

УДК 621.516

А.И. Ходырев, д.т.н., профессор, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, e-mail: aihod@gubkin.ru; **А.А. Филиппов**, аспирант, РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, e-mail: aafil@yandex.ru; **В.Н. Мартынов**, к.т.н., генеральный директор, НПК «РАНКО», e-mail: ranko@co.ru

Исследование влияния формы центрального и бокового газовводов на сплошность жидкостного поршня насосно-компрессорных установок

Представлены результаты исследования влияния формы центрального и бокового газовводов на сплошность жидкостного поршня при работе экспериментальной насосно-компрессорной установки. Определены наиболее благоприятные формы газоввода по критерию сплошности и максимальной быстроходности установки.

Ключевые слова: насосно-компрессорная установка, жидкостный поршень, сплошность, газоввод.

Одним из средств достижения одновременной утилизации попутного нефтяного газа и повышения нефтеотдачи пластов являются дожимные насосно-компрессорные установки (НКУ), в которых сжатие газа происходит проточным жидкостным поршнем. Такие установки применяются для создания высоких давлений газа (до 40 МПа), подаваемого в скважину, при

этом может быть использован неподготовленный попутный нефтяной газ. Эффективность работы таких установок зависит от режима эксплуатации и конструктивной схемы привода [1, 2]. Кроме того, работа НКУ зависит от конструктивного выполнения подвода газа в компрессионную камеру [3]. При этом наиболее распространенными видами подвода газа в компрессионную камеру

являются центральный и боковой газовводы, общие конструктивные схемы которых показаны на рисунке 1. Каждая из приведенных выше схем газоввода имеет свои недостатки. Центральный газоввод, расположенный в компрессионной камере, вызывает дополнительные возмущения жидкостного поршня при его обтекании. Указанные возмущения при определенной ско-

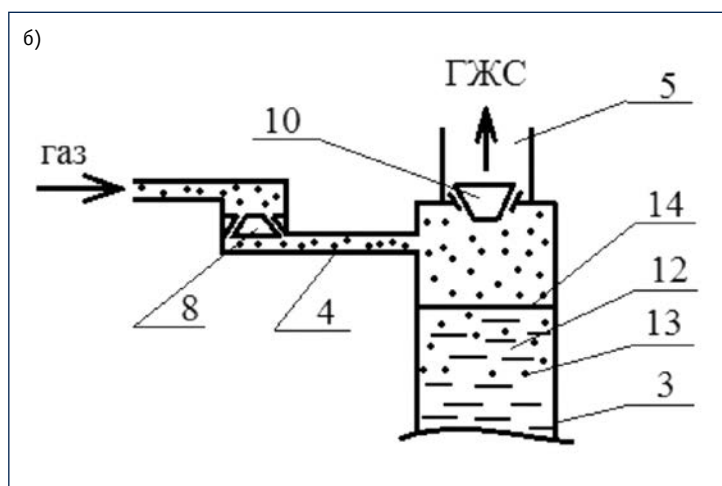
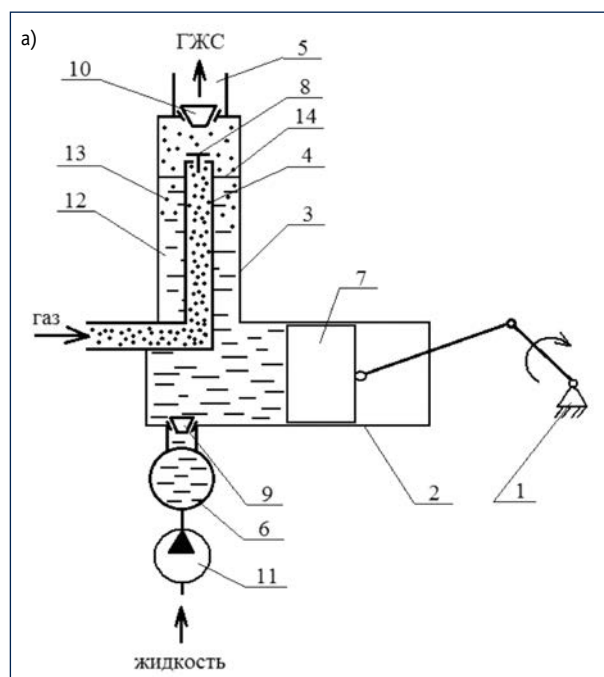


Рис. 1. Схема дожимной НКУ с центральным (а) и боковым (б) газовводом
1 – привод, 2 – цилиндр насоса, 3 – компрессионная камера, 4 – газоввод, 5 – нагнетательный коллектор, 6 – питательный коллектор, 7 – поршень, 8 – всасывающий клапан, 9 – впускной клапан, 10 – нагнетательный клапан, 11 – питательный насос, 12 – жидкостный поршень, 13 – пузырьки газа, 14 – зеркало жидкостного поршня

рости движения жидкостного поршня вызывают нарушение его сплошности – происходит вспенивание зеркала жидкостного поршня, а также поглощение и удержание пузырьков газа жидкостным поршнем. Недостатками бокового газовода являются неравномерное воздействие высокоскоростной струи всасываемого газа на зеркало жидкостного поршня и относительно большое мертвое пространство. Высокоскоростная струя всасываемого газа образуется из-за малого диаметра газовода (чем больше его диаметр, тем больше мертвое пространство и меньше производительность), а ее неравномерное воздействие обусловлено односторонним расположением газовода.

