УДК 550.822:66.069.85

Ю.Д. МУРАЕВ, *д-р техн. наук, доцент, karol@mail.ru*
В.Л. ШКРЯБИН, *студент*
Ш.З. ГУСЕЙНОВ, *студент*
Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)

Y.D. MURAEV, *Dr. eng. sc., associate professor, karol@mail.ru*
V.L. SHKRYABIN, *student*
Sh.Z. GUSEINOV, *student*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ СМЕСЕЙ

Эффективность бурения скважин с использованием газожидкостных смесей связана со способностью пен снижать трение и колебания колонны бурильных труб. Основными факторами здесь являются вязкость пены и диаметр ее пузырьков.

Ключевые слова: бурение, пена, вязкость, трение, колебания, пузырек, бурение с промывкой пеной.

STRUCTURAL FEATURES OF GAS-LIQUID MIXTURE

The effectiveness of the foam flush drilling connects of foam ability to reduce the friction force and drilling shaft oscillation. The main factors are foam viscosity and foam bubble's diameter.

Key words: drilling, foam, viscosity, friction, oscillation, bubble, foam flash drilling.

Острая необходимость в повышении производительности труда и снижении стоимости бурения привели к появлению и внедрению в практику буровых работ большого количества новых рецептур очистных агентов. Важное место в этом ряду занимают газожидкостные системы (ГЖС), в том числе пены, получившие широкое распространение при бурении в сложных геологических условиях.

Реологические характеристики пен существенно отличаются от реологических характеристик ньютоновских жидкостей, обычно используемых при бурении скважин. Особенности строения пленочного каркаса приводят к тому, что на диаграмме в координатах напряжение τ_0 – скорость сдвига $\dot{\gamma}$ кривая течения представляет собой прямую линию, которая не проходит через начало координат, что соответствует вязкопластичной жидкости Шведова – Бингама. Ее реологическая кривая описывается уравнением

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \dot{\gamma},$$

где μ_p – так называемая пластическая вязкость, $\dot{\gamma}$ – градиент скорости (скорость сдвига), физически определяющий скорость угловой деформации элемента жидкости

$$\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dy}.$$

Одной из важнейших реологических характеристик пены является вязкость; при этом часто используется понятие кажущейся вязкости:

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}},$$

представляющей собой отношение касательных напряжений к скорости сдвига.

При малых скоростях течения движение массива пены можно рассматривать как движение по тонкому (толщиной 2-10 мкм) слою раствора поверхностно-активного вещества (ПАВ). Напряжение сдвига τ_0 при этом составляет около 1 МПа, что существенно меньше его теоретического значения.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что в зависимости от скорости и условий течения изменяются свойства всей системы и поведение потока пены может описываться различными реологическими уравнениями (модели Ньютона, Оствальда-де-Ваале, Шведова – Бингама и др.). При этом каждая модель течения по-своему отражает структурные особенности системы, в частности, текучесть и вязкость. Если предел текучести при сдвиге характеризует пластические свойства материала, то вязкость (иначе говоря, внутреннее трение) представляет собой свойство среды, в данном случае пены, оказывать сопротивление перемещению одной части объема относительно другой.

Широкое использование ГЖС в буровой практике позволило выявить еще одну характерную особенность газожидкостных смесей – их способность снижать силу трения вращающейся колонны бурильных труб (КБТ) о стенки скважины.

Присутствующий на забое слой пены представляет собой сложную гетерогенную систему, состоящую из пленок раствора ПАВ и высоко диспергированных пузырьков воздуха. Тонкие адсорбционные слои ПАВ, покрывающие трущиеся поверхности, позволяют говорить о режиме, сходном с режимом граничного трения, когда толщина разделяющего слоя смазки измеряется микрометрами.

Рентгеновские исследования в сочетании с методом электронной дифракции позволили установить, что молекулы пленки смазывающего агента прочно связываются с кристаллическими решетками металла, образуя на контакте поляризованную поверхность толщиной в 2-3 молекулярных слоя. Тонкая пленка смазки оказывает сопротивление сдвигу и выдерживает большие нормальные давления – сотни мегапаскалей при толщине пленки менее 0,2 мкм. Такой режим граничного трения характеризуется коэффициентом трения в пределах 0,1-0,3.*

В машиностроении различают несколько режимов смазки:

- гидродинамический (жидкостный) и эластогидродинамический режимы, где износ фактически отсутствует, а коэффициенты трения равны 0,001-0,005 и 0,005-0,01 соответственно;
- полужидкостный или смешанный;
- граничный режим (коэффициент трения 0,01-0,1).

