

УДК 622.244.49

Д.Г. Петраков¹, e-mail: petrakovdg@mail.ru; **А.А. Яковлев²**, e-mail: andre_a_yakovlev@mail.ru;

М.В. Турицына³, e-mail: turitsyna_maria@mail.ru

¹ Кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (Санкт-Петербург, Россия).

² Кафедра механики, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (Санкт-Петербург, Россия).

³ Кафедра бурения скважин, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный» (Санкт-Петербург, Россия).

Моделирование стендовых исследований процесса вскрытия продуктивного горизонта газожидкостными смесями

Повышенные требования к качеству бурения скважин на нефть и газ в условиях аномально низких пластовых давлений обусловлены невозможностью применения традиционных промывочных жидкостей, используемых для вскрытия продуктивной залежи. Все чаще находят применение газожидкостные смеси, однако их применение значительно усложняет расчет параметров, обеспечивающих безаварийную проводку скважин, поэтому особенно важно произвести проверку разрабатываемых составов в стендовых условиях. На гидродинамику процесса промывки скважины газожидкостной смесью в большей степени влияет газосодержание, зависящее от расходов фаз. Расход фаз – кинематический фактор, который можно учесть с помощью критерия Фруда. Для учета кинематического подобия гидродинамики процесса промывки скважин с заданной допустимой депрессией на пласт получен критерийный параметр Фруда, рекомендованный для газожидкостных смесей с малым газосодержанием. Проведены стендовые испытания, имитирующие реальные пластовые давления. Для аэрации смеси использовались воздух и азот. В ходе эксперимента в первой части насосами нагнеталась газожидкостная смесь при расчетных значениях расходов фаз. Во второй части эксперимента клапан сброса настраивался таким образом, чтобы давление закачки не доходило на 10–15% до своего критического значения. Исследования показали, что разработанная авторами математическая модель промывки скважин, реализованная в форме программы Liquid-Gas 1.3, позволяет определить расходы фаз, обеспечивающие потребное давления нагнетания и давление на забое с учетом допустимой депрессии на пласт при первичном вскрытии пластов с аномально низкими давлениями с точностью, достаточной для инженерных расчетов.

Ключевые слова: бурение, аномально низкие пластовые давления (АНПД), промывка, газожидкостные смеси (ГЖС), математическая модель, критерий Фруда.

D.G. Petrakov¹, e-mail: petrakovdg@mail.ru; **A.A. Yakovlev²**, e-mail: andre_a_yakovlev@mail.ru;

M.V. Turitsyna³, e-mail: turitsyna_maria@mail.ru

¹ Oil-and-gas-field Development and Operation Department, Gorny National Mineral Resources University (Saint-Petersburg, Russia).

² Mechanics Department, Gorny National Mineral Resources University (Saint-Petersburg, Russia).

³ Well Drilling Department, Gorny National Mineral Resources University (Saint-Petersburg, Russia).

Modeling the test studies of the exposing the producing horizon with liquid-gas mixtures process

Strict requirements to the quality of wells drilling for oil and gas in the conditions of abnormally low reservoir pressures are caused by the inability to use the traditional drilling fluids used for the productive deposits exposing. Gas and liquid mixtures are used with increasing frequency; however, their use complicates the calculation of parameters, ensuring trouble-free holes drilling, so it is especially important to check the developed compositions in test conditions. Well flushing with gas and liquid mixture process hydrodynamics is largely affected by the gas content depending on stages flows. Stage flow – kinematic factor that can be taken into account via Froude number. To take into account the kinematic similarity of wells flushing hydrodynamic with predetermined allowable differential pressure drawdown Froude parameter, this is recommended for gas and liquid mixtures with low gas content is obtained. Bench tests simulating real reservoir pressure are performed. For mixture aeration air and nitrogen were used. In the experiment, in the first part of the pump pumps the liquid mixture at design flow values phases. In the second part of the experiment the relief valve was

configured in such a way that the injection pressure did not reach its critical value by 10–15%. Researches has shown that well flushing mathematical model developed by the authors, implemented in the form of Liquid-Gas 1.3 program allows determining the cost of stages, meeting the needs of the discharge pressure and the pressure at the bottom, taking into account the allowable drawdown during the initial exposing the reservoir with abnormally low pressure with accuracy sufficient for engineering calculations.

Keywords: drilling, abnormally low bottom-hole pressures (ALBHP), flushing, liquid-gas mixtures (GLM), mathematical model, Froude number.