Целью настоящих исследований являлось изучение влияния формы центрального и бокового газоводов на работу дожимных НКУ на основе анализа движения жидкостного поршня и сопутствующих процессов.

Исследования проводились на стенде, позволяющем визуально изучить процессы, происходящие в компрессионной камере, и исследовать влияние различных форм и вариантов газовода на эти процессы при различной частоте вращения кривошипа на коренном валу установки и длине хода поршня. Схема стенда показана на рисунке 2.

Проведено три серии испытаний. В первой серии моделировалось движение жидкостного поршня без воздействия на него всасываемого газа в компрессионной камере с центральным газово-

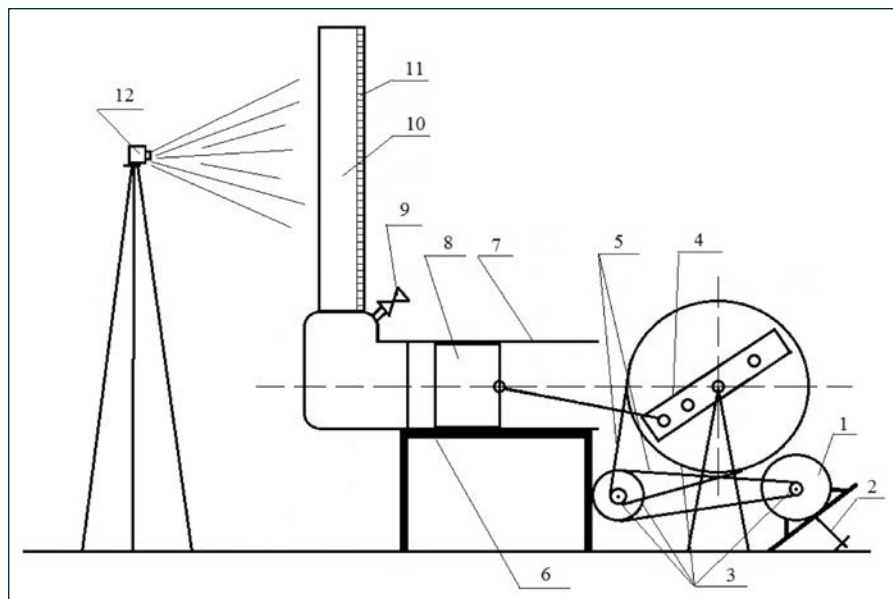


Рис. 2. Схема стенда

1 – электродвигатель, 2 – система натяжения, 3 – шкивы, 4 – кривошип с гнездами под различную длину хода, 5 – ремни клино-ременной передачи, 6 – опора, 7 – цилиндр, 8 – поршень, 9 – вентиль, 10 – прозрачная компрессионная камера, 11 – миллиметровая линейка, 12 – фотовидеокамера

дом. Во второй – движение жидкостного поршня с воздействием на него всасываемого газа в компрессионной камере с центральным газоводом с размещенным на его верхнем конце всасывающим клапаном. В третьей – движение жидкостного поршня с воздействием на него всасываемого газа в компрессионной камере с боковым газоводом, всасывающий клапан которого размещен вне компрессионной камеры.

Компрессионная камера стенда выполнена с возможностью установки цен-

тральной газовой трубы или бокового газовода.

ВО ВРЕМЯ ИСПЫТАНИЙ НА СТЕНДЕ ИЗМЕРЯЛИСЬ И ОЦЕНИВАЛИСЬ:

- длина хода жидкостного поршня;
- наличие/отсутствие всплесков на поверхности жидкостного поршня;
- высота всплесков и их месторасположение;
- наличие/отсутствие разрывов поверхности жидкостного поршня;
- наличие/отсутствие пузырьков газа в жидкостном поршне;

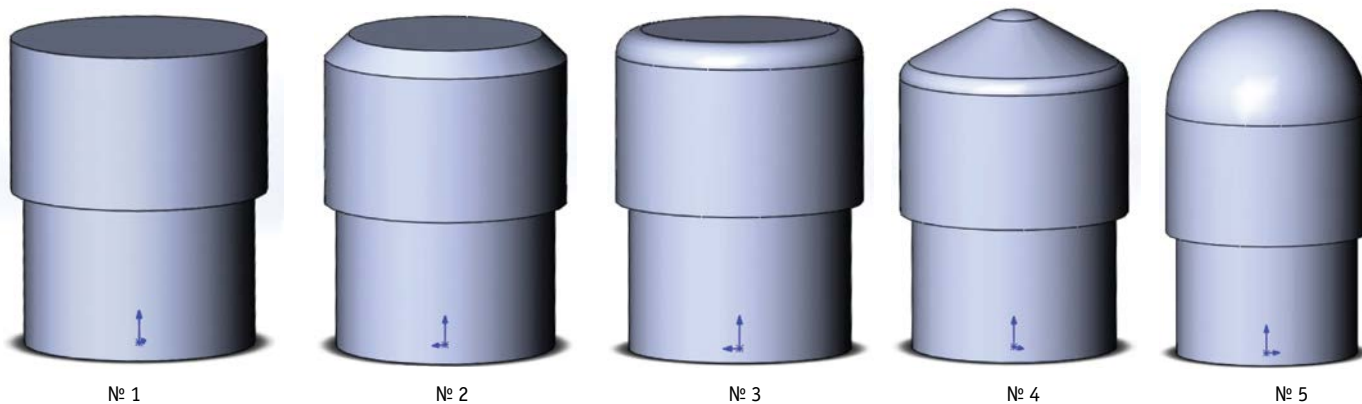


Рис. 3. Формы оголовка, имитирующего газовый клапан с различной верхней поверхностью:

№ 1 – с верхней плоской поверхностью без сколов и закруглений; № 2 – с верхней плоской поверхностью и скошенными под углом 45° краями;

№ 3 – с верхней плоской поверхностью и закругленными краями; № 4 – с верхней поверхностью в виде конуса; № 5 – с верхней поверхностью в виде полусферы

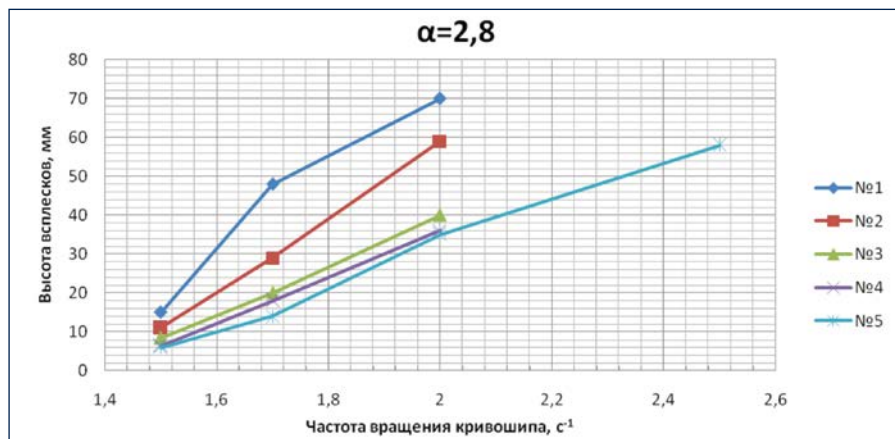


Рис. 4. Зависимость высоты всплесков от частоты вращения кривошипа для пяти форм всасывающего клапана при $\alpha=2,8$

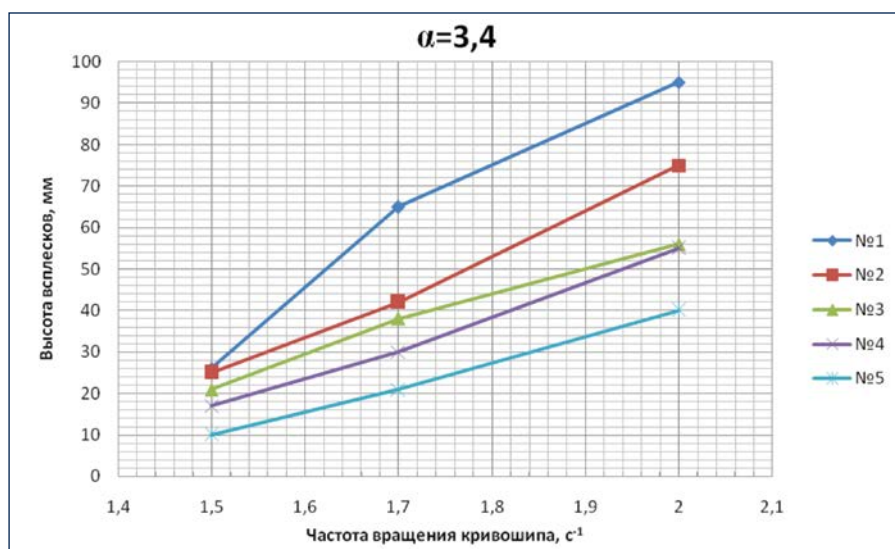


Рис. 5. Зависимость высоты всплесков от частоты вращения кривошипа для пяти форм всасывающего клапана при $\alpha=3,4$

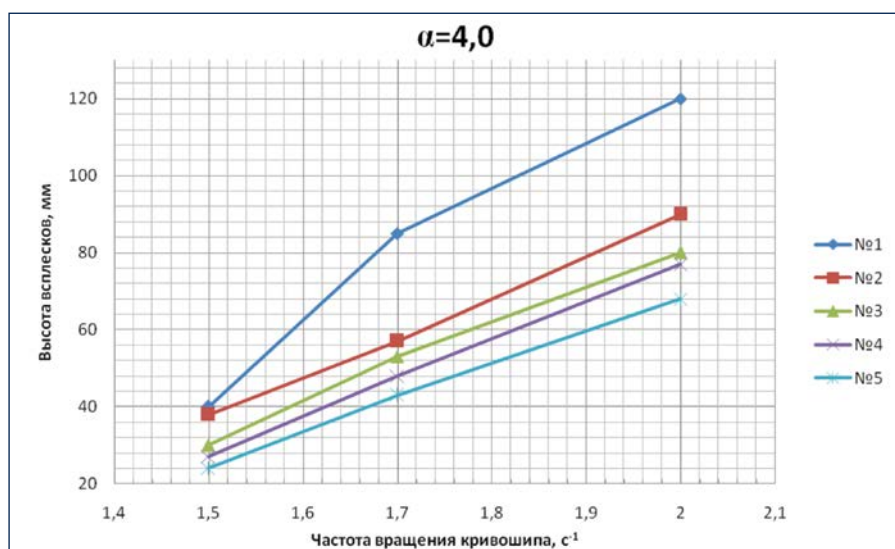


Рис. 6. Зависимость высоты всплесков от частоты вращения кривошипа для пяти форм всасывающего клапана при $\alpha=4,0$

- глубина проникновения пузырьков газа в жидкостный поршень;
- размер пузырьков газа в жидкостном поршне;
- наличие/отсутствие резонанса всплесков и их частота;
- наличие/отсутствие воронки в середине зеркала жидкостного поршня;
- глубина воронки в середине зеркала жидкостного поршня.

