

**ПРАКТИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ ИЗ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА  
ОЧИСТКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН**

**Джанхорбани Мехран**

Научный руководитель профессор С.Н. Харламов

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

Экономическая важность скважин с протяженными горизонтальными окончаниями хорошо известна, как и проблема и сложности их очистки от пробуренного шлама. Несмотря на важность и значение для практики приложений данного вопроса, его изучение весьма проблематично, особенно в условиях *in situ*. Поскольку невозможно учесть всю полноту реальных пространственных процессов и факторов, сопровождающих функционирование специального оборудования и его элементов при бурении скважин. Очевидно, что на лабораторных установках такое исследование представляется не только трудоемким, но и дорогостоящим. Учитывая это, в настоящее время самым эффективным способом изучения процесса очистки скважин выступает подход, основанный на идеях комплексного физико-математического и численного моделирования, опирающегося на методы вычислительной гидродинамики. Важно отметить, что применение такого подхода позволяет выявить и уяснить многие детали нетривиальных гидродинамических условий очистки и обоснованно рекомендовать методику ее расчета в практику [4].

Цель настоящего исследования: проведение детального комплексного моделирования транспорта шлама и очистки горизонтальных участков скважин, а также предложение построенной методики для эффективного использования в практике бурения и прогноза неблагоприятных условий и режимов функционирования оборудования.

Подход и параметры моделирования. Для изучения транспорта и очистки скважин от шлама принят подход эйлера-лагранжа [4], в котором допускается, что рассматривается внутреннее течение вязкой дисперсной смеси (капельной жидкости с твердыми частицами пробуренного шлама) по стволу скважины. Причем жидкость – рассматривается реологически сложной сплошной средой, а частицы дисперсной фазы (шлама), как дискретные частицы, имеющие соответствующий импульс. Хорошо известно [3,4], что указанных условий бурения адекватна реологическая модель Гершеля-Балкли. И она лучше, более распространённых моделей Бингама и Оствальда - де Ваале, в описании реологического поведения промывочных растворов [3]. Также в части физических допущений при построении математической модели транспорта шлама, следует учесть [1,2], что при бурении с большинством растворов, рядом с трубами бурильной колонны режим течения, в большинстве условий, ламинарный. Соответственно, при моделировании в рамках ПО ANSYS FLUENT 2021 R1 режима ламинарного течения реологически сложной вязкой двухфазной смеси через горизонтально расположенное межтрубное пространство приняты параметрскважины: длина - 10 м. диаметры – 20 см. (внешняя стенка) и 12 см. (внутренняя стенка). Положение внутренней трубы относительно внешней (т. е. эксцентricность) менялось от 0 % до 90 %. Изучаемая геометрия была покрыта разностными ячейками с общим числом 137 500. Рассматривался транспорт различных по свойствам буровых растворов, с разными дебитами, несущих шарообразных частиц песка диаметром 6мм и плотностью 2650 кг/м<sup>3</sup>. В таких условиях был изучен процесс транспорта и очистки скважины от шлама с точки зрения роста концентрации частиц в канале со временем.

Результаты и их обсуждение. Проведенное моделирование показало, что в первую очередь, на эффективность процесса гидротранспорта значительную роль оказывает эксцентricность. Так, с увеличением эксцентricности выше 50 %, в нижней части канала образуется некая «мертвая» зона, в которой скорость потока равна нулю. Частицы, попадающие в эту зону, перестают двигаться и накапливаются в этой части трубы. Это создает различные технические проблемы: от снижения скорости прохода до полного прихвата бурильной колонны. Моделирование указывает, что главным способом гидротранспорта является другая зона, образующаяся в верхней части канала. Эта зона обладает высокой вязкостью и способна поддерживать условия движения частиц внутри себя, препятствуя их седиментации в «мертвую» зону и обеспечивая перенос по пространству канала (рис.). Расчетами установлено, что чем шире эта зона, тем эффективнее условия гидротранспорта. Моделирование показало, что ширина зоны высокой вязкости зависит от реологии раствора, т. е. в рамках модели Гершеля-Балкли, от 3 ее модельных параметров:

- предельная текучесть;
- индекс консистенции;
- индекс потока.

Анализ изучаемых жидкостей установил, что индекс консистенции и индекс потока вызывают обратный эффект на рост размеров (ширины) зоны высокой вязкости. В то же время предельная текучесть, вызывает прямой эффект. Т. е. расчетами установлено, что для улучшения гидротранспорта, целесообразно уменьшать значения индекса консистенции и индекса потока и увеличивать значение предельной текучести. Дальнейшие сценарии моделирования и анализ показали, что данное предположение верно, и влияние этих параметров весьма значительно.

