

## Исследование газожидкостных струйных аппаратов для добычи нефти в осложненных условиях

М.А. Сулейманов\*, О.А. Цой, Р.О. Умарбеков

РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва

E-mail: \*suleymanov.makhsud@gmail.com

**Аннотация.** Газоконденсатные залежи месторождений Восточной Сибири характеризуются наличием нефтяной оторочки – части залежи, геологические запасы и размеры которой намного меньше газовой части. Разработка оторочки может быть отложена на длительное время или вовсе не проводиться в связи с низкой рентабельностью. Одним из способов снижения себестоимости добычи при механизированном способе является применение газожидкостных струйных аппаратов, где процесс эжектирования осуществляется за счет потенциальной энергии давления газа из газовой шапки. В статье приводятся результаты экспериментальных исследований газожидкостных струйных аппаратов с использованием диафрагменных сопел и сопел Лаваля.

**Ключевые слова:** газоконденсатное месторождение, нефтяная оторочка, механизированный способ, струйный аппарат, газожидкостной струйный аппарат, диафрагменное сопло, сопло Лаваля, длина камеры смешения.

**Для цитирования:** Сулейманов М.А., Цой О.А., Умарбеков Р.О. Исследование газожидкостных струйных аппаратов для добычи нефти в осложненных условиях // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 4(27). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art14>

### Введение

Газожидкостной струйный аппарат (ГЖСА) – разнофазный струйный аппарат, рабочим потоком которого является упругая среда (газ), а эжектируемой средой – неупругая (жидкость).

На сегодняшний день следует отметить небольшое количество научных изданий, посвященных газожидкостным струйным аппаратам [1], что связано со сложностью их экспериментального исследования. Теоретическому исследованию ГЖСА с двухфазной газожидкостной смесью посвящены работы [2, 3], в последней из которых дано уравнение эжекции при условии отсутствия теплообмена между газом и жидкостью и рассмотрен режим запиранья камеры смешения. В статье приводится попытка разработать методику расчета функционирования ГЖСА с двухфазной газожидкостной смесью. Расчетные параметры характеристик работы ГЖСА, которые связывают параметры потоков во входном и выходном сечениях проточной части, получены путем формального преобразования уравнений газового эжектора при условии, что пассивная среда является несжимаемой [4]. Такой упрощенный подход не позволяет в полной мере учитывать специфику процесса течения двухфазного потока, который образуется на выходе из

проточной части [2]. В связи с этим применение уравнений [4] может привести к ошибочным результатам. Также необходимо отметить, что теоретические исследования газожидкостного струйного аппарата сравнивались с экспериментальными исследованиями только струйных аппаратов для пневмотранспорта минеральной ваты и песка. В статье [5] приводятся стендовые испытания ГЖСА с цилиндрической камерой смешения и коническим соплом. Однако существует множество других конфигураций ГЖСА, требующих экспериментального исследования.

Конструктивно струйный аппарат (СА) состоит из рабочего сопла, приемной камеры, камеры смешения (КС) и диффузора, а режим работы характеризуется безразмерными коэффициентами: степенью расширения (отношение давления перед соплом  $P_{раб}$  к давлению в приемной камере  $P_{пр}$ ) и степенью сжатия (отношение давления на выходе СА  $P_{см}$  к давлению эжектируемого потока в приемной камере).

Исследования проводились для ГЖСА с цилиндрической КС, рабочими соплами в которой применялись сопла Лаваля и диафрагменные сопла (конструктивно – это цилиндрическое тело с открытым с одной стороны основанием и отсутствием сужающейся части перед критическим диаметром). Эффективность работы ГЖСА зависит от таких параметров как расстояние от выходного сечения сопла до входного сечения в КС ( $l_{с-кс}$ ) и относительная длина проточной части КС ( $L_{отн}=L_{кс}/d_{кс}$ ), а также от длины диффузора и угла его раскрытия.

