скорости жидкости 4–6 фут/с; при значениях механической скорости бурения: 60 фут/ч; 80 фут/ч

Fig. 10. Comparison of the flow structures [6] predicted by CFD methods versus laboratory experiments showing Fixed Bed (FB) and Mobile Layer (ML) at different ROPs (=60 ft/h, =80 ft/h) and annular velocities (=2 ft/s – FB, =4...6 ft/s – ML).

Подобный подход использовали в Р. Руки и др. [52, 53] с буровым раствором на основе пены. Е. Эпелле и др. [54] установили, что результаты, полученные по теоретической модели, отличаются на 8 % от опыта по распределению концентраций газа в пене в зависимости от интенсивности вращения трубы и изменения наклона трубы. Эти исследования интересны тем, что моделируется трехфазная, а не двухфазная жидкость. М. Мораведжи и др. [55] провели аналогичное исследование с азрированной «грязью» – изучено влияние вращения трубы на транспортировку шлама. Обнаружено [56], что турбулентность способна вносить эффекты, пренебрежение которыми не оправдано при прогнозе реальных процессов. Так, для их детального учета необходимы гибкие модели турбулентности. Также добавим, что Р. Руки и др. [53] на данных моделирования течения пены выполнили сравнительные оценки влияния реологических изменений в транспортируемой системе [модель со степенным законом (Power Law, PLm), модель Гершеля–Балкли (Herschel–Bulkley, HBm)] на транспорт шлама. Обнаружено, что использование PL модели способно более реалистично предсказывать детали сложного течения (рис. 11). На рис. 11 отражены пространственные изменения поля концентраций в кольцевой области ствола с осесимметричной формой с видом на горизонтальную и вертикальную плоскости. Также расчеты показывают, что в процессах осевого по стволу движения (картины данных в горизонтальных проекциях) концентрация частиц шлама локализуется в области дна. В то время как на участках трубы с вертикальной ориентацией тяжелые фракции (шлам) интенсивно переносятся потоком в центральной зоне кольцевого сечения.



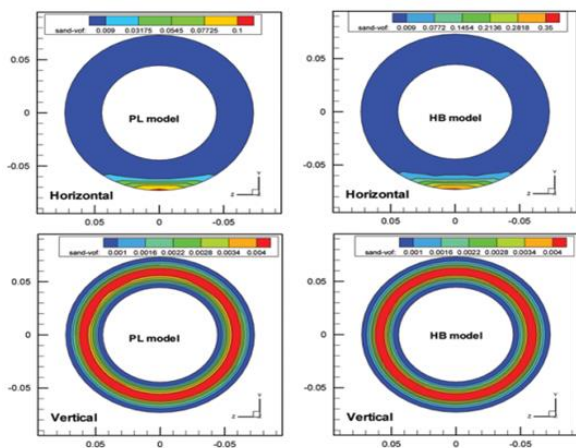


Рис. 11. Влияние реологии на динамику частиц при использовании моделей: со степенным законом (Power Law, PLm); модель Herschel–Bulkley, (HBm), данные [53]

Fig. 11. Effect of rheology on cutting dynamics using Power Law and Herschey–Bulkley models [53]

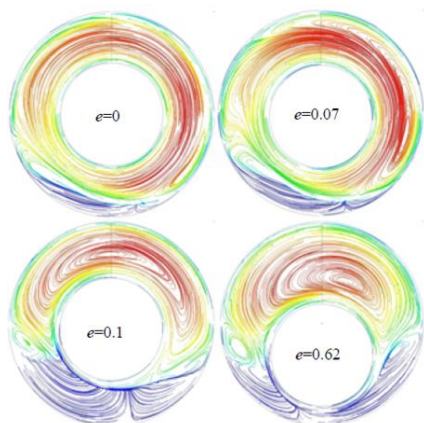


Рис. 12. Возникновение вторичных потоков с увеличением эксцентricности [56]

Fig. 12. Occurrence of secondary flows with increasing eccentricity [56]

Наши исследования по прогнозу изменений структуры сложных сдвиговых течений во внутренних системах показывают проблемы детального численного описания динамики потоков смесей. Этим вопросам также посвящен ряд исследований других авторов. В частности, Е. Эпелле и др. [54] использовали CFD и оба метода – Эйлера–Эйлера и Эйлера–Лагранжа, а также  $k\omega$ -модель турбулентности. Отмечается, что обращение к  $k\omega$ -модели связано с ее возможностями корректно рассчитывать пристеночные зоны, потоки, осложненные закруткой. Установлено, что по сравнению с  $k\epsilon$ -моделью, такие  $k\omega$ - и  $kL$  модели более устойчивы к возмущениям [57–61]. В [55, 58–61] выполнено сравнение их возможностей по корреляции между соответствующими параметрами типа «теория–опыт» с использованием позитронно-эмиссионного трекинга частиц (ПЕРТ). Обнаружено, что точность моделей составляет около 11%. Далее Ю. Игнатенко и др. [56] использовали подход Эйлера–Лагранжа,  $k\omega$ -модель, с допущениями – частицы

имеют сферическую форму, жидкость неньютоновская (закон типа Гершиля–Балкли). Обнаружено два специфических режима течения: с *первичной циркуляцией*, производимой вращением буровой колонны, и с *вторичной циркуляцией*, в которой преобладают эффекты от изменений вихревых структур. Первый режим предпочтительнее и производится с низкими эксцентricитетами и высокими внутренними скоростями вращения трубы. Отдельные данные (рис. 12) показывают, что увеличение эксцентricитета (значений  $e$ ) приводит к возникновению вторичных вихрей, которые препятствуют очистке отверстия, а также интенсифицируют процессы падения давления. Заметим, что количественная оценка этих процессов требует дополнительного анализа через сравнения с экспериментами.

Важные замечания для практики представлены Б. Аманна и др. [57] при использовании CFD-пакета (и эйлерового подхода). Установлено: 1) углы отверстий между 45 и 60 градусами являются наиболее проблематичными для очистки; 2) концентрация частиц выработки в кольцевом пространстве уменьшается с увеличением скорости потока жидкости из-за интенсификации вихревого турбулентного потока; 3) удаление выработки более удобно для крупных частиц; 4) из-за больших сил сопротивления, приложенных к частицам, транспортировка продуктов шлама будет эффективнее при более высоких скоростях буровых труб.

Общим выводом по анализу проблем, изложенных в [37–43, 46–52, 57–61] является то, что большинство исследователей транспортировки продуктов выработки допускают условия, характерные для ламинарного потока. Однако нельзя пренебрегать фактом, что турбулентность может возникнуть при интенсификации вращения не только стенки – границы области исследования внутренней задачи, но и самой буровой колонны. Эти задачи исследовались на классе внутренних течений (например, [6, 62–71]), и их результаты указывают на необходимость корректного учета моделью процессов деформаций, обусловленных изменением центробежных массовых сил. Также хорошо известен факт наличия вихревых токов вследствие вращения буровой колонны в определенных режимах закрутки ( $Ro > 1$ ), что формирует ламинарно-турбулентные эффекты и влияет на изменения структуры потока [46, 60, 61]. Эти процессы еще слабо изучены (например, [44–47, 59–61]) и составляют *новое перспективное* направление численного моделирования технологических процессов бурения скважин и организации транспорта шлама.

В силу нелинейности рассматриваемых задач, отсутствия универсального подхода их решения обращение к специальным кодам представляется *целесообразным*, но не вполне удовлетворительным по ряду причин. В числе главных – вопрос оценки достоверности расчетных данных пространственных изменений локальных и интегральных параметров процесса транспорта шлама в рамках популярных пакетов (ANSYS CFX, FLUENT, CFD и т. д.). Также недостаточно широко исследованы вопросы точности изме-

нений пульсационных тепло-, гидродинамических и диффузионных параметров по предлагаемым в пакетах моделей высшего порядка. В таких задачах крайне полезны экспериментальные данные о процессах, но они отсутствуют из-за специфичности условий проведения экспериментов. Поэтому технологии *опосредованной валидации* модели и *верификации* результатов расчета по универсальному коду следует признать оправданными.

Кроме того, результаты обзора показывают, что при решении задач гидродинамики и тепломассообмена в смесях обращаются к прогнозу турбулентного переноса в рамках следующих подходов. *Первый* опирается на модели К-теории турбулентности (типа к $\epsilon$ ). Заметим, что данный подход используется, когда фазы разделены в стратифицированных (или почти стратифицированных) многофазных потоках, а также при отношении плотностей между фазами  $\sim O(10^0)$ . Но возможно дальнейшее уточнение этого феноменологического метода. Оно сводится к использованию *дисперсной* модели типа к $\epsilon$ , которая является подходящей случаем, когда концентрации частиц (вторичных фаз) разбавлены (например, [36, 42, 43, 46, 47]). Предполагается, что столкновениями между частицами пренебрегается и *доминирующими* при случайном движении фаз выступают *турбулентные процессы* в капельной (жидкой) фазе. Именно они увлекают твердые частицы в пульсационные явления в среде.