В условиях аномально низких пластовых давлений может иметь место промывка газожидкостными смесями, что значительно усложняет расчет параметров, обеспечивающих безаварийную проводку скважин. Поэтому особенно важно произвести проверку разрабатываемых составов в стендовых условиях. Для приближенного гидродинамического прогнозирования процесса при проведении стендовых исследований с целью получения более точной характеристики потока используются критериальные уравнения подобия, такие как геометрическое и кинематическое. На гидродинамику процесса промывки скважины газожидкостной смесью в большей степени влияет газосодержание, зависящее от расходов фаз. Расход фаз – кинематический фактор, который можно учесть с помощью критерия Фруда (Fr). У ряда исследователей он представлен разными зависимостями [2, 3, 5], в целом характеризующими отношение сил инерции системы к силе тяжести.

Уравнение, полученное В.А. Петровым, Е.Г. Леоновым и Б.С. Филатовым, наиболее целесообразно для гидродинамики процесса промывки газожидкостной смесью, поскольку учитывает скорость ее потока:

$$Fr = \frac{w_c^2}{g \cdot d} = \frac{(Q_r + Q_{\text{ПОЖ}})^2}{g \cdot D \cdot F^2} \quad (1)$$

Очевидно, что при расчете объемного газосодержания по модифицированной модели разница между пластовым давлением и половиной допустимого значения депрессии на пласт будет яв-

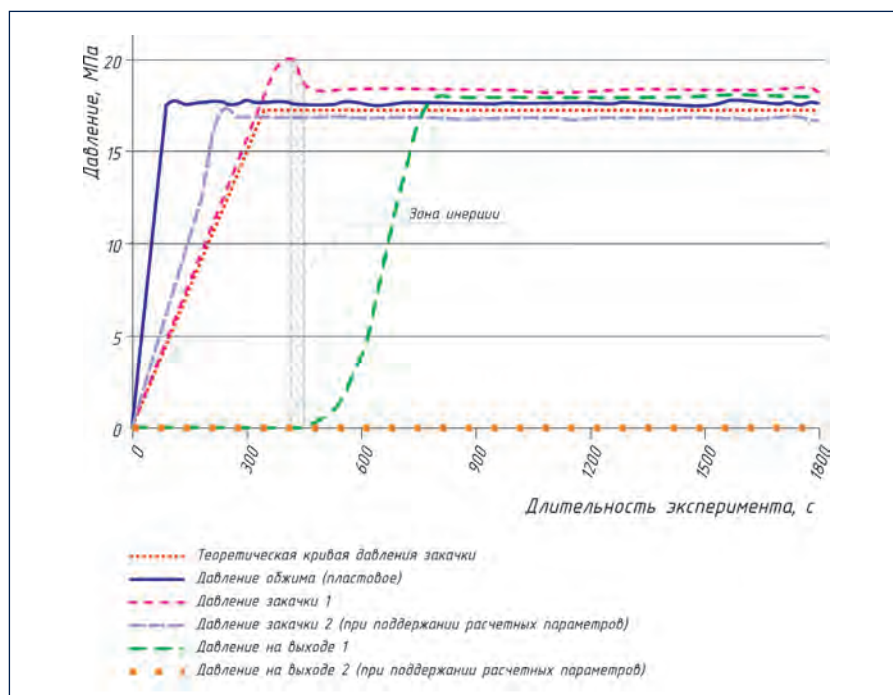


Рис. Экспериментальные исследования для условий, аналогичных скважинным: глубина 1995 м, пластовое давление 17,7 МПа, промывка газожидкостной смесью, азотированной азотом
Fig. Experimental studies for conditions, which are similar to wells: depth 1,995 m, reservoir pressure 17.7 MPa, flushing with gas and liquid mixture, aerated with nitrogen

ляться искомым забойным давлением $P_{\text{заб}} = P_{\text{пл}} - 0,5 \cdot \Delta P$. Введем безразмерный эквивалент давления:

$$k_p = \frac{P_{\text{заб}}}{P_{\text{ГСТ}}} = \frac{P_{\text{заб}}}{g \cdot \rho_{\text{ГЖС}} \cdot H_{\text{скв}}} = \frac{P_{\text{заб}} / H_{\text{скв}}}{g \cdot \rho_{\text{ГЖС}}}$$

Тогда выражение

$$\beta = 1 - \frac{P_{\text{пл}} - 0,5 \cdot \Delta P}{g \cdot \rho_{\text{ГЖС}} \cdot H_{\text{скв}}}$$

где $H_{\text{скв}}$ – глубина скважины, м, примет вид $\beta = 1 - k_p$. Поскольку

$$Q_r = \frac{\beta \cdot Q_{\text{ПОЖ}}}{1 - \beta}, \text{ тогда}$$

$$Q_r = \frac{(1 - k_p) \cdot Q_{\text{ПОЖ}}}{k_p} \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), получим:

$$Fr = \frac{\left(\frac{(1 - k_p) \cdot Q_{\text{ПОЖ}}}{k_p} + Q_{\text{ПОЖ}}\right)^2}{g \cdot D \cdot F^2} = \frac{Q_{\text{ПОЖ}}^2}{g \cdot D \cdot F^2 \cdot k_p^2}$$

На установке для исследования проницаемости кернов, изготовленной на опытном заводе «НефтеКИП», были произведены стендовые исследования проникающей способности газожидкостной смеси в образцы керна.