#### **Экспериментальные данные**

В вопросе повышения коэффициента полезного действия необходимо учитывать оптимальное расстояние между соплом и камерой смешения. При удалении рабочего сопла от камеры смешения увеличивается площадь сечения расширяющейся струи на входе в КС. Сечение расширенной струи рабочего потока может оказаться больше сечения камеры смешения, и, следовательно, внешняя часть струи не будет проходить в нее, образуя турбулизацию (завихрения) в приемной камере аппарата. Данный процесс характеризуется дополнительными потерями, возникающими за счет таких завихрений, что, в свою очередь, приводит к снижению эффективности СА.

В струйных насосах, где в качестве рабочего потока используется высоконапорная жидкость, согласно [4], оптимальное расстояние рекомендуется выбирать в пределах  $l_{с-кс}=(1\div 1,5)d_{кс}$ , где  $d_{кс}$  – диаметр входного сечения цилиндрической камеры смешения.

Для жидкостно-газовых эжекторов предлагается [4] использовать соотношение  $l_{c-кc}=6 \cdot d_c$ , где  $d_c$  – диаметр рабочего сопла.

Ранее этот параметр рассматривался в работах [5–7] при откачке газа высоконапорным газом. Согласно рекомендациям, для газоструйных аппаратов расстояние между соплом и камерой смешения должно быть как можно меньше, а в идеальном случае сечения должны совпадать.

На рис. 1 представлены характеристики работы ГЖСА с соплом Лавалья при  $P_{раб}=0,7$  МПа,  $P_{раб}/P_{np}=4$  и  $d_{кc}=6,2$  мм.

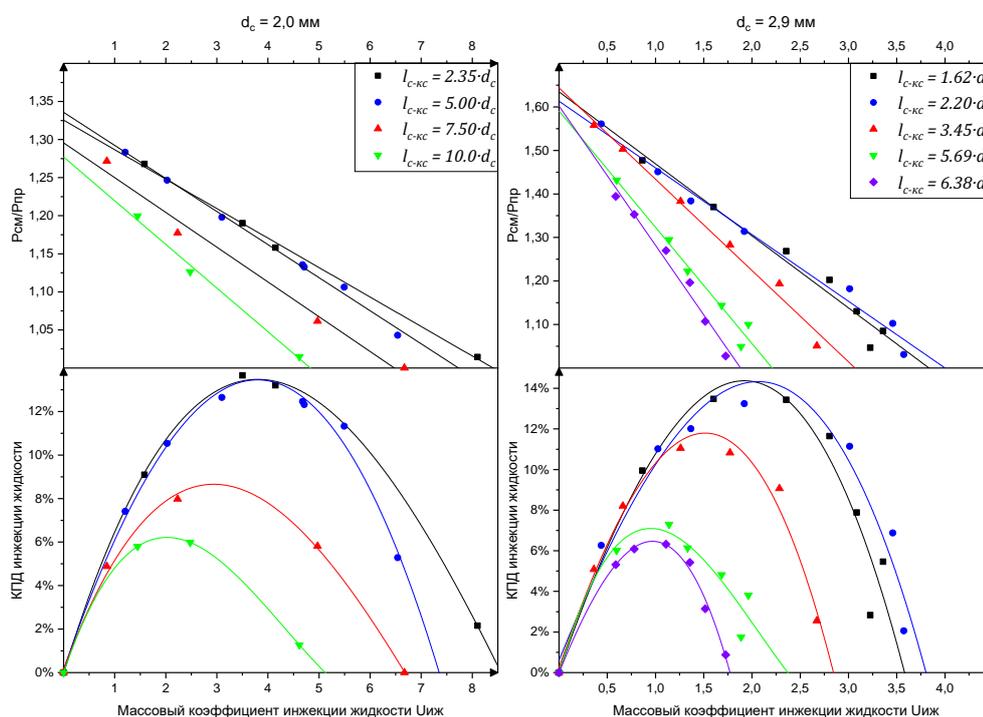


Рис. 1. Напорные и энергетические характеристики работы ГЖСА с соплом Лавалья

При работе ГЖСА с диафрагменными соплами и соплами Лавалья наблюдается отсутствие ярко выраженного кавитационного участка работы струйного аппарата. Такое поведение работы ГЖСА объясняется отсутствием критического (предельного) режима, описанного в работе [2]. Критический режим характеризуется запираемостью проточной части СА, объясняемый двумя причинами: возрастанием скорости либо струи пассивного потока на входе в КС (первый критический режим), либо смеси на выходе КС (второй критический режим) до скорости звука. Происходит это из-за разрушения профиля активного газа при его истечении в среду большей плотности – жидкость.