Важным *общим выводом* (например, [44, 58–61]) является требование к деталям исследования сложных течений смесей по многопараметрическим RSS (Reynolds Shear Stresses)-моделям «*напряжений Рейнольдса и турбулентных потоков тепла и массы*» ( $\overline{u'_i u'_j}$ , (7)) с опорной базой из уравнения для кинетической энергии турбулентности (к, (8)) и уравнения интегрального масштаба энергосодержащих вихрей (L, (9)). Эти модели широко тестировались на классе прямооточных и закрученных неизоотермических течений смесей в трубах и каналах (ее замыкания для простоты записи опущены и детально приведены, например, в [44, 61]):

$$U_k \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \nu \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_k} \right] + \frac{\partial}{\partial x_k} \left\{ c_s f_\mu \frac{k}{\epsilon} \left[ \overline{u'_i u'_l} \frac{\partial \overline{u'_j u'_k}}{\partial x_l} + \overline{u'_j u'_l} \frac{\partial \overline{u'_k u'_i}}{\partial x_l} + \overline{u'_k u'_l} \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_l} \right] \right\} + \left\{ - \left[ \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial U_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right] \right\} + R_{ij} - \epsilon_{ij}; \quad (7)$$

$$U_k \frac{\partial k}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial k}{\partial x_j} + c_{sk} f_\mu \overline{u'_i u'_j} \frac{L}{\sqrt{k}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \left\{ - \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k} \right\} - \tilde{c}_D \frac{k^{1.5}}{L}; \quad (8)$$

$$U_k \frac{\partial L}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial L}{\partial x_j} + c_{sl} f_\mu \overline{u'_i u'_j} \frac{L}{\sqrt{k}} \frac{\partial L}{\partial x_i} \right) + P_L + P_L + c_{Lj} c_{2L} k^{0.5} \left( 1 - \frac{L^2}{x_n^2} \right). \quad (9)$$

Выделение kL-модели Г.С. Глушко [6, 62] как опорной базы для RSS-модели, по сравнению с к $\epsilon$ -моделью У. Джонса [44], Б. Лаундера [63] объясняется ее лучшей реализуемостью в пристеночных зонах.

Ниже приведены отдельные результаты изменений структуры вязких течений в трубах с переменной площадью поперечного сечения, моделирующих загромождение потока шламом (рис. 13, 14) и двухфазной жидкостно-жидкостной смеси в трубах (рис. 15, 16).

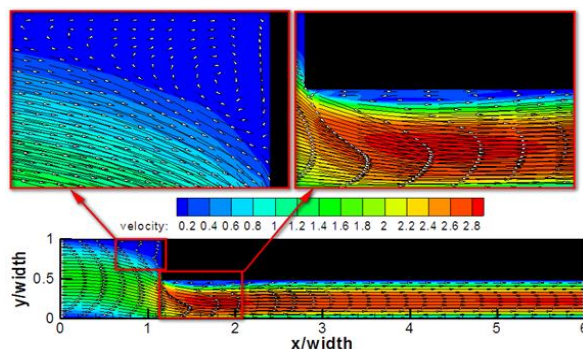


Рис. 13. Изменение поля скорости по круглой трубе (колонне) при внезапном сужении сечения, обусловленном загромождением потока неподвижным однородным слоем твердой породы [64]

Fig. 13. Change in velocity field along a circular pipe (column) with a sudden narrowing of the cross section caused by the flow clutter with a stationary homogeneous layer of solid rock [64]

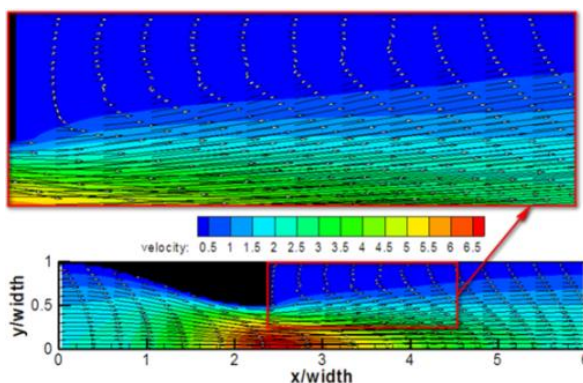
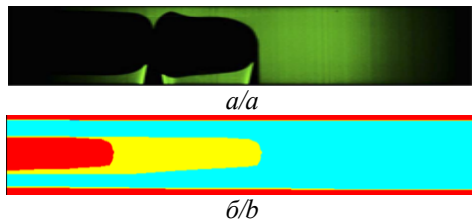


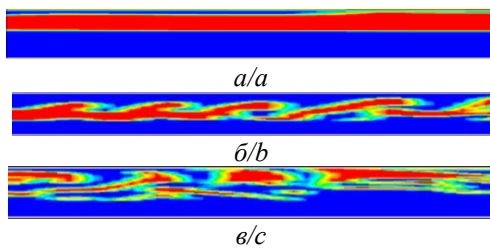
Рис. 14. Изменение поля скорости по круглой трубе (колонне) при обтекании неподвижного слоя частиц твердой породы с конфузурной формой, загромождающего движение жидкости в ядре трубы [64]

Fig. 14. Change in velocity field along a circular pipe (column) when a stationary layer of solid rock particles with a confusor shape flows around, which obstructs the movement of the liquid in the core of the pipe [64]



**Рис. 15.** Пробковый режим течения:  $D=5,6$  мм;  $U_{mix}=0,8$  м/с;  $C_w=0,7$ ; а) эксперимент Wegmann А. [65, 66]; б) визуализация результатов моделирования

**Fig. 15.** Slug flow regime:  $D=5,6$  mm;  $U_{mix}=0,8$  m/s;  $C_w=0,7$ ; а) experiment by A. Wegmann [65, 66]; б) visualization of simulation results



**Рис. 16.** Картины течения двухфазного потока: а) расслоенный режим –  $D=720$  мм;  $U_w=0,73$  м/с;  $U_n=0,5$  м/с;  $X=20-30$  м; б) переходный режим с кольцевой структурой потока в пробковый –  $D=720$  мм,  $U_w=2$  м/с;  $U_n=2$  м/с;  $X=20-30$  м; в) глобулярный режим с параметрами –  $D=720$  мм;  $U_w=2$  м/с;  $U_n=2$  м/с;  $X=30-40$  м

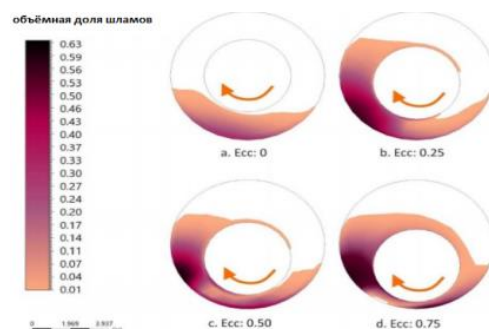
**Fig. 16.** Two-phase flow patterns: а) stratified mode –  $D=720$  mm;  $U_w=0,73$  m/s;  $U_o=0,5$  m/s;  $X=20-30$  m; б) transition mode with ring flow structure in slug –  $D=720$  mm;  $U_w=2$  m/s;  $U_o=2$  m/s;  $X=20-30$  m; в) slug mode with parameters –  $D=720$  mm;  $U_w=2$  m/s;  $U_o=2$  m/s;  $X=30-40$  m

Видно (рис. 15, 16), что при указанных скоростях течения (рис. 16, б) более тяжелая фаза (нефть) на расстоянии 20 м от входа уже контактирует со стенкой, а при  $U_n=0,5$  м/с,  $U_w=0,73$  м/с (рис. 15, а) наблюдаются возмущения вихревой природы, которые требуется корректно описывать в высоко инерционных процессах моделью турбулентности с опорной базой из kL-, k $\omega$ -, k $\epsilon$ -моделей.

Современный опыт применения RSS-моделей к описанию проблем транспорта шлама показывает следующее [67–70]. Так, О. Гейдари и соавт. [68] провели изучение процесса накопления выработки в различных областях труб с эксцентрическими кольцевыми пространствами, привлекая многофазную модель Эйлера, используя в качестве рабочей среды буровой раствор с реологией Гершеля–Балкли. Турбулентность моделируется с привлечением модели напряжений Рейнольдса. Изменения концентрационного поля смеси в кольцевой области показали (рис. 17), что рост значений эксцентриситета расположения бурильной колонны (с некоторого значения  $e$ ) способен резко увеличивать накопление продуктов выработки. И этот процесс существенно зависит от высоты слоя выработки, а также от особенностей вращения бурильной трубы. Также установлено, что если влияние вращения несколько выше определенной скорости вращения (в частности, при вращении порядка 150 об/мин), то не следует ожи-

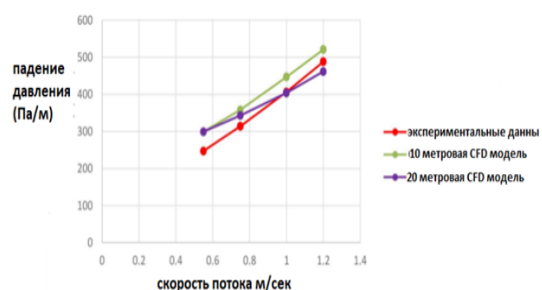
дать увеличения массы выработки за счет изменений эксцентриситета колонны.

