

Received: 30.06.2025

Revised: 19.08.2025

Accepted: 29.08.2025


DOI: 10.17804/2410-9908.2025.4.057-064


THE EFFECT OF PASSIVE INLET PRESSURE ON THE JET PUMP EJECTION PROCESS



A. M. Zorin^{1, a}, L. K. Makarkin^{2, b}, and O. V. Mishchenkova^{2, c, *}

¹*CJSC Izhevsk Petroleum Research Center,
175 Svobody St., Izhevsk, 426008, Russia*

²*Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
7 Studencheskaya St., Izhevsk, Udmurt Republic, 426069, Russia*

^a  AMZorin@udn.rosneft.ru;

^b  levkononov1@gmail.com;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-8835-1184>  mov@istu.ru

*Corresponding author. Email: mov@istu.ru

Address for correspondence: ul. Studencheskaya, 7, Izhevsk, 426069, Udmurt Republic, Russia
Tel.: +7 (912) 754-4826

The paper deals with the mathematical simulation of the hydrodynamics of a jet ejection pump with variable internal geometry. The design features of the pump expand its applicability at oil field facilities due to the pre-adjustment of the device to the production parameters of the field (fluid viscosity, required daily flow rate, presence of impurities, etc.). This paper studies the effect of pressure at the passive inlet on the ejection coefficient of the jet pump. The pressure ranges from 4 to 16 MPa. The openFOAM package designed to solve problems of continuum mechanics in a stationary setting was used for the simulation. It is shown that the pump can be operated until the ejected flow pressure reaches 10 MPa. At higher pressures, the pump begins to operate in the active flow diversion mode, and it can be used to pump fluid into the well.

Keywords: hydrodynamics, jet ejection pump, mathematical simulation, flow coefficient, variable geometric characteristics

References

1. Shishlyannikov, D.I., Lavrenko, S.A., Zverev, V.Yu., Muravskiy, A.K., and Mikryukov, A.Yu. Hydroabrasive wear of work stages of electric-centrifugal well pumps for fluids with high content of mechanical impurities. *Gornyi Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten*, 2023, 7, 5–20. (In Russian). DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_5.
2. Savin, M.A., Oshivalov, M.A., Vahrameev, E.I., and Galiagin, K.S. The numerical modelling of the ejector pump working process with variable geometry of the flow channel. *Prikladnaya Matematika i Voprosy Upravleniya*, 2023, 3, 8–21. (In Russian). DOI: 10.15593/2499-9873/2023.3.01.
3. Sazonov, Yu.A. *Osnovy rascheta i konstruirovaniya nasosno-ezhektornykh ustanovok* [Fundamentals of Calculation and Design Pump-Ejectors of Installations]. *Neft i Gaz* Publ., Moscow, 2012. 305 p. (In Russian).
4. Borovykh, A.E. The one-dimensional theory of the water-jet pump with isobaric mixture in an inlet chamber. *Izvestiya Vuzov. Mashinostroenie*, 2003, 12, 20–29. (In Russian).
5. *Pump Handbook*, ed. by I.J. Karassik, J.P. Messina, P. Cooper, and C.C. Heald, 3d edition, McGraw-Hill, 2001, 1790 p.