С уменьшением расстояния между соплом и камерой смешения наблюдается значительный рост КПД при незначительных изменениях напора ГЖСА с диафрагменными соплами. Также увеличивается массовый коэффициент эжекции, так как смешение сред происходит с меньшими потерями.

Различные исследователи отталкиваются от разных геометрических параметров для обезразмеривания  $l_{c-кc}$ , в связи с этим был проведен корреляционный анализ коэффициента полезного действия для обоих типов сопел. По результатам анализа при обезразмеривании расстояния от выходного сечения рабочего сопла до входного сечения камеры смешения рекомендуется использовать произведение диаметра сопла на само расстояние, то есть  $d_c \cdot l_{c-кc}$ . Для удобства дальнейшего исследования перестроим напорно-энергетические характеристики работы ГЖСА в координатах  $f = (d_c \cdot l_{c-кc} ; \eta_{max})$  и  $f = (d_c \cdot l_{c-кc} ; (P_{см} / P_{пр})_{opt})$  (рис. 2 и 3).

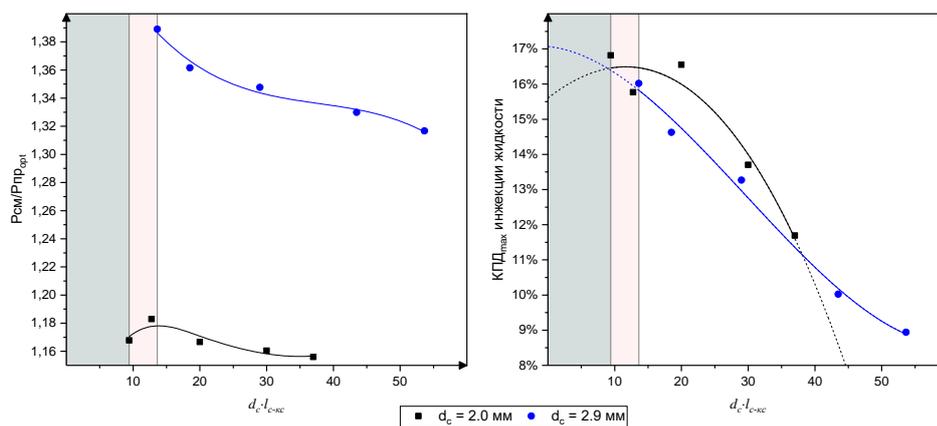


Рис. 2. Напорные и энергетические характеристики работы ГЖСА с диафрагменными соплами в координатах  $f = (d_c \cdot l_{c-кc} ; \eta_{max})$  и  $f = (d_c \cdot l_{c-кc} ; (P_{см} / P_{пр})_{opt})$