Все измерения проведены для трех длин хода поршня и пяти частот вращения кривошипа.

Ход испытаний фиксировался с помощью фотовидеокамеры. Число повторений каждого опыта составляло пять раз, после этого вычислялись средние значения максимального всплеска, длины, глубины и диаметра.

Фиксируемые величины вычисляются по перемещению условной границы поверхности, которая показывает перемещение жидкостного поршня без учета высоты всплесков и отрывов верхних слоев жидкостного поршня в верхней мертвой точке.

Использован безразмерный параметр, показанный в формуле (1):

$$\alpha = \frac{h}{D_{\text{ЭКВ}}}, \quad (1)$$

где $D_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный диаметр кольцевого жидкостного поршня в компрессионной камере, h – длина хода жидкостного поршня.

При этом эквивалентный диаметр вычислялся по формуле (2).

$$D_{\text{ЭКВ}} = \frac{4 \cdot S}{P}, \quad (2)$$

где S – площадь кольцевого сечения, P – периметр смачиваемой поверхности. Длина хода жидкостного поршня изменялась путем смены длины хода кривошипа, при этом для центрального газовода $\alpha=2,8; 3,4$ и $4,0$.

В первой серии испытаний исследованы пять форм верхней поверхности центрального газовода с целью определения наиболее благоприятной формы всасывающего клапана, установленного на вершине центральной газовой трубы, расположенной в компрессионной камере. Формы имитируемых верхних поверхностей клапанов показаны на рисунке 3.

На рисунках 4–6 показана зависимость высоты всплесков от частоты вращения кривошипа для всех пяти форм всасывающего клапана при трех значениях длины хода, соответствующих $\alpha=2,8$, 3,4 и 4,0.

Испытания показали, что рост частоты вращения кривошипа при всех формах всасывающего клапана способствует большому нарушению сплошности жидкостного поршня за счет появления пузырьков газа. Для реальной установки это означает увеличение объема мертвого пространства и снижение производительности вплоть до предельно допустимого значения. В эксперименте за предельную частоту вращения кривошипа принимали частоту, при которой высота всплесков и вспененного слоя составляет 250 мм. Получено, что для всасывающего клапана с верхней поверхностью в виде полусферы с ростом длины хода (α от 2,8 до 4,0) предельная частота вращения снижается с 2,5 до 1,7 с⁻¹, а для остальных – с 2,0 до 1,7 с⁻¹.

Как видно из представленных результатов, наиболее благоприятные формы всасывающего клапана из условия максимальной быстроходности установки по критерию сплошности жидкостного поршня расположены в следующем порядке: полусфера – конус – горизонтальная с закругленными краями – горизонтальная со скошенными под углом 45° краями – горизонтальная без скосов и закруглений.

По полученным результатам первой серии испытаний на компрессионной камере без поступления газа через центральный газоввод для дальнейших исследований были отобраны наиболее и наименее эффективные формы всасывающего клапана – с верхней поверхностью в виде полусферы и с

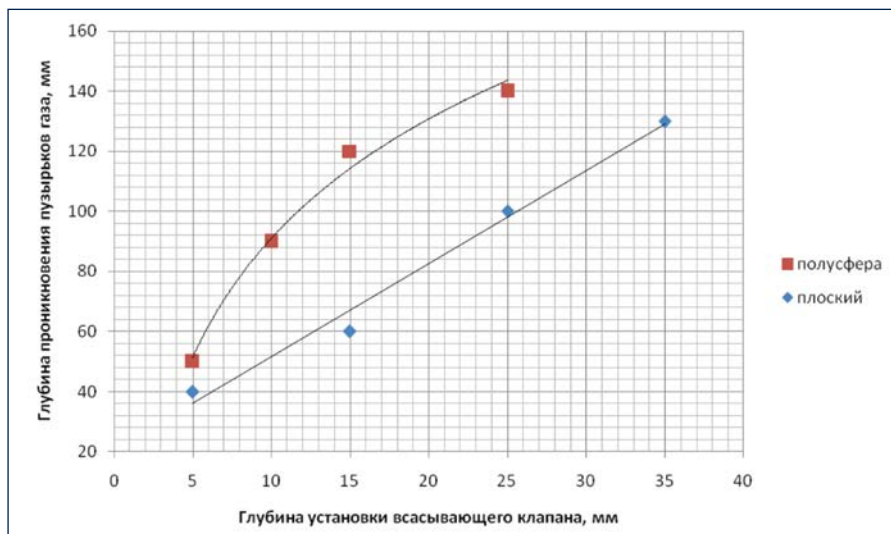


Рис. 7. График зависимости глубины проникновения пузырьков газа в жидкостный поршень от глубины установки всасывающего клапана

