

**К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ БУРЕНИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ  
ОЧИСТКИ СКВАЖИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОДА  
ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

**Джанхорбани Мехран**

Научный руководитель профессор Харламов С.Н.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

**Введение.** Одной из ключевых проблем современного бурения является проблема очистки скважины от шлама, особенно, из горизонтальных участков ее ствола. Хорошо известно (см., например [1-3]), что процесс очистки гораздо эффективнее при вращении буровой колонны. Поэтому при слайдинге (бурении с забойным двигателем и без вращения буровой колонны) необходимо приостанавливать бурение с целью выполнения операций по очистке скважин. Заметим, что определение частоты таких периодов очистки крайне важно. Так, если остановить бурение раньше необходимого момента, то возникнет ситуация с ненужными финансовыми и временными издержками, а позже – интенсифицируются неблагоприятные процессы для функционирования технологического оборудования, вызывающие прихват буровой колонны. В связи с этим в работе поставлена *цель*: выяснить особенности организации оптимального режима продолжительного бурения скважин с горизонтальными участками в рамках использования комплексных подходов математического и численного моделирования процессов гидродинамики и конвективного массопереноса реологически сложных вязких сред в условиях накопления шлама при разных скоростях бурения.

**Физические допущения и детали моделирования.** Предполагается, что имеет место течение неньютоновской каплеобразной жидкости (раствора типа Гершеля-Балкли) с параметрами, указанными в таблице 1. Геометрическая конфигурация скважины отвечает параметрам двух цилиндров с диаметрами 20 см (внешний) и 12 см (внутренний), общей длиной 10 м. Цилиндры расположены коаксиально и эксцентрично (75 %). Численное интегрирование определяющих уравнений гидродинамики и массопереноса гетерогенных смесей проводится в рамках подходов, методов, а также учета деталей изменений реологических свойств вязкой среды, подробно изложенных в [1-3] на разностной сетке с общим числом узлов  $M=3,44 \cdot 10^5$ . Верификация моделей/ методов/ алгоритма численного интегрирования выполнена по анализу изменений локальных и интегральных параметров задачи (подобно [1-3]), а также сравнением с имеющимися опытными данными (например, изменений перепада давления по пространству области решения задачи пока результаты расчёта отличаются друг от друга меньше 2 % [4]).

*Таблица 1*

*Характеристики раствора*

Предел текучести, [Па]	Индекс консистенции, [Па·с <sup>n</sup> ]	Индекс потока, [-]	Критическая скорость сдвига, [с <sup>-1</sup> ]	Плотность, [кг/м <sup>3</sup> ]
6,5	0,640	0,48	0,001с <sup>-1</sup>	1000

В качестве дисперсной фазы использовались твердые частицы песка сферической формы с плотностью 2650 кг/м<sup>3</sup> и диаметром 6 мм. Предполагается, что течение смеси неустановившееся по пространству, стационарное на входе осуществляется при значениях: со средней скоростью порядка 2м/с; скорости бурения отвечают характерным значениям процесса бурения и отвечают величинам 5, 10, 20 м/час. Процесс накопления шлама со временем в донной части коаксиальной эксцентричной трубы с указанными геометрическими и физическими особенностями течения и массопереноса анализировался с шагом установления процесса получения численного решения порядка 10<sup>-3</sup>, причем при определении поля давления использовались популярные алгоритмы такие, как SIMPLE и PISO. Расчеты установлены, что, хотя алгоритмы дают приблизительно близкие результаты, но в условиях нерегулярности сетки PISO сопровождается лучшей сходимостью численного решения к предельным значениям порядка 10<sup>-6</sup> по изменению локальных значений задачи. Отметим, расчёты были проведены на ПК с ПО ANSYS FLUENT 2021 R1, в рамках которого проанализировано влияние фаз друг на друга.

**Результаты и их обсуждение.** Ниже, на рис. 1 представлены отдельные результаты исследования по прогнозу изменений объемной доли частиц шлама в межтрубном пространстве и определения предельного момента для начала выполнения операций прекращения бурения и очистки скважины. В частности, по значениям процентной доли (рис.3) объема частиц шлама можно судить о достижении этого определенного уровня. Заметим, что для уяснения особенностей накопления/транспорта частиц шлама в условиях развивающегося течения по стволу скважины, заданной геометрии (длиной L), с характерной на входе скоростью бурения ( $\hat{U}$ ), данный процесс удобно связать с изменением характерного гидродинамического времени бурения ( $\tau_o = L / \hat{U}$ ) путем введения в анализ определяющего числа подобия - гомохронность процесса бурения,  $Ho = \tau / \tau_o$ . Тогда значение безразмерного времени ( $Ho$ ), отвечающее циклам течения (с условием - цикл соответствует  $\tau_o$ ), можно использовать в качестве критерия, описывающего гидродинамические особенности накопления шлама. С учетом сказанного, из рис. 3 видно, что в принятом процессе (цикл/ $\tau_o = 5c$  – время течения, с которым поток проходит скважину) линии 1-3 показывают интенсификацию накопления шлама в условиях роста скорости бурения ( $\hat{U}$ ). Подчеркнем, что *практическая ценность результата очевидна*. Ведь имея подобные кривые, инженер по бурению может предсказать через сколько времени (по числовым значениям  $Ho$ ) объемная доля частиц достигает определенного уровня (например, 5%) и нужно будет остановить бурение и провести очистку.