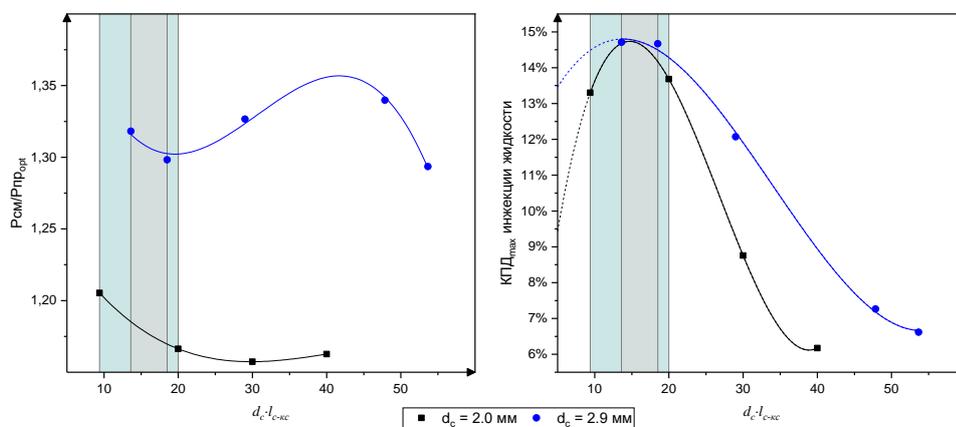
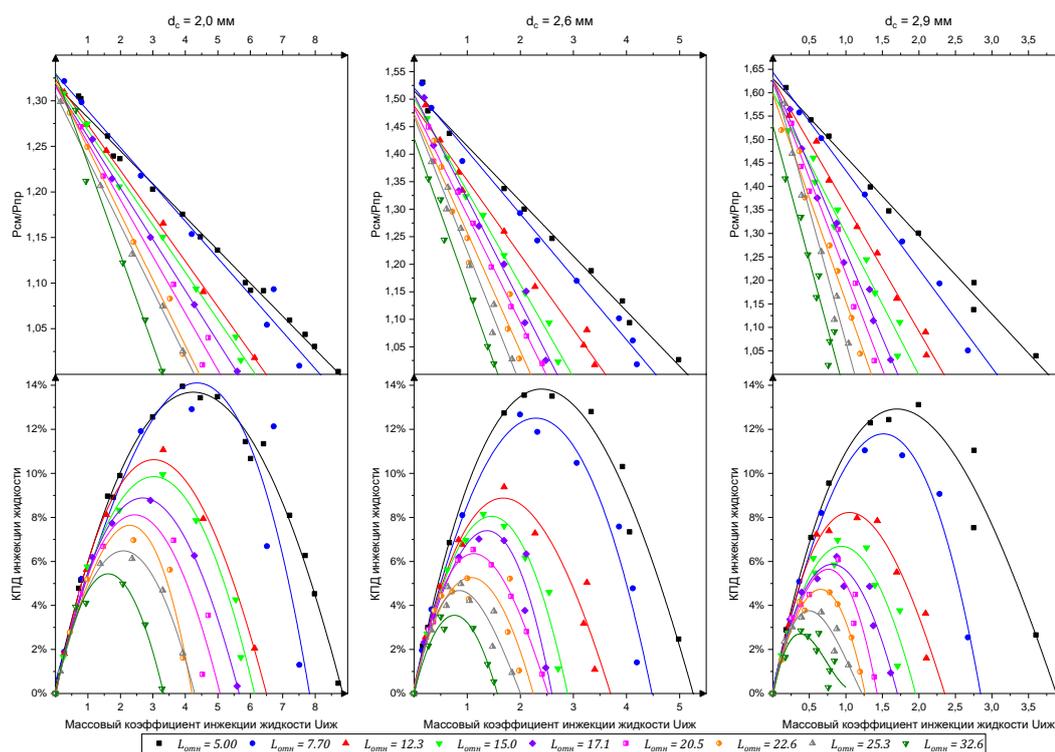


Рис. 3. Напорные и энергетические характеристики работы ГЖСА с соплами Лаваля в координатах  $f = (d_c \cdot l_{c-кc} ; \eta_{max})$  и  $f = (d_c \cdot l_{c-кc} ; (P_{см} / P_{пр})_{opt})$

Был проведен однофакторный дисперсионный анализ с уровнем значимости 0,05 и распределением Фишера. По результатам анализа рекомендации авторов [4–6] справедливы для диафрагменных сопел: расстояние от выходного сечения рабочего сопла до входного сечения камеры смешения должно быть как можно меньше, то есть  $l_{c-кc} \rightarrow 0$ , а для сопел Лавала – оптимум находится в диапазоне  $d_c \cdot l_{c-кc} = 9,4 \div 20$ .