Опыт расчета турбулентных процессов в потоках с криволинейной границей области течения свидетельствует [60, 61, 63, 71], что структура диффузионного поля вещества, представленная на рис. 17, сильно зависит от эволюции компонент тензора напряжений Рейнольдса и составляющих турбулентных потоков массы, которые отличаются высокой степенью анизотропии при взаимодействии смеси со стенками труб, содержащих эксцентрично расположенное круглое ядро с подвижной поверхностью стенки. Учитывая особенности течения смесей в трубах с эксцентричными ядрами и используя универсальный CFD-пакет С. Саундла и др. [72] провели детальные исследования влияния эксцентриситета трубы на транспортировку шлама. Показано, что при течении в эксцентрической кольцевой зоне перепад давления меньше, чем в концентрической кольцевой области при аналогичных и подобных физических условиях в соответствующих жидких средах. Кроме того, обнаружено, что как в эксцентрических, так и в коаксиальных режимах течения смесей наличие выработки сильно влияет на перепад давления (рис. 18).



**Рис. 17.** Распределения концентрационного поля с учетом турбулентности (RSS-ke модель) при изменении эксцентриситета колонны (картины отвечают [70])

**Fig. 17.** Distribution of concentration field taking into account turbulence (RSS-ke model) when the column eccentricity changes [70]



**Рис. 18.** Сравнение результатов расчета перепада поля давления (теория – CFD-моделирование и эксперимент – символы) с учетом данных об изменении эксцентриситета (результаты отвечают данным [52])

**Fig. 18.** Comparison of the results of calculating the differential pressure field (Experimental results are given by the red line) [52]

Таким образом, при характеристике моделей, методов и подходов изучения движения в реологически сложных гетерогенных смесях (жидкость–частицы) следует отметить, что наряду с эйлерово-эйлеровым подходом в расчетах динамики шлама популярен лагранжево-эйлеров метод. В последнем жидкая фаза рассматривается как континуум и описывается уравнениями Навье–Стокса. В то время как поведение частиц дисперсной фазы прогнозируется путем отслеживания движения частиц через расчетное поле несущей фазы смеси. Дисперсная фаза может обмениваться импульсом, массой и энергией с жидкой фазой. Основное предположение, сделанное в этой модели, состоит в том, что дисперсная (вторая) фаза занимает небольшую объемную долю. Это допущение вносит серьезные ограничения на применимость модели к процессам, в которых значениями объемной доли второй фазы пренебрегать нельзя. Процессы межфазного взаимодействия между жидкой и твердой фазами связаны через источники членов в уравнениях законов сохранения массы, импульса и энергии (например, [38, 43–45, 47]).

Принимая во внимание достоинства и способность многопараметрических моделей корректно описывать сложные процессы во внутренних системах, С. Акшик и др. [70] выполнили исследование влияния вращения буровой колонны на транспортировку шлама в рамках положений лагранжево-эйлеровой модели с учетом эффектов столкновений между частицами и стенками области движения (кольцевая зона между внутренней и внешней стенками труб), а также нетривиального характера воздействия внутренних и внешних сил: сопротивления, подъема и перепада поля давления. Заметим, что моделирование процессов переноса проведено в ANSYS CFD по алгоритму, обеспечивающему получение устойчивого решения нелинейной пространственной и связанной задачи гидродинамики и тепломассопереноса по системе определяющих уравнений для двухфазной среды с граничными условиями для замкнутой области кольцевого движения с ядром. Отдельные сведения о поведении шлама в трубе с эксцентрично расположенным ядром иллюстрируют данные [70] (рис. 19).

Эти результаты позволили утверждать, что увеличение вращения трубы контрпродуктивно при поиске путей роста скорости движения потока жидкости и очистки отверстий. Однако увеличение скорости вращения трубы все же способно незначительно увеличивать кольцевое давление. Этот результат следует признать полезным при выработке решений об оптимизации технологических операций очистки отверстий от шлама.

Диффузионные вопросы составили содержание исследования С. Акшика и др. [71], ориентированное на оценки: какое влияние на процесс очистки способны оказывать эффекты, обусловленные изменением размера частиц, свойств смеси и промывочной жидкости (буровой раствор), микроскопические свойства частиц на границах контакта. С этой целью в [71] разработан алгоритм детального решения задачи по пакету CFD-DEM, в котором в качестве основных мик-

роскопических свойств на границах контакта частиц между собой, стенками межтрубного пространства выступают значения неизвестных компонент напряжений от взаимодействий частица–частица, трения от контакта частицы со стенкой, трения от контакта частицы и бура. Результаты показывают определяющее влияние на процессы транспорта частиц шлама микроскопических свойств частиц в областях непосредственного контакта. Отдельные результаты, иллюстрирующие изменения структуры потока по данным [71], приведены на рис. 20.

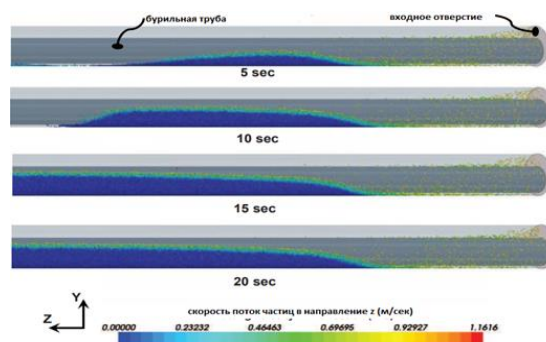


Рис. 19. Данные изменений структуры гетерогенной смеси, полученной в рамках лагранжево-эйлерова подхода моделирования ламинарного течения [70]

Fig. 19. Changes in the structure of a heterogeneous mixture obtained using the Lagrangian–Euler approach for modeling laminar flow [70]

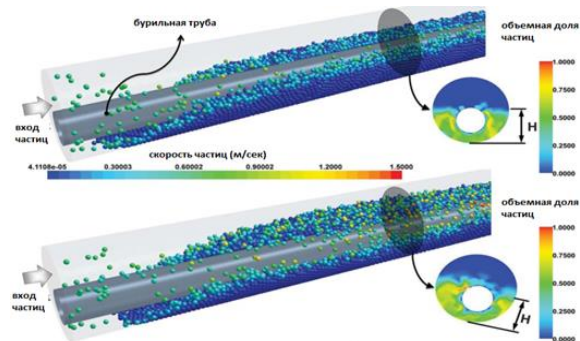


Рис. 20. Данные изменений коэффициента трения в зависимости от объемной доли частиц в поперечном сечении трубы с эксцентрично расположенным ядром [71]

Fig. 20. Modeling the change in particle concentration by varying the friction coefficient between particles in the selected cross section of a pipe with an eccentric inner pipe [71]

В серии исследований, например, [51, 73–77], заслуживают внимания вопросы выяснения особенностей реализации алгоритмов расчета сложных течений гетерогенных систем (CFD-, DEM-модели и их комбинаций с эйлеро-эйлеровым и лагранжевым подходами) в прогнозах деталей гидродинамики, интенсивности тепло- и массопереноса, изменений состава смесей, механизмов осаждения и транспорта частиц шлама, изменений эксцентриситета, наклона труб, геометрии пространства и частиц и т. д. (например,

данные рис. 21). В частности, Б. Сун и др. [51] при прогнозе очистки тонких отверстий по модели CFD-DEM установлено, что в потоке возникают высокие давления в локальных областях кольцевых зазоров. Это способно вносить серьезные ограничения на величину скорости движения смеси. И авторы [51] предлагают оригинальную модель для прогнозирования минимальной кольцевой скорости, достаточной для организации транспорта шлама/предотвращения накопления осадка частиц. На рис. 22 проанализированы данные факторов очистки. Видно, что теория и опыт результатов очистки находятся в удовлетворительном соответствии. Е. Эпелле и др. [73] оценили использование эйлерово-эйлерово подхода со степенной жидкостью и однородными частицами размера (3 мм) при проведении многопараметрического исследования по установлению факторов, влияющих на транспорт частиц шлама. Показано, что ошибка теории и моделирования составляет не более 11 % по интегральным параметрам, а скорость перемещения жидкости, наклон отверстий и эксцентриситет трубы способны вызывать *наибольшее влияние* на транспортировку шлама.