Также данные *таблицы 2* иллюстрируют картину процесса в условиях, отвечающих заданию: длина горизонтальной части - 1 км, остальные параметры - соответствуют рис. 1.

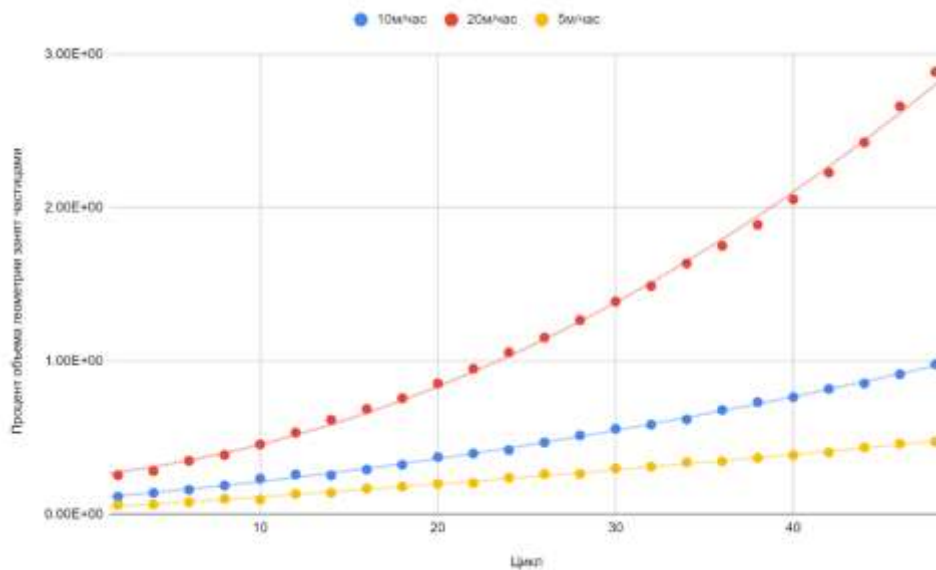


Рис. Занятый частицами шлама объем межтрубного пространства скважины (%) в зависимости от среднемаассовой скорости раствора на входе ( $\bar{U}=2$  м/с) при изменении характерного безразмерного времени процесса бурения (Но или числа циклов) в условиях накопления и транспорта частиц шлама по стволу скважины. Здесь обозначены линии с характерным значением скорости ( $\bar{U}$ , м/ч) бурения: 5 – желтая; 10 – синяя; 20 – красная соответственно.

Таблица 2

Детали технологического процесса бурения, накопления и транспорта шлама в скважине при заданных условиях (объемная доля) и переменности цикла (изменении критерия гомохронности, Но)

Цикл (Но)	Объемная доля, (%)	Время бурения, (час)	Скорость бурения, (м/ч)
274	5.0	38.1	5
141	5.0	19.6	10
68	5.0	9.4	20

Из табл. 2 видно, какая должна быть максимальная продолжительность бурения горизонтальной секции длиной в 1 км при разных скоростях бурения, если требуется обеспечить функционирование оборудования до достижения максимально допустимого значения доли частиц шлама в стволе в 5%.

**Заключение.** Детальный анализ процессов в скважине, моделирование и расчет нетривиальных рео- и гидродинамических эффектов, сопровождающих течение смеси, показывают, что результаты находятся в пределах разумного прогноза. Можно допустить, что предлагаемая методика вполне успешна в практике с целью определения продолжительности бурения, установления условий, в которых бурильная колонна не вращается, например, при слайдинге или при бурении с колонной из гибких труб (coiled tubing drilling). Кроме того, в случае стандартного бурения можно рассматривать подобные кривые в качестве способа нахождения минимальной продолжительности бурения. Поскольку моделирование процесса с эксцентричным вращением бурильной колонны очень затратное и не годится для прикладных приложений.

#### Литература

1. Харламов С. Н., Мехран Д. Процессы транспорта шлама при очистке скважин с произвольной ориентацией буровых труб, содержащих эксцентрично расположенное круглое ядро с подвижной стенкой: проблемы, результаты, перспективы (обзор) //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – №. 7. – С. 131-149.
2. Харламов С. Н., Мехран Д. Процедуры и инструментарий мониторинга процессов и механизмов транспорта шлама при гидравлической очистке горизонтальных скважин //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – №. 12. – С. 22-40.
3. Харламов С. Н., Мехран Д., Филиппов К. А. Математическое моделирование и методы исследования гидродинамической очистки горизонтальных скважин //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – №. 8. – С. 53-73.
4. Харламов С. Н., Джангхорбани М. Численное моделирование течений вязких смесей бурового шлама и потока сырой нефти на горизонтальных участках скважин с эксцентричными бурильными трубами //Новые вызовы фундаментальной и прикладной геологии нефти и газа-XXI век. – 2021. – С. 221-224.