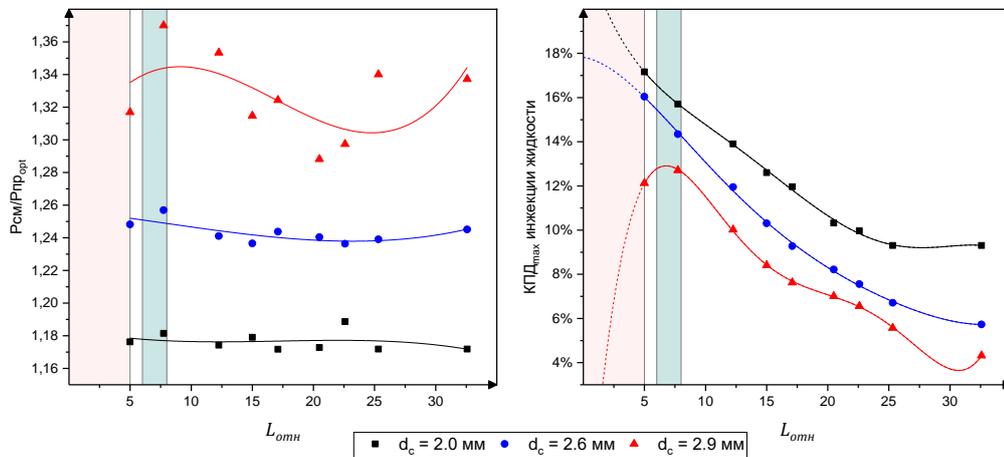
Немаловажную роль в определении эффективности работы струйных аппаратов играет размер и форма камеры смешения: ее основная цель – перемешивание и выравнивание скоростей рабочего и эжектируемого потока. При короткой КС процесс смешения двух сред не успевает завершиться и продолжается в диффузоре, а при длинной КС – часть энергии смешавшейся среды тратится на преодоление гидравлических сопротивлений. В обоих случаях это приводит к снижению эффективности ГЖСА, в связи с чем необходимо определить оптимальную длину КС. На рис. 4 представлены характеристики работы ГЖСА в зависимости от длины камеры смешения и диаметра сопла (2,0, 2,6 и 2,9 мм).



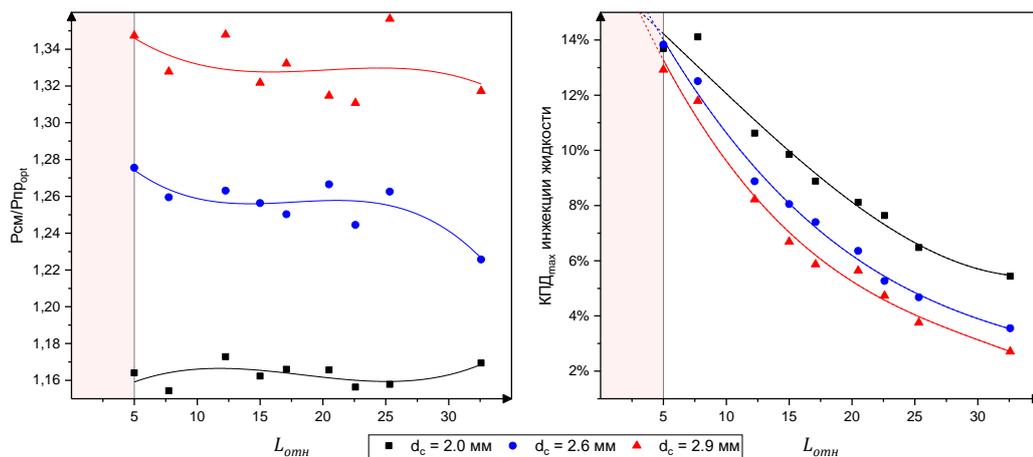
**Рис. 4.** Напорные и энергетические характеристики работы ГЖСА с соплом Лавала при разных  $L_{отн}(d_{кc})$

С уменьшением параметра относительной длины КС ( $L_{отн}(d_{кc})$ ) увеличивается КПД  $\eta_{max}$  и напор  $(P_{см}/P_{пр})_{opt}$ , а также массовый коэффициент эжекции. Надо также отметить,

что напорные характеристики имеют тенденцию сходиться при  $U_{иж} \rightarrow 0$ . На рис. 5 и 6 показаны перестроенные характеристики в координатах  $f = (L_{отн}; \eta_{max})$  и  $f = (L_{отн}; (P_{см}/P_{пр})_{opt})$ .



