

Оригинальная статья / Original article

УДК 622.243.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2541-9455-2018-41-2-111-117>

СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПРОЦЕССА ВЫНОСА РАЗРУШЕННОЙ ПОРОДЫ ИЗ СКВАЖИНЫ

© А.И. Ламбин^а

^аИркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. Цель. Классической задачей гидромеханики является изучение течения жидкости в эксцентричном канале, имеющей, в частности, практическое применение при промывке наклонно направленных скважин с горизонтальным окончанием. Транспортирование частиц разрушенной горной породы из скважины указанного профиля потоком промывочной жидкости является сложной теоретической и практической задачей. Изучение транспорта бурового шлама путем промысловых и лабораторных исследований показало разнонаправленность воздействий таких показателей промывочной жидкости, как ее вязкость и плотность при турбулентном режиме течения. Целью исследования является изучение указанной разнонаправленности на примере исследований транспортирующей способности бурового раствора отдельных авторов. **Методы.** Использован сравнительный анализ влияния реологических параметров и плотности полимерсодержащей промывочной жидкости на минимальный расход промывочной жидкости, при котором не происходит возникновение осадка. **Результаты.** Сопоставлено влияние плотности изучаемых промывочных жидкостей и их вязкости на параметр оптимизации, за который принят минимальный расход промывочной жидкости, полностью извлекающей твердые частицы из эксцентричного кольцевого пространства экспериментальной установки. Для этого по информации о вязкости растворов вычислены их плотности. В рассмотрение были приняты водные растворы карбоксиметилцеллюлозы и ее производные, а также водные растворы глицерина. **Выводы.** Выявлено, что водные растворы глицерина в качестве промывочных жидкостей увеличивают их выносную способность благодаря большей плотности по сравнению с растворами карбоксиметилцеллюлозы. Эксперименты, определяющие несущую способность буровых растворов, необходимо ставить с учетом не только реологических параметров жидкости, но и ее плотности, для этого можно использовать приведенную вязкость растворов с переводом ее значений в плотность.

Ключевые слова: буровой раствор, транспортирование шлама, вязкость жидкости, плотность, выносная способность раствора.

Информация о статье. Дата поступления 24 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 4 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 29 июня 2018 г.

Формат цитирования. Ламбин А.И. Составляющие процесса выноса разрушенной породы из скважины // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2018. Т. 41. № 2. С. 111–117. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-2-111-117

COMPONENTS OF THE PROCESS OF BROKEN ROCK REMOVAL FROM THE WELL

© A.I. Lambin

Irkutsk National Research Technical University,
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russian Federation

^аЛамбин Анатолий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры нефтегазового дела, e-mail: alambin@ex.istu.edu

Anatoliy I. Lambin, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Business, e-mail: alambin@ex.istu.edu

ABSTRACT. Purpose. A classical problem of fluid mechanics involving the study of liquid flow in the eccentric channel has, in particular, the practical application in the process of flushing of controlled directional wells with horizontal ending. Transport of destroyed rock particles from the wells of the specified profile by the flow of flushing fluid is a challenging theoretical and practical task. The study of mud transport in field and laboratory studies has showed the multidirectional impacts of such characteristics of the flushing fluid as its viscosity and density in the turbulent flow regime. The purpose of the article is to study the specified multidirectionality on example of researches of different authors devoted to drilling mud carrying capacity. The **Methods** used include a comparative analysis of the influence of rheological parameters and density of polymer-containing flushing fluid on the minimum flow rate of the flushing fluid at which the precipitate is not formed. **Results.** Comparison is given to the influence of density of the studied flushing fluids and their viscosity on the optimization parameter which is taken as the minimum flow rate of the flushing fluid that fully extracts solid particles from the eccentric annular space of the experimental installation. The densities of solutions are calculated by the data on solution viscosity. Consideration is given to the aqueous solutions of carboxymethyl cellulose (CMC) and its derivatives as well as aqueous solutions of glycerine. **Conclusions.** It has been found out that the use of aqueous glycerin solutions as flushing fluids increase the carrying capacity of the latter due to higher density as compared with the solutions of CMC. The experiments that determine the carrying capacity of drilling fluids should be set taking into account both rheological parameters of the liquid and its density. The reduced viscosity of solutions can be used for this purpose by transforming its values into density.