Так, данные таблицы показывают, как выбор реологических параметров влияет на время до того, как концентрация шлама в межтрубном пространстве достигнет 5 %. Видно, что в условиях самого неоптимального варианта, только после 43 м бурения, концентрация шлама уже достигала 5 %. И, следовательно, надо будет приостановить бурение и проводить шаблонирование. Но, при оптимальном выборе реологических параметров, можно с такой же скоростью бурения пробуривать в 5 раз больше (т. е. 251 м.), пока такая необходимость не возникнет. При этом, дебит, т. е. средняя скорость потока имеет показывает очень слабое влияние на эффективность гидротранспорта, особенно, для условий пока гидродинамический режим течения смеси не меняется.

Отметим, что в моделируемых случаях, по имеющимся оценкам (соотношениям и аналитическим формулам), такой переход от ламинарного в переходный (неламинарный режим, даже при высоких и почти не достигаемых при бурении скоростях (порядка 3 м/с) не наблюдался.

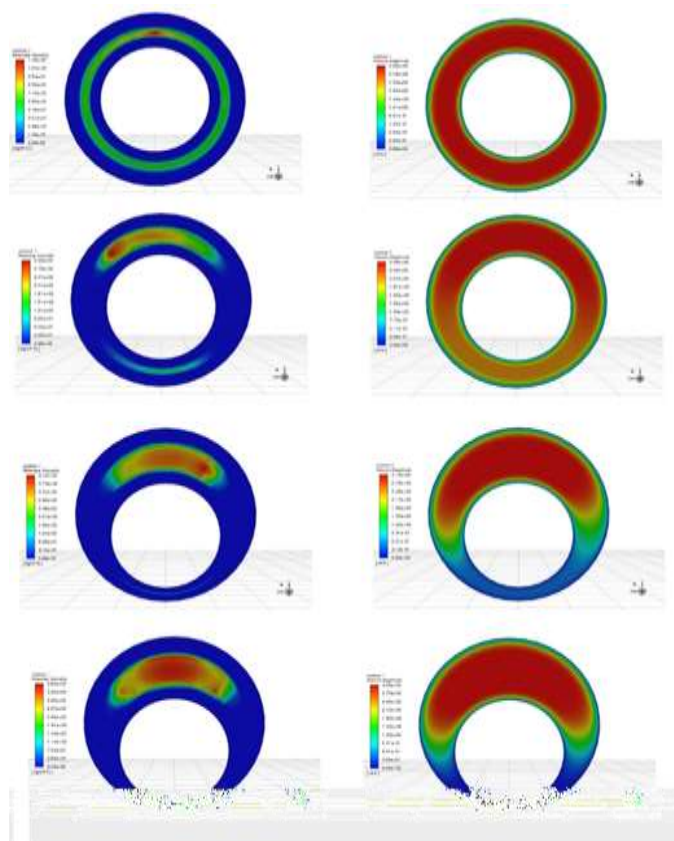


Рис. Изменение зоны высокой вязкости и образование мертвой зоны с изменением эксцентricности (шкала обозначает скорость потока). (здесь средняя скорость на входе равна 2 м/с)

Таблица

Эффект реологических параметров на скорость накопления шлама (здесь скорость бурения 10 м/час, длина горизонтального участка=1000 м и средняя скорость потока = 2 м/с)

Передел Текучести [Па]	Индекс консистенции [Па·с <sup>n</sup> ]	Индекс Потока, [-]	Продолжительность Бурения, [м]
6.50	0.640	0.48	194
1	0.640	0.48	43
15	0.640	0.48	251
6.5	0.03	0.48	169
6.5	1.4	0.48	55
6.50	0.640	0.4	160
6.50	0.640	0.8	45

Практическое значение. Установлено, что представленный подход к моделированию, намного быстрее других подходов и это имеет большое значение в практике. Так как инженер может сравнивать разные буровые растворы при разных технических параметрах (угол наклона от вертикала, дебит, диаметр труб, эксцентricность и т. д.) для выбора самого оптимального варианта и получит результаты за счётные часы вместо, например недели, которые обычно нужны для подхода Эйлера-Эйлера [4]. В рамках указанного метода и подхода, инженер ещё может проводить анализ роста концентрации шлама в межтрубном пространстве. Обычно считается, что эта концентрация не должна превышать 5 % по объёму, и руководствуясь этим принципом, можно составлять план шаблонирования при разных технических условиях и даже для разных участков скважин. Конечно, такой план будет оптимистичным, т. к. он не учитывает разрушение стенок скважин и присутствие муфт между элементами бурильной колонны, которые ухудшают процесс гидротранспорта. Но, иметь такой предварительный план очень важно на этапах планирования скважин.