**Рис. 5.** Напорные и энергетические характеристики работы ГЖСА с диафрагменными соплами в координатах  $f = (L_{отн}; \eta_{max})$  и  $f = (L_{отн}; (P_{см}/P_{пр})_{opt})$



**Рис. 6.** Напорные и энергетические характеристики работы ГЖСА с соплами Лавеля в координатах  $f = (L_{отн}; \eta_{max})$  и  $f = (L_{отн}; (P_{см}/P_{пр})_{opt})$

В обоих случаях оптимальный напор ГЖСА изменяется незначительно, наблюдается значительный рост КПД при незначительных изменениях напора ГЖСА. Однофакторный дисперсионный анализ с распределением Фишера показал, что оптимальная относительная длина КС  $L_{отн}(d_{КС}) \leq 5d_{КС}$ , увеличение ее ведет к понижению КПД. Объясняется это тем, что скорости пассивного и активного потоков выравниваются задолго до конечного сечения КС и часть энергии смеси, сформированной из активного и пассивного потоков, теряется на преодоление сил трения о стенки камеры смешения.

Подтверждается вывод автора [5]: результаты показывают картину, обратную рекомендациям, полученным для гидроструйных насосных аппаратов в работе [8]. Энергообмен между потоками эжектируемой среды и струей рабочего потока начинается только при разрушении последнего. Для жидкогазовых струйных аппаратов энергообмен на начальном участке КС практически отсутствует, и только на значительном удалении от входного сечения КС рабочая струя разрушается и начинается процесс смешения двух сред. Этим обусловлены рекомендации [4, 9] удлинять проточную часть. Однако в газожидкостных струйных аппаратах разрушение рабочей струи газа при истечении в среду большей плотности происходит практически мгновенно и процесс смешения сред начинается раньше.

### Выводы

Таким образом, на основании проведенных экспериментальных исследований определены оптимальные конфигурации струйных аппаратов с цилиндрической камерой смешения с использованием диафрагменных сопел и сопел Лавалья при откачке жидкости струей высоконапорного газа (табл. 1).

Таблица 1

### Оптимальные конфигурации ГЖСА

Параметры	$r$ (относительное расстояние от выходного сечения сопла до входного сечения КС $l_{c-кс} \cdot d_{кс}$ )	$L_{отн}$ (относительная длина камеры смешения $l_{кс}/d_{кс}$ )
Виды сопел		
Диафрагменные сопла	<9,4 ( $d_r = 2,38-3,1$ )	<5
	<13,63 ( $d_r = 2,14$ )	6–8
Сопла Лавалья	9,4–20	<5

Примечание:  $d_r$  – отношение диаметра КС к диаметру сопла.

Однако необходимо и дальше продолжать исследование ГЖСА. Интерес представляет использование многопрофильных диафрагменных сопел, в которых увеличивается площадь контакта рабочего и эжектируемого потока. Применение конических камер смешения также может повысить эффективность и эжектируемую способность ГЖСА.