Keywords: *drilling mud, mud transport, liquid viscosity, density, solution carrying capacity*

Article info. Received 24 April 2018; accepted for publication 4 June 2018; available online 29 June 2018.

For citation. Lambin A.I. Components of the process of broken rock removal from the well. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh* = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits, 2018, vol. 41, no. 2, pp. 111–117. DOI: 10.21285/2541-9455-2018-41-2-111-117. (In Russian).

Введение

Задача о течении жидкости в канале между двумя цилиндрическими трубами является классической задачей гидродинамики, имеющей широкое практическое применение. На практике важно знать характеристики течений в широком диапазоне параметров (геометрия канала, свойства жидкости и режим течения), а также их зависимость от этих параметров. Задачу существенно усложняет неньютоновская реология рабочей среды, вязкость которой нелинейно зависит от скорости деформации течения.

Транспортирование частиц разрушенной породы в скважине или процесс выноса выбуренной породы из скважины является сложной теоретической и практической задачей. Несмотря на схожесть с процессами гидротранспорта, имеющими достаточно разработанную теоретическую базу, транспорт шлама имеет свои особенности.

Во-первых, массовая концентрация разрушенной породы в буровом растворе

значительно меньше концентрации твердой фазы при гидротранспорте, что определяет неравномерность распределения частиц по гранулометрическому составу в поперечном сечении потока бурового раствора. Во-вторых, при гидротранспорте используется вода, а буровые растворы представляют собой неньютоновские жидкости, различающиеся по реологическому фактору.

Кроме того, гидротранспорт осуществляется преимущественно при турбулентном режиме течения потока, тогда как условия в скважине заставляют применять разные режимы течения.

Наконец, геометрия поперечного сечения потоков определяет характер движения твердой фазы. Нарушение осевой симметрии течения вследствие эксцентриситета усложняет задачу, так как в этом случае могут одновременно осуществляться и ламинарный, и переходный, и турбулентный режимы.

Все перечисленное затрудняет использование теоретических разработок

гидротранспорта для оптимизации выноса разрушенной породы из скважины. Поэтому изучение процесса транспортирования шлама из скважины ведется путем промысловых и лабораторных исследований.

Характер движения выносящего потока существенно влияет на содержание твердых частиц в единице объема потока, которые в условиях скважины находятся под влиянием сил тяжести. Следует отметить, что это содержание обычно не превышает 5 %, что позволяет рассматривать двухфазный суспензионный поток как поток с невзаимодействующими частицами. Этот факт позволяет рассматривать динамику движения отдельных твердых частиц в потоке.

В настоящее время повышенному вниманию исследователей подвергаются поперечные перемещения частиц относительно оси потока. Возникновение поперечной силы обусловлено возмущениями, которые вносит сама частица в несущий поток. Одной из причин возмущений может быть различие скоростей частицы и жидкости вдали от нее – проскальзывание частицы. Оно возникает, например, в результате действия силы тяжести на не нейтрально плавучие частицы, имеющие плотность вещества, отличную от плотности несущей фазы. При этом возникает сила Сафмена. Проскальзывание частиц относительно жидкости или газа может быть результатом действия не только гравитации, но и ускоренного движения несущей фазы. В этом случае инерция частиц [1] определяет их обтекание потоком жидкости¹.

Другой причиной поперечной миграции частицы в потоке может быть ее вращение, что вызывает силу Магнуса [2].

Модель, в которой частица прямолинейно и равномерно движется вместе с потоком среды, является сильной идеализацией, однако она позволяет обратиться в ноль практически все описанные в гидродинамике силы, вызывающие миграцию частицы поперек ламинарного потока. Это позволяет выделить и описать в чистом виде аналог выталкивающей силы Архимеда для многофазных гидродинамических потоков. Из термодинамического описания следует, что эта сила как одна из составляющих существует в общем случае при любых перемещениях частиц в ламинарном потоке [3].

