Записки Санкт-Петербургского горного института.
Т. 136. СПб, 1993

УДК 622.244.443:66.069.85

В.Я.КЛИМОВ
(Санкт-Петербургский горный ин-т),
СИ ХУЙВЕН
(Чанчуньский геологический ун-т, КНР)

ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ И ТЕЧЕНИЯ ПЕНЫ В СКВАЖИНЕ

За последнее десятилетие пена как очистной агент получила широкое распространение при бурении скважин на твердые полезные ископаемые. В соответствии с принятой в бурении классификацией [I, 3], под термином "пена" понимают двух- или трехфазную газожидкостную систему (ГЖС), имеющую степень аэрации $\alpha = 50 \div 300$ ($\alpha = V_г / V_ж$, где $V_г$, $V_ж$ – объемные расходы газа и жидкости соответственно), в которой дисперсной фазой служит газ, а дисперсионной средой – жидкость. Для пен характерна пленочно-ячеистая структура, в которой пузырьки газа разделены тонкими пленками жидкости, содержащей поверхностно-активные вещества (ПАВ). ГЖС, имеющие степень аэрации меньше 50, относят к аэрированным жидкостям. Для последних так же, как и для пен, характерно наличие дисперсионной среды в виде жидкости, при этом пузырьки газа расположены на значительно большем расстоянии друг от друга, т.е. не разделены тонкими пленками. Некоторые исследователи (Н.В.Касаков, 1977) относят к пене ГЖС, имеющей параметр $k_п = V_п / V_ж$; $k_п \geq 2{,}8$ (где $V_п$ – объемный расход пены). Неньютоновские свойства ГЖС, содержащих ПАВ, начинают проявляться при $\alpha > 1{,}08$ [4]. Это означает, что при таком значении степени аэрации пленки жидкости между пузырьками газа достаточно малы, а площадь поверхности пузырьков настолько возрастает, что силы межфазового взаимодействия в системе становятся значимыми и ГЖС проявляет свойства, характерные для пен.

Многочисленными полевыми исследованиями, проведенными в различных районах Сибири, Крайнего Севера и Северо-Востока, было замечено [2], что при бурении геолого-разведочных скважин с промывкой пеной, т.е. при подаче в скважину ГЖС, имеющей степень аэрации, приведенную к нормальным условиям, пределах 50–300, на выходе из скважины газожидкостное отношение редко достигает значения 20, большей частью составляя 5–15. Часто такое несоответствие пытались объяснить наличием водопритока в скважину, так как механизм образования и движения пены в скважине не был изучен в достаточной степени. Эти факты показались авторам достаточно значимыми для того, чтобы экспериментально изучить механизм образования и движения пены в модели скважины.

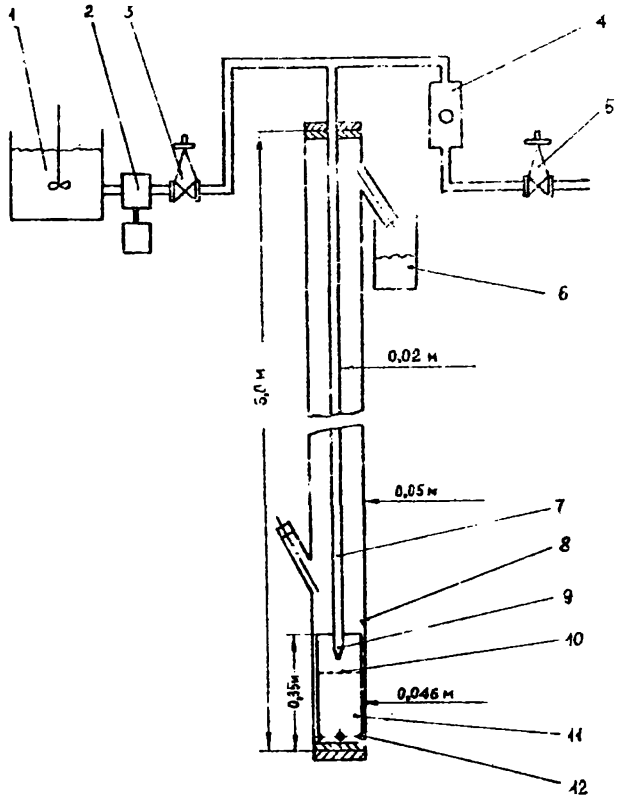


Схема экспериментального стенда
1 емкость с пенообразующим раствором; 2 – плунжерный насос; 3 – регулировочный вентиль; 4 – воздушный расходомер-ротаметр; 5 – регулятор расхода воздуха; 6 – мерный сосуд; 7 труба из нержавеющей стали; 8 – труба из стекла; 9 – сопло; 10 – сетка; 11 – колонковая труба; 12 – промывочные отверстия