6. Bityutskikh, S.Yu. and Spiridonov, E.K. Research and calculation of fluid dynamics in the jet-pump. *Vestnik YuUrGU. Seriya Mashinostroenie*, 2016, 16 (1), 5–15. (In Russian). DOI: 10.14529/engin160101.
7. Timurshin, A.A. Studying the effect of viscosity on the ejection process in a jet pump by numerical simulation. In: *Sbornik trudov V Vserossiyskoy naucno-tekhnicheskoy konferentsii "Aktualnye voprosy energomashinostroeniya, neftyanoy i gazovoy otrasli"* [Proceedings of the 5th All-Russian Scientific and Technical Conference on the Current Issues of Power-Plant Engineering, Oil and Gas Industry, Izhevsk, March 20–21, 2025]. IzhGTU Publ., Izhevsk, 2025, pp. 199–200. (In Russian).
8. Lomakin, V.O. and Chaburko, P.S. Effect of the geometric shape of the jet pump nozzle on its characteristics. *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana*, 2014, 12, 128–136. (In Russian). DOI: 10.7463/0815.9328000. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-geometricheskoy-formy-sopla-struynogo-nasosa-na-ego-harakteristiki>
9. Fedorov, V.V. *Razrabotka obobshchennoy gidrodinamicheskoy modeli mnogofaznykh tekheniy pri osvoenii skvazhin s primeneniem struynogo nasosa na neftegazokondensatnykh mestorozhdeniyakh* [Development of a Generalized Model of Multi-Phase Flows in Well Completion with the Use of a Jet Pump at Oil and Gas Condensate Fields: Cand. Thesis]. Moscow, 2005, 168 p. (In Russian).
10. Koroleva, M.R., Simonenko, K.E., and Chernova, A.A. Effect of gas ejector design variables on its operation efficiency. *Nauka i Tekhnika v Gazovoy Promyshlennosti*, 2017, 4 (72), 47–54. (In Russian).
11. Baimetova, E.S. Numerical simulation of hydrodynamic processes in a multichannel collector. *Trudy MAI*, 2023, 130, 8. (In Russian). DOI: 10.34759/trd-2023-130-08.
12. Baimetova, E.S. and Koroleva, M.R. Construction of a hydraulic model of a heat exchanger. *Trudy ISP RAN*, 2025, 37 (2), 129–140. (In Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-9.

Подана в журнал: 30.06.2025

УДК 532.5

DOI: 10.17804/2410-9908.2025.4.057-064


ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПАССИВНОГО ВХОДА НА ПРОЦЕСС ЭЖЕКЦИИ СТРУЙНОГО НАСОСА


А. М. Зорин^{1, а}, Л. К. Макаркин^{2, б}, О. В. Мищенко^{2, в, *}



¹ ЗАО «ИННЦ»,

ул. Свободы, д. 17, г. Ижевск, 5426008, Россия

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова»,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск, 426069, Удмуртская республика, Россия

^а  AMZorin@udn.rosneft.ru;

^б  levkononov1@gmail.com;

^в  <https://orcid.org/0000-0002-8835-1184>  mov@istu.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: mov@istu.ru

Адрес для переписки: ул. Студенческая, 7, г. Ижевск, 426069, Россия

Тел.: +7 (912) 754-48-26

Работа посвящена вопросам математического моделирования гидродинамики струйного эжекционного насоса с переменной внутренней геометрией. Конструктивные особенности рассматриваемого насоса расширяют сферу его применимости на объектах нефтепромысла за счет предварительной настройки устройства под производственные параметры месторождения (вязкость жидкости, необходимый суточный дебит, наличие примесей и т. д.). В настоящей работе исследуется влияние давления пассивного входа на коэффициент эжекции струйного насоса. Давление варьируется в диапазоне от 4 до 16 МПа. Моделирование проводилось с помощью пакета openFOAM для решения задач механики сплошной среды в стационарной постановке. Показано, что эксплуатация насоса возможна до давлений эжектируемого потока в 10 МПа. При более высоких давлениях насос начинает работать в режиме отвода активного потока и может использоваться для закачки жидкости в скважину.

Ключевые слова: гидродинамика, струйный эжекционный насос, математическое моделирование, коэффициент расхода, изменяемые геометрические характеристики

1. Введение

Задачи добычи/извлечения высоковязкой нефти и добычи смеси нефти с твердой фракцией (песок, суглинок) при высоких концентрациях примеси относятся к осложненным условиям добычи. При этом второстепенными актуальными задачами остаются повышение производительности (дебита жидкости) и обеспечение бесперебойности и работоспособности оборудования. Если при добыче нефти с высокой вязкостью основной проблемой остаются ее неньютоновские свойства и, как следствие, высокие напряжения сдвига при ее добыче, то добыча флюида в условиях высокой концентрации твердых примесей, особенно силикатной природы, сопряжена не только с регулярным остановам оборудования из-за перекрытия конгломератом твердых частиц проходного сечения труб НКТ, но и с высоким гидроабразивным износом [1] конструктивных элементов насосного оборудования. Одним из эффективных и распространенных методов решения задачи извлечения нефти является применение струйных насосов с изменяемой внутренней геометрией – устройств, функционирующих за счет потока рабочей жидкости [2]. Использование струйных насосов является наиболее эффективным способом непрерывного поддержания подачи нефти и плавного регулиро-