Следует отметить, что свойства граничного слоя существенно отличаются от свойств смазочного материала, составляющего объемный слой. Если толщина граничного слоя может изменяться от единиц до 500 молекулярных слоев (до 1 мкм), то толщина всего слоя смазки значительно больше и может составлять несколько десятков микрометров для контакта сталь – сталь.

Для характеристики условий смазки обычно используется понятие удельной толщины смазочного слоя

$$\lambda_{уд} = h/(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)0{,}5,$$

где h – толщина смазочного слоя; σ_1 и σ_2 – среднеквадратические отклонения амплитуд шероховатости первой и второй контактирующих поверхностей.

Считается, что при $\lambda_{уд} < 1$ имеет место режим граничного трения и при этом наблюдается значительное повреждение поверхностных слоев металла.

При бурении с пеной для пары КБТ – стенка скважины не выполняется ни одно из требований, предъявляемых в машиностроении к узлам трения: между колонной бурильных труб и стенкой скважины зазор составляет не менее 1 мм; высота неровностей породы даже при алмазном бурении составляет до 0,2 мм, а при бескерновом бурении достигает 2-3 мм, т.е. $\lambda_{уд} << 1$; траектория взаимного перемещения контактирующих поверхностей чрезвычайно сложна, а контакты КБТ со стенками характеризу-

* Смазочные материалы / Гл. ред. К.В.Флоров. М., 1989. 217 с.
Oils / K.V.Frolov. Moscow, 1989. 217 p.

ются знакопеременными и зачастую ударными нагрузками. Таким образом, единственным способом нормализации сил трения при вращении колонны бурильных труб является создание промывочного агента, способного выполнять функции универсальной смазки в условиях ограниченного набора средств и возможностей.

Исследования показывают, что при наложении вибраций на дисперсные среды наблюдаются сдвиговые явления в перемещении смежных монослоев и возникает затухающая волна. В таком случае пену можно считать упруговязкопластичной инерционной системой, демпфирующей наложенные на нее колебания.

Исследованиями автора было установлено, что поскольку условная толщина слоя ПАВ, находящегося в скважине в единицу времени при нормальных условиях циркуляции, около 0,03 мм, что существенно меньше высоты неровностей, роль смазки и демпфера колебаний во время бурения с пеной выполняет насыщенный мелкими пузырьками пристенный слой в сочетании с расклинивающим действием раствора ПАВ, который предотвращает непосредственный контакт бурильных труб со стенками скважины и является прослойкой, существенно снижающей силу трения вращающегося снаряда.

При поперечных колебаниях колонны бурильных труб и выдавливании пузырьков из зазора между трубой и стенкой скважины пузырьки деформируются с изменением краевых углов и преодолением гистерезисного сопротивления. В.И.Классеном установлено, что для пузырьков диаметром 0,5-1,5 мм это сопротивление тем больше, чем больше начальное ускорение смещения, и при изменении равновесного краевого угла натекания от 10° до 70° сила прилипания возрастает примерно в 40 раз.

С другой стороны, при сжатии ГЖС температура воздуха внутри пузырьков повышается и для установления теплового равновесия системе требуется определенное время. Для пузырьков с первоначальным радиусом менее 0,25 мм это время составляет не более нескольких миллисекунд.* Тем не менее, при этом происходит диссипация определенной части энергии ударной волны, чем и объясняются демпфирующие свойства пен в области сравнительно высоких частот колебаний, возникающих, в частности, при разрушении породы мелкоалмазным инструментом. Другая часть энергии волны расходуется на механическое преодоление сопротивления упруговязкой вспененной среды механическим колебаниям, основным источником которых является колонна бурильных труб.

Совместное действие этих факторов приводит к тому, что при наличии достаточного количества ПАВ структурированная газожидкостная смесь в значительной мере снижает трение и вибрации контактирующих поверхностей, сохраняя между ними неизменной прослойку мелких пузырьков.

Аналитические выражения для характеристики упругих свойств газожидкостной смеси были получены Б.В.Дерягиным. Исследуя физические свойства пен, он пришел к выводу, что такая пространственная структура обладает упругостью формы, которая отсутствует у составляющих ее фаз. Иначе говоря, по отношению к механическим воздействиям пена должна вести себя как твердое упругое тело и к ней можно применять законы классической теории упругости. Он установил, что модуль Юнга для подобных систем

$$E_{\text{п}} = \left(\frac{2}{5}\right) P_{\text{к}},$$

где $P_{\text{к}}$ – разность внешнего давления и внутреннего давления в пузырьках.

