

Код МРНТИ 52.47.33

А. Н. Багиров¹, *Д. С. Рустамзаде¹, *А. Б. Расулзаде²¹Азербайджанский государственный Университет Нефти и Промышленности (г. Баку, Азербайджан),²Производственное объединение «Азеригаз», (г. Баку, Азербайджан)

СУПЕРЗВУКОВОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА ГАЗОРЕГУЛИРУЮЩЕЙ СТАНЦИИ С ЦЕЛЬЮ ЕГО ОЧИСТКИ

Аннотация. В представленной статье рассмотрены вопросы глубокого охлаждения природного газа и его очистки от вредных компонентов и жидкой фазы. На основе технических возможностей, создаваемых соплом Лавалья для отделения свободной и парообразной жидкости, содержащейся в газе, приведены сведения о создании и применении в последние годы газодинамических сепараторов ведущими компаниями мира, а также отечественными учеными. Целью излагаемого в статье исследования является глубокое охлаждение природного газа за счет сверхзвукового движения для очистки на газораспределительной станции (ГРС), направляемого населению и прочим бытовых потребителям газа, от жидкости и вредных компонентов. Проанализированы технологические процессы и комплексы оборудования, созданные с использованием сверхзвукового движения природного газа, определены их преимущества и недостатки, а также дано их объяснение.

Ключевые слова: природный газ, газораспределительная станция, сопло Лавалья, сверхзвуковое движение, критическая температура, число Маха.

Газ реттеу станциясында табиғи газды тазарту максатында асқындыбыстық салқындату

Аңдатпа. Ұсынылған мақалада табиғи газды терең салқындату және оны зиянды компоненттер мен сұйық фазадан тазарту мәселелері қарастырылған. Газ құрамындағы еркін және бу фазалы сұйықтықты бөлу үшін Лаваль сопласының техникалық мүмкіндіктеріне сүйене отырып, соңғы жылдары әлемдік жетекші компаниялар мен отандық ғалымдар жасаған газдинамикалық сепараторларды құру және қолдану туралы мәліметтер берілген. Мақалада баяндалған зерттеудің максаты – газ тарату станциясында (ГТС) халыққа және басқа тұрмыстық тұтынушыларға жеткізілетін газды сұйықтық пен зиянды компоненттерден тазарту үшін табиғи газды супердыбыстық қозғалыс арқылы терең салқындату. Супердыбыстық қозғалыс қолданылған табиғи газдың технологиялық процестері мен жабдық кешендері талданған, олардың артықшылықтары мен кемшіліктері анықталып, түсіндірмесі берілген.

Түйінді сөздер: табиғи газ, газ тарату станциясы, Лаваль сопласы, супердыбыстық қозғалыс, критикалық температура, Мах саны.

Supersonic cooling of natural gas at gas regulating station for purification purposes

Abstract. This study investigates the deep cooling of natural gas and its purification from harmful components and liquid phases. Utilizing the technical capabilities of the Laval nozzle to separate free and vapor-phase liquids present in the gas, recent developments and applications of gas-dynamic separators by leading international companies and domestic researchers are reviewed. The primary objective of this research is to achieve deep cooling of natural gas through supersonic flow, enabling effective removal of liquids and harmful components at gas distribution stations (GDS) for supply to the population and other domestic consumers. Technological processes and equipment systems developed based on supersonic natural gas flow are analyzed, with their advantages and limitations identified and discussed.

Key words: natural gas, gas distribution station, Laval nozzle, supersonic flow, critical temperature, Mach number.

Введение

Поскольку нефтегазодобывающие страны, наряду с нефтью, являются производителями и природного газа, термодинамические условия, возникающие при его сверхзвуковом движении, обусловленные свойствами природного газа, создают реальные возможности для решения ряда технических и технологических задач, а также для открытия нового альтернативного источника энергии. На основе технических возможностей, создаваемых соплом Лавалья для отделения свободной и парообразной жидкости, содержащейся в природном газе, в последние годы ведущими мировыми компаниями и отечественными учеными были получены первые результаты по созданию и применению газодинамических сепараторов [1, 2]. 3S-сепаратор (Super Sonic Separator) – это низкотемпературный сверхзвуковой сепаратор, конструкция которого основана на достижениях современной аэродинамики. Принцип работы 3S-сепаратора основан на охлаждении природного газа в сверхзвуковом закрученном потоке. В последние годы в Канаде, России и Китае введено в эксплуатацию несколько установок, на выходе которых точка росы газа составляет от минус 27 °С до минус 46 °С. При всех явных достоинствах этих установок отсутствие гибкой системы регулирования приводит к отклонению работы этих сепараторов от расчетного режима и, как следствие, к выходу природного газа из процесса сепарации.