вания давления, однако оно требует предварительной настройки с учетом особенностей месторождения, например глубины залегания нефтеносного пласта и качества нефти (содержание газа, твердых примесей и т. п.). Подбор режимов работы, связанных с изменяемой внутренней геометрией камеры смешения насоса, возможно (и гораздо быстрее) провести на основе результатов параметрического математического моделирования.

Одномерные математические модели, описывающие гидродинамику струйных насосов, широко распространены [3–5] в литературе. Подробный анализ исторической ретроспективы исследований гидродинамики струйных насосов содержится в работе [6], где также представлены результаты экспериментально-численных исследований гидродинамики струйного насоса при турбулентном режиме истечения жидкости. В работе [7] исследовано влияние вязкости жидкости на особенности ее течения в узком сечении эжекторного устройства струйного насоса. Вопросы влияния конструктивных параметров сопла струйного насоса на его производительность рассмотрены в исследовании [8]. В работе [9] представлена обобщенная гидродинамическая модель газожидкостных течений, реализуемых при разработке скважин с применением струйного насоса. Работы [2, 7, 10] посвящены вопросам численных исследований рабочих процессов в газовых, газожидкостных и жидкостных струйных устройствах. Целью данной работы является исследование влияния вакуумметрического давления на пассивном входе в струйный насос на коэффициент расхода.

2. Постановка задачи

Объектом исследования является струйный насос, схема которого представлена на рис. 1. Высоконапорный поток рабочей жидкости подается во входной канал, откуда поток направляется в сопловую часть струйного насоса. При прохождении минимального сечения сопла давление жидкости падает, что приводит к вовлечению низконапорного потока из пассивного входа. Величина перепада давления и, соответственно, количество подводимой к устройству жидкости из пласта регулируются одним из управляющих размеров конструкции соплового эжекторного насоса – расстоянием между сопловой вставкой (3 на рис. 1 *a*) и смесителем (4 на рис. 1 *a*), которое предопределяется при установке насоса и зависит от глубины скважины, места установки насоса и качества нефти. В данной работе это расстояние фиксировано и составляет 5 мм (рис. 1 *б*). Заданными величинами являются также расход рабочей жидкости и давление на пассивном входе. Это позволяет смоделировать работу струйного насоса при различном залегании нефтяного пласта и определить минимальное давление на входе в устройство, компенсирующее потери на трение.

Из рис. 1 *a* видно, что рассматриваемый насос обладает осевой симметрией, что позволяет в предположении отсутствия радиального течения перейти к моделированию части конструкции (рис. 1 *б, в*) с использованием соответствующих граничных условий на боковых гранях. Более детально геометрия проточной части насоса показана на рис. 1 *в*. Видно, что расположение входа в смеситель и, соответственно, объем камеры смешения зависят от позиционирования сопловой вставки. Смеситель состоит из двух расположенных друг за другом частей: кольцевого канала подвода жидкости из боковой емкости с пассивным входом и прямолинейного канала круглого сечения за ним для обеспечения лучшего перемешивания потоков. Длина прямолинейной части составляет 37 мм, а общая протяженность внутренней части струйного насоса – 236 мм.

При математическом описании задачи сделаны следующие допущения: рабочие процессы считаются изотермическими, стенки насоса – адиабатическими и абсолютно гладкими. В качестве рабочей жидкости исследуется нефть в ньютоновском приближении с коэффициентом вязкости 0,04 Па·с и плотностью 800 кг/м³, которые являются постоянными величинами.

