

# Исследование конструктивных и технологических параметров водогазового эжектора для утилизации попутного нефтяного газа

**У.М. Абуталипов**

к.т.н., начальник отдела новых технологий  
[AbutalipovUM@bashneft.ru](mailto:AbutalipovUM@bashneft.ru)

**А.Н. Китабов**

к.т.н., ведущий инженер отдела новых технологий  
[KitabovAN@bashneft.ru](mailto:KitabovAN@bashneft.ru)

**П.К. Есипов**

инженер отдела новых технологий  
[EsipovPK@bashneft.ru](mailto:EsipovPK@bashneft.ru)

**А.В. Иванов**

главный специалист отдела новых технологий  
 ООО «БашНИПИнефть», Уфа, Россия

**Статья посвящена рассмотрению некоторых способов повышения эффективности работы водогазового эжектора, применяемого для закачки низконапорного попутного нефтяного газа в пласт через систему поддержания пластового давления для его утилизации.**

**Рассмотрено несколько вариантов конструктивного исполнения проточных (сужающихся) частей данной установки с целью оптимизации его рабочих характеристик и увеличения показателей утилизации газа. Представлены результаты опытно-промышленных испытаний данных конструкций проточных частей, проведен сравнительный анализ полученных результатов, выявлены достоинства и**

На современном этапе развития нефтегазовой отрасли большое внимание уделяется процессам, связанным с извлечением и рациональным использованием углеводородного сырья, в частности, попутного нефтяного газа (ПНГ), сжигаемого на факельных установках. В качестве способов целесообразного расходования ПНГ могут выступать:

1. Потребление газа для удовлетворения потребностей организации (обогрев помещений, работа технологического оборудования от газовых генераторов, и т.д.);
2. Подготовка газа и дальнейшая реализация;
3. Закачка ПНГ в продуктивный пласт.

Каждый метод имеет свои преимущества, недостатки и ограничения. Использование газа для собственных нужд является оптимальным способом, однако на многих месторождениях объемы добываемого ПНГ значительно превышают требуемые.

Подготовка и транспортировка газа потребителям не всегда рациональна, поскольку непосредственно зависит от наличия потенциальных покупателей, а также связана с необходимостью строительства трубопровода.

На некоторых объектах, географическое расположение которых характеризуется значительной удаленностью от потенциальных потребителей или низким качеством продукта (например, низким содержанием метана или высоким содержанием азота и сероводорода), применение первых двух вариантов рационального использования ПНГ оказывается невозможным. В данных случаях оптимальным вариантом утилизации ПНГ без сжигания на факеле является закачка его в продуктивный пласт через водовод системы поддержания пластового давления (ППД).

Однако практическая реализация данного варианта невозможна без специальных устройств, поскольку давление ПНГ достаточно низкое (около 0,2...0,6 МПа), а давление водовода системы ППД может варьироваться от единиц до десятков МПа. Поскольку смешение различных сред возможно только при соблюдении равенства их давлений, в технологическую схему необходимо ввести специальное устройство, позволяющее преобразовывать потенциальную энергию потока жидкости системы ППД в кинетическую энергию таким образом, чтобы давление в зоне смешения сред было одинаковым.