### Литература

1. *Цегельский В.Г.* Двухфазные струйные аппараты. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 405 с.
2. *Васильев Ю.Н.* Теория двухфазного газо-жидкостного эжектора с цилиндрической камерой смешения // Лопаточные машины и струйные аппараты: Сб. ст. М.: Машиностроение, 1971. Вып. 5. С. 175–261.
3. *Шидловский В.П.* К расчету газо-жидкостного эжектора // Известия АН СССР. 1954. № 10. С. 40–65.
4. *Соколов Е.Я., Зингер Н.М.* Струйные аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 352 с.
5. *Федоров А.Э., Вербицкий В.С., Горидько К.А.* Экспериментальные исследования и анализ характеристик работы газоструйных аппаратов для добычи нефти и газа из скважин с осложненными условиями эксплуатации // Society of Petroleum Engineers. Российская нефтегазовая техническая конференция и выставка SPE, 24–26 октября 2016 г., г. Москва. 2016. 30 с. <https://doi.org/10.2118/181956-RU>
6. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. В 2 ч.: Учеб. руководство для вузов. М.: Наука, 1991. Ч. 1. 600 с.
7. *Цегельский В.Г.* К теории газовых эжекторов с цилиндрической и конической камерами смешения // Известия ВУЗов. Сер. «Машиностроение». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. № 2. С. 46–71.
8. *Демьянова Л.А.* Теоретические и экспериментальные исследования работы струйных аппаратов на газожидкостных смесях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 24 с.
9. *Дроздов А.Н.* Разработка, исследование и результаты промышленного использования погружных насосно-эжекторных систем для добычи нефти: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 1998. 47 с.

## Research of gas-liquid jet pumps for oil production in complicated conditions

**M.A. Suleymanov\***, **O.A. Tsoy**, **R.O. Umarbekov**

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow

E-mail: \*suleymanov.makhsud@gmail.com

**Abstract.** Gas condensate deposits of Eastern Siberia fields are characterized by the presence of an oil rim – a part of the deposit, geological reserves and the size of which is much smaller than the gas part. The exploitation of oil rim may be delayed for a long time or not at all due to low profitability. One of the ways to reduce the cost of production by artificial lift is the use of gas-liquid jet pumps, where the ejection process is carried out at the expense of the potential energy of the gas pressure from the gas cap. The article presents experimental studies of gas-liquid jet pumps.

**Keywords:** gas condensate field, oil rim, artificial lift, jet pump, gas-liquid jet pump, diaphragm nozzle, Laval nozzle, mixing chamber length.

**Citation:** *Suleymanov M.A., Tsoy O.A., Umarbekov R.O.* Research of gas-liquid jet pumps for oil production in complicated conditions // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 4(27). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-27.art14> (In Russ.).

### References

1. *Tsegelskiy V.G.* Two-phase inkjet devices. Moscow: BMSTU, 2003. 405 p. (In Russ.).
2. *Vasiliev Yu.N.* Theory of a two-phase gas-liquid ejector with a cylindrical mixing chamber // Blade machines and inkjet devices: Collected papers. Moscow: Mashinostroenie, 1971. Iss. 5. P. 175–261. (In Russ.).
3. *Shidlovskiy V.P.* On the calculation of a gas-liquid ejector // *Izvestiya AN SSSR*. 1954. No. 10. P. 40–65. (In Russ.).
4. *Sokolov E.Ya., Zinger N.M.* Inkjet devices. Moscow: Energoatomizdat, 1989. 390 p. (In Russ.).
5. *Fedorov A.E., Verbitsky V.S., Goridko K.A.* Experimental studies and analysis of gas-jet device's operation characteristics for oil and gas production in abnormal operating conditions // Society of Petroleum Engineers. Moscow. 2016. 30 p. <https://doi.org/10.2118/181956-MS>
6. *Abramovich G.N.* Applied gas dynamics. In 2 parts: Textbook for technical colleges. Moscow: Nauka, 1991. 600 p. (In Russ.).
7. *Tsegelskiy V.G.* On the theory of gas ejectors having cylindrical and conical mixing chambers // Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building. Moscow. 2012. No. 3. P. 46–71. (In Russ.).

8. *Demyanova L.A.* Theoretical and experimental studies of the operation of jet devices in gas-liquid mixtures. Moscow: Synopsis of doctoral thesis. 1999. 24 p. (In Russ.)

9. *Drozdov A.N.* Development, research and results of industrial use of submersible pump-ejector systems for oil production Moscow: Synopsis of doctoral thesis. 1998. 47 p. (In Russ.).