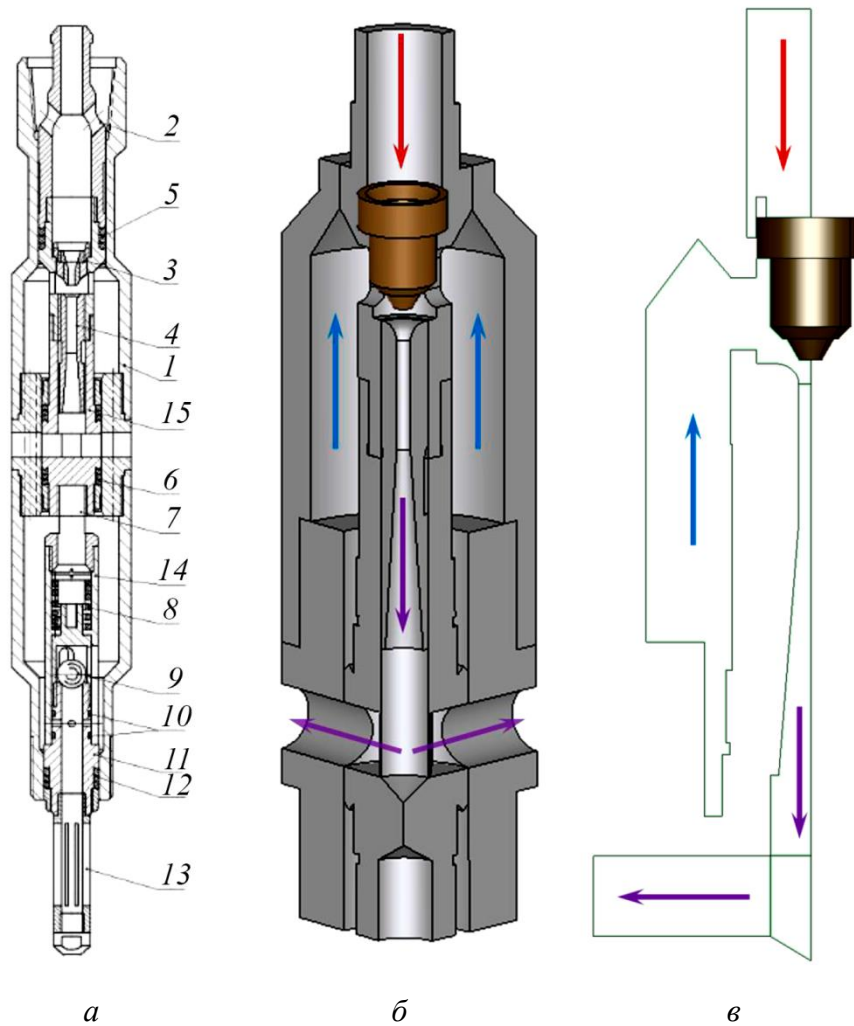


Рис. 1. Струйный насос: *а* – схема (1, 15 – корпус; 2 – хвостовик; 3 – сопловая вставка; 4 – смеситель; 5, 6 и 12 – манжеты; 7 – болт; 8 – пружина; 9 – шарик; 10 – кольцо; 11 – седло; 13 – фильтр; 14 – гильза); *б* – 3D-модель со схемой движения жидкости; *в* – геометрия проточной части насоса

С учетом сделанных допущений задача о гидродинамике струйного насоса в условиях низкого дебита жидкости может быть описана системой уравнений

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{U} = 0, \\ \frac{d\mathbf{U}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot \mathbf{P}, \\ \rho = \text{const.} \end{cases} \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости, p – давление, \mathbf{U} – вектор скорости, \mathbf{P} – тензор вязких напряжений.

Граничные условия определены следующим образом: на непроницаемых стенках использовали условие прилипания, на границе активного входа задавали расход, постоянный для всех расчетных случаев, полное вакуумметрическое давление на границе пассивного входа задавали исходя из предположения о глубине залегания нефтяного пласта и варьировали в диапазоне от 4 до 16 МПа относительно глубинного давления в скважине. Система уравнений (1) решалась приближенно на основе метода конечных объемов в рамках стационарной постановки. Численное моделирование проводится в пакете для решения задач меха-

ники сплошных сред openFOAM. Расчет проводили методом установления с использованием итерационной процедуры сходимости по невязке скорости и давления 10^{-6} . Подробно о настройках численного метода можно узнать в работах [11, 12].