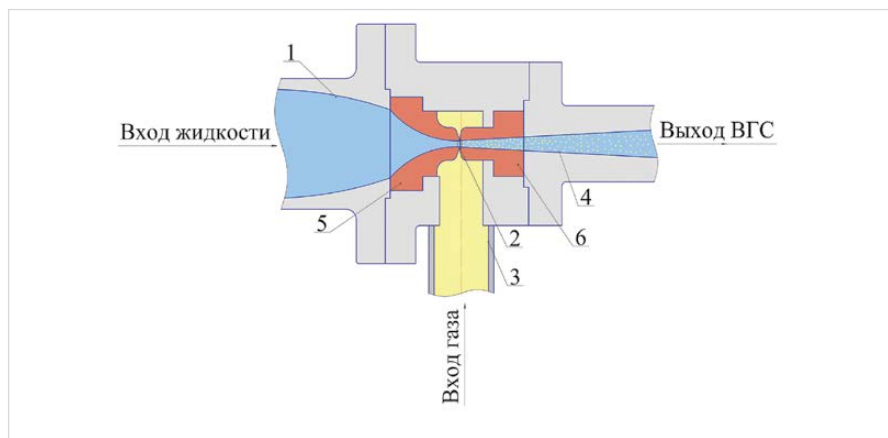


Рис. 1 — Конструкция эжектора Fig. 1 — Constructional design of the ejector

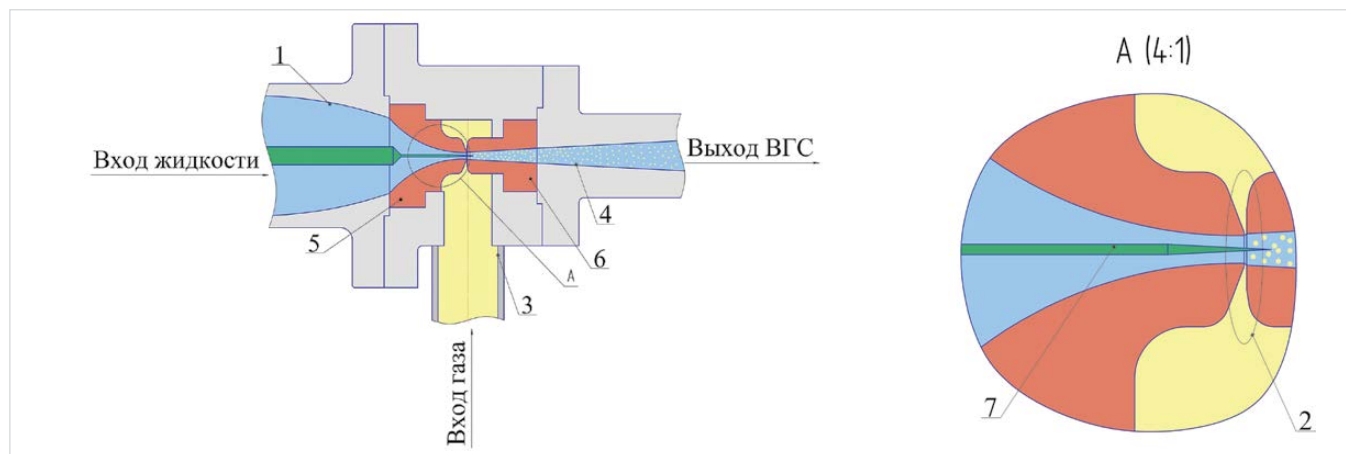


Рис. 2 — Конструкция эжектора с выдвигающейся конусной иглой Fig. 2 — Constructional design of the ejector with a retractable needle

**недостатки, определена область применения.**

**Кроме того, проведен анализ работы установки эжекции на основе статистических данных, полученных в результате периодических замеров всех технологических параметров работы установки.**

**Установлены основные параметры, оказывающие существенное влияние на объем утилизируемого газа.**

#### Материалы и методы

Экспериментальным путем были опробованы варианты исполнения эжектора. На основе статистических методов был проведен анализ технологических параметров работы установки эжекции.

#### Ключевые слова

водогазовый эжектор, сопло, втулка, попутный нефтяной газ, система ППД, камера смешения



Рис. 3 — Сопло с выдвигающейся иглой  
Fig. 3 — A nozzle with a retractable needle



Рис. 4 — Сопло с тремя проходными отверстиями  
Fig. 4 — A nozzle with three through bores

Наиболее популярным устройством, позволяющим смешивать потоки с различными давлениями, является водогазовый эжектор — струйный аппарат, позволяющий производить смешение высоконапорного жидкостного потока с низконапорным газовым потоком [1, 2]. В данном случае реализации эжектора рабочим потоком является пластовая вода, а эжектируемым потоком — ПНГ. В ООО «БашНИПнефть» разработана собственная конструкция эжектора, отличительной особенностью которой является отсутствие цилиндрической камеры смешения, что позволяет на выходе после эжектора достигать восстановления давления до 90% от входного [3]. Данная конструкция защищена патентом [4]. Схема водогазового эжектора представлена на рис. 1.

В конфузоре 1, представляющий собой переход от большего сечения к меньшему, через плавно сужающийся участок подается рабочий поток жидкости. За счет постепенного сужения в конфузоре 1, на выходе из него происходит увеличение скорости рабочего потока жидкости в 100 раз и более с одновременным снижением статического давления потока ниже давления газа за счет перехода потенциальной энергии в кинетическую энергию потока в соответствии с законом Бернулли. Далее поток рабочей жидкости проходит через зону эжекции 2, в которую также поступает поток газа через входной патрубок 3. Контактируя в зоне эжекции 2, рабочий поток жидкости и поток газа смешиваются и поступают в диффузор 4, где происходит дальнейшее смешение потоков и восстановление статического давления за счет снижения скорости потока [4].