Несмотря на значительное влияние сил вязкости на выносную способность раствора при ламинарном режиме течения необходимо учитывать и вклад выталкивающей силы раствора. При турбулентном режиме течения характер взаимодействия твердой частицы с потоком жидкости несколько иной.

Целью настоящего исследования является определение вклада силы Архимеда при турбулентном режиме течения потока бурового раствора.

С ростом числа Рейнольдса увеличиваются гидродинамические потери, связанные с турбулентностью потока, влекущего выделенную частицу разрушенной горной породы. Вихревой характер турбулентности определяет перенос массы, импульса и энергии жидкими частицами вихревого происхождения, благодаря чему некоторая часть частиц шлама не стокового размера будет находиться во взвешенном состоянии. Интенсивность пульсаций в жидкости влияет на движение взвешенных частиц. В результате пульсации скоростей и давления, турбулентного перемешивания жидкости происходит поддержание во взвешенном состоянии твердых частиц,

¹ Асмолов Е.С. Поперечная миграция малых сферических частиц в сдвиговых и нестационарных потоках: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2015. 206 с. / Asmolov E.S. Transverse migration

of small spherical particles in shear and nonstationary flows: the author's abstract of Doctoral Dissertation in Physical and Mathematical sciences. M., 2015. 206 p.

переносимых потоком. Скорость пульсационного вихря может достигать 14 % средней скорости потока, что определяет интенсивность его воздействия на частицу по сравнению с интенсивностью воздействия основного потока.

Поддержание обратного потока циркулирующего бурового раствора в режиме турбулентности только частично улучшает процесс очистки скважины при ее бурении. Однако, как известно, вязкость бурового раствора тормозит возникновение и распространение пульсаций, а следовательно, уменьшает процент выноса шлама.

В настоящее время промывочные жидкости в своем составе изобилуют наличием высокомолекулярных полимеров, увеличивающих вязкость циркулирующей жидкости.

Методы

Отечественные и зарубежные авторы исследуют влияние реологических параметров бурового раствора на удаление шлама из скважины. Так, например, авторы работы [4] исследовали процесс транспортирования твердых частиц при изменении эксцентриситета кольцевого пространства при использовании жидкостей с различными реологическими параметрами. В качестве промывочных жидкостей применялись вода и водные растворы карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ), полианионной целлюлозы (ПАЦ) и глицерина. В качестве частиц шлама использовался кварцевый песок и пропант с плотностями 2300 и 3600 кг/м³ соответственно. За параметр оптимизации был принят минимальный расход циркулирующей жидкости, при котором не происходило образование осадка.

Столь подробное описание проведенного эксперимента требуется для обоснования некорректности выводов в части влияния реологии на транспортирующую способность различных жидкостей. Авторы отмечают, что увеличение вязкости растворов КМЦ и ПАЦ требует

увеличения минимального расхода жидкости, при котором не происходит выпадение осадка на нижнюю стенку стеклянной трубы, имитирующей горизонтальную скважину, то есть с увеличением вязкости жидкости ее несущая способность уменьшается. Но при использовании высоковязких водных растворов глицерина получился обратный, «казалось бы, парадоксальный результат». Авторы, ссылаясь на модель Оствальда-де Ваале, делают вывод: «В то же время высокая структурная вязкость раствора при одинаковых показателях нелинейности n способствует транспорту шлама».

Здесь парадоксальности нет, все закономерно, и вывод со ссылкой на показатель нелинейности в модели псевдопластичной жидкости также ошибочен.

При постановке подобных экспериментов, определяющих несущую способность буровых растворов, необходимо использовать не только реологические параметры жидкости, но и ее плотность.

Для подтверждения покажем несколько купированную приведенную авторами таблицу реологических параметров примененных жидкостей (табл. 1). Для описания течения жидкости авторами использовалась формула Оствальда-де Ваале $\tau = K\dot{\gamma}^n$, где τ – напряжение сдвига; K – показатель консистенции жидкости, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, n – показатель нелинейности.

