SOCAR

SOCAR Proceedings

Reservoir and petroleum engineering

journal home page: http://proceedings.socar.az

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ТЕЧЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Э. Х. Искендеров, А. Н. Багиров, Ш. А. Багиров, П. Ш. Исмайилова*

Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

Development of new technological processes based on supersonic flow of natural gas

E. Kh. Iskenderov, A. N. Bagirov, Sh. A. Bagirov, P. Sh. Ismayilova*

Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan

A B S T R A C T

The article is devoted to the study of supersonic movement of natural gas in a pipeline and the possibility of developing new technological processes for cooling, drying and separating liquid hydrocarbons. Technological processes and a set of equipment created using the supersonic movement of natural gas are studied, their advantages and disadvantages are analyzed. It is known that a change in the process of gas injection into UGS facilities in a wide range of pressure during the season creates opportunities for more efficient use of compressor equipment. The thermobaric parameters of gas cooling due to supersonic motion in various designs have been calculated, and the existence of ample opportunities for creating new technological processes has been proved. Recommendations have been developed on the throughput capacity of gas installations to ensure the regulation of cooling systems created for underground gas storage facilities. It was noted that the cooling and gas separation systems created on the basis of thermobaric parameters and principles of regulation will be useful not only for underground gas storages, but also for other sub-sectors of the gas industry.

K E Y W O R D S

Natural gas;
Supersonic movement;
Laval nozzle;
Underground gas storage;
Gas cooling;
Separation;
Compressor.

© 2022 «OilGasScientificResearchProject» Institute. All rights reserved.

Введение

Эффективность энергоемких технических средств и технологических процессов определяется объемом и качеством выпускаемой продукции, а также снижением энергозатрат на производство.

Для увеличения объемов и качества продукции требуются новые и более сложные технологические процессы. Для снижения энергопотребления необходимо создание режима экономии или принятие решения по использованию альтернативных источников энергии. Термодинамические условия, создаваемые при сверхзвуковом движении природного газа, создают реальные возможности для решения ряда технико-технологических задач и создания нового альтернативного источника энергии.

Создаваемые при сверхзвуковом движении природного газа термодинамические условия позволяют решить следующие технические и технологические задачи:

- очистка высоконапорного газа, добываемого на морских газоконденсатных месторождениях, от тяжелых углеводородов перед подачей в подводные трубопроводы и его транспортировка на береговые сооружения без риска гидратообразования;
- охлаждение нагретого в результате процессов многоступенчатого сжатия на компрессорных станциях газа до высокой температуры (100-120 °C) и отказ от энергоемких аппаратов воздушного охлаждения (АВО);
- глубокая осушка газа путем его охлаждения перед отправкой потребителям в подземных хранилищах газа и отказ от менее эффективного дроссель-эффекта;
- выделение пропан-бутановой фракции из поступающего на газоперерабатывающий завод под высоким давлением газа;
- отделение природного газа, поступающего на газораспределительные пункты под высоким давлением, от тяжелых фракций перед подачей в систему потребителя.

Концепция использования сверхзвукового движения природного газа в качестве альтернативного источника энергии основана на принципе получения искусственного охлаждения. В различных технологических процессах газотранспортной системы для процедур охлаждения используется многочисленные высокоэнергоемкие аппараты [1-7].

**E-mail:* pervaneismayilova0715@gmail.com

http://dx.doi.org/10.5510/OGP20220400790

Постановка задачи

Не вдаваясь в подробности известных положений теории газовой динамики, рассмотрим теоретические аспекты создания непосредственно охладителей газодинамического типа для сжатого газа компрессорных станций.

Основываясь на технических возможностях, создаваемых соплом Лаваля для разделения свободной и парообразной жидкости в природном газе, в последние годы ведущие мировые компании достигли определенных результатов в разработке и применении сепараторов газодинамического типа.

Поскольку процесс разделения в трубчатом сепараторе, рассчитанный по методике, учитывающей газодинамические характеристики газожидкостного потока, осуществляется при температуре окружающей среды, температура точки росы отделяемого газа будет равна температуре окружающей среды. Таким образом, в обычном трубчатом сепараторе осуществляется высокотемпературная сепарация и из газового потока отделяется только сконденсировавшая свободная жидкая фаза. В таких условиях компоненты, которые могут конденсироваться при более низких температурах, остаются растворенным в газовой фазе и конденсируясь в трубопроводе при понижении температуры окружающей среды во время транспортировки вызывают ряд проблем.