С целью повышения технологичности конструкции и ее оперативного изменения при смене параметров работы установок, наименьшие диаметры участков конфузора и диффузора можно варьировать путем смены пары эжекционных насадок — сопла конфузора 5 и втулки диффузора 6. При этом характерный уровень потерь давления в предложенном устройстве для эжекции газа составляет 10...20% от входного давления жидкости. Среднестатистический баланс гидравлических потерь давления на уровне 15% подтвержден многомесячными испытаниями на промышленных объектах [3, 5].

Данная установка (в том числе, ее строительство) позволяет утилизировать ПНГ с минимальными затратами, при этом максимально задействуя гидравлическую энергию жидкости.

Для оценки эффективности и перспективных вариантов развития данной технологии утилизации ПНГ был проведен комплекс работ по исследованию эффективности работы эжектора с различными конфигурациями проточных частей, а также проведен анализ большинства ключевых технологических параметров работы установки, оказывающих влияние на совокупный расход газа через эжектор.

#### Исследование работы эжектора при различных конфигурациях проточных частей

Проект описанной выше конструкции эжектора был реализован на семи объектах ООО «Башнефть-Добыча». Основной проблемой при внедрении систем эжекции стало

снижение их эффективности при уменьшении объемов закачки воды.

С целью увеличения коэффициента эжекции установки и, как следствие, повышения показателей утилизации ПНГ, было разработано и испытано несколько вариантов модернизированных проточных частей эжектора:

1. сопло с тремя проходными отверстиями;
2. сопло с выдвигающейся иглой;
3. диффузор с камерой смешения.

Работа системы ППД отличается значительной нестабильностью выходных параметров ее технологического оборудования (давление на выкиде насоса, расход жидкости), а также изменением характеристик непосредственно самой системы (давление в системе, приемистость нагнетательных скважин). В случае снижения расхода жидкости через сопло конфузора может возникнуть ситуация, когда давление газа будет ниже, чем давление воды в зоне эжекции, в результате чего эжекция газа прекратится, а вода начнет поступать в газовую линию.

Для того, чтобы обеспечить возможность гибкого регулирования площади выходного сечения сопла эжектора и подстройки к изменяющимся технологическим параметрам работы установки, в частности, расхода воды, был разработан и испытан вариант эжектора, в сопле которого установлена выдвигающаяся игла (рис. 2). Отличительной особенностью данного эжектора является наличие конусной иглы 7 в центральном сечении сопла 5, перемещение которой позволяет изменять площадь проходного сечения конфузора 1. Увеличение или уменьшение проходного сечения позволяет достичь требуемого давления в зоне эжекции в условиях изменяющегося расхода воды и восстановить закачку ПНГ без остановки и замены эжекционных насадок. На данную конструкцию эжектора подана заявка на изобретение.

Общий вид сопла с иглой представлен на рис. 3. В процессе эксплуатации эжектора было опробовано несколько вариантов подобной конфигурации.

Компоновка сопла с выдвижной иглой испытана на двух объектах эжекции. Наличие иглы действительно позволяет регулировать скорость потока через сопло, и, как следствие, давление на срезе сопла и в камере эжекции. Однако длительная эксплуатация показала, что из-за конструктивных особенностей эжектора, связанных со сравнительно небольшими расходами воды (100...350 м<sup>3</sup>/сут.), большой вылет иглы и небольшой диаметр (до 3 мм) приводят к вибрациям иглы, ускоренному ее износу и снижению коэффициента эжекции вплоть до остановки закачки газа. Для обеспечения жесткости конусной иглы необходимо увеличить ее диаметр и уменьшить вылет. Таким образом, область эффективного использования регулирующей иглы, для данной типовой схемы эжектора, ограничена минимальным диаметром сопла 15 мм, что соответствует расходом воды от 1500 м<sup>3</sup>/сут.

Следующим вариантом оптимизации проточных частей эжектора являлась установка сопла с тремя проходными отверстиями, конструкция которого представлена на рис. 4. Диаметр каждого отверстия составляет 3,1 мм, что соответствует суммарной площади трех отверстий, эквивалентной площади сопла с одним отверстием, равным 6,4 мм. Данное сопло позволяет увеличить

поверхность контакта взаимодействующих сред и, как следствие, коэффициент эжекции, при прочих равных условиях. Во время испытания данной конфигурации сопла давление на входе в эжектор возросло в два раза, ожидаемого снижения давления в камере эжекции до вакуума не произошло. Практическое применение данной конструкции возможно лишь при замене существующего насосного оборудования на более мощное.