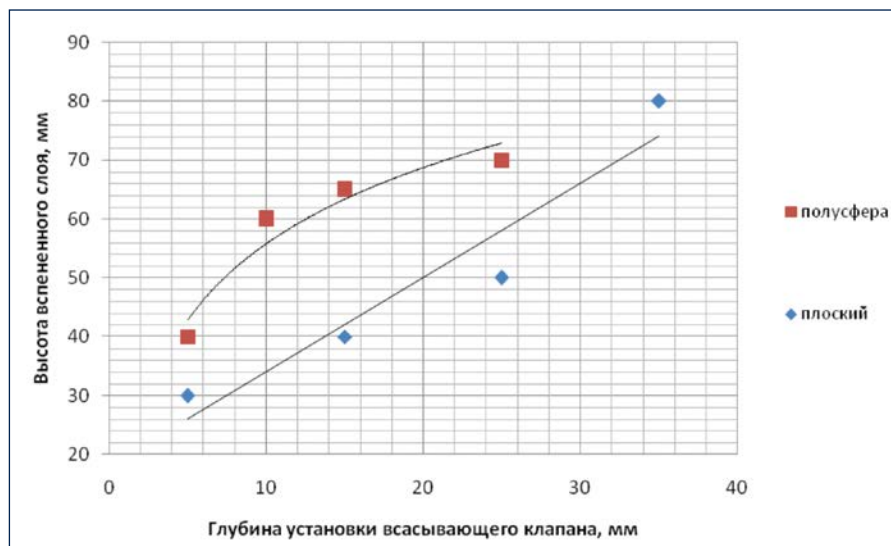
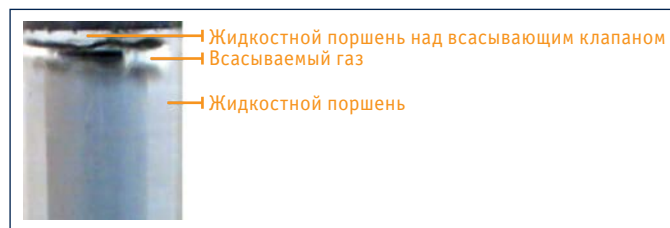


Рис. 8. График зависимости высоты вспененного слоя жидкостного поршня от глубины установки всасывающего клапана

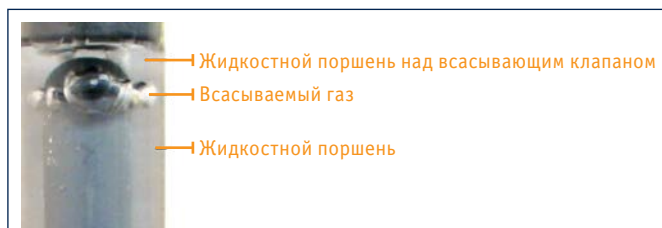
горизонтальной верхней поверхностью без скосов и закруглений.

Во второй серии испытаний исследовалось влияние глубины установки всасывающего клапана, размещенного на

верхнем конце центрального газоввода, на сплошность жидкостного поршня при всасывании газа в компрессионную камеру. За глубину установки всасывающего клапана принято расстояние



а)



б)

Рис. 9. Проникновение газа в объем жидкостного поршня в начале всасывания:

а) плоский клапан; б) клапан в виде полусферы

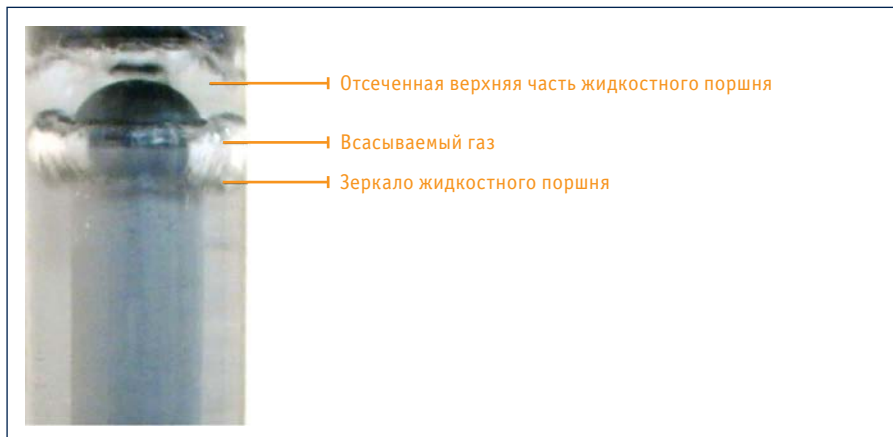


Рис. 10. Отсечение верхней части жидкостного поршня при всасывании газа в компрессионную камеру



Рис. 11. Удержание фрагментов жидкостного поршня в стадии всасывания газа в компрессионную камеру

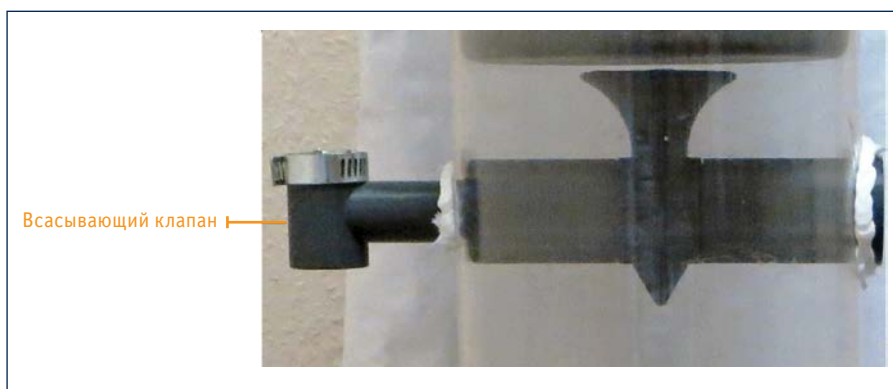


Рис. 12. Боковой газовод разработанной конструкции

от крайней верхней точки запорного элемента всасывающего клапана до торца компрессионной камеры, в котором установлен нагнетательный клапан.