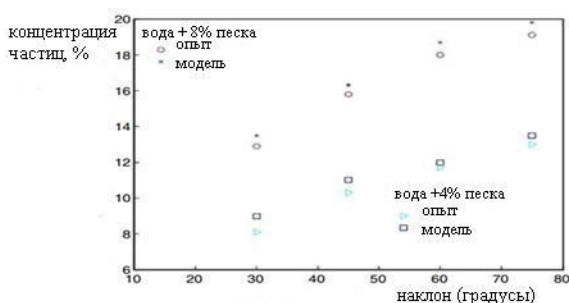


Рис. 21. Сравнение расчетных и опытных данных процесса очистки от шлама [51]

Fig. 21. Comparison of calculated and experimental data of the hole cleaning [51]

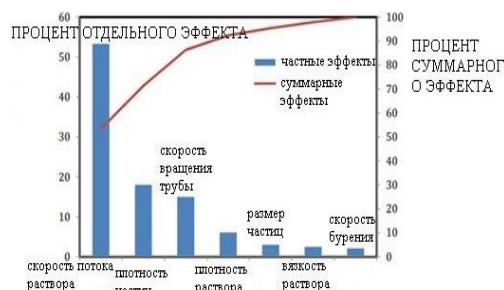


Рис. 22. Доля факторов, определяющих очистку скважин [77]

Fig. 22. Share of factors in modeling hole cleaning [77]

Более близкая к реальности ситуация транспорта моделировалась С. Акшик и др. [75] на базе метода (CFD-DEM) для описания переноса шлама при бурении на депрессии с учетом взаимодействия азрированного бурового раствора со скважиной. Выполнена попытка определения влияния скорости потока жидкости, скорости нагнетания воздуха, угла наклона

кольца, повышенной температуры и давления на эффективность транспортировки шлама. Эволюция и динамика частиц твердой фазы изучается с помощью DEM подхода. Показано, что наряду с *расходом жидкости* на эффективность переноса шлама существенно влияют параметры: *соотношение и доля концентраций* в системе «газ–жидкость»; *температура* окружающей среды и *величина впрыска* давления. Такие результаты потребовали Е. Эпелле и др. [76] провести исследование о влиянии геометрии частиц на эффективность процессов. Обнаружено, что несферические частицы движутся быстрее, чем идеальные сферические частицы в кольцевом пространстве. Установлено, что допущение идеальной сферичности может привести к погрешности до 11 % в оценке падения давления. Эта же тема была ранее исследована С. Акшик и др. [71]. Но в то время как в [77] использован эйлерово-эйлеровый подход, в [72] реализована лагранжево-эйлерова модель. Расчеты подчеркивают, что поскольку форма частиц отличалась от идеальной сферы, были получены данные, что концентрация частиц и скорость переноса увеличиваются при транспортировке.

Изучение пневмотранспорта шлама с привлечением газового потока проводили Е. Манджула и др. [74], где установлено, что данный процесс можно осуществить двумя способами: 1) если поток газа имеет скорость, достаточную для нахождения частиц шлама во взвешенном состоянии и движения их с общей массой газа; 2) в случае, если скорость газа реально мала для транспорта, то возникают условия, при которых продукты выработки локализируются и транспортируются в виде «пробок» внутри жидкости. Заметим, что это исследование перспективно, мало изучено на предмет установления уравнения подобия для критического значения скорости, учитывающего изменения структуры потока дисперсной системы в трубах.

Результаты транспорта шлама [76, 77], основанные на моделировании процессов по методу Монте-Карло (MCS), CFD расчетах с использованием прототипа устройства (DOE), показали следующее. Эффекты от изменений скорости бурового раствора, вращения трубы и бурильной колонны, массы бурового раствора, диаметра частиц шлама, вязкости бурового раствора оказывают наибольшее влияние на транспортировку пробуренного шлама от забоя скважины до поверхности. Установлено, что 86,3 % вариаций эффективности транспортировки продуктов выработки течения бурового раствора, *массой частиц* выработки и *скоростью вращения* бурильной трубы. Более полно эти сведения отражают данные М. Надеры и др. [77], представленные на рис. 22.

### Заключение

Общий анализ результатов исследований процессов транспорта продуктов выработки при бурении, перспектив их приложений к технике позволяет утверждать следующее.

1. Последние 30 лет отмечены многочисленными достижениями в моделировании движений смесей жидкостей с твердыми частицами в полях действия массовых сил в областях с эксцентрично расположенными ядрами и представляют многообещающую альтернативу экспериментальному анализу задач транспорта шлама.
2. При моделировании особое внимание следует уделять вопросам: способности *моделей* реагировать на эффекты в *низкорейнольдсовых областях*, которые включают влияние молекулярной вязкости (температуропроводности, диффузионности) и отличаются существенной анизотропией, кривизной линий тока, отрывом и присоединением вязкого потока, ударами частиц о стенку, обусловленными деформациями в сложном сдвиговом течении *от* эффектов вращения ядра, перестройки поля скорости по длине скважины от закрученного в прямоточное движение; *сокращения* времени вычислений для достижения устойчивости высших моментов, влияющих на процессы диффузии в смеси.
3. Аналитическое и экспериментальное изучение должно послужить предметом дополнительных исследований: *механистических (многослойных) моделей*, учитывающих эксцентричность расположения и вращения круглых ядер, несферичность формы частиц; *создания* установки для тестирования критериальных зависимостей по оценке эффективности очистки отверстий.
4. Предприняты усилия, направленные на уменьшение неопределенности эффектов, описывающих силовое, тепловое и диффузионное взаимодействие между частицами несущей капельной среды и взвешенными в ней твердыми частицами выработки и соответственно *коэффициентов* аэродинамического сопротивления, тепло- и массо-передачи посредством: *привлечения* средств бесконтактной регистрации (лазерное доплеровское оборудование); *обращения* к вспомогательным программам анализа данных в рамках ПК ANSYS.
5. В численном моделировании надежен *лагранжево-эйлеров* метод, предполагающий обращение к траекторной модели частиц дисперсной фазы и континуальной модели для частиц несущей среды, для которого весьма актуальны вопросы: взаимодействия турбулентности при межчастичном взаимодействии, фазовых эффектов, изменений эксцентриситета трубы, формы частиц, столкновений в многофазной структуре.
6. Недостаточно апробированы турбулентные модели высшего порядка для напряжений и потоков скалярной субстанции (тепла и массы) – RSS-модели. В частности, это вызвано высокой чувствительностью  $k\epsilon$ -,  $k\omega$ -опорных баз к локальным возмущениям, идущим от границ раздела фаз. Установлено, что хорошей альтернативой им может служить  $kL$ -модель с консервативным физическим параметром, характеризующим «тонкую» структуру потока (интегральный масштаб энерго-содержащих вихрей,  $L$ ) и это составит предмет перспективных будущих исследований рассматриваемых задач.
7. Экспериментами сформирована база данных, которую рекомендовано использовать для тестирования разрабатываемых моделей очистки скважин. Причем главными в моделировании выступают проблемы прогноза: *состава* шлама в любой точке затрубного пространства; *установления* минимальной скорости жидкости (значения порядка 46–61 м/мин при бурении протяженных горизонтальных секций), гарантирующей удаление шлама из скважины, предотвращение его образования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells / A. Piroozian, I. Ismail, Z. Yaacob, P. Babakhani, A.S.I. Ismail // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2012. – V. 2 (3). – P. 149–156.
2. Effect of pipe rotation on hole cleaning for water-based drilling fluids in horizontal and deviated wells / M.E. Ozbayoglu, A. Saasen, M. Sorgun, K. Svanes // International Association of Drilling Contractors/Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. – Jakarta, Indonesia, 2008. – P. 1–11.
3. Pigott R.J.S. Mud flow in drilling // Drilling and Production Practice. – USA: American Petroleum Institute, 1942. – P. 91–103.
4. Chien S.F. Settling velocity of irregularly shaped particles // Paper Society of Petroleum Engineers. – 1993. – № 26121. – P. 281–289.
5. Ramsey M. Practical wellbore hydraulics and hole cleaning unlock faster, more efficient, and trouble-free drilling operations. USA: Gulf Professional Publishing, 2019. – 340 p.
6. Osgouei R.E., Ozbayoglu M.E., Fu T.K. CFD simulation of solids carrying capacity of a Newtonian fluid through horizontal eccentric annulus // American Society of Mechanical Engineering 2013. Fluids Engineering Division Summer Meeting. – USA, July, 2013. – P. 23–28.
7. Iyoho A.W. Drilled-cuttings transport by non-Newtonian drilling fluids through inclined, eccentric annuli: PhD thesis. – USA, 1980. – 263 p.
8. Brown N.P., Bern P.A., Weaver A. Cleaning deviated holes: new experimental and theoretical studies // The Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors Drilling Conference. – New Orleans, Louisiana, February 28 – March 3, 1989. – P. 171–178.
9. Gavignet A.A., Sobey I.J. A Model for the transport of cuttings in highly deviated wells // Society of Petroleum Engineers paper 15417. The 61<sup>st</sup> Annual Technical Conference and Exhibition of the Society Petroleum Engineers. – New Orleans, October 5–6, 1986. – P. 916–921.
10. Okrajni S. Mud cuttings transport in directional well drilling // Society of Petroleum Engineers paper 16.178: the 60<sup>th</sup> Ann Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. – Las Vegas, NV, September 22–25, 1985. – P. 297–308.
11. Transport of cuttings in directional wells / M. Martin, C. Georges, P. Bisson, O. Konirsch // Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors paper 16083, Drilling Conf. – New Orleans, LA, March 15–18, 1987. – P. 293–303.
12. Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes / J.T. Ford, J.M. Peden, M.B. Oyenyin, Erhu Gao, R. Zarrouh // The 65<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. – New Orleans, LA, September 23–26, 1990. – P. 197–206.
13. Peden J.M., Ford J.T., Oyenyin M.B. Comprehensive experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotation and eccentricity // The 1990