Одним из вариантов оптимизации конструкции эжектора, ориентированным на увеличение потребления энергии на эжектирование газа с одновременным повышением коэффициента эжекции, является добавление в конструкцию диффузора цилиндрической камеры смешения. Конструкция данного варианта эжектора представлена

на рис. 5. Отличительной особенностью является наличие цилиндрической камеры смешения 7 в диффузоре 4. Длина цилиндрической участка составляет 10...15 диаметров сопла с равномерным раскрытием диаметра. Установка цилиндрической части позволяет обеспечить образование однородной газожидкостной эмульсии.

Стоит отметить, что установка камеры смешения позволила значительно увеличить объем утилизируемого газа — в 2–2,5 раза, однако наряду с этим увеличились гидравлические потери, которые вносит дополнительное сопротивление камеры. В данном случае, установка камеры смешения повысила уровень гидравлических потерь с 20% до 35%.

Данное обстоятельство значительно ограничивает его использование на ряде

объектов. Данный вариант исполнения точной части эжектора является оптимальным для объектов с невысокими — ниже 10,0 МПа, давлениями закачки. Это обусловлено требованием встраивания эжектора в систему ППД без изменения типоразмеров существующего насосного оборудования и параметров закачки. Применение аналогичной конфигурации при давлениях более 10 МПа ограничено, так как потребует увеличения давления на выходе насоса до 2,5 раз, что не всегда возможно.

#### Исследование влияния технологических параметров работы эжектора на показатели утилизации ПНГ

В процессе опытно-промышленной эксплуатации на одной из установок эжекции газа неоднократно наблюдались кратковременные промежутки времени, в течение которых происходило резкое увеличение расхода газа через эжектор (с 4–5  $\text{м}^3/\text{час}$  до 15–20  $\text{м}^3/\text{час}$ ) в произвольные моменты времени. Как правило, подобные изменения продолжались от 2 до 5 ч и происходили в дневное время.

Для идентификации причинно-следственных связей подобных стохастических изменений в работе установки эжекции был проведен комплексный мониторинг параметров работы эжектора. Первым этапом мониторинга стала фиксация параметров работы эжектора, таких как: расход жидкости через эжектор ( $\text{м}^3/\text{час}$ ), давление на входе в эжектор (атм), давление на выходе из эжектора (атм), давление в газовой линии (атм), температура газа ( $^{\circ}\text{C}$ ). В результате анализа полученных данных, было установлено, что в течение четырех часов расход газа через эжектор удерживался на уровне 14–16  $\text{м}^3/\text{час}$ , после чего наблюдалось резкое падение расхода газа до значений 4–5  $\text{м}^3/\text{час}$ , полученный в результате анализа материалов видеосъемки, показан на рис. 6.

Далее был проведен анализ всех перечисленных параметров работы эжектора в переходных режимах (в моменты увеличения и уменьшения расхода газа), что позволило установить некоторые закономерности в работе эжектора.

В процессе анализа взаимосвязи показаний давления в газовой линии и расхода газа, была построена соответствующая зависимость, которая показала, что увеличение расхода газа однозначно связано с повышением давления в газовой линии. Однако данное изменение носит скачкообразный характер, поскольку резкое увеличение расхода газа (с 5  $\text{м}^3/\text{час}$  до 14  $\text{м}^3/\text{час}$ ) произошло при достижении давления газа избыточного значения — 4,95 атм. Анализ данной зависимости в момент падения расхода газа подтвердил данное заключение, поскольку при постепенном снижении давления в газовой линии резкое падение расхода газа (с 15  $\text{м}^3/\text{час}$  до 11,46  $\text{м}^3/\text{час}$ ) произошло при переходе давления газа значения 4,9 атм. Графики зависимости расхода газа через эжектор от давления в газовой линии в момент роста (а) и падения (расхода) (б) представлены на рис. 7.

Далее были проанализированы зависимости расхода газа от давлений на входе и выходе из эжектора, а также от расхода проходящей через него жидкости. В процессе эксплуатации эжектора было установлено, что повышение расхода жидкости или снижение