3S-сепаратор (super sonik separator) – низкотемпературный сверхзвуковой сепаратор, конструкция которого основана на достижениях современной аэродинамики. Принцип работы 3S-сепаратора основан на охлаждении природного газа в сверхзвуковом закрученном потоке. В конфузорно-диффузорном сопле Лаваля скорость газа имеет большее значение, чем скорость звука в газе. При этом происходит сильное охлаждение газа за счет преобразования части потенциальной энергии потока в кинетическую энергию. В результате жидкие компоненты разделяются, а пропускаемый через диффузор основной поток газа обеспечивает повышения давления [8, 9].

На вход таких сепараторов можно подавать газ с жидкой фазой до 20%. В 3S-сепараторе геометрическими размерами сопла и степенью перепада давления (характеризуется числом Маха «М») возможно осуществить регулирование температуры потока.

Несмотря на все перечисленные преимущества, нами выявили определенные недостатки, препятствующие широкому использованию 3S-сепаратора. Так, для эффективной работы данного типа сепараторов давление и объем газа, подаваемого на его прием, должны быть не меньше показателей, определенных расчетами. В реальных производственных условиях при изменении запросов потребителя в газе, при обеспечении газом газлифтной системы добычи нефти, при закачке газа в газохранилища и прочих ситуациях операции по пуску и эксплуатации компрессорных установок сопровождаются изменением давления и особенно объема в широком диапазоне. Отсутствие гибкой системы регулирования предопределяет отклонение этих сепараторов от расчетного режима, нарушение режима охлаждения и сепарации [10].

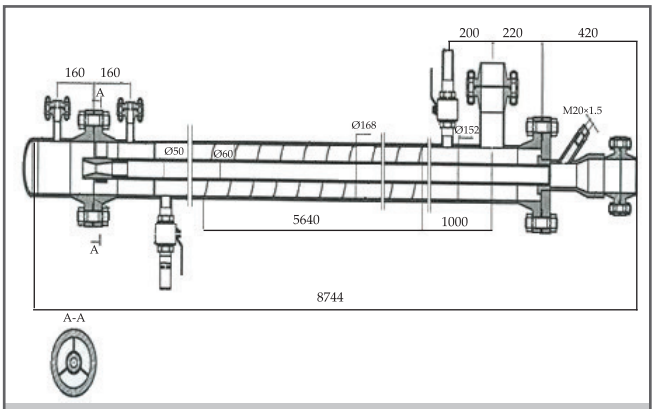

Рис. 1. Схема промышленного образца газодинамического сепаратора

Другая внештатная ситуация может наблюдаться, когда фактический объем газа значительно превышает расчетный объем. В этом случае скорость потока в сепараторе в 2-3 раза превысит скорость звука в газе, что может привести к формированию критически отрицательных температур и разрушению металлической конструкции сепаратора.

Газодинамический сепаратор, разработанный азербайджанскими учеными при непосредственном участии одного из авторов статьи, также был разработан на основе сопла Лаваля. В этой конструкции термодинамический процесс основан на теплообмене горячего газа, поступающего в сепаратор с выходящим из сопла и сильно охлажденным газом.

Схема промышленного образца газодинамического сепаратора отражена на рисунке 1.

Основные параметры газодинамического сепаратора приведены ниже:

Рабочее давление, МПа	– 2.5
Максимальная производительность при рабочем давлении, тыс.нм^3/сут	– 200
Наружный диаметр, мм	– 168
Толщина стенки, мм	– 8
Внутренняя труба (НКТ), мм	– 73×5.5
Объем, м^3	– 0.15
Длина, мм	– 8750
Масса (без жидкости), кг	– 550

В результате проведенных на компрессоре №1 компрессорной станции №3 НГДУ им. Н.Нариманова испытаний указанного газодинамического сепаратора выявлено, что горячий газ, поступающий в сепаратор из компрессора с температурой 58 °С (331К) был охлажден до 34 °С (297К), т.е. температура газа снизилась на 24°.