3. Результаты численного моделирования

В результате расчетов были получены распределения полей давлений, скоростей, кинетической энергии, оценены интегральные характеристики потока и вычислен коэффициент эжекции K (рис. 2–4). На рис. 2 показано распределение давления и линий тока течения во внутреннем объеме струйного насоса. Анализ изменения полей давления и кинетической энергии в каналах струйного устройства показал, что снижение давления на пассивном входе приводит к существенному снижению давления рабочей жидкости и изменению скорости в зоне смешения. В боковой части струйного насоса формируются крупномасштабные вихревые течения, реагирующие на вакуумметрическое давление.

На рис. 3 показаны графики изменения модуля скорости и давления по оси струйного насоса. Характер изменения скорости обусловлен не только геометрическими особенностями сопла, но и гидродинамикой перемешивания потоков. При значениях давления эжектируемого потока до 10 МПа наблюдается постепенное снижение давления в сопловой вставке, связанное с сужением канала, и повышение скорости. В зоне смешения потоков давление также сохраняет тенденцию к снижению. В этой зоне падение давления в 2 раза ниже по сравнению с сопловой вставкой, что связано с восстановлением давления при подаче жидкости из боковой области. При этом осевая скорость также снижается. В расширяющейся части канала давление восстанавливается, а скорость течения продолжает снижаться (рис. 3 б).