Для проведения ких исследований использована экспери- ная установка, разработанная Американским нефтяным институтом (API) для испытания пенообразующих агентов в условиях бурения очисткой скважины пеной [5] (см рисунок). С целью приближения условий пенообразования усл характерным для колонкового бурения, в нижнюю часть опытной установки была вмонтирована колонковая труба длиной 0,35 м, внутрь которой был встроен диспергатор, представляющий собой сопло диаметром и сетку с размером ячейки I x I мм, расположенную на расстоянии 60 мм ниже сопл с таким расчетом чтобы ореол рассеивания струи ГЖС перекрывал всю площадь поверхности сетки При проведении экспе

ментов использовалось следующее оборудование: плунжерный насос с производительностью, регулируемой от 0 до 200 мин; воздушный компрессор, развивающий давление до 0,8 МПа при производительности 0,2 м^3/мин, регулятор давления воздуха, позволяющий поддерживать постоянное давление на входе в воздушный расходомер – ротаметр; регулировочные вентили; манометры; измерительные емкости объемом 0,1–1,0 дм^3; секундомер. В качестве реагента-пенообразователя использовался реагент китайского производства, имеющий формулу

$$RO(CH_2CH_2O)_{3-5}-SO_3Na\,, \qquad R=C_8C_{10}C_{12}\,.$$

Его объемное содержание в пенообразующем растворе принималось равным 0,2; 0,4; 0,6 %.

Экспериментальные и расчетные данные результатов

Номер строки	Объемная концентрация раствора ПАВ, %	Расход жидкости Qж, м3/с	Расход воздуха Qв, м3/с	Средние измеренные	
				Фактический расход пены Qп, м3/с	Фактический расход жидкости в составе пены Qжп, м3/с
1	0,2	2,68*10-6	1,67*10-4	3,48*10-5	9,88*10-7
2	0,2	,68*10-6	3,33*10-4	2,86*10-5	1,60*10-6
3	0,2	2,68*10-6	5,00*10-4	3,03*10-5	2,68*10-6
4	0,2	2,68*10-6	6,67*10-4	2,68*10-5	2,68*10-6
5	0,4	2,68*10-6	1,67*10-4	3,67*10-5	1,45*10-6
	0,4	2,68*10-6	3,33*10-4	3,27*10-5	2,68*10-6
7	0,4	2,68*10-6	5,00*10-4	2,22*10-5	2,15*10-6
8	0,4	2,68*10-6	6,67*10-4	2,35*10-5	2,07*10-6
9	0,6	2,68*10-6	1,67*10-4	2,60*10-5	1,04*10-6
10	0,6	2,68*10-6	3,33*10-4	3,27*10-5	2,68*10-6
11	0,6	2,68*10-6	5,00*10-4	2,53*10-5	2,52*10-6
12	0,6	2,68*10-6	6,67*10-4	2,45*10-5	2,32*10-6
13	0,4	2,68*10-6	1,67*10-4	3,13*10-5	4,50*10-7
14	0,4	2,68*10-6	3,33*10-4	2,68*10-5	1,56*10-6
15	0,4	2,68*10-6	5,00*10-4	2,22*10-5	1,76*10-6
16	0,4	2,68*10-6	6,67*10-4	2,45*10-5	1,66*10-6
17	0,4	1,83*10-6	1,67*10-4	2,82*10-5	2,83*10-7
18	0,4	1,83*10-6	3,33*10-4	1,17*10-5	1,35*10-6
19	0,4	1,83*10-6	5,00*10-4	1,25*10-5	1,40*10-6
20	0,4	1,83*10-6	6,67*10-4	1,47*10-5	1,70*10-6
21	0,4	6,33*10-7	1,67*10-4	2,28*10-5	3,16*10-7

Примечание. Под скоростью движения пены в скважине понимается средняя по сечению канала и длине скважины скорость движения ГЖС, представленная в виде секций плотно упакованных пузырьков воздуха без учета объема воздушных пробок, между которыми движутся эти пузырьковые секции.