- European Petroleum Conference. – The Hague, Netherlands, 1990. – P. 394–405.
14. Martins A.L., Santana C.C. Evaluation of cuttings transport in horizontal and near horizontal wells – a dimensionless approach // The Second Latin America Petroleum Engineering Conference. – Caracas, Venezuela, 1992. – P. 155–161.
  15. Bassal A.A. The effect of drillpipe rotation on cuttings transport in inclined wellbores: PhD Thesis. – Tulsa, Oklahoma, USA, 1995. – 214 p.
  16. Saasen A. Hole cleaning during deviated drilling – the effects of pump rate and rheology // The 1998 Society of Petroleum Engineers European Petroleum Conference. – The Hague, Netherlands, 1998. – P. 161–167.
  17. Pilevhari A.A., Azar J.J., Shirazi S.A. State-of-the-art cuttings transport in horizontal wellbores // Society of Petroleum Engineers Drilling & Completion. – 1999. – V. 14. – P. 196–200.
  18. Critical cuttings transport velocity in inclined annulus: experimental studies and numerical simulation / Y. Masuda, Q. Doan, M. Ogutoreli, S. Nagawa, T. Yonezawa, A. Kobayashi, A. Kamp // The 2000 Society of Petroleum Engineers/Petroleum Society of Canadian Institute of Mining International Conference. – Calgary, Alberta, Canada, 2000. – P. 1–12.
  19. Analysis of the effects of major drilling parameters on cuttings transport efficiency for high-angle wells in coiled tubing drilling operations / M.E. Ozbayoglu, S.Z. Miska, T. Reed, N. Takach // Society of Petroleum Engineers/Intervention and Coiled Tubing Association Coiled Tubing Conference and Exhibition. – Houston, Texas, 2004, January. – P. 1–8.
  20. Drill-cuttings transport in full scale vertical annuli / T.R. Sifferman, G.M. Myers, E.L. Haden, H.A. Hahl // Journal of Petroleum Technology. – 1974, November. – V. 26. – P. 1295–1302.
  21. Gul S., Kuru E., Parlaktuna M. Experimental investigation of cuttings transport in horizontal wells using aerated drilling fluids // International Petroleum Exhibition & Conference. Society of Petroleum Engineers. – Abu Dhabi, November, 2017. – P. 1–18.
  22. Werner B., Myrseth V., Saasen A. Viscoelastic properties of drilling fluids and their influence on cuttings transport // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 156. – P. 845–851.
  23. Gavignet A.A., Sobey I.J. Model aids cuttings transport prediction // Journal of Petroleum Technology. – 1989. – V. 41. – P. 916–921.
  24. Philip Z., Sharma M.M., Chenevert M.E. The role of Taylor vortices in the transport of drill cuttings // Society of Petroleum Engineers India Oil and Gas Conference and Exhibition. – New Delhi, India, January 1998. – P. 1–7.
  25. Leising L.J., Walton I.C. Cuttings-transport problems and solutions in coiled-tubing drilling // Society of Petroleum Engineers Drilling Conference. – Dallas, Texas, March 2002. – P. 85–100.
  26. Clark R.K., Bickham K.L. A mechanistic model for cuttings transport // Society of Petroleum Engineers annual technical conference and exhibition. – New Orleans, Louisiana USA, September 1994. – P. 139–153.
  27. A new MTV computer package for hole-cleaning design and analysis / J.T. Ford, M.B. Oyenyin, J.M. Peden, M.B. Larrucia, D. Parker // Society of Petroleum Engineers Drilling & Completion. – 1996. – V. 11. – P. 168–172.
  28. Larsen T.I., Pilevhari A.A., Azar J.J. Development of a new cutting transport: model for high-hole wellbores including horizontal wells // Paper Society of Petroleum Engineers 25872. Society of Petroleum Engineers Rocky Mountain Regional/Low Permeability Reservoirs Symposium. – Denver, April 12–14, 1993. – P. 129–135.
  29. Nguyen D., Rahman S.S. A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells // The International Association of Drilling Contractors/Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Drilling Technology Conference. – Kuala Lumpur, Malaysia, 1996. – P. 163–173.
  30. Kamp A.M., Rivero M. Layer modeling for cuttings transport in highly inclined wellbores // Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Society of Petroleum Engineers. – Caracas, Venezuela, January, 1999. – P. 1–12.
  31. Doron P., Barnea D. Flow of solid-liquid mixtures in inclined pipes // International Journal of Multiphase Flow. – 1997. – V. 23. – № 2. – P. 313–323.
  32. Numerical simulation on three layer dynamic cutting transport model and its application on extended reach drilling / Z. Wang, Y. Zhai, X. Hao, X. Guo, L. Sun // Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition. – Ho Chi Minh City, Vietnam, November 2010. – P. 1–10.
  33. 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 and Completion. – September 2017. – V. 32. – P. 1–14.
  34. Prasad S., Ghalambor A. Transient cuttings transport with foam in horizontal wells – a numerical simulation study for applications in depleted reservoirs // SPE international conference and exhibition on formation damage control. Society of Petroleum Engineers. – Lafayette, Louisiana, USA, February, 2018. – P. 1–23.
  35. A unified transient solid-liquid two-phase flow model for cuttings transport-modelling part / F. Zhang, S. Miska, M. Yu, E. Ozbayoglu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 166. – P. 146–156.
  36. Iyoho A.W., Horeth I.J.M., Veenkant R.L. A computer model for hole-cleaning analysis // Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition. – Dallas, Texas, September 1988. – P. 397–407.
  37. King I., Trenty L., Vit C. How the 3D modeling could help hole-cleaning optimization // Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition. – Dallas, Texas, October 2000. – P. 1–6.
  38. Кроу С.Т. Исследования модели течения газа с небольшим содержанием частиц // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1982. – Сер. Д. – № 3. – С. 114–122.
  39. Akhshik S., Behzad M., Rajabi M. CFD-DEM approach to investigate the effect of drill pipe rotation on cuttings transport behavior // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2015. – V. 127. – P. 229–244.
  40. Mishra N. Investigation of hole cleaning parameters using computational fluid dynamics in horizontal and deviated wells: Msc Thesis. – Virginia, 2007. – 76 p.
  41. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport / H.I. Bilgesu, M.W. Ali, K. Aminian, S. Ameri // Society of Petroleum Engineers Eastern Regional Meeting. – Lexington, Kentucky, 2002. – P. 1–4.
  42. Bilgesu H.I., Mishra N., Ameri S. Understanding the effect of drilling parameters on hole cleaning in horizontal and deviated wellbores using computational fluid dynamics // Society of Petroleum Engineers Eastern Regional Meeting. – Lexington, Kentucky USA, October 2007. – P. 1–7.
  43. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Т. 1. – 464 с.
  44. Турбулентные течения газовзвесей / А.А. Шрайбер, Л.Б. Гавин, В.А. Наумов, В.П. Яценко. – Киев: Наукова Думка, 1987. – 239 с.
  45. Распространение запыленных струйных течений / Ф.Ф. Моства, Х.Ц. Монджиа, В.Г. Макдонелл, Г.С. Самуэлсен // Аэрокосмическая техника. – 1990. – № 3. – С. 65–82.
  46. Бубенчиков А.М., Харламов С.Н. Математические модели неоднородной анизотропной турбулентности во внутренних течениях. – Томск: Томский государственный университет, 2001. – 448 с.
  47. Зайчик Л.И., Алипченков В.М. Статистические модели движения частиц в турбулентной жидкости. – М.: Физматлит, 2007. – 312 с.
  48. Wang Z.M., Li M., Hong Y.K. Effect of drillpipe rotation on borehole cleaning for extended reach well // Journal of Hydrodynamics. – 2009. – V. 21. – № 3. – P. 366–372.
  49. Mme U., Skalle P. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles // International Journal of Petroleum Science and Technology. – 2012. – V. 6 (2). – P. 129–141.
  50. Simulation of the cuttings cleaning during the drilling operation / H.H. Al-Kayiem, M.Z.A. Ismail, N.M. Zaki, M.E. Elfeel // American Journal of Applied Sciences. – 2010. – V. 7 (6). – P. 800–806.
  51. Modeling of the Critical Deposition Velocity of Cuttings in an Inclined-Slimhole Annulus / B. Sun, H. Xiang, H. Li & X. Li // Society of Petroleum Engineers Journal. – August 2017. – V. 22. – P. 1213–1224.