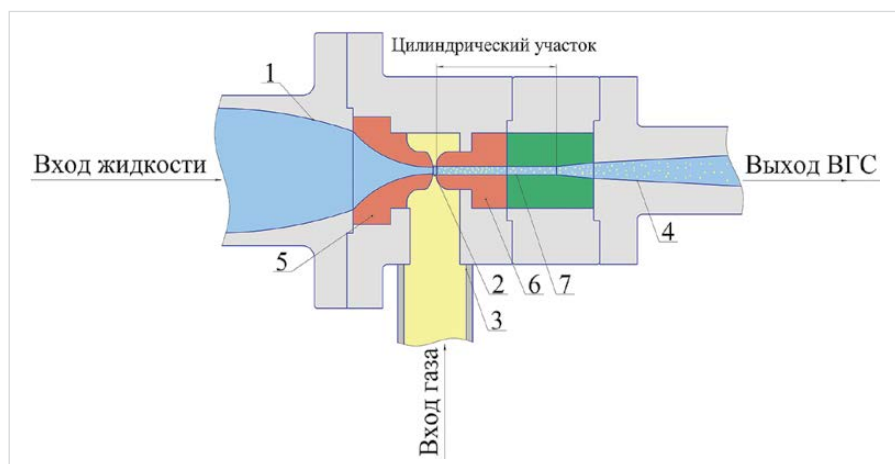


Рис. 5 — Эжектор с цилиндрическим участком ( $L=77$  мм)  
Fig. 5 — Constructional design of the ejector with circumferential part ( $L=77$  mm)

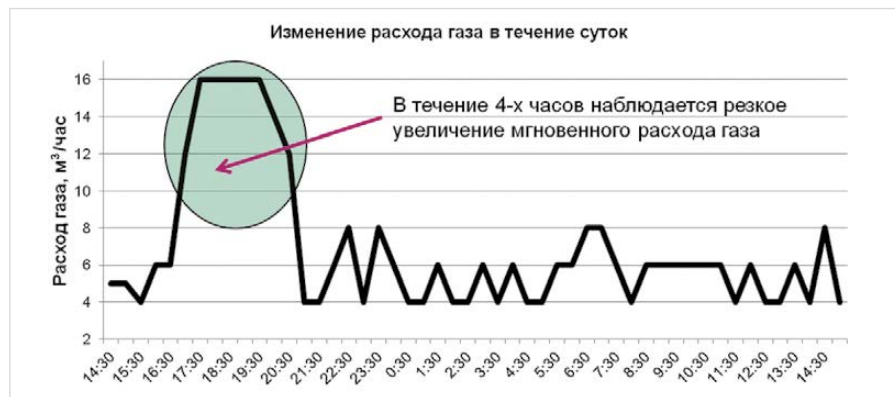


Рис. 6 — График изменений расхода газа в течение суток  
Fig. 6 — Gas flow characteristic curve within 24 hours

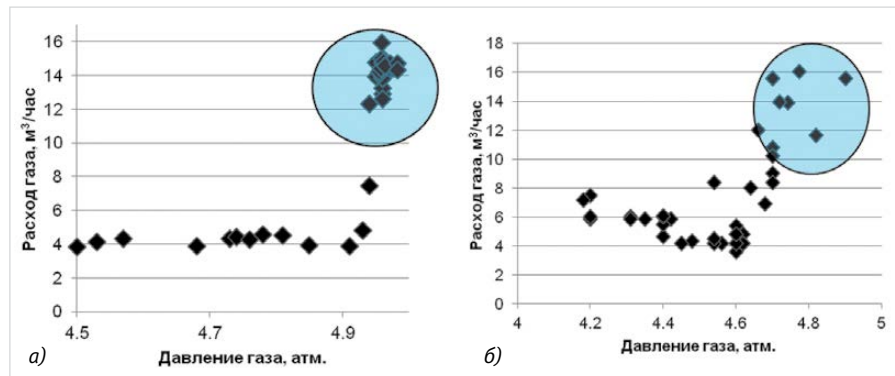


Рис. 7 — Зависимости расхода газа от давления в газовой линии:  
а) — во время роста расхода газа; б) — во время падения расхода газа  
Fig. 7 — Correlation between gas rate and stressing of gas line: а) — at the time of gas rate increasing; б) at the time of gas rate decreasing



давлений на входе и выходе из эжектора приводит к незначительному увеличению расхода газа, однако при анализе указанных зависимостей в моменты резкого увеличения расхода газа изменений в перечисленных параметрах не наблюдалось, что исключает данные параметры из списка причин резкого увеличения расхода газа. Зависимости расхода газа от указанных выше технологических параметров работы установки приведены на рис. 8.

Далее был проведен анализ зависимости расхода газа через эжектор от его температуры (рис. 9). Из графика видно, что резкое увеличение расхода газа происходит при достижении значений его температуры 29,5°C и выше. Данный аспект связан с внутренними изменениями в структуре газа, поскольку в его компонентном составе (на данной конкретной установке) присутствуют алканы с числом углеводородов в цепи больше пяти (пентан, гексан, и т.д.), которые при нормальных условиях являются жидкостями, а при температурах свыше 29,5°C переходят в газовую фазу, что способствует расширению газа и увеличению его давления, что в свою очередь позволяет увеличить подвижность газа и, как следствие, его расход. Данные о температурах кипения компонентов газа представлены в таб. 1.