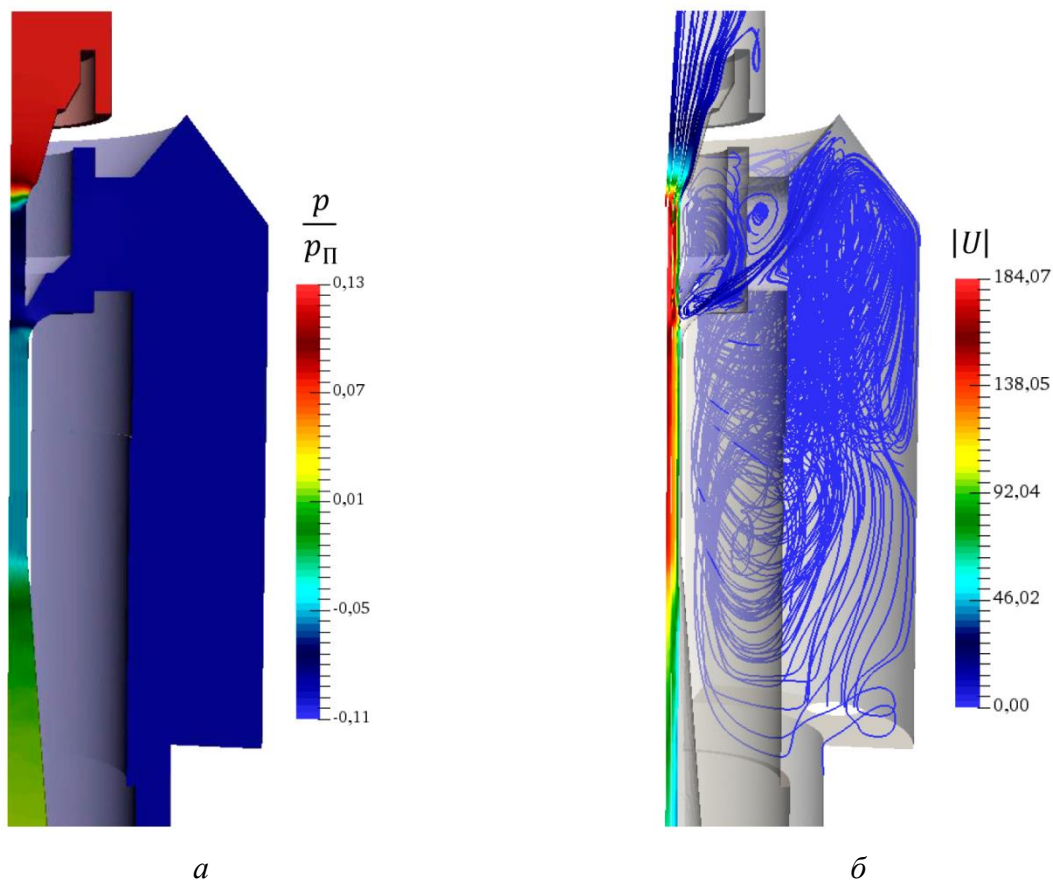


Рис. 2. Распределение давления (а) и линии тока течения (б) при давлении на пассивном входе 8 Мпа

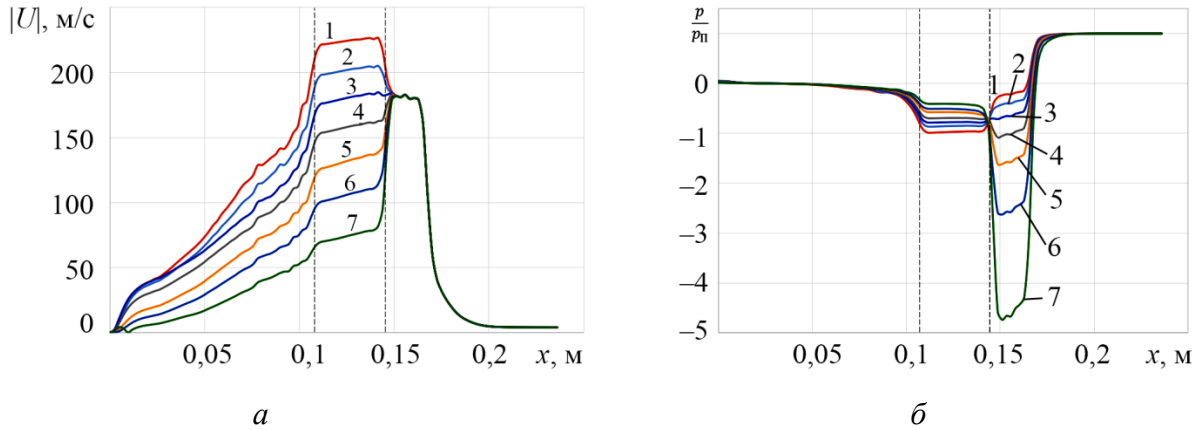


Рис. 3. Изменение скорости (а) и давления (б) жидкости по оси струйного насоса при различном давлении на пассивном входе: 1 – 4 МПа, 2 – 6 МПа, 3 – 8 МПа, 4 – 10 МПа, 5 – 12 МПа, 6 – 14 МПа, 7 – 16 МПа

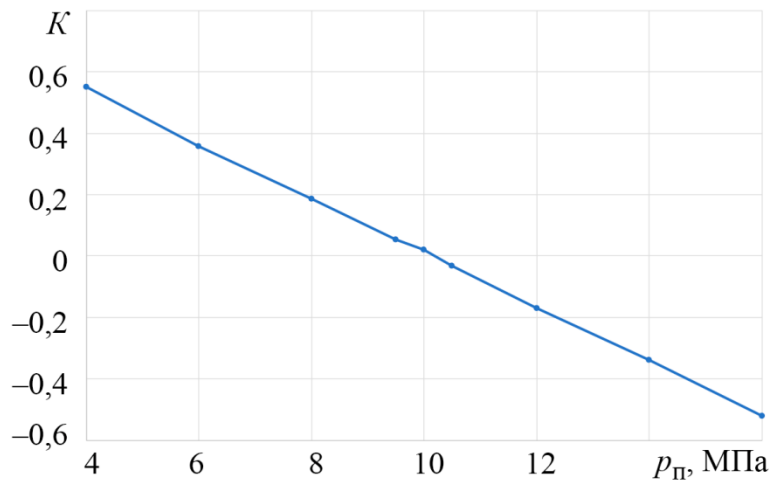


Рис. 4. Коэффициент эжекции в зависимости от давления на пассивном входе

Начиная с 10 МПа гидродинамика течения меняется. Давление за сопловой вставкой превышает давления внутри нее, и часть основного потока поступает в боковой объем насоса. В результате из-за оттока жидкости скорость основного течения снижается, давление быстрее восстанавливается, и эжектор начинает отводить жидкость, а не эжектировать ее. Коэффициент эжекции становится отрицательным (рис. 4).