Задачей исследования является сравнение влияния эффекта вязкости и эффекта плотности циркулирующего раствора. Для этого рассмотрим таблицу зависимости вязкости водных растворов глицерина от его содержания в растворе (табл. 2).

Результаты

Анализ таблиц показывает, что при вязкости раствора глицерина, равной 0,015 Па·с, его плотность составит даже при 25 °С 1140 кг/м³, в то время как плотность раствора КМЦ при концентрации 1,5 % составляет 1009 кг/м³. Отсюда сила

Таблица 1

Вязкость водных растворов

Table 1

Viscosity of aqueous solutions

Вид жидкости / Type of liquid	Условная вязкость, с / Funnel viscosity, s	Модель Оствальда-де Ваале / Ostwald-de Waele model		Эффективная вязкость $\mu_{эф}$, Па·с / Effective viscosity $\mu_{эф}$, Pa·s
		Показатель консистенции жидкости K , Па·с ^m / Liquid consistency index K , Pa·s ^m	Показатель нелинейности n / Nonlinearity index n	
Вода / Water	15	0,001	1	0,001
1 %-й раствор КМЦ / 1% solution of CMC	25	0,05	0,8	0,028
1,5 %-й раствор КМЦ / 1.5% solution of CMC	35	0,14	0,7	0,043
Раствор ПАЦ / Solution PAC	35	0,41	0,5	0,056
Раствор глицерина / Glycerin solution	25	0,009	1,0	0,009
Раствор глицерина / Glycerin solution	35	0,015	1,0	0,015

Примечание. КМЦ – карбоксиметилцеллюлоза, ПАЦ – полианионная целлюлоза.
Note. CMC – carboxymethyl cellulose, PAC – polyanionic cellulose.

Таблица 2

Вязкость водных растворов глицерина

Table 2

Viscosity of aqueous solutions of glycerin

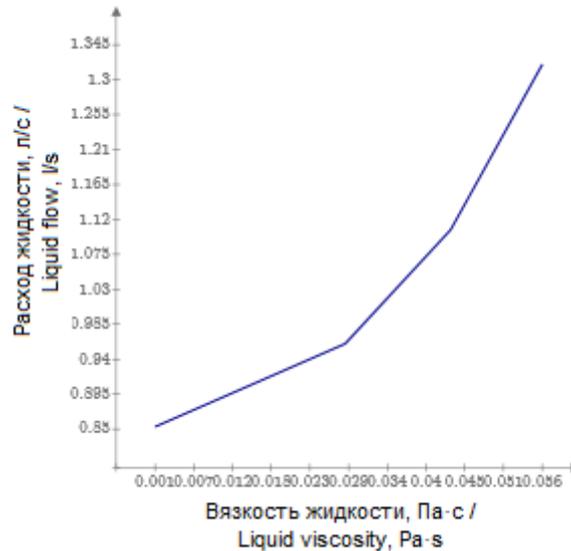
Удельный вес, г/см ³ / Specific weight, g/sm ³	Весовой процент глицерина / Weight percentage of glycerin	Вязкость, спз (25 °С) / Viscosity, centipoise
1,20925	80	45,72
1,12720	50	5,024
1,06115	25	1,805
1,02370	10	1,149

Архимеда больше у раствора глицерина, что и определяет положительный эффект в выносной способности водного раствора глицерина.

Можно показать, насколько эффективна в данном случае разность плотностей рассматриваемых растворов в выносной способности циркулирующей жидкости по предложенному авторами параметру оптимизации: минимальный расход жидкости, при котором не происходит осаждения твердой фазы. Для

этого необходимо принять установленный многими авторами факт отрицательного влияния вязкости растворов на их выносную способность при турбулентном режиме циркулирующей жидкости.

С этой целью построим по данным авторов график влияния вязкости на установленный ими же параметр оптимизации, взятый из построенного авторами графика при максимальном эксцентриситете (рисунок).