52. CFD simulation of rheological model effect on cuttings transport / R. Rooki, F.D. Ardejani, A. Moradzadeh, M. Norouzi // Journal of the Society of Petroleum Engineers on Science and Technology. – 2015. – V. 36 (3). – P. 402–410.
53. Simulation of cuttings transport with foam in deviated wellbores using computational fluid dynamics / R. Rooki, F.D. Ardejani, A. Moradzadeh, M. Norouzi // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. – 2014. – V. 4 (3). – P. 263–273.
54. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. Transient and steady state analysis of drill cuttings transport phenomena under turbulent conditions // Chemical Engineering Research and Design. – 2018. – V. 131. – P. 520–544.
55. Investigation of drill pipe rotation effect on cutting transport with aerated mud using CFD approach / M.K. Moraveji, M. Sabah, A. Shahryari, A. Ghaffarkhah // Advanced Powder Technology. – 2017. – V. 28 (4). – P. 1141–1153.
56. Steady-state cuttings transport simulation in horizontal borehole annulus / Y. Ignatenko, O. Bocharov, A. Gavrillov, R. May // ASME 2018 37<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. – Madrid, Spain June, 2018. – P. 74–79.
57. Amanna B., Movaghar M.R.K. Cuttings transport behavior in directional drilling using Computational Fluid Dynamics (CFD) // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – V. 34. – P. 670–679.
58. Kharlamov S.N., Islyamov I.Sh. Optimization of the liquid hydrocarbons pipeline transport with using a vortex effect and inductive heating of metallic additives // Proc. of the 7<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology. – Tomsk, Russia, 2012. – P. 1–6. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357803.
59. Николаев Е.В., Харламов С.Н. Закономерности изменений параметров процессов переноса многокомпонентных углеводородных сред в условиях сепарации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 10. – P. 137–144.
60. Kharlamov S.N. Characteristics of flow and heat transfer in a turbulent twisted flow // Heat Transfer Research. – 2002. – V. 33. – Iss. 1–2. – P. 64–74.
61. Prospects of RANS models with effects multiparameter at modeling of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface / S.N. Kharlamov, V.Yu. Kim, S.I. Silvestrov, R.A. Alginov, S.A. Pavlov // Proc. of the 6<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology. – Heilongjiang, Harbin, China, 2011. – V. 2. – P. 787–791. DOI: 10.1109/IFOST.2011.6021139.
62. Глушко Г.С. Некоторые особенности турбулентных течений несжимаемой жидкости с поперечным сдвигом // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1971. – № 4. – С. 128–136.
63. Launder B.E. Second-moment closure and its use in modelling turbulent industrial flows // International Journal of the Numerical Methods in Fluids. – 1989. – V. 9. – P. 963–979.
64. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Specific aspects of turbulent flow separation in nodes and junctions of pipelines // XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov: PGON 2014 IOP Publishing IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 21(1). – Tomsk, Russia, 2014. – P. 1–6. DOI:10.1088/1755-1315/21/1/012038.
65. Харламов С.Н., Павлов С.А. Исследование течений гетерогенных сред на горизонтальных участках трубопроводов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 8. – С. 94–103.
66. Kharlamov S.N., Malozemov A.V. Investigation of regularities highly viscous liquid flows in interaction with peripheral annular flow of water – oil in complex pipelines // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – V. 565. – P. 152–155. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.565.152.
67. Kharlamov S.N., Kudelin N.S., Dedeyev P.O. Hydrodynamic, heat and acoustic processes modelling in transport of rheologically complex viscous media technology in pipelines // XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov: PGON2014 IOP Publishing IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 21. – Tomsk, Russia, 2014. – P. 1–6. DOI:10.1088/1755-1315/21/1/012040.
68. Heydari O., Sahraei E., Skalle P. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuluses using Computational Fluid Dynamics (CFD) // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 156. – P. 801–813. DOI: 10.1016/j.petrol.2017.06.059.
69. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Engineering approaches' progress in calculation of inhomogeneous turbulence in pipelines // Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. – Moscow, Russia, 2010. – V. 2. – P. 798–805.
70. Akhshik S., Behzad M., Rajabi M. On the particle-particle contact effects on the hole cleaning process via a CFD-DEM model // Particulate Science and Technology. – 2016. – V. 34 (6). – P. 736–743.
71. Akhshik S., Behzad M., Rajabi M. CFD-DEM simulation of the hole cleaning process in a deviated well drilling: the effects of particle shape // Particology. – 2016. – V. 25. – P. 72–82.
72. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and water-based drilling fluids / S. Sayindla, B. Lund, J.D. Ytrehus, A. Saasen // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2017. – V. 1 (159). – P. 49–57.
73. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. A multiparametric CFD analysis of multiphase annular flows for oil and gas drilling applications // Computers & Chemical Engineering. – 2017. – V. 106. – P. 645–661.
74. A review of CFD modelling studies on pneumatic conveying and challenges in modelling offshore drill cuttings transport / E.V.P.J. Manjula, W.H. Ariyaratne, C. Ratnayake, M.C. Melaen // Powder Technology. – 2017. – V. 305. – P. 782–793.
75. Akhshik S., Rajabi M. CFD-DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 160. – P. 229–246.
76. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle sphericity // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 170. – P. 992–1004.
77. Naderi M., Khamehchi E. Cutting transport efficiency prediction using probabilistic CFD and DOE techniques // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2018. – V. 163. – P. 58–66.

Поступила: 02.03.2020 г.

#### Информация об авторах

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

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



UDC 532.517:536.242:544.012:622.244:519.6

## CUTTINGS TRANSPORT IN HOLE CLEANING CONSIDERING WELL ORIENTATION, PIPE ECCENTRICITY AND PIPE ROTATION: PROBLEMS, RESULTS, PROSPECTS (SURVEY)

Sergey N. Kharlamov<sup>1</sup>,  
kharsn@mail.ru

Mehran Janghorbani<sup>1</sup>,  
mehran.janghorbani@gmail.com

<sup>1</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The article relevance** is caused by the critical estimation of the data presented in domestic and foreign publications on problems related to modeling of viscous fluid streams while interacting with particles of a dispersed material and with walls of the devices intended for performance of drilling operations; clearing of wellbores from cuttings taking into account well inclination and drillpipe eccentricity.

**The main aim** is to introduce the bibliographic analysis of hole cleaning and cuttings transport, focused on finding ways to efficiently increase operational efficiency; to work out approaches and methods to model the cuttings transport in vertical and horizontal holes; to explain modern data on numerical modeling of cuttings transport problems; to provide recommendations to increase hole cleaning efficiency.

**The research methods** are theoretical and practical ones, characterizing fluid flow in systems, containing particles and the legitimacy of idealization of transport phenomena in mixtures; as well as the methods borrowed from other disciplines aimed at calculating the influence of flow regime and drillpipe rotation and eccentricity on location and behavior of dispersed particles. The general concepts of hydrodynamic and heat- and mass transfer principles in rheological complex media are not discussed in detail, and explained only to that degree which is required for clarity and completeness. The experimental material contains data on applicability of the theory to real physical systems. Most investigations are based on analyzing particle movement through fluid in common lumps as it originates at sedimentation as well as when particles remain more or less motionless, as in densely packed beds; or the relative motion of particles and fluid with complex turbulent distribution; at motion of particles relative to each other when the flow of the carrying medium is a complex shear flow.

**Results.** The paper introduces the analysis of experimental and theoretical results, important for applications related to cuttings transport phenomena, and the features accompanying processes of momentum, mass and energy during the flow of rheologically complex homogeneous and heterogeneous viscous mixtures in the annular space between a rotating eccentric inner pipe and a non-rotating outer pipe. Cuttings accumulation and difficulties in its transportation have major real world applications in drilling inclined and horizontal wellbores. Modeling results and the existing empirical relationships for cuttings behavior are critically analyzed. Advantages and the legitimacy of assumptions of some turbulent models and their closing relationships and dynamic, diffusive properties are presented. Also the parameters and mechanisms modeling the formation, accumulation, sedimentation, transport and separation of slime cuttings from a liquid in which they are suspended are given. The last 25–30 years have seen the numerous advances in numerical methods of multi-parameter and multidimensional modeling of hydrodynamics in dispersed mixtures (suspension, foam, powders). The analysis of experimental works shows that observation of dynamics of solid and liquid particles interaction by contactless means of registration can provide valuable information for validation and verification of the modern Reynolds Shear Stresses (RSS)-models of turbulence and specific turbulent fluxes for streams based on  $kL$ -,  $k\epsilon$ -equations, capable to predict complex turbulent flow of a mixture. The paper introduces the prospects of developing a universal algorithm with the possibility of a detailed prediction of effects: cutting bed formations in arbitrary points of annular spaces; determination of the minimum speed necessary for its formation and removal. The latter can be used in further research for determination of maximum admissible Rate Of Penetration (ROP); optimum values pump output; establishing field guidelines on duration and sequence of well cleaning operations, and the frequency of tripping operations.

### Key words:

Cuttings, hole, cleaning, modeling, hydrodynamics, rheology, structure, stresses, mass forces.