Ссылка для цитирования (for references):

Петраков Д.Г., Яковлев А.А., Турицына М.В. Моделирование стендовых исследований процесса вскрытия продуктивного горизонта газожидкостными смесями // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2015. № 11. С. 30–33.

Petrakov D.G., Yakovlev A.A., Turitsyna M.V. Modeling the test studies of the exposing the producing horizon with liquid-gas mixtures process (In Russ.). *Territorija «NEFTEGAZ» = Oil and Gas Territory*, 2015, No. 11. P. 30–33.

Таблица 1. Расчет параметров расхода фаз для проведения стендовых исследований через безразмерный коэффициент подобия

Table 1. Calculation of stages flow parameters for bench researches through the dimensionless similarity factor

Параметры Parameters	Условия исследования Terms of study					
	Пласт Reservoir	Стенд Bench	Пласт Reservoir	Стенд Bench	Пласт Reservoir	Стенд Bench
Глубина скважины, м Depth of the well, m	1850		1950		1995	
Пластовое давление, МПа Reservoir pressure, MPa	16,9		14,4		17,7	
Газ для аэрации Lift gas	азот nitrogen					
Критерий Фруда, $\cdot 10^3$ Froude number, $\cdot 10^3$	1,162		9,647		1,182	
Расход жидкости, см ³ /с Liquid flow rate, cm ³ /s	24000	9,94	18000	7,45	25000	10,35
Расход газа, см ³ /с Gas flow rate, cm ³ /s	4080	1,69	7587	3,14	3358	1,39
Газ для аэрации Lift gas	воздух air					
Критерий Фруда, $\cdot 10^3$ Froude number, $\cdot 10^3$	1,187	1,007	1,202			
Расход жидкости, см ³ /с Liquid flow rate, cm ³ /s	24000	9,94	18000	7,45	25000	10,35
Расход газа, см ³ /с Gas flow rate, cm ³ /s	4394	1,82	8142	3,37	3599	1,49

Была проведена серия исследований с целью проверки математической модели промывки скважины ГЖС [4] на предмет достижения расчетных забойных давлений (и соответствующего значения депрессии) для обеспечения непрониновения газожидкостной смеси в образец горной породы при рекомендуемых расчетных значениях расходов фаз. Проверка методики была осуществлена для смесей, аэрированных воздухом и азотом, плотность пенообразующей жидкости составляла 1015 кг/м³.

Расчетный анализ по модифицированной методике при использовании про-

граммы Liquid-Gas 1.3» [1] был выполнен для скважины диаметром 0,228 м обсаженной колонной с внутренним диаметром 0,26 м длиной 1400 м; наружный диаметр бурильных труб – 0,08 м; внутренний диаметр – 0,065 м; тип соединений бурильной колонны – муфтово-замковый.

В таблице 1 представлены расчетные данные для проведения серии экспериментальных исследований на стенде. Проведен расчет для условных скважин, глубины и давления которых привязаны к реальным месторождениям.

В ходе эксперимента в первой части насосами нагнеталась газожидкостная

смесь при расчетных значениях расходов фаз. Графики, получаемые путем обработки экспериментальных данных, для каждой из трех условных скважин и обоих использованных газов имеют подобный вид, поэтому представлена только одна из диаграмм. Как видно из рисунка, давление закачки (1) соответствует забойному давлению в бурящейся скважине после достижения критического значения, при котором имел место «прорыв» (начиналось прокачивание жидкости через образец породы), характеризующийся через некоторое время резким ростом давления на выходе (1).

Таблица 2. Сравнение опытных данных с расчетными по разработанной методике значений давления нагнетания (по условной скважине)

Table 2. Comparison of the discharge pressures of experimental values and values calculated with the developed technique (on nominal value)

Пластовые условия Reservoir condition		Газ для аэрации Lift gas	Давление на забое, МПа Bottom-hole pressure, MPa		Относительная ошибка $\frac{P_3^o - P_3^p}{P_3^o} \cdot 100, \%$ Relative error $\frac{P_3^o - P_3^p}{P_3^o} \cdot 100, \%$
Глубина скважины, м Depth of the well, m	Давление, МПа Pressure, MPa		опытное P_3^o experimental P_3^o	расчетное P_3^p design P_3^p	
1850	16,9	воздух air	15,789	16,331	3,43
		азот nitrogen	15,984	16,474	3,07
1950	14,4	воздух air	12,922	13,54	4,78
		азот nitrogen	13,245	13,837	4,47
1995	17,7	воздух air	16,594	17,014	2,53
		азот nitrogen	16,976	17,197	1,30

Во второй части эксперимента клапан сброса настраивался таким образом, чтобы давление закачки не доходило на 10–15% до своего критического значения. Как видно из графиков, давление закачки (2) на определенном этапе доходит до своего экстремального значения, при котором срабатывает предохранительный клапан, через который жидкость направляется на линию сброса, имитируя движение с забоя на поверхность, после чего стабилизируется и выходит на постоянный уровень, характеризующий забойное давление. При этом на выходе из образца не наблюдалось фильтрации жидкости, что регистрировалось манометрами – давление на выходе (1).