#### Итоги

Проведены эксперименты нескольких вариантов модернизированных проточных частей эжектора: сопло с тремя проходными отверстиями, сопло с выдвигающейся иглой, установка камеры смешения, определены преимущества и недостатки, а также область применения каждого из вариантов:

1. Сопло с выдвигающейся иглой позволяет оперативно выполнять изменения проходного сечения сопла, однако его установка характеризуется сложностью фиксации иглы, что требует определенных конструкторских доработок для обеспечения жесткого крепления;
2. Исследование сопла с тремя проходными отверстиями показало, что необходимым условием для установки эжекционной насадки является замена насосного агрегата на более мощный, поскольку данная конфигурация проточной части характеризуется повышенным уровнем гидравлических потерь;
3. Внедрение в конструкцию эжектора цилиндрической камеры смешения позволило повысить уровень утилизации ПНГ, стабилизировать его работу в целом, однако данная модернизация предполагает использование на объектах с низкими давлениями закачки в скважины системы ППД;
4. Повышенный уровень утилизации ПНГ имеет многофакторную зависимость, и, кроме базовых условий (снижение давления на выходе из эжектора, повышение уровня закачки воды при неизменном входном давлении), необходимо выполнение и других, к примеру, обеспечение повышенного избыточного давления в газовой линии. В рассматриваемом случае установки эжекции газа данным значением является избыточное давление в газовой линии на уровне не ниже 5 атм. Кроме того, идентифицирована корреляция мгновенного расхода газа через эжектор от его температуры и установлено, что повышение расхода газа сопровождается температурой выше 29, 5°C.