Газодинамический сепаратор, разработанный азербайджанскими учеными, также создан на основе сопла Лавалья. В данной конструкции термодинамический процесс основан на теплообмене между охлажденным газом, выходя-

щим из сопла, и горячим газом, поступающим в сепаратор. В результате испытаний, проведенных на компрессорной станции № 3 НГДУ им. Н. Нариманова, удалось снизить температуру газа на 24 °С [3, 4].

Сначала рассмотрим источники и объемы природного газа, поступающего на Карадагскую газораспределительную станцию (ГРС), а также инфраструктурные объекты, параметры давления и температуры. Учитывая, что в зависимости от сезона, схемы транспортировки природного газа по магистральным трубопроводам различаются, для проводимого исследования рассмотрим источники, наиболее значимые для зимнего периода:

1. Объемы газа, добываемого на месторождении «Гюнешли», транспортируемого на берег по подводным газопроводам и перерабатываемого на Азербайджанском газоперерабатывающем заводе – 5 млн м³/сутки;
2. Объемы газа с газоконденсатного месторождения «Умид» – 6 млн м³/сутки;
3. Объемы газа, поступающие с газоконденсатного месторождения «Булла-Дениз» НГДУ имени Н. Нариманова, 2 млн м³/сутки;
4. Объемы газа с газоконденсатного месторождения «Булла-Дениз», сжимаемые посредством компрессорной станции № 3, 2 млн м³/сутки;
5. Объемы газа, отбираемые из Карадагского подземного газохранилища и направляемые в сторону Карадагской газораспределительной станции (ГРС), 8–9 млн м³/сутки в зависимости от спроса.

Указанные объемы газа в основном направляются на Карадагскую компрессорную станцию при давлении

2,3 МПа и температуре 0–10 °С (273–283 К), которая зависит от температуры окружающей среды. На станции газ сжимается до давления 4,0 МПа с помощью двух газотурбинных компрессорных установок. За исключением природного газа, поступающего со сжимающей компрессорной станции № 2 на Нефтяных Камнях, все остальные объемы газа не проходят установку осушки и подвергаются только процессу сепарации. По этой причине содержание жидких компонентов в них является более высоким.

Для дальнейшего анализа и расчетов, учитывая, что температура газа является одним из основных параметров и что в результате адиабатического сжатия в компрессоре температура повышается, можно рассчитать выходную температуру в соответствии с входными температурами по следующей формуле:

$$T_{\text{вых}} = T_{\text{вх}} \left(\frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (1)$$

где: $T_{\text{вх}}$ и $T_{\text{вых}}$ – соответственно, температуры на входе и выходе компрессора (К);

$P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$ – соответственно, давление на входе и выходе компрессора (МПа);

k – показатель адиабаты (для природного газа месторождений региона $k = 1,31$).

Проведя расчеты по формуле (1), определяем, что при температуре на входе компрессора 0–10 °С (273–283 К) температура на выходе компрессора будет находиться на уровне 38–49 °С (311–322 К). Сжатый на компрессорной станции природный газ (при работе одной установки – 5–6 млн м³/сутки, при работе двух установок – 10–12 млн м³/сутки) поступает на Карадагскую ГРС и направляется по следующим направлениям:

1. С высоким давлением (3,0–3,2 МПа) – по трубопроводу Карадаг – Северная ГРЭС;

2. Со средним давлением (1,0–1,2 МПа) – по трубопроводу Карадаг – Дигях;

3. С низким давлением (0,3 МПа) – по трубопроводу Карадаг – Масазыр – Дигях – Бина.

Поскольку объектом исследования является система низкого давления, рассмотрим процессы, происходящие в данном направлении. На Карадагской ГРС газ с давлением 3,2 МПа и объемом 500–600 тыс. м³/сутки, формирующий для подачи в трубопровод низкого давления, проходит трехступенчатый процесс дросселирования, в результате чего его давление снижается до 0,3 МПа. Дросселирование – это эффект снижения давления газового потока при прохождении через сужение.

Хотя применяемый технологический процесс способен выполнять функцию поэтапного снижения давления, в условиях низкой температуры окружающей среды не исключаются определенные осложнения.

