

С.Н. Бузинов¹, С.А. Бородин¹, В.М. Пищухин¹, А.Н. Харитонов²,
О.В. Николаев¹, С.А. Шулепин¹

¹ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва

²ООО «Газпром добыча Надым», Надым

S_Buzinov@vniigaz.gazprom.ru, S_Borodin@vniigaz.gazprom.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМ В ГАЗОВЫХ СКВАЖИНАХ

Одна из проблем истощенных газовых месторождений – накопление жидкости в стволе скважины, и как следствие остановка ее работы. Традиционно применяемые методы расчета оптимального режима работы скважин при осложненных условиях по эмпирическим формулам имеют ряд ограничений и допущений. В статье рассмотрен оптимизированный алгоритм расчета, опирающийся на результаты практических экспериментов, проведенных на экспериментальной установке ООО «Газпром ВНИИГАЗ» – стенд по отработке эксплуатации газовых скважин на поздней стадии разработки.

Ключевые слова: газогидродинамика, двухфазное течение, приведенный параметр Фруда, истощенные месторождения, минимально-допустимый дебит скважины, самодавливание скважин.

Эксплуатация газовых скважин сопровождается поступлением в ствол скважины пластовой и конденсационной воды. Гидравлические процессы при движении сухого газа и газа, содержащего жидкость, во многих случаях существенно отличаются между собой. Жидкость, находящаяся в стволе скважины, как правило, усложняет условия работы скважины, вызывая дополнительные потери сопротивления (Точигин, 1979). Как показывает практика разработки газовых месторождений, а также экспериментальные исследования, наибольшее отрицательное воздействие оказывает жидкость на работу скважины при малых расходах газа что, как правило, наблюдается на поздней стадии разработки. Это актуализирует проблему изучения механизма двухфазного течения газа и жидкости в трубах (Ли и др., 2008).

Указанной проблеме уделяется большое внимание. Ежегодно в мире выходит несколько десятков статей и монографий и поток публикаций не уменьшается. Это вызвано как актуальностью, так и сложностью проблемы. Формы движения двухфазных систем многообразны. Вряд ли удастся разработать единую научную основу, адекватно отображающую все формы движения двухфазных систем в трубах.

В настоящей статье ставится более скромная задача –

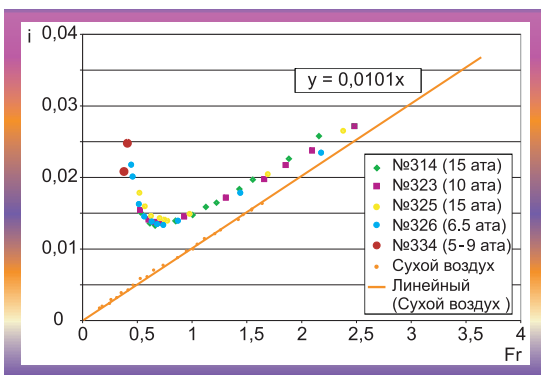


Рис. 1. Характеристики лифтовой колонны 114 мм при расходе воды 68 л/ч и давлениях 5 ата, 6,5 ата, 9 ата, 10 ата и сухом воздухе.

изложить некоторые экспериментальные исследования и дать им некоторую физическую трактовку, посвященную одному типу движения двухфазных систем в вертикальных трубах – случаю, когда газовая фаза является непрерывной. Такой тип движения реализуется при относительно высоких скоростях движения газа и малой доли жидкой фазы в потоке.

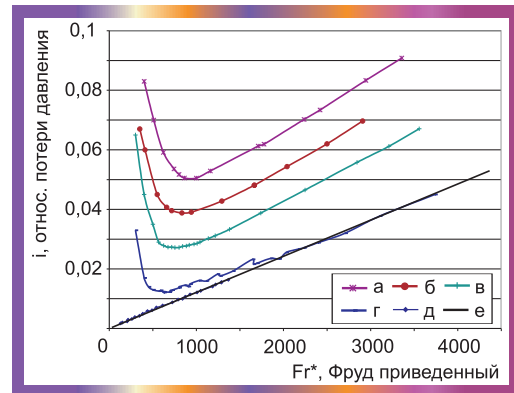


Рис. 2. Зависимость индикаторных характеристик лифта $d_{\text{вн.}} = 62$ мм от расхода воды. Расход воды: а – 210 л/ч, б – 130 л/ч, в – 67 л/ч, г – 4 л/ч. д – сухой воздух, е – линейный (сухой воздух).