Испытания проведены на минимальной длине хода жидкостного поршня и минимальной частоте вращения кривошипа.

Необходимо отметить, что всасывающий клапан с горизонтальной верхней поверхностью конструктивно имеет очевидные преимущества по минимизации глубины установки по сравнению с всасывающим клапаном, у которого верхняя поверхность выполнена в виде полусферы.

По результатам испытаний построены графики зависимости глубины проникновения пузырьков газа в жидкостный поршень и высоты его вспененного слоя от глубины установки всасывающего клапана, показанные на рисунках 7 и 8.

Испытания показали, что в начальной стадии всасывания газа из центральной газовой трубы часть жидкостного поршня еще находится выше щели всасывающего клапана, поэтому происходит движение струи газа в объем жидкостного поршня, за счет чего происходит отсечение верхней части жидкостного поршня и его удержание над поверхностью всасывающего клапана. При этом всасывающий клапан с плоской поверхностью больше способствует удержанию слоев жидкостного поршня над ним, чем всасывающий клапан с поверхностью в виде полусферы. В связи с этим удержанные фрагменты жидкостного поршня при плоском всасывающем клапане падают на зеркало жидкостного поршня позже, уже в процессе сжатия газа в компрессионной камере, а при всасывающем клапане с поверхностью в виде полусферы этот процесс происходит во время окончания стадии всасывания, т.к. закругленная поверхность неспособна длительное время удерживать фрагменты жидкостного поршня при любых рассмотренных глубинах установки всасывающего клапана. Выявлено, что падение фрагментов жидкостного поршня на его зеркало в стадии сжатия газа в компрессионной камере вызывает значительно меньшие нарушения сплошности жидкостного поршня, чем во время окончания стадии всасывания. Это можно объяснить тем, что в момент окончания стадии всасывания высота падения максимальна, а

зеркало жидкостного поршня имеет наибольшие возмущения.

Из рисунков 7 и 8 видно, что увеличение глубины установки всасывающего клапана способствует большему нарушению сплошности жидкостного поршня, в частности растут глубина проникновения газа в жидкостный поршень и высота его вспененного слоя. Это обусловлено тем, что с ростом глубины установки всасывающего клапана увеличивается объем отсекаемой части жидкостного поршня.

Процесс проникновения газа в объем жидкостного поршня при всасывании газа через клапан с плоской поверхностью и поверхностью в виде полусферы показан на рисунке 9, процесс отсечения верхней части жидкостного поршня клапаном с поверхностью в виде полусферы – на рисунке 10, а на рисунке 11 показан процесс удержания фрагментов жидкостного поршня всасывающим клапаном с плоской поверхностью.

Таким образом, испытания показали, что кроме проблемы обтекания центрального газовода при ходе жидкостного поршня вверх существует проблема отсечения и удержания фрагментов жидкостного поршня при его ходе вниз.

В третьей серии испытаний исследовалось движение жидкостного поршня с воздействием на него всасываемого газа в компрессионной камере с боковым газоводом, всасывающий клапан которого размещен вне компрессионной камеры. Авторами разработана конструкция, позволяющая снизить негативное влияние газовода при обтекании его жидкостным поршнем при ходе как вверх, так и вниз. Подана заявка на выдачу патента на полезную модель № 2014110693 с приоритетом от 20.03.2014.

Идея заключается в том, что всасывающий клапан размещен вне компрессионной камеры и сообщен с ее полостью с помощью горизонтального канала. При этом горизонтальный канал выполнен в горизонтальном патрубке, соединенном с вставкой, выполненной в виде вертикального патрубка с внутренним каналом и полого расширяющегося сопла, направленного большим своим основанием в сторону нагнетательного клапана. Каналы в горизонтальном и

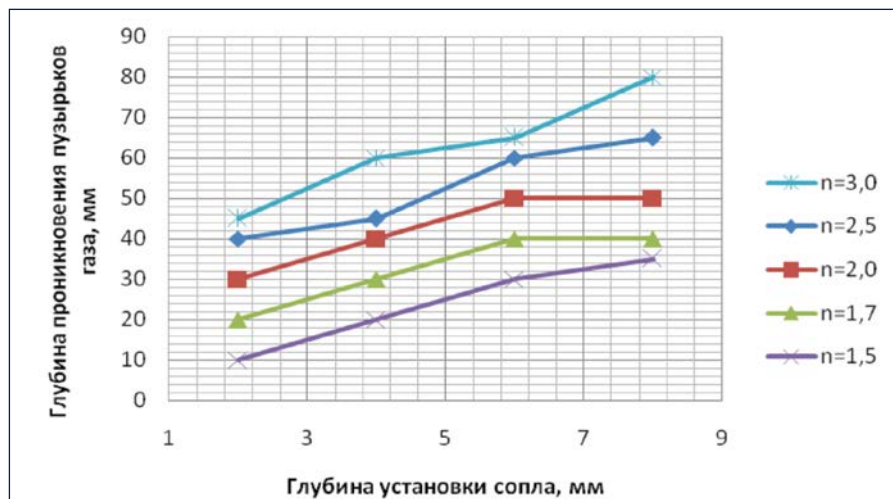


Рис. 13. Зависимость глубины проникновения пузырьков газа от глубины установки сопла при разной частоте вращения кривошипа