измерений движения пены модели скважины

Значения			Режим движения ГЖС	Примечания
Газожидкостное отношение (фактическое/расчетное)	Фактическая скорость движения пены Vп, м/с	Скорость движения воздушных пробок, м/с		
34,2/62,1	0,021	0,08	Приближенный к пузырьковому	С колонковой трубой
16,9/124,2	0,017	0,184	Поршневой	То же
10,3/186,6	0,018	0,285	То же	-"-
9,01/248,9	0,016	0,388	-"	
24,3/62,1	0,022	0,079	Приближенный к пузырьковому	-"-
11,2/124,2	0,0198	0,182	Поршневой	-"-
9,50/186,6	0,013	0,289	То же	"-
10,4/248,9	0,014	,39	-"-	-"-
23,9/62,1	0,016	0,085	Приближенный к пузырьковому	-"-
11,2/124,2	0,019	0,182	Поршневой	-"-
10,0/186,6	0,0153	0,301	То же	-"-
9,50/248,9	0,015	0,389	-"-	-"-
68,5/62,1	0,019	0,082	Приближенный к пузырьковому	Без колонковой трубы
16,0/124,2	0,016	0,186	Поршневой	То же
11,7/186,6	0,013	0,289	То же	-"
13,8/243,9	0,015	0,389		-"-
30,9/91,2	0,017	0,084	Приближенный к пузырьковому	С колонковой трубой
7,70/1 1,9	0.007	0,195	Поршневой	То же
7,90/273,2	0,0076	0,275	То же	
7,60/364,4	0.0089	0,395	-"-	-"-
71,0/263,8	0,..4	0,087	Приближенный к пузырьковому	

Порядок проведения экспериментов заключался в следующем. В модель скважины с помощью плунжерного насоса подавался раствор пенообразователя с постоянным расходом, равным 0,161 л/мин ($2,68 \cdot 10^{-6}$ м^3/с), и сжатый воздух. Для каждого принятого значения концентрации пенообразующего раствора расход воздуха составлял 10; 20; 30; 40 л/мин ($1,67 \cdot 10^{-4}$; $3,33 \cdot 10^{-4}$; $5,0 \cdot 10^{-4}$; $6,67 \cdot 10^{-4}$ м^3/с соответственно). Такие соотношения расходов жидкости и воздуха соответствовали следующим расчетным значениям степени аэрации: 62,1; 124,2; 186,6; 248,9, т.е. перекрывали весь диапазон классификации, по которой ГЖС может быть отнесена к термину «пена». Указанные значения расходов жидкости и воздуха и принятые геометрические размеры модели скважины (см. рисунок) позволяли поддерживать среднюю расчетную скорость движения пены в скважине в пределах 0,1–0,4 м/с, что соответствует рациональным значениям скорости движения пены в скважине, принятым на практике [3].

Для заполнения модели скважины равномерным потоком ГЖС требовалось некоторое время, по истечении которого выходящая из скважины пена собиралась в мерную емкость объемом 1 дм^3 и измерялось время наполнения этой емкости. Заполненная пеной емкость оставлялась в состоянии покоя в течение 10–12 ч для самопроизвольного разрушения пены. Скопившийся на дне емкости пенообразующий раствор переливался в мерный цилиндр с ценой деления 1 мл для определения объема раствора. Каждый опыт повторялся не менее трех раз. Данные измерений заносились в журнал наблюдений, в результате обработки которых составлена таблица.

Анализ результатов проведенных измерений и наблюдений показывает, что только при скоростях движения ГЖС в скважине ниже 0,1 м/с режим течения ГЖС приближается к пузырьковому, в котором мелкие пузырьки воздуха равномерно распределены по всему объему скважины, а профиль скоростей потока пены соответствует ламинарному типу. При увеличении расхода воздуха пузырьковый режим течения переходит к пробковому. При этом наблюдается раздельное течение пачек газа, которые толкают перед собой некоторые объемы ГЖС с пузырьковой (пенной) структурой. Движущиеся воздушные пачки занимают не всю площадь поперечного сечения канала, а движутся в центральной части кольцевого зазора скважины. Между стенкой скважины и движущейся воздушной пачкой всегда имеется слой с пенной структурой, скорость движения которого постоянно меняется в зависимости от положения воздушной пачки. Наличие движущихся внутри пенного потока воздушных пачек свидетельствует о том, что только меньшая часть воздуха участвует в процессе образования пены.

Наблюдения за процессом образования пены в призабойной части скважины позволили установить следующее. В кольцевом зазоре скважины между ее стенками и наружной поверхностью колонковой трубы, где площадь сечения канала примерно в 3,5 раза меньше, чем в скважине выше колонковой трубы, ГЖС имеет менее однородную структуру, и воздух, выходящий из промывочных отверстий в нижней части колонковой трубы, струями проходит сквозь тонкий слой пены в кольцевом зазоре. Выше колонковой трубы, где скорость потока