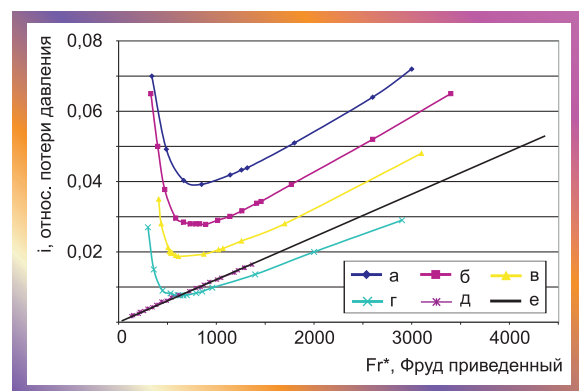


Рис. 3. Зависимость индикаторных характеристик лифта $d_{\text{вн.}} = 76$ мм от расхода воды. Расход воды: а – 350 л/ч, б – 120 л/ч, в – 80 л/ч, г – 2,5 л/ч. д – сухой воздух, е – линейный (сухой воздух).

Нами на установке (изложено в работе (Тер-Саркисов, 2001)), а также в настоящем сборнике (Бузинов и др., 2010), были проведены экспериментальные исследования. Кроме того, были использованы ранее проведенные в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» экспериментальные исследования, проведенные Б.Г. Ахмедовым (Ахмедов, 1982), а также, к сожалению, неопубликованные исследования О.В. Николаева и А.А. Михайлова.

Исследования проводились применительно к условиям разработки сеноманских газовых залежей Надым-Пуровского газоносного района при сниженных пластовых давлениях.

Опыты проводились на вертикальных трубах с внутренним диаметром 62 мм, 76 мм, 100 мм, 152 мм. Давление при этом варьировалось 0,3 МПа до 1,5 МПа. Максимальный расход газа при этом составлял 350 м³/ч. Водный фактор изменялся от 0 до 1300 л/ч. В процессе исследования замеряется расход газа и воды, а также перепад давления на трубе длиной 29 м.

Результаты экспериментальных исследований обрабатывались графически в координатах $i = \Delta p / (\rho g H)$,

$$Fr_{np.} = \frac{v_r^2}{gD} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_{ж}}, \text{ где } i - \text{ относительные потери давления,}$$

Δp – потери давления в трубе на расстоянии H , g – ускорение свободного падения, H – высота колонны – 29 м, $Fr_{np.}$ – приведенный параметр Фруда, V_r – скорость газа при рабочих условиях, D – внутренний диаметр лифтовой колонны, ρ_z – плотность газа при рабочих условиях, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости.

Наши экспериментальные исследования показали, что именно приведенный параметр Фруда является определяющим процесс двухфазного движения. Об этом свидетельствуют, например, данные, приведенные на рис. 1.

Здесь иллюстрируется зависимость i от $Fr_{np.}$, полученные на трубе $d_{вн.} = 100$ мм при различных значениях давлений в трубе. Как видно, наблюдается хорошее совпадение результатов исследования для разных значений давлений и других параметров.

На рисунках 2 – 4 помещены графики зависимости величин $Fr_{np.}$ и i для труб с тремя внутренними диаметрами 62 мм, 76 мм, 100 мм. Общим является хорошо прослеживаемая зависимость увеличения потерь давления в любой трубе от увеличения количества воды (расхода) в ней. Черная линия – линия тренда, экстраполирующая линию, описывающую потери сопротивления в трубе для сухого газа. Следует отметить, что при малых расходах воды наблюдаются потери давления меньшие, чем при движении сухого газа, вплоть до расхода воды равного 10 л/ч для трубы 114 мм.