В частности, в узле, состоящем из клапана регулирующего устройства и его седла, обеспечивающего дросселирование, могут наблюдаться явления обмерзания. Кроме того, в технологии дросселирования влага и вредные компоненты, находящиеся в составе газа в парообразном состоянии при исходных условиях, при охлаждении пере-

ходят в жидкое состояние, однако их улавливание и отделение от газового потока не обеспечивается.

Устранение указанных недостатков может быть достигнуто благодаря разработке и внедрению механизмов глубокой очистки природного газа от жидкой фазы в термобарических условиях, создаваемых сверхзвуковым движением. Принципиальное отличие и преимущество данной технологии связано с возможностью получения более низких температур. Поэтому, опираясь на теорию газовой динамики и анализ существующих образцов газодинамических сепараторов, были рассмотрены вопросы разработки модели газодинамического охладителя природного газа [5, 6].

Методы исследования

Изучение сверхзвукового движения природного газа и исследование возможностей разработки на этой основе новых технологических процессов для охлаждения газа, его осушки и отделения содержащихся в нем жидких углеводородов является одним из перспективных направлений исследований в газовой промышленности. Прежде чем рассчитать параметры сверхзвукового движения для объекта исследования, рассмотрим термодинамические и газодинамические процессы, происходящие в газопроводах. Известно, что образование жидкой фазы в газопроводах происходит по двум причинам: термодинамической и газодинамической. На протяжении всего периода разработки газового месторождения в условиях постоянного изменения термодинамических условий и состава продукции скважин поддержание стабильного оптимального режима процесса сепарации становится невозможным.

Месторождения в основном разрабатываются в режиме истощения, и в связи с быстрым падением пластового давления период низкотемпературной сепарации, возникающий за счет естественного охлаждения газа, является непродолжительным. Использование же холодильных установок с экономической точки зрения является нецелесообразным. Поэтому во многих случаях сепарация газа проводится без дополнительного охлаждения – при собственной температуре газа или при температуре, формирующейся под воздействием окружающей среды [7, 8].

В таких условиях в сепарационных установках не создается удовлетворительная среда для отделения жидких капель, и из газа отделяется лишь определенная часть жидкости. В результате процесс конденсации тяжелых углеводородов и влаги в газопроводе продолжается, что и является термодинамической причиной образования жидкой фазы.

Высокая скорость двухфазного потока в сепараторе приводит к дроблению и распылению жидкой фазы, а также к уносу капель жидкости вместе с газом из сепаратора в трубопровод. Наряду с низким коэффициентом полезного действия сепараторов, обусловленным несовершенством их конструкций, именно этим объясняется и вторая (газодинамическая) причина попадания жидкости в газопровод.

В обычном трубном сепараторе, рассчитанном по методике с учетом газодинамических характеристик газожид-

костного потока, процесс сепарации осуществляется при температуре окружающей среды. Поэтому температура точки росы сепарированного газа будет равна температуре окружающей среды. Таким образом, в обычном трубном сепараторе осуществляется высокотемпературный процесс сепарации, и из газового потока отделяется только уже сконденсировавшаяся свободная жидкая фаза. В этих условиях часть компонентов, которые могли бы конденсироваться при более низкой температуре, остается растворенной в газовой фазе. При понижении температуры окружающей среды в процессе транспортировки такие компоненты могут конденсироваться в трубопроводе, создавая опасность образования конденсата и затрудняя транспортировку газа. Таким образом, решение рассматриваемой проблемы состоит из двух частей: разработки механизма охлаждения природного газа на основе его сверхзвукового движения и создания непосредственно конструкции сепаратора.

В данной статье рассматривается решение первой задачи. Целью исследования является осушка и очистка природного газа, направляемого бытовым и коммунальным потребителям, от вредных компонентов на Карадагской ГРС на основе сверхзвукового движения газа. В технологическом процессе, применяемом на этой станции и основанном на дросселировании, в условиях низкой температуры окружающей среды могут возникать определенные осложнения. В частности, в узле, состоящем из клапана регулирующего устройства и его седла, обеспечивающего дросселирование, может наблюдаться обмерзание. Кроме того, при использовании технологии дросселирования влага и вредные компоненты, находящиеся в газе в парообразном состоянии при исходных условиях, при охлаждении переходят в жидкое состояние, однако их улавливание и отделение от газового потока не обеспечивается [9]. Устранение указанных недостатков возможно благодаря разработке и внедрению механизмов глубокой очистки природного газа от жидкой фазы в термобарических условиях, создаваемых сверхзвуковым движением. Принципиальное отличие и преимущество данной технологии заключается в возможности получения более низких температур.