Влияние вязкости жидкости на ее выносную способность

Линией обозначена величина расхода жидкости, при котором не образуется осадка на нижней стенке

Effect of liquid viscosity on its carrying capacity

The line indicates the amount of fluid flow under which the precipitate on the bottom wall is not formed

Из графика видно, что с увеличением вязкости расход, требуемый для обеспечения отсутствия осадка шлама, растет.

Далее, опираясь на тот же параметр оптимизации, что выдвинули авторы, оценим эффективность архимедовой силы. Необходимо отметить, что водный раствор глицерина вязкостью 0,015 Па·с имеет удельную вязкость, равную 14, показывающую, во сколько раз увеличивается вязкость растворителя при добавлении к нему полимера, не говоря уже о растворах КМЦ и ее производных.

Сравнение уменьшения расхода только за счет изменения плотности производится с водой (растворителем). При использовании воды ее расход должен быть не менее 0,853 л/с, чтобы не образовывалось осадка при ее циркуляции. Раствор глицерина вязкостью 0,015 должен течь с производительностью не менее 0,57 л/с (данные берутся из тех же графиков, предложенных авторами). Но этот раствор имеет повышенную вязкость по сравнению с водой. Повышение

вязкости воды до 0,015 Па·с по нашему графику влечет повышение требуемого расхода на 0,063 л/с, то есть увеличение плотности растворителя на 114 кг/м³ без роста вязкости потребует расход жидкости, равный 0,51 л/с для невыпадения осадка. Разница в расходах 0,853 - 0,51 = 0,343 л/с, выраженная в процентах, составит эффективность изменения плотности жидкости без изменения ее вязкости.

Заключение

Выявлено, что водные растворы глицерина в качестве промывочных жидкостей увеличивают их выносную способность благодаря большей плотности по сравнению с растворами КМЦ. Таким образом, при постановке подобных экспериментов, определяющих несущую способность буровых растворов, необходимо ставить с учетом не только реологических параметров жидкости, но и ее плотности, для этого можно использовать приведенную вязкость растворов с переводом ее значений в значения плотности.

Библиографический список

1. P.G. Saffman. The Lift on a Small Sphere in a Slow Shear Flow" // Journal of Fluid Mechanics. 1965. № 22. P. 385.

2. Архипов В.А., Усанина А.С. Движение аэрозольных частиц в потоке. Томск: Изд-во ТГУ, 2013. 92 с.

3. Федосеев В.Б. Выталкивающая сила, действующая на частицу,двигающуюся в ламинарном потоке вместе со

средой // Вестник научно-технического развития. 2011. № 9 (49). С. 14–20.

4. Акбулатов Т.О., Исмаков Р.А., Хабibuлин И.А. [и др.]. К вопросу о влиянии реологических параметров промывочной жидкости на транспорт шлама по стволу горизонтальной скважины // Территория НЕФТЕГАЗ. 2012. № 4. С. 12–15.

References

1. P.G. Saffman. The Lift on a Small Sphere in a Slow Shear Flow". Journal of Fluid Mechanics, 1965, no. 22, pp. 385.

2. Arkhipov V.A., Usanina A.S. *Dvizhenie aerazol'nykh chastits v potoke* [Aerosol particles motion in flow]. Tomsk: Tomsk State University Publ., 2013, 92 p. (In Russian).

3. Fedoseev V.B. Buoyancy force acting on a particle moving in a laminar flow

together with the media. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya* [Bulletin of scientific and technological development], 2011, no. 9 (49), pp. 14–20. (In Russian).

4. Akbulatov T.O., Ismakov R.A., Khabibulin I.A. To the question of washing liquid rheological parameters effect on slurry transport along the horizontal wellbore. *Territoriya NEFTEGAZ* [Oil and Gas Territory], 2012, no. 4, pp. 12–15. (In Russian).

Критерии авторства

Ламбин А.И. написал статью, имеет на нее авторские права и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Lambin A.I. has written the article, has all author's rights and bear the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The author declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.