Как видно при некотором значении Fr^* функция $i(Fr^*, Fr_{ж.})$ имеет минимум. Зная зависимость i от Fr^* , $Fr_{ж.}$, а также зная зависимость плотности газа от давления, из уравнения (1) можно определить перепад давления на элементе трубы длиной Δl .

Перепад давления в лифте (разница давлений на забое и на устье) можно определить путем численного решения дифференциального уравнения:

$$\frac{dP}{dZ} = -\rho_z(P)g - i(Fr^*, Fr_{ж.})\rho_{ж.}g, \quad (1)$$

где ось Z – направлена вверх.

Решение дифференциального уравнения (1) позволяет определить зависимость забойного давления от расхода газа при фиксированном значении давления на устье скважины. График этой зависимости называется индикаторной кривой лифта. По известному значению пластового давления и известном значении фильтрационных сопротивлений по формуле

$$P_{пл.}^2 - P_{заб.}^2 = AQ + BQ^2 \quad (2)$$

можно построить зависимость забойного давления от дебита (Одишария, Точигин, 1998). Эта зависимость называется индикаторной характеристикой скважины. Пример индикаторной характеристики скважины и газожидкостного подъемника приведен на рис. 5.

Пересечение индикаторных характеристик позволяет определить рабочий дебит скважины. Устойчивая работа скважины на левой ветви не возможна. В связи с этим минимально-возможный устойчивый дебит скважины может быть, когда обеспечивается значение приведенного числа Фруда, соответствующее минимуму индикаторной характеристики лифта. Обозначим это значение через $Fr_{кр.}$. Тогда минимально-возможный дебит скважины будет равен значению, соответствующему точке пересечения правой ветви индикаторной характеристики лифта с индикаторной характеристикой пласта. Например, на рис. 5 это значение приблизительно равно 112 м³/сут.

Очевидно, левая ветвь индикаторной характеристики скважины не имеет существенного практического значения. Актуально знание величины $Fr_{кр.}$.

Как видно из рисунков 2 – 4, при значениях $Fr_{np.} > Fr_{кр.}$ наблюдается линейная связь между величиной i и Fr^* .

Экспериментально было также установлена зависимость величины i от параметра Фруда для жидкости, $Fr_{ж.}$, для труб диаметром $d_{вн.} = 62$ мм, 76 мм, 100 мм. Для значений $Fr_{np.} > Fr_{кр.}$ была получена эмпирическая зависимость i от Fr^* и приведенного расхода для жидкости. Под приведенным расходом воды, $q_{np.}$, понимается расход, при котором значение числа Фруда для жидкости будет равно числу Фруда для трубы $d_{вн.} = 62$ мм и определяется формулой:

$$q_{в. np.} = q_{в.} \left(\frac{62}{D_{вн.}} \right)^{5/2}, \quad (3)$$

где $q_{в.}$ – реальный расход жидкости, в л/ч; $D_{вн.}$ – внутренний диаметр трубы в мм.

Эмпирическая (аппроксимационная) формула имеет вид:

$$i = -0.000877 + 0.000276 \cdot q_{np.} - 0.547 \cdot q_{np.}^2 \cdot 10^{-6} \cdot q_{в.} + 0.1014 \cdot Fr_{np.} \cdot 10^{-6}. \quad (4)$$

Эту формулу можно рекомендовать для проведения ориентировочных расчетов для труб, внутренний диаметр которых изменяется от 62 мм до 100 мм. Более правильно необходимо ориентироваться на экспериментальные исследования, которые должны быть проведены на сертифицированном стенде.