Давление внутри пузырька определяется формулой Лапласа

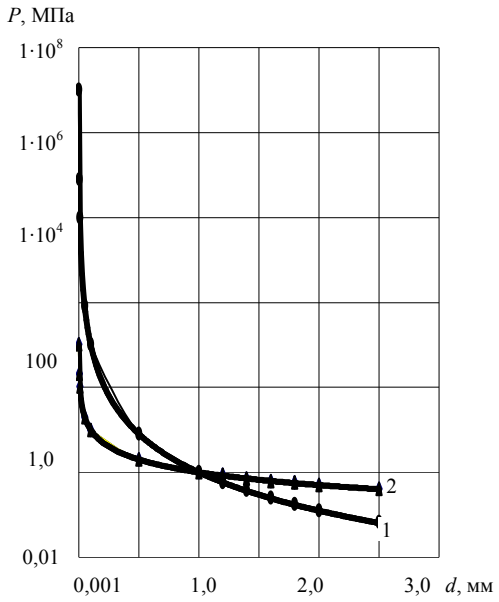
$$P_{\text{г}} = \sigma(1/r_1 + 1/r_2),$$

где $P_{\text{г}}$ – давление в жидкой фазе; σ – поверхностное натяжение; r_1 и r_2 – главные радиусы кривизны пузырька.

---

* *Паркин Б.Р.* Ударниые волны в воде с пузырьками воздуха / Б.Р.Паркин, Ф.Р.Гилмор, Г.Л.Броуд // Подводные и подземные взрывы. М., 1974.

Parkin B.P., Gilmor F.R., Broud G.L. Strike waves in the water-bubbles mixture // Underwater and underground explosions. Moscow, 1974.



Изменение давления в пузырьке в зависимости от его размеров

1 – внутреннее давление, определяемое объемом газа P^*;
2 – давление под влиянием поверхностного натяжения $P_к$

Разность давлений в газовой и жидкой фазах пены называется капиллярным давлением: $P_к = P_г - P_ж$, где $P_ж$ – давление жидкой фазы. Считая $r_1 = r_2$ (для шарообразного пузырька), получим $P_г = 2\sigma/r$, и тогда

$$P_к = P_г - P_ж = 2\sigma/r - P_ж.$$

Соответственно выражение для модуля Юнга примет вид

$$E_п = \frac{2}{5}\frac{1}{r}(2\sigma - rP_æ),$$

т.е. модуль сдвига пены обратно пропорционален радиусу пузырька пены, а демпфирующие свойства пены тем выше, чем более высокократную пену мы имеем.

При резком изменении давления (или радиуса пузырька) нарушается термодинамическое равновесие, связанное с особенностями диффузионных процессов и перегруппировкой молекулярных слоев, и для его восстановления требуется определенное время, пропорциональное величине деформации (так называемое время релаксации). Кроме того, сжатие пузырька и уменьшение его радиуса R способствует увеличению капиллярного давления $P_к$, но еще быстрее растет его внутреннее давление $P^* = kR^{-3}$ (гипербола третьего порядка), при этом градиент значений этой функции в пределах $0 < R < 0{,}5$ существенно больше градиента значений равносторонней гиперболы, отражающей капиллярное давление (см. рисунок). Значения функций становятся равными только при $R \approx 1$, т.е. диаметр пузырька, равный 1 мм, является критической величиной, определяющей точку перераспределения градиентов давлений, связанных с поверхностным натяжением и с повышением плотности газа внутри пузырька при уменьшении его объема.

Таким образом, наиболее эффективное сопротивление изменению объема, в частности, сжатию, оказывают пены, насыщенные пузырьками газа диаметром до 1-1,5 мм.

Представленная модель позволяет объяснить установленное опытным путем снижение величины вибраций и крутящего момента при использовании газожидкостных смесей, находящихся в зоне сжатия. При этом основными факторами являются интенсивность нагрузки, вязкость пены и сила поверхностного натяжения. Очевидно, что при вращении колонны бурильных труб может быть создан режим трения, близкий к смешанному, но при обязательных насыщении массива циркулирующей пены пузырьками диаметром до 1 мм и режиме циркуляции, обеспечивающем пенную структуру потока.