Расчётами установлено, что вычислительное гидродинамическое моделирование очистки с подходом Эйлера-Лагранжа быстрее и эффективнее других имеющихся инструментов, способно детально исследовать процесс выноса шлама из скважин. Анализ результатов указывает, что данный подход приемлем к произвольным конфигурациям скважин. В случае с горизонтальными участками скважин, совокупность эксцентricности положения бурильной колонны относительно скважин и неньютоновского характера промывочных жидкостей создают условия,

при которых увеличение расхода насосов (т. е. дебита) мало, что влияет на эффективность гидротранспорта. А вместо этого нужно сосредоточиться на оптимизации показателей (параметров) модели Гершеля-Балкли. К счастью, подход Эйлера-Лагранжа позволяет проводить такие исследования относительно быстро. Этот факт имеет большое значение для практики бурения.

#### Литература

1. Busch A. On particle transport and turbulence in wellbore flows of non-Newtonian fluids – findings from a cuttings transport process analysis by means of computational fluid dynamics, rheometry, and dimensional analysis. PhD Thesis. Trondheim university. 2020.
2. Guo, Boyun, and Gefei Liu. Applied drilling circulation systems: hydraulics, calculations and models. Gulf Professional Publishing, 2011.
3. Saasen A. Viscosity models for drilling fluids: viscosity parameters and their use / A. Saasen, J.D. Ytrehus // International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering; American Society of Mechanical Engineers. 2019. – V. 58875. – P. V008T11A078.
4. Харламов С.Н., Джанхорбани М., Брыксин М.Р. Аспекты компьютерного моделирования процессов транспорта и очистки от шлама горизонтальных участков скважин // Математическое моделирование. 2022. – Т. 34. – №11. – С. 77 – 106.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЦИКЛОННЫХ АППАРАТОВ В ПРОЦЕССЕ УЛАВЛИВАНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ ГАЗОГИДРАТОВ

Дубов А.А.

Научный руководитель старший преподаватель Л.В. Чеканцева

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

Проблема гидратообразования в настоящее время является одной из основных осложнений, с которыми сталкиваются компании при разработке большинства газовых и газоконденсатных месторождений. Для месторождений Западной Сибири и Крайнего Севера это имеет особое значение, связанное с аномально низкими температурами.

Гидраты, скапливаясь внутри промыслового оборудования, приводят к уменьшению пропускной способности, дополнительного понижения давления газоконденсата при протекании через сужение проходного канала, а в некоторых случаях и его полной остановке. Возникновение гидратных отложений в призабойной зоне пласта оказывает отрицательное воздействие на дебит скважины [2].

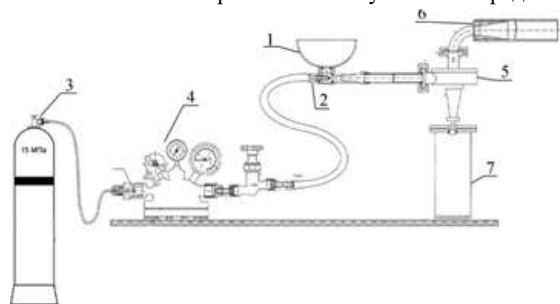
Наиболее распространенным способом борьбы с гидратообразованием в настоящее время является применение метанола, что позволяет изменить термодинамические условия образования гидратов. По некоторым оценкам, около 30–35 % затрат на транспортировку и добычу газа приходится на борьбу с гидратами [3].

Целью данной работы является выявление зависимостей для эффективного улавливания частиц газогидратов, а также определение оптимальных параметров работы установки.

Одним из эффективных решений проблемы присутствия газогидратов в газе является применение циклонных аппаратов, при этом способе удаление газогидратов происходит под действием центробежной силы.

Для исследования этой проблемы была использована установка, предназначенная для моделирования и определения основных параметров процесса улавливания механических примесей и твердых гидратов в газовом потоке трубопровода с применением эжектора [1].

Схема экспериментальной установке представлена на рисунке 1.



Установка состоит из следующих элементов:

- 1 - приемная воронка;
- 2 - эжектор;
- 3 - баллон со сжатым воздухом;
- 4 - рамповый редуктор ДКР-250;
- 5 - циклон;
- 6 - колено с измерительной трубой;
- 7 - форбункер.

**Рис. 1. Установка отделения механических примесей**

Данная установка работает следующим образом. В приемную воронку 1 помещаются частицы льда, которые по своим свойствам наиболее близки к кристаллам гидратов, массой 100 г и с размерами частиц до 8 мм. Из баллона через редуктор 4 подается воздух с необходимым давлением на эжектор 2. В результате эжекционного эффекта образуется движения газового потока с частицами льда по транспортной трубе, затем двухфазный поток поступает в циклон 5. В результате движения двухфазного потока по касательной к внутренней поверхности корпуса в циклоне происходит вращение потока неочищенного газа со скоростью, обеспечивающей появление центробежной силы, превышающей силу тяжести. При этом тяжелые частицы льда под действием центробежной силы накапливаются у внутренней поверхности корпуса циклона. Здесь частицы теряют центробежную скорость, извлекаются