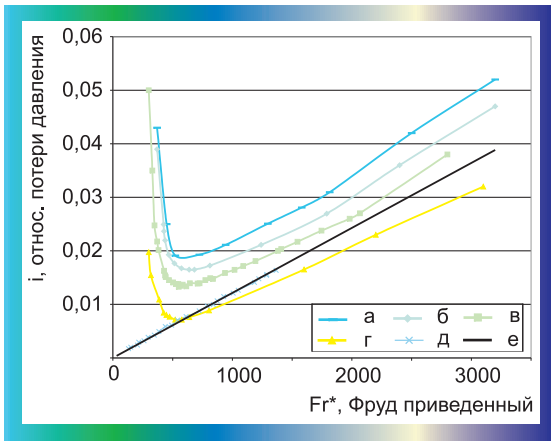


Рис. 4. Зависимость индикаторных характеристик лифта $d_{вн.} = 100$ мм от расхода воды. Расход воды: а – 132 л/ч, б – 97 л/ч, в – 68 л/ч, г – 9 л/ч. д – сухой воздух, е – линейный (сухой воздух).

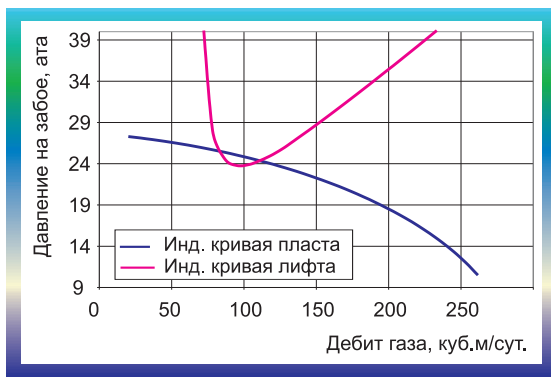


Рис. 5. Индикаторные характеристики лифтовой колонны и пласта.

На рисунке 6 приведено сопоставление графика зависимости, $(i = i(Fr_{пр}, q_{в.пр}))$, полученного в результате проведенных экспериментов на трубах $d_{вн.} = 76$ мм и $d_{вн.} = 100$ мм при одинаковых значениях приведенного расхода воды. Как видно, получается удовлетворительное сопоставление зависимостей, отображающих процесс при одинаковых значениях приведенного расхода воды. Отклонения составили не более 5–6 %. По графикам видно, что индикаторная кривая лифта $d_{вн.} = 76$ мм (зеленого цвета) очень близка с кривой $d_{вн.} = 100$ мм (малинового цвета) при одинаковых значениях приведенного расхода воды 27 л/ч.

Тоже, но с чуть большим отклонением, видно по графикам синего и бирюзового цвета, здесь расход воды составил 20 л/ч.

На рисунке 7 приведено сопоставление экспериментальных данных, полученных нами с данными расчета по аппроксимационной формуле. Как видно получается удовлетворительное сопоставление. Отклонения от расчетной формулы (общей для всех перечисленных в статье диаметров труб) составило не более 8 %.

Также нами были проведены сопоставления наших экспериментальных данных с промышленными данными одного месторождения. В основном, получается неплохое сопоставление, хотя в ряде случаев наблюдается существенное расхождение.

Следует отметить, что необходимое сопоставление с промышленными данными имеет одну особенность: необходимо не только (а может быть и не столько) точ-

ность полученных данных, но и быть убежденным, что на промысле при проведении исследований был осуществлен установившейся режим работы скважины. Здесь под установившимся режимом понимается режим, когда стабилизировались не только расход газа, но и расход воды. Стабилизация последнего иногда требует нескольких суток.

В заключении отметим еще два момента. О.В. Николаевым и А.А. Михайловым проведены экспериментальные исследования, когда в качестве агента при газлифте применяли гелий, плотность которого в 7,5 раз меньше плотности воздуха. Зависимость гидравлических потерь от приведенного параметра Фруда практически полностью совпала с аналогичной зависимостью, полученной в экспериментах с воздухом.

В 2001 году вышла монография (Мукерджи, 2001), в которой авторы обобщили проведенные экспериментальные исследования по рассматриваемому вопросу. Авторы уделяют должное внимание параметрам, определяющим процесс движения газожидкостных систем.