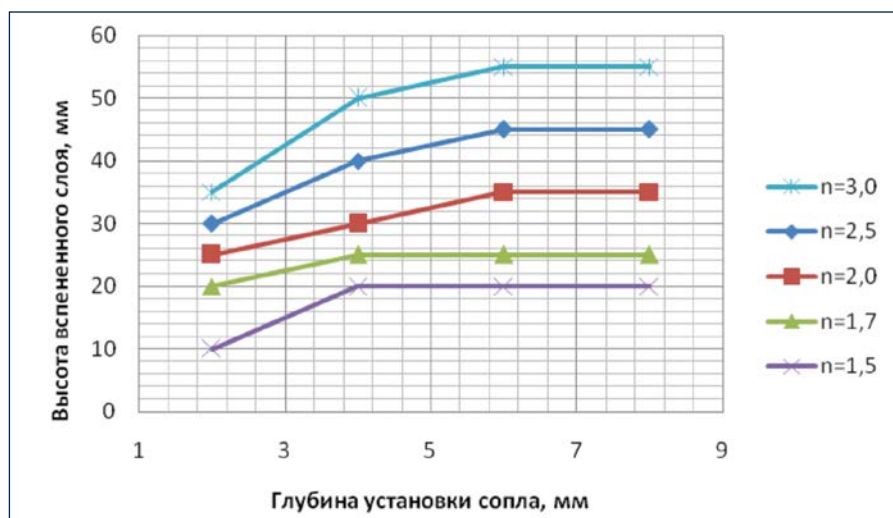


Рис. 14. Зависимость высоты вспененного слоя от глубины установки сопла при разной частоте вращения кривошипа

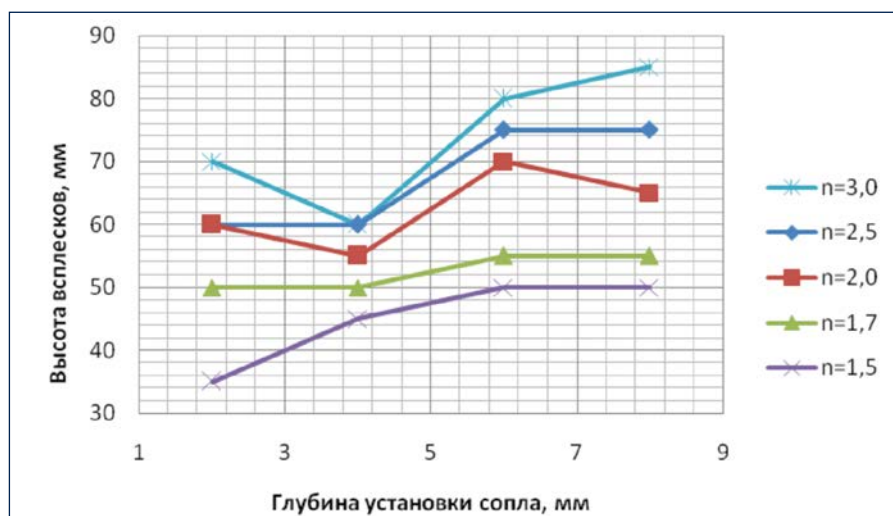


Рис. 15. Зависимость высоты всплесков от глубины установки сопла при разной частоте вращения кривошипа

вертикальном патрубках, а также полость в расширяющемся сопле образуют путь газа в компрессионную камеру. Модель предложенного газовода, изготовленная с помощью 3D-принтера и использованная при исследованиях, показана на рисунке 12.

Верхняя грань расширяющегося сопла закруглена, обеспечивая обтекание жидкостным поршнем при ходе вверх и вниз без дополнительных возмущений. Форма сопла позволяет направлять поток газа параллельно запорному элементу нагнетательного клапана, обеспечивая снижение скорости струи газа и предотвращая зависание фрагментов жидкостного поршня над газоводом. Проведены испытания предложенной конструкции на описанном ранее стенде. При этом исследовалось влияние расстояния между верхней гранью расширяющегося сопла и торцом компрессионной камеры, в котором установлен нагнетательный клапан, условно названное глубиной установки сопла, на сплошность и барботаж жидкостного

поршня при различной частоте вращения кривошипа и длине хода жидкостного поршня.

Испытания показали, что с увеличением глубины установки сопла в компрессионной камере, длины хода поршня и частоты вращения кривошипа растут глубина проникновения пузырьков газа в жидкостный поршень (рис. 13) и высота вспененного слоя (рис. 14). В то же время для высоты всплесков эта зависимость неоднозначна (рис. 15). Из рисунков 13 и 14 видно, что глубина проникновения пузырьков газа и высота вспененного слоя увеличиваются примерно в 2 раза при увеличении глубины установки сопла. При этом из рисунка 15 видно, что на средней частоте вращения кривошипа и ниже при увеличении глубины установки сопла высота всплесков сначала снижается, а затем растет. Это объясняется тем, что при относительно малых глубинах установки сопла скорость всасываемого газа довольно высока, что негативно влияет на сплошность жидкостного поршня,

вызывая дополнительные всплески. Необходимо отметить, что увеличение глубины установки сопла выше средней также приводит к большему нарушению сплошности жидкостного поршня ввиду отсечения его части всасываемым газом. Экспериментально установлено, что наиболее благоприятными глубинами установки сопла из условия максимальной сплошности жидкостного поршня являются 4–6 мм.