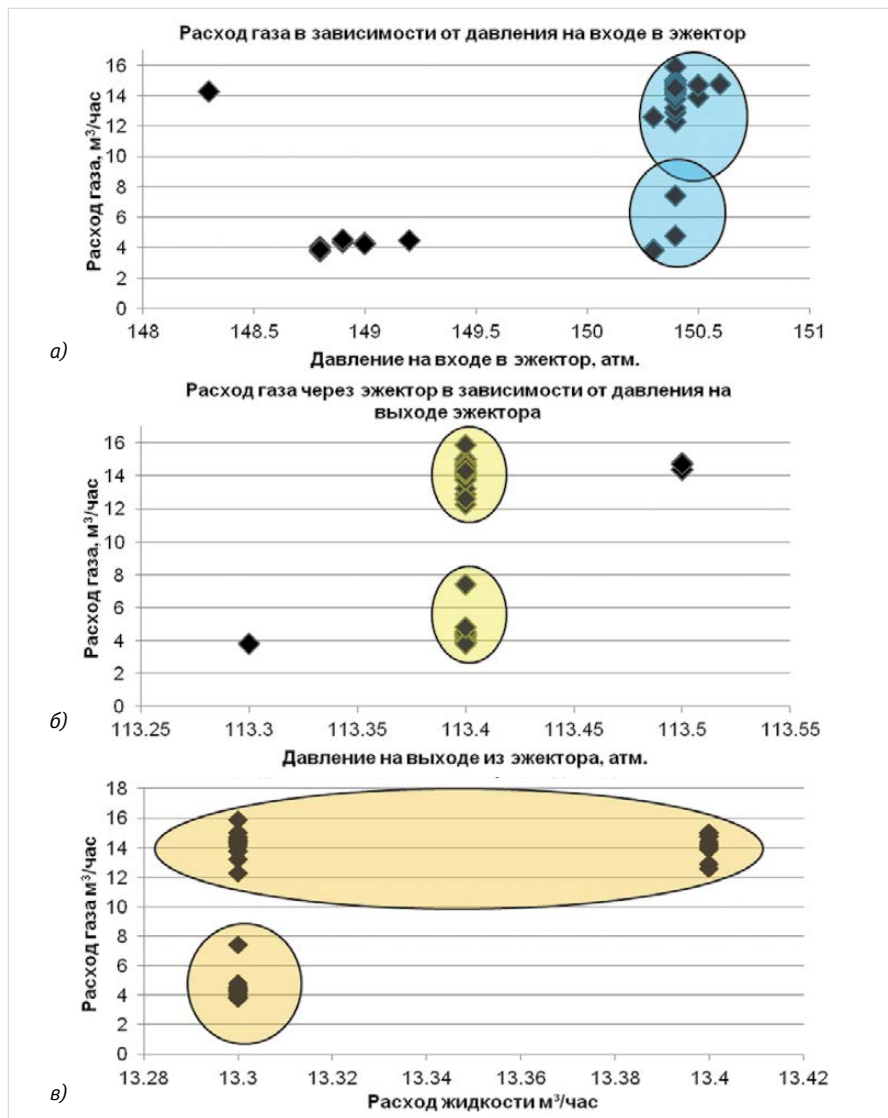


Рис. 8 — Зависимости расхода газа от параметров работы эжектора: а) от давления на входе в эжектор; б) от давления на выходе из эжектора; в) от расхода жидкости  
 Fig. 8 — Correlation between gas rate and technological parameters of gas-water ejector: a) stressing in the ejector; b) stressing out of the ejector; c) fluid rate

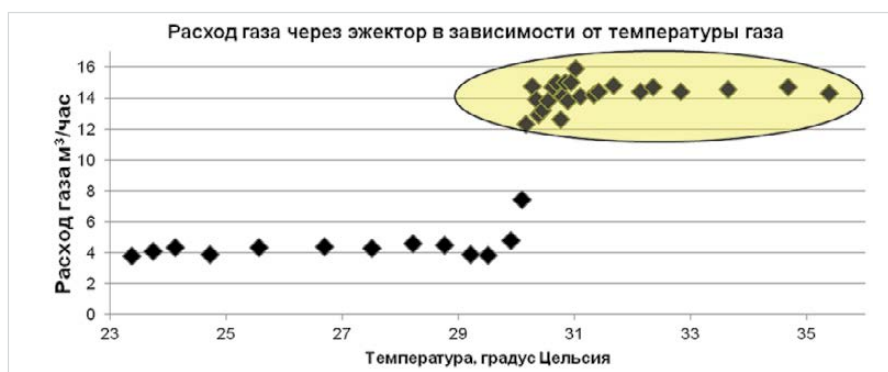


Рис. 9 — Зависимость расхода газа от его температуры  
 Fig. 9 — Correlation between gas rate and its temperature

Название	Плотность при Н.У, кг/м³	Температура кипения, °С
нео-Пентан	627	9,5
и-Пентан	626	27,85
н-Пентан	626,2	36,0
Гексан	654,8	68
Азот	1,251	-195
Метан	16,043	-161
Этан	30,07	-88

Таб. 1 — Плотность и температура кипения компонентов ПНГ  
 Tab. 1 — Tightness and boiling point of associated gas elements

## Выводы

Был проведен комплексный анализ влияния различных технологических параметров работы установки эжекции газа на показатели утилизации. Определены необходимые условия для увеличения расхода ПНГ.

Для того, чтобы обеспечить возможность гибкого регулирования площади выходного сечения сопла эжектора и подстройки к изменяющимся технологическим параметрам работы установки, в частности, расхода воды, был разработан и испытан вариант эжектора, в сопле которого установлена выдвигающаяся игла. На данную

конструкцию эжектора подана заявка на изобретение.

## Список литературы

1. Соколов Е.Я., Зингер И.М. Струйные аппараты. М.: Энергия, 1970. 288 с.
2. Цегельский В.Г. Двухфазные струйные аппараты. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 408 с.
3. Абуталипов У.М. Опыт применения газового эжектора для утилизации ПНГ через систему ППД в ОАО АНК «Башнефть» // Инженерная практика. 2013. №11 С. 28.

4. Патент №2508477. Устройство для эжекции низконапорного газа в поток жидкости, приоритет 30.08.2012, кл. F 04 F 5/04.
5. Есипов П.К., Абуталипов У.М. Внедрение установок эжекции для закачки газа через систему ППД в ООО «Башнефть-Добыча». Исследования по актуальным проблемам добычи нефти и газа, промышленного обустройства и экологии. Сборник докладов IV научно-технической конференции молодых специалистов ООО «БашНИПнефть». Уфа: БашНИПнефть, 2014. С. 87–92.