Результаты

Рассмотрим параметры газодинамических охлаждающих установок, которые предполагается спроектировать для рассматриваемого объекта. Плотность природного газа, поступающего с давлением $P_1 = 3,2$ МПа и температурой $T_1 = 316,65$ К на Карадагскую ГРС в объеме $Q_{\text{норм}} = 500$ тыс. м³/сутки (5,787 м³/сек), составляет 0,76 кг/м³. Массовый расход через установку $M = \rho_{\text{норм}} Q_{\text{норм}} = 0,76 \cdot 5,787 = 4,40$ кг/сек. В зависимости от компонентного состава газа его относительная плотность составляет

$$\Delta = \frac{\rho_{\text{станд}}}{\rho_{\text{в.ст}}} = \frac{\rho_{\text{норм}} \cdot 1,073}{\rho_{\text{в.ст}}} = \frac{0,76 \cdot 1,073}{1,20445} = 0,677$$

(где $\rho_{\text{в.ст}}$ – плотность воздуха при стандартных условиях). Принимая критическое давление $P_{\text{крит}} = 4,7$ МПа и показатель адиабаты $k = 1,31$, получим:

$$\beta = \frac{P_{\text{крит}}}{P_{\text{вх}}} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,544 \quad (2)$$

Учитывая, что температура газа на выходе из компрессорной станции (КС) изменяется в интервале 38–49 °С (311–322 К), примем температуру газа на входе в охлаждающее устройство равной 43,5 °С (316,65 К) и используя формулу (3)

$$T_{\text{крит}} = T_1 \cdot \frac{2}{k+1}, \quad (3)$$

определим критическую температуру ($T_{\text{крит}} = 274$ К = 1 °С).

По диаграммам Стендинга-Катца определяем коэффициент сверхсжимаемости $Z = 0,90$. Учитывая, что молекулярная масса газа составляет 18,7 г/моль (0,0187 кг/моль), а универсальная газовая постоянная равна 8,314 Дж / (моль · К), можно определить удельную газовую постоянную данного природного газа, которая составляет 444,6 Дж / (кг · К). Этот параметр также будет использован в расчетах. Комбинированное сопло (сопло Лавала) состоит из двух частей – сужающейся и расширяющейся. В сужающейся части скорость потока увеличивается от начального значения до локальной скорости звука, а в расширяющейся части наблюдается дальнейшее увеличение скорости потока. Для уменьшения потерь энергии расширяющаяся часть плавно соединяется с сужающейся посредством специального горлового сечения. Участок с наименьшей площадью поперечного сечения, где скорость потока достигает скорости звука, называется критическим сечением, а параметры газа в этой точке – критическими параметрами. На первом этапе достигается критическая скорость, равная локальной скорости звука, а на втором этапе – максимальная скорость движения газа. Сопло Лавала используется в том случае, когда отношение давлений P_2/P_1 (где P_1 – абсолютное давление перед соплом, P_2 – абсолютное давление среды, в которую направляется поток) меньше критического отношения β . Расчет параметров для охлаждения газа проводится в следующей последовательности: заданные параметры – давление

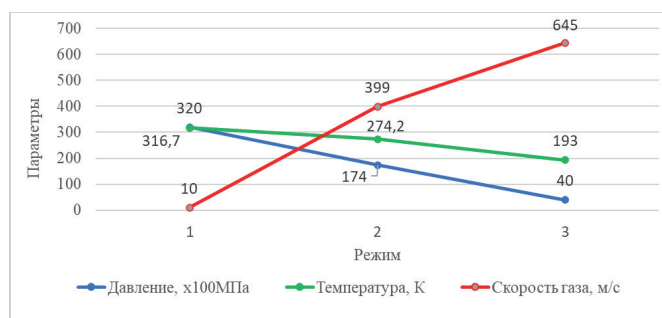


Рис. 1. Динамика изменения давления, температуры и скорости газа в процессе охлаждения.

Сурет 1. Салкындату процесінде газдың қысымы, температурасы және жылдамдығының өзгеру динамикасы.

Figure 1. Dynamics of changes in gas pressure, temperature, and velocity during the cooling process.