Констатируется, ссылаясь на исследования Данса и Роса, о наличии 8 безразмерных параметров, из которых 4 являются определяющими. Приведем их (в интерпретации авторов).

– Показатель скорости жидкости

$$N_{LV} = V_{SL} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{g\sigma_L}};$$

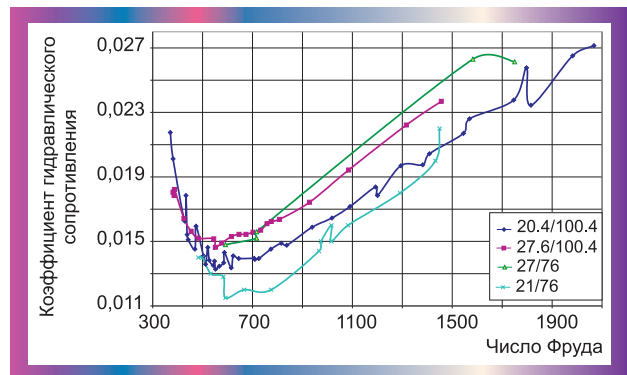


Рис. 6. Сопоставление опытов с близкими приведенными параметрами расхода воды на трубах различного диаметра.

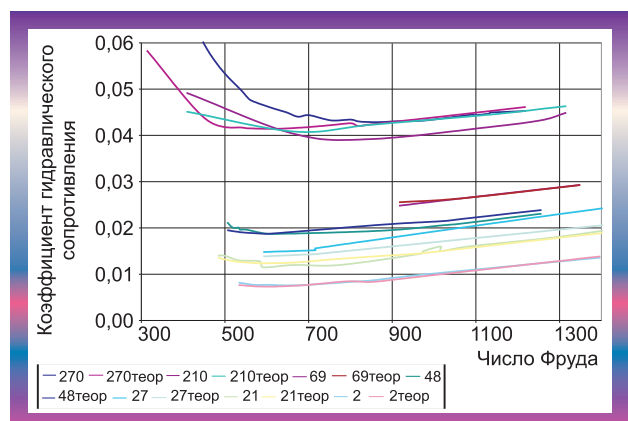


Рис. 7. Графики сравнения сопоставления расчетных формул с экспериментальными данными.

– Показатель скорости газа

$$N_{gV} = V_{Sg} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{g\sigma_L}};$$

– Показатель диаметра трубы

$$N_d = d \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{g\sigma_L}};$$

– Показатель вязкости жидкости

$$N_L = \mu_L \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{g\sigma_L^3}};$$

где V_{Sg} и V_{SL} – средние скорости (расходные) движения газа и жидкости в трубе, ρ_L – плотность жидкости, σ_L – поверхностное натяжение, μ_L – вязкость жидкости, g – ускорение свободного падения.

Для наших исследований, проведенных непосредственно для условий разработки сеноманских залежей месторождения Медвежье, плотность, поверхностное натяжение и вязкости жидкости изменились в небольшом диапазоне. В связи с этим применительно к нашим исследованиям из вышеперечисленных четырех параметров останутся два:

$$Fr_{жс} = \frac{N_{LV}^2}{N_d} = \frac{V_{SL}^2}{gD} \quad Fr_2 = \frac{N_{gV}^2}{N_d} = \frac{V_{gL}^2}{gD},$$

т.е. следуя рассуждениям Данса и Роса, которые принимались и многими другими исследователями, цитируемым в указанной монографии – Оржижевским, Азизом и др., Бегезом и Брилом, Мукерджи и Брилом процесс двухфазного движения жидкости и газа в вертикальных трубах при фиксированных свойствах жидкости определяется двумя параметрами Фруда для жидкости, $Fr_{жс}$, и параметра Фруда для газа Fr_2 . Это в основном соответствует нашим представлениям о механизме двухфазного движения. В связи с этим мы позволим себе констатировать, что наши исследования идут в русле последних мировых исследований по рассматриваемой тематике. Основное отличие наших представлений от изложенного выше заключается в том, что нам удалось доказать, что определяющим параметром является не параметр Фруда, $\frac{V_{SL}^2}{gD}$, а приведенный

параметр Фруда, $Fr_2^* = \frac{V_{gS}^2}{gD} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_L}$, где ρ_g – плотность газа.