Габаритные размеры и металлоемкость газодинамического сепаратора в несколько раз меньше, чем у существующего холодильника типа ХР. Отсутствует необходимость в хладагенте и, как следствие, насосной станции для охлаждающей воды и градирне для охлаждения охлаждающей воды (рис. 2).

Учитывая, что испытания проводились в летние месяцы при температуре окружающего воздуха 36-38 °С, полученные результаты можно считать удовлетворительными.

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что возможности использования газодинамической технологии в процессах охлаждения природного газа могут помочь в достижении важных технологических и экономических преимуществ.

По этой причине, на основе теории газовой динамики

и анализа работы созданных образцов газодинамических сепараторов, рассмотрены вопросы разработки моделей газодинамических холодильных установок, способных заменить энергоемкие газоохладительные установки, работающие в системах сбора, подготовки, транспорта и хранения природного газа.

В настоящее время наряду с прочими подотраслями газовой промышленности и на компрессорных станциях газохранилищ для охлаждения сжатого газа широко применяются аппараты воздушного охлаждения (АВО) различных конструкций. На компрессорных станциях ПХГ Гарадаг и Галмаз сжатый на последней ступени газ пройдя через АВО типа 1АВГ-160 транспортируется к скважинам для закачки в пласт.

Основные технические параметры АВО типа 1АВГ-160 следующие:

Рабочее давление, МПа	– 16.0
Площадь поверхности теплообмена, м^2	– 9940
Диаметр крыльчатки вентилятора, мм	– 2800
Мощность двигателя, кВт	– 37
Количество двигателей	– 4

В таблице 1 приведены параметры сжатого газа на компрессорных станциях Гарадагского и Калмазского ЮГА.

Как видно из таблицы 1, только на выходе из второй ступени сжатия компрессоров (в сторону скважин) установлены 5 АВО типа 1АВГ-160 с 4-мя вентиляторами в каждой, работающими от двигателя мощностью 37 кВт.

Эти устройства предназначены для лишь частичного охлаждения сжатого газа, чтобы обеспечить стабильность и прочность газовой трубы и ее изоляции.

Таким образом, вопрос глубокого охлаждения и отделения газа от парообразных жидких компонентов при процессах закачки и отбора газа в газохранилищах остается нерешенной проблемой.

Решение проблемы и обсуждение результатов

Глубокая осушка природного газа при закачке газа позволит изменить газожидкостную концентрацию в пластах ПХГ в сторону газа, увеличить из года в год общее газосодержание залежи, в том числе объем активного газа, а также получить ценное сырье в виде жидких углеводородов для перерабатывающей промышленности. С другой стороны, отпадет необходимость в электроэнергии для работы АВО.

Для определения параметров проектируемых установок газодинамического охлаждения рассмотрим параметры реконструкции Гарадагского подземного хранилища газа:

Рис. 2. Газодинамический сепаратор

Общий объем газа, подлежащий закачке в хранилище, млн.м^3/сут	– 2500.0
Суточный объем газа, закачиваемого в хранилище, млн.м^3/сут	– 4.0-14.0
Давление после блока охлаждения газа, МПа, абс.	– 7.0-22.14
Плотность газа, кг/м^3	– 0.76

В зависимости от состава газа при его относительной плотности

$$\Delta = \frac{\rho_{ст}}{\rho_e} = \frac{\rho_{н\text{-}1.073}}{\rho_e} = \frac{0.76 \cdot 1.073}{1.20445} = 0.677$$

(ρ_e – плотность воздуха под при стандартных условиях), критическом давлении $P_{кр}$=4.7 МПа и принимая коэффициент адиабаты k=1.3, получаем:

$$\pi = P_{кр} / P_1 = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 0.546$$

Учитывая, что температура газа на выходе из КС колеблется в пределах 75-90 °С и что по пути к газоохладителю газ частично охлаждается под действием окружающего воздуха, можно определить критическую температуру, приняв температуру газа на входе в охладитель равной 85 °С (358.15К):

$$T_{кр} = T_1 \cdot \frac{2}{k+1}$$

Комбинированное сопло (сопло Лаваля) состоит из сужающейся и расширяющейся частей. В первой части достигается критическая скорость, равная локальной скорости звука, во второй – максимальная скорость газа. Сопло Лаваля применяют, когда отношение давлений