Таблица 1

Параметры охлаждения газа, $T = 316,65 \text{ К (43,5}^\circ\text{C)}$

Кесме 1

Газды салқындату параметрлері, $T = 316,65 \text{ К (43,5}^\circ\text{C)}$

Table 1

Gas cooling parameters, $T = 316.65 \text{ К (43.5}^\circ\text{C)}$

Параметр	Формула	Значение
Входное давление, P_1 , МПа, абс.	-	3,2
Выходное давление, P_2 , МПа, абс.	-	0,4
Плотность газа на входе (реальный газ), кг/м^3	$\rho_1 = \frac{P_1}{ZRT_1}$	25,2
Критическое давление, МПа	$P_{kr} = P_1 \cdot \beta$	1,74
Критическая температура, К	$T_{kr} = T_1 \cdot \frac{2}{k+1}$	274,2
Критическая плотность, кг/м^3	$\rho_{kr} = \rho_1 \cdot \beta^{\frac{1}{k}}$	15,8
Критическая скорость, м/с	$a_{kr} = \sqrt{k \cdot R \cdot T_{kr}}$	399
Максимальная (теоретическая) скорость, м/с	$V_{max} = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot R \cdot T_1}$	1090
Выходная скорость, м/с	$V_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$	680
С учетом реального газа, м/с	$V_2^{(Z)} = V_2 \cdot \sqrt{Z}$	645
Выходная температура, К	$T_2 = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}}$	193
Скорость звука, м/с	$a_2 = \sqrt{k \cdot R \cdot T_2}$	335
Относительная скорость (число Маха)	$M_2 = \frac{V_2^{(Z)}}{a_2}$	1,93
Площадь критического сечения сопла, м^2	$A_{kr} = \frac{M}{\rho_{kr} \cdot V_{kr}}$	0,000696
Диаметр горловины сопла, м	$d_{kr} = \sqrt{\frac{A_{kr}}{0.785}}$	0,0298 $\approx$ 0,030

газа на входе P_1 , температура T_1 ; плотность газа ρ_1 и расход M ; давление газа на выходе P_2 . По длине сопла рассчитываются критическое давление, температура, плотность, скорость. Далее вычисляются выходные скорость и температура, скорость звука и число Маха, площадь и диаметр критического сечения сопла.

Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Обсуждение результатов

Из таблицы 1 видно, что при применении предлагаемой технологии температура газа, транспортируемого по рассматриваемому трубопроводу, значительно снижается и может достигать 193 К (-80°C). При таких температурах

влаги и вредные компоненты, находившиеся в газе в парообразном состоянии при исходных условиях, переходят в жидкое состояние, что позволяет осуществить их улавливание и отделение от газового потока без дополнительного энергопотребления.

На графике 1 показаны изменения давления, температуры и скорости газа в процессе охлаждения. По горизонтальной оси обозначены параметры: 1 – на входе, 2 – в критическом сечении, 3 – на выходе. Из графика видно, что при снижении давления от 3,2 до 0,4 МПа и увеличении скорости газа от 10 до 645 м/с температура газа изменяется в диапазоне 317–193 К, то есть происходит снижение на 124 К. Особое значение исследования заключается

в том, что предлагаемый метод позволяет достичь температуры $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, что является важным фактором для глубокой очистки природного газа от жидких компонентов.

Закключение

1. Проведенное исследование показало, что на газораспределительных станциях возможно очищение газа от жидкой фазы и вредных компонентов за счет сверхзвукового движения газа.

2. При заданных параметрах поток природного газа в сопле достигает критического режима с переходом в сверхзвуковое течение ($M \approx 1.9$).

3. Учет коэффициента сжимаемости Z приводит к увеличению плотности газа и уточнению геометрических параметров сопла.

4. Полученный диаметр критического сечения составляет порядка 30 мм, что подтверждает компактность конструкции при заданном расходе.

5. Полученные результаты носят универсальный характер, поэтому разработанные рекомендации целесообразно применять на аналогичных промышленных объектах.