ENGLISH

GAS INDUSTRY

## Analysis of design and technological parameters of gas-water ejector for associated gas utilization

UDC 628.146

### Authors:

**Ural M. Abutalipov** — Ph.D., of the department of new technologies; [AbutalipovUM@bashneft.ru](mailto:AbutalipovUM@bashneft.ru)

**Andrey N. Kitabov** — Ph.D., leading engineer of the new technologies department; [KitabovAN@bashneft.ru](mailto:KitabovAN@bashneft.ru)

**Pavel K. Esipov** — engineer of the new technologies department; [EsipovPK@bashneft.ru](mailto:EsipovPK@bashneft.ru)

**Artem V. Ivanov** — chief specialist of the new technologies department

“BashNIPneft”, LLC, Ufa, Russian Federation

### Abstract

The article is devoted to the ways of efficiency gains of the gas-water ejector, used for the injection of low-pressure associated gas into the reservoir through the reservoir pressure maintenance system for its utilization.

Several alternative ways of designing the unit convergent sections for optimization and coefficient of gas utilization are analyzed in the article.

The results of pilot tests of the units, the comparative analysis of the results, determined advantages and disadvantages of each modification and the range of application are set out in the article.

In addition, the analysis of the ejection operation of the plant is based on statistical data from intermittent test of all process parameters of the unit.

Basic parameters with the significant influence on the volume of gas utilized are determined in the article.

### Materials and methods

The alternate design of the ejector was tested experimentally. On the basis of statistical methods technological parameters of the ejection unit were analyzed.

### Results

Experiments of the alternate design of improved flow channels of the ejector parts (a nozzle with three through bores, a nozzle with a retractable needle, the unit of the mixing chamber) were carried out, advantages and disadvantages, a field of application were identified:

1. A nozzle with a retractable needle allows to change quickly the flow area of the nozzle, but the installation of the needle is characterized by difficulties, concerning with needle detent, that is the reason for some design improvements to provide rigid attachment;
2. According to the analysis of the nozzle with three through bores, the necessary condition for the installation of jet nozzle is changing a pump to heavier, taking into account the design of the flow area is characterized by a high level of hydraulic losses;
3. Integration of the cylindrical mixing chamber into the ejector design allows to increase the level of associated gas utilization, to stabilize its work, though the upgrade involves the use of facilities in the low-pressure injection into the well reservoir pressure maintenance system;
4. Elevated level of gas utilization is correlated to different conditions, not only basic (reducing of the pressure at the outlet of the ejector, increasing of water injection under

the unchanged upstream pressure), but some others, for example, providing the increased pressure in the gas line.

In the ejector unit, this parameter is the increased pressure in the gas line not lower than 5 atm.

In addition, the correlation between the gas flow rate through the ejector and its temperature was identified; it was found that the temperature increasing above 29°C is usually followed by the increasing of gas flow rate.

### Conclusions

The comprehensive analysis of technological parameters of the unit, that can influence on the parameters of gas utilization was carried out. Necessary conditions of increasing the associated gas flow rate were found.

Tests of the alternate design of the ejector (a nozzle with a retractable needle) were carried out in order to provide the possibility of the exit area versatile tuning and adaptation to changing parameters of the unit, particularly, water flow rate. This alternate design of the ejector was applied for a patent.

### Keywords

water-gas ejector, nozzle, bush sleeve, associated gas, reservoir pressure maintenance system, mixing chamber

### References

1. Sokolov E.Ya., Zinger I.M. *Struynye apparaty* [Jet devices]. Moscow: *Energiya*, 1970, 288 p.
2. Tsegel'skiy V.G. *Dvukhfaznye struynye apparaty* [Two phase jet devices]. Moscow: *Izdatel'stvo MG TU im. N.E. Baumana*, 2003, 408 p.
3. Abutalipov U.M. *Opyt primeneniya gazovogo ezhektora dlya utilizatsii PNG cherez sistemu PPD v OAO ANK "Bashneft"* [Experience with gas ejector for PNG utilization through

the PPD system in OAO ANK “Bashneft”]. *Inzhenernaya praktika*, 2013, issue 11, pp. 28.

4. Patent №2508477. *Ustroystvo dlya ezheksii nizkonapornogo gaza v potok zhidkosti* [A device for ejecting liquid in the low pressure gas flow]. Priority from 30.08.2012, kl. F 04 F 5/04.
5. Esipov P.K., Abutalipov U.M. *Vnedrenie ustanovok ezheksii dlya zakachki gaza cherez sistemu PPD v OAO*

*«Bashneft'-Dobycha». Issledovaniya po aktual'nym problemam dobychi nefi i gaza, promyslovogo obustroystva i ekologii. Sbornik dokladov IV nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh spetsialistov OAO «BashNIPneft'»* [Research on actual problems of oil and gas, fishing settlement and ecology: Proceedings IV Scientific and technical conference of young specialists of “BashNIPneft’”]. Ufa: *BashNIPneft'*, 2014, pp. 87–92.