### REFERENCES

1. Piroozian A., Ismail I., Yaacob Z., Babakhani P., Ismail A.S.I. Impact of drilling fluid viscosity, velocity and hole inclination on cuttings transport in horizontal and highly deviated wells. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2012, vol. 2 (3), pp. 149–156.
2. Ozbayoglu M.E., Saasen A., Sorgun M., Svanes K. Effect of pipe rotation on hole cleaning for water-based drilling fluids in horizontal and deviated wells. *International Association of Drilling Contractors/Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*. Jakarta, Indonesia, 2008, pp. 1–11.
3. Pigott R.J.S. Mud flow in drilling. *Drilling and Production Practice*. USA, American Petroleum Institute, 1942, pp. 91–103.
4. Chien S.F. Settling velocity of irregularly shaped particles. *Paper Society of Petroleum Engineers*, 1993, no. 26121, pp. 281–289.
5. Ramsey M. *Practical wellbore hydraulics and hole cleaning unlock faster, more efficient, and trouble-free drilling operations*. USA, Gulf Professional Publishing, 2019. 340 p.
6. Osgouei R.E., Ozbayoglu M.E., Fu T.K. CFD simulation of solids carrying capacity of a Newtonian fluid through horizontal eccentric annulus. *American Society of Mechanical Engineering 2013. Fluids Engineering Division Summer Meeting*. USA, July, 2013, pp. 23–28.
7. Iyoho A.W. *Drilled-cuttings transport by non-newtonian drilling fluids through inclined, eccentric annuli*. PhD thesis. Tulsa, 1980. 263 p.
8. Brown N.P., Bern P.A., Weaver A. Cleaning deviated holes: new experimental and theoretical studies. *The Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors Drilling Conference*. New Orleans, Louisiana, February 28 – March 3, 1989, pp. 171–178.
9. Gavignet A.A., Sobey I.J. A Model for the transport of cuttings in highly deviated wells. *Society of Petroleum Engineers paper 15417. The 61<sup>st</sup> Annual Technical Conference and Exhibition of*

- the Society Petroleum Engineers*. New Orleans, USA, October 5–6, 1986, pp. 916–921.
10. Okrajni S. Mud cuttings transport in directional well drilling. *Society of Petroleum Engineers paper 16.178: the 60<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers*. Las Vegas, Nevada, USA, September 22–25, 1985, pp. 297–308.
  11. Martin M., Georges C., Bisson P., Konirsch O. Transport of cuttings in directional wells. *Society of Petroleum Engineers/International Association of Drilling Contractors paper 16083, Drilling Conf*. New Orleans, Louisiana, USA, March 15–18, 1987, pp. 293–303.
  12. Ford J.T., Peden J.M., Oyenyin M.B., Erhu Gao, Zarrouh R.. Experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined boreholes. *The 65<sup>th</sup> Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers*. New Orleans, Louisiana, USA, September 23–26, 1990, pp. 197–206.
  13. Peden J.M., Ford J.T., Oyenyin M.B. Comprehensive experimental investigation of drilled cuttings transport in inclined wells including the effects of rotation and eccentricity. *The 1990 European Petroleum Conference*. The Hague, Netherlands, 1990, pp. 394–405.
  14. Martins A.L., Santana C.C. Evaluation of cuttings transport in horizontal and near horizontal wells – a dimensionless approach. *The Second Latin America Petroleum Engineering Conference*. Caracas, Venezuela, 1992, pp. 155–161.
  15. Bassal A.A. *The effect of drillpipe rotation on cuttings transport in inclined wellbores*. PhD Thesis. Tulsa, Oklahoma, USA, 1995. 214 p.
  16. Saasen A. Hole cleaning during deviated drilling – the effects of pump rate and rheology. *The 1998 Society of Petroleum Engineers European Petroleum Conference*. The Hague, Netherlands, 1998, pp. 161–167.
  17. Pilehvari A.A., Azar J.J., Shirazi S.A. State-of-the-art cuttings transport in horizontal wellbores. *Society of Petroleum Engineers Drilling & Completion*, 1999, vol. 14, pp. 196–200.
  18. Masuda Y., Doan Q., Ogutoreli M., Nagawa S., Yonezawa T., Kobayashi A., Kamp A. Critical cuttings transport velocity in inclined annulus: experimental studies and numerical simulation. *The 2000 Society of Petroleum Engineers/Petroleum Society of Canadian Institute of Mining International Conference*. Calgary, Alberta, Canada, 2000, pp. 1–12.
  19. Ozbayoglu M.E., Miska S.Z., Reed T., Takach N.. Analysis of the effects of major drilling parameters on cuttings transport efficiency for high-angle wells in coiled tubing drilling operations. *Society of Petroleum Engineers/Intervention and Coiled Tubing Association Coiled Tubing Conference and Exhibition*. Houston, Texas, January 2004, pp. 1–8.
  20. Sifferman T.R., Myers G.M., Haden E.L., Hahl H.A. Drill-cuttings transport in full scale vertical annuli. *Journal of Petroleum Technology*, 1974, November, vol. 26, pp. 1295–1302.
  21. Gul S., Kuru E., Parlaktuna M. Experimental investigation of cuttings transport in horizontal wells using aerated drilling fluids. *International Petroleum Exhibition & Conference*. Abu Dhabi, November, 2017, pp. 1–18.
  22. Werner B., Myrseth V., Saasen A. Viscoelastic properties of drilling fluids and their influence on cuttings transport. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 156, pp. 845–851.
  23. Gavignet A.A., Sobey I.J. Model aids cuttings transport prediction. *Journal of Petroleum Technology*, 1989, vol. 41, pp. 916–921.
  24. Philip Z., Sharma M.M., Chenevert M.E. The role of Taylor vortices in the transport of drill cuttings. *Society of Petroleum Engineers India Oil and Gas Conference and Exhibition*. New Delhi, India, January 1998, pp. 1–7.
  25. Leising L.J., Walton I.C. Cuttings-transport problems and solutions in coiled-tubing drilling. *Society of Petroleum Engineers Drilling Conference*. Dallas, Texas, USA, March 2002, pp. 85–100.
  26. Clark R.K., Bickham K.L. A mechanistic model for cuttings transport. *Society of Petroleum Engineers annual technical conference and exhibition*. New Orleans, Louisiana, USA, September 1994, pp. 139–153.
  27. Ford J.T., Oyenyin M.B., Peden J.M., Larrucia M.B., Parker D. A new MTV computer package for hole-cleaning design and analysis. *Society of Petroleum Engineers Drilling & Completion*, 1996, vol. 11, pp. 168–172.
  28. Larsen T.I., Pilehvari A.A., Azar J.J. Development of a new cutting transport: model for high-hole wellbores including horizontal wells. Paper Society of Petroleum Engineers 25872. *Society of Petroleum Engineers Rocky Mountain Regional/Low Permeability Reservoirs Symposium*. Denver, Colorado, USA, April 12–14, 1993, pp. 129–135.
  29. Nguyen D., Rahman S.S. A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells. *The International Association of Drilling Contractors/Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Drilling Technology Conference*. Kuala Lumpur, Malaysia, 1996, pp. 163–173.
  30. Kamp A.M., Rivero M. Layer modeling for cuttings transport in highly inclined wellbores. *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference. Society of Petroleum Engineers*. Caracas, Venezuela, January, 1999, pp. 1–12.
  31. Doron P., Barnea D. Flow of solid-liquid mixtures in inclined pipes. *International Journal of Multiphase Flow*, 1997, vol. 23, no. 2, pp. 313–323.
  32. Wang Z., Zhai Y., Hao X., Guo X., Sun L. Numerical simulation on three layer dynamic cutting transport model and its application on extended reach drilling. *Society of Petroleum Engineers Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition*. Ho Chi Minh City, Vietnam, November 2010, pp. 1–10.
  33. 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 and Completion*, September 2017, vol. 32, pp. 1–14.
  34. Prasun S., Ghalambor A. Transient cuttings transport with foam in horizontal wells – a numerical simulation study for applications in depleted reservoirs. *SPE international conference and exhibition on formation damage control. Society of Petroleum Engineers*. Lafayette, Louisiana, USA, February, 2018, pp. 1–23.
  35. Zhang F., Miska S., Yu M., Ozbayoglu E. A unified transient solid-liquid two-phase flow model for cuttings transport-modelling part. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 166, pp. 146–156.
  36. Iyoho A.W., Horeth II.J.M., Veenkant R.L. A computer model for hole-cleaning analysis. *Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition*. Dallas, Texas, September 1988, pp. 397–407.
  37. King I., Trenty L., Vit C. How 3D modeling could help hole-cleaning optimization. *Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition*. Dallas, Texas, October 2000, pp. 1–6.
  38. Crow C.T. Issledovaniya modeli techeniya gaza s nebolshim soderzhaniiem chastits [Studies of a gas flow model with a small particle content]. *Teoreticheskie osnovy inzhenernykh rasshetov*, 1982, Ser. D, no. 3, pp. 114–122.
  39. Akhshik S., Behzad M., Rajabi M. CFD–DEM approach to investigate the effect of drill pipe rotation on cuttings transport behavior. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, vol. 127, pp. 229–244.
  40. Mishra N. *Investigation of hole cleaning parameters using computational fluid dynamics in horizontal and deviated wells*. Msc Thesis. Virginia, USA 2007. 76 p.
  41. Bilgesu H.I., Ali M.W., Aminian K., Ameri S.. Computational Fluid Dynamics (CFD) as a tool to study cutting transport. *Society of Petroleum Engineers Eastern Regional Meeting*. Lexington, Kentucky, USA, 2002, pp. 1–4.
  42. Bilgesu H.I., Mishra N., Ameri S. Understanding the effect of drilling parameters on hole cleaning in horizontal and deviated wellbores using computational fluid dynamics. *Society of Petroleum Engineers Eastern Regional Meeting*. Lexington, Kentucky, USA, October 2007, pp. 1–7.
  43. Nigmatulin R.I. *Dinamika mnogofaznykh sred* [Dynamics of multiphase media]. Moscow, Nauka Publ., 1987. Vol. 1, 464 p.
  44. Schreiber A.A., Gavin L.B., Naumov V.A., Yatsenko V.P. *Turbulentnye techeniya gazovzvesey* [Turbulent flows of gas suspensions]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1987. 239 p.
  45. Mostafa F.F., Monjia H.C., McDonnell V.G., Samuelsen G.S. Rasprostraneniye zapylennykh struynykh techeny [Distribution of dusty jet streams]. *Aerokosmicheskaya Tekhnika*, 1990, no. 3, pp. 65–82.