Благодарность

Автор выражает благодарность всем сотрудникам и пожилым людям, участвовавшим в этом исследовании, которые поделились своими ценными мыслями и опытом. Их сотрудничество и открытость значительно способствовали глубине и насыщенности полученных результатов исследования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Baghirov A. N. Сверхзвуковая технология охлаждения воздуха газовых турбин // *Technologies and Resource Saving*. – 2024. – Т. 81. – № 4. – С. 79–87 (на английском языке)
2. Сверхзвуковые характеристики сжижения природного газа в сопле Лаваля / J. Bian [и др.] // *Energy*. – 2018. – Т. 159. – С. 706–715 (на английском языке)
3. Имаев С. З., Сафьянников М. И. Регулирование сверхзвуковых сепараторов // *Территория Нефтегаз*. – 2016. – № 9. – С. 98–104 (на русском языке)
4. Разработка новых технологических процессов на основе сверхзвукового течения природного газа / Э. Х. Искендеров [и др.] // *Материалы SOCAR*. – 2022. – № 4. – С. 117–123 (на русском языке)
5. Iskanderov E. Kh., Baghirov A. N., Shikhiyeva L. M. Метод оценки гидратообразования в смеси потоков природного газа с различным содержанием влаги // *Nafta-Gaz*. – 2024. – № 1. – С. 39–44 (на английском языке)
6. Cao X., Bian J. Сверхзвуковая технология сепарации для переработки природного газа: обзор // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. – 2019. – Т. 136. – С. 138–151 (на английском языке)
7. Характеристики сверхзвукового охлаждения сопел и особенности фазового перехода влажного природного газа с учетом эффектов ударных волн / X. Cao [и др.] // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2020. – Ст. 100833 (на английском языке)
8. Yang Q., Yang Sh., Yu H. Влияние конструкции сопла Лаваля на характеристики потока сверхзвукового газо-твердофазного двухфазного потока // *Powder Technology*. – 2024. – Т. 439. – Ст. 119657 (на английском языке)
9. Zhang H., Liu Y., Li Q. Численное исследование сверхзвуковой конденсации природного газа в сопле Лаваля // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2017. – Т. 44. – С. 1–9 (на английском языке)
10. Baghirov L. A., İmaev S. Z. Опыт применения 3S-технологии для переработки природного газа на объектах в России и Китае. SPE-176649-MS // *Материалы конференции SPE*. – 2015 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Baghirov A. N. Газ турбиналық ауаны супердыбыстық салқындату технологиясы // *Energy Technologies and Resource Saving*. – 2024. – Т. 81. – № 4. – Б. 79–87 (ағылшын тілінде)
2. Соплолардағы асқындыбыстық салқындату сипаттамалары және соққы толқындарын ескере отырып ылғалды табиғи газдың фазалық ауысу ерекшеліктері / J. Bian [және т. б.] // *Energy*. – 2018. – Т. 159. – Б. 706–715 (ағылшын тілінде)
3. Имаев С. З., Сафьянников М. И. Супердыбыстық сепараторларды реттеу // *Территория Нефтегаз*. – 2016. – № 9. – Б. 98–104 (орыс тілінде)
4. Табиғи газдың супердыбыстық ағымы негізінде жаңа технологиялық процестерді әзірлеу / Э. Х. Искендеров [және т. б.] // *SOCAR еңбектері*. – 2022. – № 4. – Б. 117–123 (орыс тілінде)
5. Iskanderov E. Kh., Baghirov A. N., Shikhiyeva L. M. Әр түрлі ылғалдылықтағы табиғи газ ағындарынан гидрат түзілуін бағалау әдісі // *Nafta-Gaz*. – 2024. – № 1. – Б. 39–44 (ағылшын тілінде)
6. Cao X., Bian J. Табиғи газды өңдеуге арналған супердыбыстық бөлу технологиясы: шолу // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. – 2019. – Т. 136. – Б. 138–151 (ағылшын тілінде)