Данс и Рос проводили исследования при условиях, близких к атмосферному. В связи с этим, параметр ρ_g/ρ_L был постоянным и в этих условиях определяющими параметрами были параметр Фруда для жидкости и параметр Фруда для газа, $Fr_2^* = \frac{V_{gS}^2}{gD}$.

Учитывая, что плотность воды в рассматриваемых задачах величина постоянная, параметр Фруда, который называем приведенным параметром Фруда для газа, можно представить в виде $Fr_2^* = \frac{V_{gS}^2}{gD} \cdot \frac{\rho \cdot P \cdot T_{cm}}{z \cdot P_{cm} \cdot T}$, где ρ – относи-

тельная плотность газа по отношению к воздуху.

Представление определяющего параметра Фруда в форме $Fr_2^* = \frac{V_{gS}^2}{gD} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_L}$ более естественно. Подъемная способность газа должна быть пропорциональна кинетической энергии потока, которая пропорциональна квадрату скорости и массе (плотности) потока, т.е. величине $V_2^2 \cdot \rho_2$.

Литература

- Точигин А.А. Гидродинамика газожидкостных смесей в разработке и эксплуатации газоконденсатных месторождений. *Автореф. дисс. уч. ст. д.техн.н.* М. 1979.
- Ли Дж., Никенс Г.В., Уэллс М. Эксплуатация обводняющихся газовых скважин. М. ООО «Премиум Инжиниринг». 2008.
- Тер-Саркисов Р.М. Газовая промышленность. 2001.
- Бузинов С.Н., Бородин С.А., Пищухин В.М., Шулупин С.А. Стенд по отработке технологии эксплуатации скважин на поздней стадии разработки месторождений. 2010.
- Ахмедов Б.Г. Оптимизация режимов работы газовых скважин с помощью ПАВ. *Дисс. на соискание уч. ст. к.г.-м.н.* 1982.
- Одишария Г.Э., Точигин А.А. Прикладная гидродинамика газожидкостных смесей. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт природных газов и газовых технологий. Ивановский государственный энергетический университет. 1998.
- Мукерджи Х. Производительность скважин (Руководство). М. 2001.

S.N. Buzinov, S.A. Borodin, V.M. Pischukhin, A.N. Kharitonov, O.V. Nikolaev, S.A. Shulepin. **Experimental researches of diphasic systems movement in gas wells.**

One of the problems of depleted gas fields is liquid accumulation in a well trunk and as consequence a stop of its work. Traditionally applied methods of calculation of an optimum operating mode of wells under the complicated conditions on empirical formulas have a number of restrictions and assumptions. In article the optimized algorithm of calculation leaning against results of practical experiments, «GazpromVNIIGAZ» Ltd spent on experimental installation – the stand on working off of operation of gas wells at a late stage of working out is considered.

Keywords: dynamics of fluids and gases, the diphasic current, the resulted (brought) parameter of Fruda, the exhausted deposits, is minimum-admissible wells debit, wells itself rate termination.

Олег Валерьевич Николаев

ведущий инженер. Научные интересы: физическое моделирование процессов многофазовой фильтрации.

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»

142717, РФ, Пос. Развилка, Ленинский р-н, Московская область. Тел.: (495)355-96-46.

Андрей Николаевич Харитонов

к.тех.н., Зам. начальника ИТЦ Надым ООО «Газпром добыча Надым». Научные интересы: проблематика эксплуатации газоконденсатных месторождений на поздней стадии разработки.

629730, РФ, Ямало-Ненецкий автономный округ, г.Надым, ул. Полярная, 1/1 (инженерно-технический центр - ИТЦ). Тел./факс: 8 (3499) 56-70-08.