Таблица 1

Параметры газа Гарадагской и Калмазской ПХГ

ПХГ, КС, тип компрессора	Давление газа, МПа		Производительность, млн. м^3/сут	Температура газа,°С		Количество АВО 1АВГ-160
	На входе КС	На выходе КС		Перед АВО (выход КС)	После АВО	
Гарадагское						
КС-1 (10ГКНАМ)	4.0	7.0-15.0	0.5-2.5	85	38	-
КС-2 (MKS12)	7.0-8.4	7.0-16.0	2.0-10.0	75-80	38-40	3
Калмазское						
КС-1 (10ГКНАМ)	4.5-5.0	7.0-15.0	6.0-10.0	90	40	1
КС-2 (10ГКНАМ)	4.5-5.0	7.0-15.0	2.4-3.25	90	40	1

P_2/P_1 (P_1 – абсолютное давление перед соплом, P_2 - абсолютное давление среды, в которую направлен поток) меньше критического отношения (π). Параметры газоохладителя при различных режимах давления приведены в таблице. 2.

Из таблицы 2 видно, что при отказе от АВО при давлениях на выходе из холодильного агрегата 7.0-13.0 МПа можно получить температуру 0-38 °С.

В то же время, начиная с 14.0 МПа, сверхзвуковое движение превращается в дозвуковое, в этом случае расширяющаяся часть начинает выполнять роль диффузора, за счет расширения площади поперечного сечения скорость снижается, охлаждение газа не происходит.

Для повышения охлаждающего эффекта рассчитаем параметры эффекта, которых можно добиться, установив охлаждающее устройство после существующих АВО. При этом температура газа, поступающего в устройство, снизится до +38 °С (311 К). Результаты расчета приведены в таблице 3.

Из таблицы 3 видно, что при установке блока охлаждения после существующих АВО при давлениях на выходе 7.0-13.0 МПа можно получить температуру (-36.2)-(-2.7) °С. Однако, как и в предыдущем варианте, начиная с 14.0 МПа, сверхзвуковое движение переходит в дозвуковое и газ не охлаждается.

Для большего повышения охлаждающего эффекта рассмотрим возможность повышения давления газа, поступающего в установку. Поскольку объектом исследования является Гарадагская ПХГ и его ожидаемые проекты реконструкции, основой для анализа взяты текущие и перспективные технологические параметры этого газохранилища.

В настоящее время ведутся работы по доведению верхнего предела давления закачки газа на Гарадагской ПХГ до 25.0 МПа. На следующем этапе возможно повышение давления сжатия газа компрессорными станциями до 35.0 МПа. Так, бурение новых скважин в геологической структуре и создание соответствующей технологической инфраструктуры может привести к повышению давления закачки газа в пласт. Обеспечение такого проекта компрессорным оборудованием также является одним из вопросов, требующих решения.

В результате анализ характеристик компрессорного оборудования производства ведущих стран мира для подземного хранения газа и изучения опыта их применения был выявлен ряд конструктивных, технологических

Таблица 2

Параметры охлаждения газа без АВО, T=358.15 K (85 °C)

Входное давление, P_1, MPa	24.9							
Выходное давление, P_2, MPa	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0
Критическая скорость, m/s	458.67							
Плотность газа, kq/m^3	142.44							
Критическая плотность, kq/m^3	89.39							
Критическая температура, K	311.43							
Критическая давление, MPa	13.59							
Максимальная скорость, m/s	620.16	590.95	563.11	536.30	510.22	484.64	459.35	434.18
Выходная скорость, m/s	595.35	567.31	540.59	514.85	489.81	465.25	440.98	416.81
Относительная скорость, λ	1.3521	1.2884	1.2277	1.1693	1.1124	1.0566	1.0015	0.9466
Плотность в выходном сечении, kq/m^3	57.45	63.15	68.67	74.02	79.22	84.30	89.37	-
Давление в выходном сечении, P_2, MPa	7.65	8.65	9.64	10.63	11.61	12.59	13.58	-
Температура в выходном сечении, T_2, K (°C)	272.75 (-0.4)	280.60 (7.5)	287.74 (14.6)	294.28 (21.1)	300.34 (27.2)	306.00 (32.9)	311.30 (38.1)	-

Таблица 3

Параметры охлаждения газа с АВО, T=311.15 K (38 °C)