7. Соплолардың сверхдыбыстық салқындату өнімділігі және соққы толқындарының әсерін ескере отырып, ылғалды табиғи газдың фазалық ауысу сипаттамалары / X. Cao [және т. б.] // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2020. – 100833 (ағылшын тілінде)
8. Yang Q., Yang Sh., Yu H. Лаваль соплосының құрылымының сверхдыбыстық газ-қатты екі фазалы ағын сипаттамаларына әсері // *Powder Technology*. – 2024. – Т. 439. – 119657 (ағылшын тілінде)
9. Zhang H., Liu Y., Li Q. Лаваль соплосында табиғи газдың асқындыбыстық конденсациясын сандық зерттеу // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2017. – Т. 44. – С. 1–9 (ағылшын тілінде)
10. Бағыров Л. А., Имаев С. З. 3S технологиясын Ресей мен Қытайдағы табиғи газды өңдеу нысандарында қолдану тәжірибесі. SPE-176649-MS // SPE конференциясы. – 2015 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Baghirov A.N. Supersonic cooling technology of gas turbine air // *Energy technologies and resource saving*. – 2024. – Vol. 81. – No. 4. – P. 79–87 (in English)
2. Supersonic liquefaction properties of natural gas in the Laval nozzle / J. Bian et al. // *Energy*. – 2018. – Vol. 159. – P. 706–715 (in English)
3. Imayev S. Z., Safyannikov M. I. Regulirovanie sverkhzvukovykh separatorov [Regulation of supersonic separators]. *Territoriya Neftegaz [Neftegaz Territory]*. – 2016. – No. 9. – P. 98–104 (in Russian)
4. Razrabotka novykh tekhnologicheskikh protsessov na osnove sverkhzvukovogo techeniya prirodnogo gaza [Development of new technological processes based on supersonic flow of natural gas] E. Kh. Iskanderov et al. *Materialy SOCAR [SOCAR Proceedings]*. – 2022. – No. 4. – P. 117–123 (in Russian)
5. Iskanderov E. Kh., Baghirov A. N., Shikhiyeva L. M. Method for assessing hydrate formation from a mixture of natural gas flows of varying moisture content // *Nafta-Gaz*. – 2024. – No. 1. – P. 39–44 (in English)
6. Cao X., Bian J. Supersonic separation technology for natural gas processing: A review // *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*. – 2019. – Vol. 136. – P. 138–151 (in English)
7. Supersonic refrigeration performances of nozzles and phase transition characteristics of wet natural gas considering shock wave effects / X. Cao et al. // *Case Studies in Thermal Engineering*. – 2020. – Article 100833 (in English)
8. Yang Q., Yang Sh., Yu H. Impact of Laval nozzle structure on the flow characteristics of supersonic gas-solid two-phase flow // *Powder Technology*. – 2024. – Vol. 439. – Article 119657 (in English)
9. Zhang H., Liu Y., Li Q. Numerical investigation of supersonic condensation of natural gas in Laval nozzle // *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 44. – P. 1–9 (in English)
10. Baghirov L. A., Imayev S. Z. Experience of applying 3S technology for natural gas processing at facilities in Russia and China. SPE-176649-MS // *SPE Conference*. – 2015 (in English)

Сведения об авторах:

Багиров А. Н., к. т. н., доцент кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», Азербайджанский государственный университет Нефти и Промышленности (г. Баку, Азербайджан), abaghirov59@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-6112-6443>

Рустамзаде Д. С., ст. преподаватель кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», Азербайджанский государственный Университет Нефти и Промышленности (г. Баку, Азербайджан), Joshgun.rustamzada@asoiu.edu.az; <https://orcid.org/0009-0002-7380-4707>

Расулзаде А. Б., инженер отдела ОТ, ТБ и ООС, Производственное объединение «Азеригаз», Государственная нефтяная компания Азербайджанской Республики (г. Баку, Азербайджан), agha.rasulzada@socar.az; <https://orcid.org/0009-0002-8715-9366>

Авторлар туралы мәліметтер:

Багиров А. Н., т. ғ. к., «Мұнай және газды тасымалдау және сақтау» кафедрасының доценті, Әзербайжан мемлекеттік мұнай және өнеркәсіп университеті (Баку қ., Әзербайжан),

Рустамзаде Д. С., «Мұнай және газды тасымалдау және сақтау» кафедрасының аға оқытушысы, Әзербайжан мемлекеттік мұнай және өнеркәсіп университеті (Баку қ., Әзербайжан)

Расулзаде А. Б., «Әзіргаз» өндірістік бірлестігі, Әзербайжан Республикасының Мемлекеттік мұнай компаниясы, ЕҚ, ТҚ және ҚОҚ бөлімінің инженері (Баку қ., Әзербайжан)

Information about the authors:

Baghirov A. N., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Transportation and Storage, Azerbaijan State Oil and Industry University (Baku, Azerbaijan)

Rustamzada J. S., Senior Lecturer of the Department of Oil and Gas Transportation and Storage, Azerbaijan State Oil and Industry University (Baku, Azerbaijan)

Rasulzada A. B., Engineer of the HSE Department, Azerigas Production Union, State Oil Company of Azerbaijan Republic (Baku, Azerbaijan)