4. Заключение

В работе проведено математическое моделирование гидродинамики струйного насоса при различном давлении на пассивном входе для фиксированного положения сопловой вставки. Исследования показали, что при расстоянии между сопловой вставкой и смесителем в 5 мм эксплуатация насоса (извлечение нефти) возможна до давлений эжектируемого потока в 10 МПа. При более высоких давлениях насос начинает работать в режиме отвода рабочей жидкости и может использоваться для закачки жидкости в скважину.

Литература

1. Исследование гидроабразивного износа рабочих ступеней скважинных электроцентробежных насосов, перекачивающих жидкости с высоким содержанием

- механических примесей / Д. И. Шишлянников, С. А. Лавренко, В. Ю. Зверев, А. К. Муравский, А. Ю. Микрюков // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 7. – С. 5–20. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_7_0_5.
2. Численный анализ работы струйного насоса с изменяемой геометрией проточного тракта / М. А. Савин, М. А. Ошивалов, Е. И. Вахрамеев, К. С. Галягин // Прикладная математика и вопросы управления. – 2023. – № 3. – С. 8–21. – DOI: 10.15593/2499-9873/2023.3.01.
3. Сазонов Ю. А. Основы расчета и конструирования насосно-эжекторных установок – М. : Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2012. – 305 с.
4. Боровых А. Е. Одномерная теория водоструйного насоса с изобарическим смешением в приемной камере // Известия вузов. Машиностроение. – 2003. – № 12. – С. 20–29.
5. Pump Handbook / ed. by I. J. Karassik, J. P. Messina, P. Cooper, C. C. Heald. – 3d edition. – McGraw-Hill, 2001. – 1790 p.
6. Битюцких С. Ю., Спиридонов Е. К. Исследование и расчет гидродинамики в струйном насосе // Вестник ЮУрГУ. Серия: Машиностроение. - 2016. - № 1. – DOI: 10.14529/engin160101.
7. Тимуршин А. А. Исследование влияния вязкости на процесс эжекции в струйном насосе методами численного моделирования // V Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная 75-летию со дня рождения профессора А. В. Алиева «Актуальные вопросы энергомашиностроения, нефтяной и газовой отрасли», Ижевск, 20–21 марта 2025 г. : сборник трудов. – Ижевск : Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова, 2025. – С. 199–200.
8. Ломакин В. О., Чабурко П. С. Влияние геометрической формы сопла струйного насоса на его характеристики // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2014. – № 12. – С. 128–136. – DOI: 10.7463/0815.9328000. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-geometricheskoy-formy-sopla-struynogo-nasosa-na-ego-harakteristiki> (дата обращения: 06.08.2025).
9. Федоров В. В. Разработка обобщенной гидродинамической модели многофазных течений при освоении скважин с применением струйного насоса на нефтегазоконденсатных месторождениях : дис. ... канд. техн. наук : 01.02.05. – Москва, 2005. – 168 с.
10. Королева М. Р., Симоненко К. Е., Чернова А. А. Влияние конструктивных параметров газового эжектора на эффективность его работы // Наука и техника в газовой промышленности. – 2017. – № 4 (72). – С. 47–54.
11. Байметова Е. С. Численное моделирование гидродинамических процессов в многоканальном коллекторе // Труды МАИ. – 2023. – № 130. – DOI: 10.34759/trd-2023-130-08.
12. Байметова Е. С., Королева М. Р. Построение гидравлической модели теплообменного аппарата // Труды ИСП РАН. – 2025. – Т. 37, № 2. – С. 129–140. – DOI: 10.15514/ISPRAS-2025-37(2)-9.