Входное давление, P_1, MPa	24.9							
Выходное давление, P_2, MPa	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0
Критическая скорость, m/s	427.52							
Плотность газа, kq/m^3	163.96							
Критическая плотность, kq/m^3	102.90							
Критическая температура, K	270.57							
Критическая давление, MPa	13.59							
Максимальная скорость, m/s	578.03	550.80	524.86	499.86	475.55	451.71	428.15	404.68
Выходная скорость, m/s	1.3521	1.2884	1.2277	1.1692	1.1123	1.0566	1.0015	0.9466
Относительная скорость, λ	554.91	528.77	503.87	479.87	456.53	433.64	411.02	
Плотность в выходном сечении, kq/m^3	66.13	72.69	79.04	85.20	91.19	97.03	102.75	-
Давление в выходном сечении, P_2, MPa	7.65	8.65	9.64	10.63	11.61	12.59	12.49	-
Температура в выходном сечении, T_2, K (°C)	236.95 (-36.2)	243.79 (-29.4)	249.98 (-23.2)	255.67 (-17.5)	260.94 (-12.2)	265.85 (-7.3)	270.44 (-2.7)	-

и эксплуатационных преимуществ мотор-компрессоров Ajax. Двигатель-компрессор Ajax 2804 состоит из коленчатого вала, расположенного внутри корпуса, 4-х силовых и 3-х компрессорных цилиндров, горизонтально подсоединенных к корпусу. Компрессорные цилиндры способны работать при переменных давлениях на выходе компрессорной станции ПХГ вплоть до 37.9 МПа.

Основные параметры мотор-компрессора Ajax 2804 следующие:

Модель	– DPC Ajax 2804St
Номинальная мощность	– 0.63 МВт
Номинальное число оборотов	– 440 циклов/мин
Диаметр силового цилиндра, дюймы	– 15
Ход поршня, дюймы	– 16
Габаритные размеры, Д×Ш×В, м	– 6.0×4.3×2.2

При входном давлении 25.0 МПа производительность мотор-компрессора DPC Ajax 2804St составляет 1.8 млн. м^3/сутки. В связи с тем, что высоконапорная закачка в газохранилище приходится на последние месяцы сезона закачки газа и объем закачиваемого газа в эти месяцы снижается, в зависимости размер новой геологической структуры может потребоваться небольшое количество (3-4 шт.) таких компрессоров. В этом случае, наряду с увеличением объема закачиваемого в хранилище активного газа, появляются дополнительные возможности для охлаждения и глубокой осушки газа.

В этой связи рассчитаны газодинамические параметры охлаждения газа при увеличении выходных давлений компрессоров. С учетом особенностей компримирования газа при высоких давлениях на выходе КС давление принималось равным 35.0 МПа, а температура 311 К (38 °С). Результаты расчета приведены в таблице 4.

Как видно из таблицы 4, что при давлении на входе установки охлаждения после АВО 35.0 МПа при давлениях на выходе 7.0-18.0 МПа можно получить температуру (-52.5)-(-3.4) °С. В отличие от предыдущих вариантов, сверхзвуковое движение переходит в дозвуковое начиная с 19.0 МПа.

Для сравнения эффектов охлаждения газа с разной конструктивной структурой была установлена зависимость изменения температуры в выходном сечении в зависимости от выходного давления (рис. 3).

Среднесуточные объемы газа, подлежащие закачке по месяцам согласно разработанному альтернативного проекту реконструкции Гарадагского ПХГ с доведением объема активного газа до 3 миллиардов кубометров, приведены в таблице 5.