Как видно из рисунка, при поддержании расчетных значений расходов фаз обеспечивается условие качественного вскрытия продуктивного горизонта с сохранением фильтрационных характеристик пласта. Расходы, превышающие расчетные на 10–15%, могут привести к проникновению смеси в пласт, что влечет за собой колюматацию призабойной зоны и последующее снижение проницаемости.

Расчетные кривые для значений забойного давления приближены к полученным экспериментальным значениям давлениям закачки, соответствующих



забойным, что говорит о высокой точности расчета. Результаты сопоставления приведены в таблице 2.

Приведенные в таблице 2 данные показывают удовлетворительное совпадение расчетных значений давления по рассматриваемой методике с экспериментальными данными. Относительные ошибки обусловлены неучтенными потерями давления в циркуляционной системе скважины. Однако при бурении скважин на забойное давление будет оказывать влияние уширение ствола, отличное от запроектированного, что учесть не представляется возможным, поскольку в каждой последующей сква-

жине коэффициент может отличаться от данных кавернограмм предыдущих скважин, поэтому относительная ошибка всегда будет иметь место.

По проведенным исследованиям можно сделать вывод, что разработанная гидродинамическая модель промывки скважины с применением газожидкостных смесей позволяет определить расходы фаз, обеспечивающие требуемое давление нагнетания и давление на забое с учетом допустимой депрессии на пласт при первичном вскрытии пластов с аномально низкими давлениями с точностью, достаточной для инженерных расчетов ($\pm 1,30$; 4,78%).

Литература:

1. Турицына М.В., Блинов П.А., Яковлев А.А. Программа Liquid-Gas 1.03 Гидравлический расчет промывки скважин газожидкостной смесью. Авторское свидетельство 2014613166 РФ; заявл. 04.12.2013; опубл. 19.03.2014.
2. Винников С.Д., Доля Е.А., Давыденко Е.В. Анализ критериальных зависимостей Рейнольдса и Фруда применительно к автомоделной области турбулентного потока // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2011. № 21. С. 11–19.
3. Мураев Ю.Д. Газожидкостные системы в буровых работах. СПб.: СПГИ (ТУ), 2004. 123 с.
4. Турицына М.В. Гидродинамическое обоснование применения газожидкостных смесей для вскрытия пластов с аномально низкими давлениями: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.15. СПб., 2013. 142 с.
5. Чилап А.Я. К согласованию критериев подобия // Георесурсы. 2007. № 4. С. 7.

References:

1. Turitsyna M.V., Blinov P.A., Yakovlev A.A. *Programma Liquid-Gas 1.03 Gidravlicheskiy raschet promyvki skvazhin gazozhidkostnoj smes'ju* [Liquid-Gas 1.03 program Hydraulic calculation of wells flushing with gas and liquid mixture]. Author certificate 2014613166RF; appl. 04.12.2013; published on 19.03.2014.
2. Vinnikov S.D., Dolya Ye.A., Davydenko Ye.V. Analiz kriterial'nyh zavisimostej Rejnol'dsa i Fruda primenitel'no k avtomodel'noj oblasti turbulentnogo potoka [Analysis of Reynolds and Froude criteria dependencies in relation to the self-field model of the turbulent flow]. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Russian State Hydrometeorological University scholarly notes*, 2011, No. 21. P. 11–19.
3. Murav Yu.D. *Gazozhidkostnye sistemy v burovnyh rabotah* [Gas and liquid systems in drilling works]. St. Petersburg State Mining Institute (TU), 2004. 123 pp.
4. Turitsyna M.V. *Gidrodinamicheskoe obosnovanie primeneniya gazozhidkostnyh smesey dlya vskrytija plastov s anomal'no nizkimi davlenijami: dis. ... kand. tehn. nauk* [Hydrodynamical justification for the use of liquid and gas mixtures for exposing the reservoirs with abnormally low pressures: thesis ... Candidate of Sciences (Engineering)]. Saint-Petersburg, 2013. 142 pp.
5. Chilap A.Ya. K soglasovaniju kriteriev podobija [On similarity criterion coordination]. *Georesursy = Geological resources*, 2007, No. 4. P. 7.