Таким образом, проведенное исследование позволило определить наиболее благоприятные формы всасывающего клапана и глубину его установки в центре компрессионной камеры. Установлено, что при всасывании газа происходит отсечение и удержание фрагментов жидкостного поршня, приводящее к нарушению его сплошности. Предложена и исследована конструкция бокового газовода, позволяющая минимизировать негативное воздействие всасываемого газа на жидкостный поршень.

Литература:

1. Ходырев А.И., Филиппов А.А., Мартынов В.Н. Анализ неравномерности мгновенной производительности и динамики приводной части бустерных насосно-компрессорных установок // Территория «Нефтегаз». – 2011. – № 10. – С. 74–79.
2. Патент на полезную модель RU 123471 U1. Установка для нагнетания газожидкостной смеси / В.Н. Ивановский, А.И. Ходырев, С.С. Пекин, А.А. Филиппов. Публ. 27.12.2012.
3. Филиппов А.А., Ходырев А.И. Исследование влияния формы центрального газовода на работу дожимных насосно-компрессорных установок // Тезисы докладов на X Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России». – М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2014. – С. 244.

UDC 621.516

A.I. Hodirev, Dr.Sci.Tech. professor, Gubkin university of oil and gas, e-mail: aihod@gubkin.ru; **A.A. Philippov**, post-graduate student, Gubkin university of oil and gas, e-mail: aafil@yandex.ru; **V.N. Martinov**, Cand.Tech.Sci., director general, The research-and-production company «RANKO», e-mail: ranko@co.ru

Research of influence of the form central and lateral gas-intake on uniformity the liquid piston of pump-compressor installations

Results of research of influence of the form central and lateral gas-intake on uniformity the liquid piston are presented at work experimental pump-compressor installations. Optimum forms gas-intake by criterion uniformity and the maximum rapidity of installation are defined.

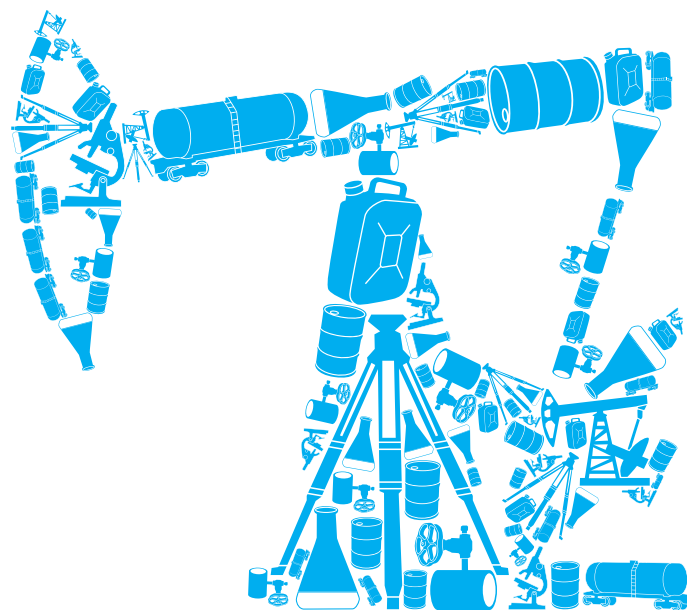
Keywords: pump-compressor installation, liquid piston, uniformity, gas-intake.

References:

1. Khodyrev A.I., Philippov A.A., Martynov V.N. Analiz neravnomernosti mgnovЕННОй proizvoditel'nosti i dinamiki privodnoi chasti busternykh nasosno-kompressornykh ustanovok (Analysis of non-uniformity of instantaneous performance and dynamics of booster pump and compressor plants power ends) // NEFTEGAS Territory. – 2011. – No. 10. – P. 74–79.
2. Patent for utility model RU 123471 U1. Ustanovka dlya nagnetaniya gazozhidkostnoi smesi (Plant for liquid gas mixture injection) / V.N. Ivanovskiy, A.I. Khodyrev, S.S. Pekin, A.A. Philippov. Published on 27.12.2012.
3. Philippov A.A., Khodyrev A.I. Issledovanie vliyaniya formy tsentral'nogo gazovvoda na rabotu dozhimnykh nasosno-kompressornykh ustanovok (Research of central gas inlet shape influence on booster pump and compressor plants operation) // Theses of reports at X All-Russia scientific and technical conference «Actual issues of development of the oil and gas industry of Russia». – Moscow: Gubkin Russian State University of Oil and Gas, 2014. – P. 244.



14-17 октября 2014



НЕФТЬ И ГАЗ. ХИМИЯ

16-я межрегиональная выставка
технологий и оборудования для
нефтяной, газовой и химической
промышленности

Официальная поддержка:
Правительство Пермского края
Администрация города Перми
Торгово-промышленная палата
Пермского края

Генеральный партнёр выставки:
Группа предприятий ОАО «ЛУКОЙЛ»
в Пермском крае

II Пермский нефтегазовый форум

Спецраздел выставки: промышленная безопасность



ВЫСТАВОЧНЫЙ ЦЕНТР
ПЕРМСКАЯ ЯРМАРКА

Место проведения
Специализированный
выставочный комплекс
«Пермская ярмарка»

614077, Россия, Пермь,
бульвар Гагарина, 65
(+7 342) 262-58-58
www.exporperm.ru

Время работы выставки
14 октября: 12.00-18.00
15-16 октября: 10.00-18.00
17 октября: 10.00-15.00