ГЖС резко снижается, образуется слой жидкости, сквозь который проходят пузырьки воздуха меньших размеров. Это приводит к захвату жидкости и образованию пенной структуры ГЖС. Количество жидкости, захватываемое пузырьками воздуха, зависит от концентрации ПАВ в жидкости и режима прохождения воздуха через слой этой жидкости. Например, при концентрации ПАВ, равной 0,2 %, вся жидкость, подаваемая в скважину, захватывалась воздухом и выносилась пеной из скважины только при расходе воздуха $5,00 \cdot 10^{-4}$ и $6,67 \cdot 10^{-4}$ м^3/с (строки 3 и 4 таблицы). При концентрации ПАВ, равной 0,4 и 0,6 %, только при расходе воздуха $3,33 \cdot 10^{-4}$ м^3/с наблюдался полный вынос жидкости, подаваемой в скважину (строки 6, 10 таблицы). В остальных случаях происходило накопление пенообразующего раствора в призабойной части скважины.

Наиболее высокие значения степени аэрации пены, выходящей из скважины, были получены при минимальном расходе воздуха и приближении течения ГЖС в скважине к ламинарному. В большинстве случаев степень аэрации ГЖС, имеющей пенную структуру, не превышала 35. Только в двух случаях, при уменьшении подачи жидкости в скважину до $6,33 \cdot 10^{-7}$ м^3/с и удалении из скважины колонковой трубы, были получены значения степени аэрации пены, равные 71 и 68,5 соответственно (строки 21 и 13 таблицы). В случае наличия в скважине пробкового режима течения степень аэрации пены находилась в пределах 7,6–16,9. Несмотря на такие низкие значения степени аэрации, полученную ГЖС с полной очевидностью можно отнести к системе, имеющей "пенную" структуру: пузырьки воздуха, равномерно распределенные в объеме и разделенные тонкими пленками жидкости. Результаты настоящих исследований хорошо согласуются с известными данными производственного опыта [2], показывающими, что в условиях образования пены в скважине степень ее аэрации в большинстве случаев не превышает 20. Для оценки влияния дополнительных технических средств на качество образования пены были выполнены две серии опытов, при которых в одном случае присутствовала колонковая труба со встроенным диспергатором, а в другом нет. При наличии дополнительно встроенного диспергатора подаваемый в скважину воздух расходуется более рационально и количество образующейся в этом случае пены возрастает.

С уменьшением расхода жидкости, подаваемой в скважину, уменьшается и объем получаемой пены (строки 17–21 таблицы). Увеличение концентрации ПАВ в жидкости выше рационального для данного ПАВ значения не приводит к улучшению условий пенообразования. Для используемого в данных экспериментальных исследованиях ПАВ наилучшие показатели пенообразующей способности получены при концентрации ПАВ в растворе 0,4 %. Увеличение расхода воздуха выше значений, при которых в скважине средняя скорость ГЖС превышает 0,2 м/с, нежелательно, так как это приводит не только к уменьшению образующегося количества пены, но и к повышенным затратам мощности на преодоление потерь давления в потоке ГЖС в скважине.

Выводы

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить ряд научных фактов, которые до настоящего времени были изучены недостаточно полно.

При образовании пены на забое скважин преобладают процессы диспергирования воздуха, проходящего через слой жидкости, содержащей ПАВ. Наилучшими условиями для пенообразования являются такие, при которых скорость прохождения воздуха через пенообразующий раствор не превышает 0,2 м/с.

При циркуляции ГЖС в скважине под термином «пена» правомочно понимать систему с газожидкостным отношением, равным 7 и более до 300, в которой пузырьки воздуха равномерно распределены по некоторому объему и разделены между собой тонкими пленками жидкости.

Наличие в составе бурового снаряда или поверхностной обвязке технических средств, приводящих к лучшему диспергированию воздуха в жидкости, позволяет получить в скважине пену с более высокими значениями степени аэрации и способствует рациональному использованию воздуха, подаваемого в скважину в составе ГЖС.

При скоростях движения ГЖС в скважине, превышающих 0,1 м/с, циркулирующая ГЖС имеет пробковый режим течения.

Настоящие исследования выполнены без учета вращения колонны бурильных труб, что может повлиять на количественную сторону процесса образования пены в скважине.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бреев А.С. Бурение скважин с использованием газообразных агент Недра, 1979.

2. Коваленко В.И., Климов В.Я., Яковлев А.А. Бурение скважин с очисткой забоя пеной / ВИЭМС. М., 1986.

3. Яковлев А.М., Коваленко В.И. Бурение скважин с пеной на твердые полезные ископаемые. М.: Недра, 1987.

4. Mitchell R.F. J.Petrol.Technol., 1983, v.35, No 12.

5. Recomended Practice for Testing Foam Agents for Mist Drilling.-American Petroleum Institute, Washington D.C., 1966.