46. Bubenchikov A.M., Kharlamov S.N. *Matematicheskie modeli neodnorodnoy anizotropnoy turbulentnosti vo vnutrennikh techeniyakh* [Mathematical models of non-homogeneous anisotropic turbulence in internal flows]. Tomsk, Tomsk State University Publ., 2001. 448 p.
47. Zaychik L.I., Alipchenov V.M. *Statisticheskie modeli dvizheniya chastits v turbulentnoy zhidkosti* [Statistical models of particle motion in a turbulent liquid]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007. 312 p.
48. Wang Z.M., Li M., Hong Y.K. Effect of drillpipe rotation on borehole cleaning for extended reach well. *Journal of Hydrodynamics*, 2009, vol. 21 (3), pp. 366–372.
49. Mme U., Skalle P. CFD calculations of cuttings transport through drilling annuli at various angles. *International Journal of Petroleum Science and Technology*, 2012, vol. 6 (2), pp. 129–141.
50. Al-Kayiem H.H., Ismail M.Z.A., Zaki N.M., Elfeel M.E. Simulation of the cuttings cleaning during the drilling operation. *American Journal of Applied Sciences*, 2010, vol. 7 (6), pp. 800–806.
51. Sun B., Xiang H., Li H., Li X. Modeling of the critical deposition velocity of cuttings in an inclined-slimhole annulus. *Society of Petroleum Engineers Journal*, August 2017, vol. 22, pp. 1213–1224.
52. Rooki R., Ardejani F.D., Moradzadeh A., Norouzi M. CFD simulation of rheological model effect on cuttings transport. *Journal of the Society of Petroleum Engineers on Science and Technology*, 2015, vol. 36 (3), pp. 402–410.
53. Rooki R., Ardejani F.D., Moradzadeh A., Norouzi M.. Simulation of cuttings transport with foam in deviated wellbores using computational fluid dynamics. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2014, vol. 4 (3), pp. 263–273.
54. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. Transient and steady state analysis of drill cuttings transport phenomena under turbulent conditions. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, vol. 131, pp. 520–544.
55. Moraveji M.K., Sabah M., Shahryari A., Ghaffarkhah A. Investigation of drill pipe rotation effect on cutting transport with aerated mud using CFD approach. *Advanced Powder Technology*, 2017, vol. 28 (4), pp. 1141–1153.
56. Ignatenko Y., Bocharov O., Gavrillov A., May R. Steady-state cuttings transport simulation in horizontal borehole annulus. *ASME 2018 37<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Madrid, Spain, June, 2018. pp. 74–79.
57. Amanna B., Movaghar M.R.K. Cuttings transport behavior in directional drilling using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, vol. 34, pp. 670–679.
58. Kharlamov S.N., Islyamov I.Sh. Optimization of the liquid hydrocarbons pipeline transport with using a vortex effect and inductive heating of metallic additives. *Proc. of the 7<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology*. Tomsk, Russia, 2012. pp. 1–6. DOI: 10.1109/IFOST.2012.6357803.
59. Nikolaev E.V., Kharlamov S.N. Regularities of changes in parameters of multicomponent hydrocarbon media transfer in separation conditions. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 10, pp. 137–144. In Rus.
60. Kharlamov S.N. Characteristics of flow and heat transfer in a turbulent twisted flow. *Heat Transfer Research*, 2002, vol. 33, Iss. 1–2, pp. 64–74.
61. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I., Alginov R.A., Pavlov S.A.. Prospects of RANS models with effects multiparameter at modeling of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface. *Proc. of the 6<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology*. Heilongjiang, Harbin, China, 2011. Vol. 2, pp. 787–791.
62. Glushko G.S. Nekotorye osobennosti turbulentnykh techeny neshzimaemoy zhidkosti s poperechnym sdvigom [Some features of turbulent flows of an incompressible fluid with a transverse shift]. *Izvestiya AN SSSR Mekhanika Zhidkosti i Gaza*, 1971, no. 4, pp. 128–136.
63. Launder B.E. Second-moment closure and its use in modelling turbulent industrial flows. *International Journal of the Numerical Methods in Fluids*, 1989, vol. 9, pp. 963–979.
64. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Specific aspects of turbulent flow separation in nodes and junctions of pipelines. *XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov: PGON 2014 IOP Publishing IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 21(1)*. Tomsk, Russia, 2014. pp. 1–6.
65. Kharlamov S.N., Pavlov S.A. Issledovanie Teheny geterogennykh sred na gorizontalnykh uchastkakh truboprovodov [Investigation of flows of heterogeneous media on horizontal sections of pipelines]. *Gorny informatsionno analiticheski bulletin (nauchno tekhnicheski zhurnal)*, 2012, no. 8, pp. 94–103.
66. Kharlamov S.N., Malozemov A.V. Investigation of regularities highly viscous liquid flows in interaction with peripheral annular flow of water – oil in complex pipelines. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 565, pp. 152–155.
67. Kharlamov S.N., Kudelin N.S., Dedeyev P.O. Hydrodynamic, heat and acoustic processes modelling in tranport of rheologically complex viscous media technology in pipelines. *XVIII International Scientific Symposium in Honour of Academician M.A. Usov: PGON2014 IOP Publishing IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 21*. Tomsk, Russia, 2014. pp. 1–6.
68. Heydari O., Sahraei E., Skalle P. Investigating the impact of drillpipe's rotation and eccentricity on cuttings transport phenomenon in various horizontal annuluses using Computational Fluid Dynamics (CFD). *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 156, pp. 801–813.
69. Kharlamov S.N., Alginov R.A. Engineering Approaches' Progress in Calculation of Inhomogeneous Turbulence in Pipelines. *Society of Petroleum Engineers – SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*. Moscow, Russia, 2010. Vol. 2, pp. 798–805.
70. Akhshik S., Behzad M., Rajabi M. On the particle–particle contact effects on the hole cleaning process via a CFD–DEM model. *Particulate Science and Technology*, 2016, vol. 34 (6), pp. 736–743.
71. Akhshik S., Behzad M., Rajabi M. CFD-DEM simulation of the hole cleaning process in a deviated well drilling: the effects of particle shape. *Particuology*, 2016, vol. 25, pp. 72–82.
72. Sayindla S., Lund B., Ytrehus J.D., Saasen A. Hole-cleaning performance comparison of oil-based and water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017, vol. 1 (159), pp. 49–57.
73. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. A multiparametric CFD analysis of multiphase annular flows for oil and gas drilling applications. *Computers & Chemical Engineering*, 2017, vol. 106, pp. 645–661.
74. Manjula E.V.P.J., Ariyaratne W.H., Ratnayake C., Melaen M.C. A review of CFD modelling studies on pneumatic conveying and challenges in modelling offshore drill cuttings transport. *Powder Technology*, 2017, vol. 305, pp. 782–793.
75. Akhshik S., Rajabi M. CFD-DEM modeling of cuttings transport in underbalanced drilling considering aerated mud effects and downhole conditions. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 160, pp. 229–246.
76. Epelle E.I., Gerogiorgis D.I. CFD modelling and simulation of drill cuttings transport efficiency in annular bends: effect of particle sphericity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 170, pp. 992–1004.
77. Naderi M., Khamehchi E. Cutting transport efficiency prediction using probabilistic CFD and DOE techniques. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, vol. 163, pp. 58–66.

Received: 2 March 2020.

#### Information about the authors

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

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