Учитывая, что суточный объем закачиваемого в пласт

Таблица 4

Параметры охлаждения газа с входным давлением 35 МПа

Входное давление, P_1, MPa	34.9							
Выходное давление, P_2, MPa	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0
Критическая скорость, m/s	427.52							
Плотность газа, kq/m^3	229.80							
Критическая плотность, kq/m^3	144.22							
Критическая температура, K	270.57							
Критическая давление, MPa	19.05							
Максимальная скорость, m/s	638.54	615.88	594.47	574.28	554.85	536.11	517.91	500.15
Выходная скорость, m/s	1.4936	1.4406	1.3905	1.3433	1.2978	1.2540	1.2114	1.1699
Относительная скорость, λ	613.00	591.24	570.69	551.31	532.66	514.67	497.19	480.14
Плотность в выходном сечении, kq/m^3	73.04	80.24	87.22	93.93	100.51	108.91	113.19	119.32
Давление в выходном сечении, P_2,MPa	7.86	8.89	9.91	10.91	11.91	13.22	13.90	14.89
Температура в выходном сечении, T_2, K (^{o}C)	220.61 (-52.5)	226.92 (-46.2)	232.68 (-40.5)	237.91 (-35.2)	242.79 (-30.4)	247.33 (-25.8)	251.60 (-21.6)	255.61 (-17.5)
Входное давление, P_1, MPa	34.9							
Выходное давление, P_2 MPa	15.0	16.0	17.0	18.0	19.0			
Критическая скорость, m/s	427.52							
Плотность газа, kq/m^3	229.80							
Критическая плотность, kq/m^3	144.22							
Критическая температура, K	270.57							
Критическая давление, MPa	19.05							
Максимальная скорость, m/s	482.75	465.61	448.67	431.86	415.11			
Выходная скорость, m/s	1.1292	1.0891	1.0495	1.0102	0.9778			
Относительная скорость, λ	463.44	446.99	430.72	414.59				
Плотность в выходном сечении, kq/m^3	125.33	131.24	137.02	142.75	-			
Давление в выходном сечении, P_2,MPa	15.87	16.85	17.82	18.79	-			
Температура в выходном сечении, T_2, K (^{o}C)	259.41 (-13.7)	263.02 (-10.1)	266.44 (-6.7)	269.74 (-3.4)	-			

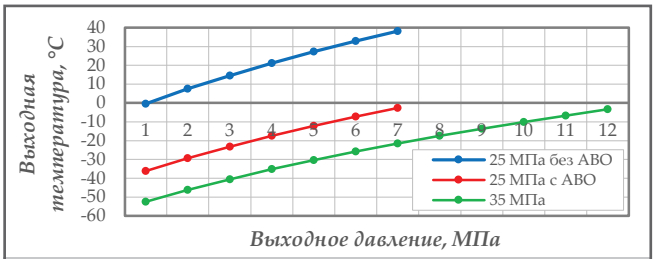

Рис. 3. Зависимость изменения температуры в выходном сечении в зависимости от выходного давления при различных конструктивных структурах

Таблица 5

Среднесуточные объемы закачки газа в ПХГ по месяцам

Месяцы	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь
Объем газа (средний за сутки), млн. м^3/сут	8	14	14	14	14	11	8	4

газа в сезон закачки динамически меняется помесячно, ежедневно и даже в течение суток (днем и ночью), для обеспечения регулирования давления, объема и скорости газа наиболее оптимальным является принятие пропускной способности холодильных установок равной 1 млн нм^3/сутки.

Устройства охлаждения газа, основанные на указанных выше термобарических параметрах и принципах регулирования, и их технологическое продолжение в виде систем сепарации могут применяться не только в подземных хранилищах газа, но и в других областях газовой промышленности.

Выводы

1. Проведен расчет термобарических параметров охлаждения газа, образующегося за счет сверхзвукового движения в различных конструктивных структурах.

2. Определены критерии создания новых технологических процессов охлаждения и осушки природного газа за счет сверхзвукового движения.

Литература

1. Suleimanov, B. A. (1995). Filtration of disperse systems in a nonhomogeneous porous medium. *Colloid Journal*, 57(5), 704-707.

2. Suleimanov, B. A. (1996). Experimental study of the formation of fractal structures in displacement of immiscible fluids using a Hele-Shaw cell. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 69(2), 182-187.

3. Suleimanov, B. A. (1996). Effect of a surface-active substance on nonequilibrium phenomena in filtration of gas-liquid systems in the subcritical region. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 69(4), 427-431.

4. Suleimanov, B. A. (1997). Slip effect during filtration of gassed liquid. *Colloid Journal*, 59(6), 749-753.

5. Suleimanov, B. A. (1999). The slip effect during filtration of gassed non-Newtonian liquids. *Colloid Journal*, 61(6), 786-790.

6. Suleimanov, B. A. (2004). On the effect of interaction between dispersed phase particles on the rheology of fractally heterogeneous disperse systems. *Colloid Journal*, 66(2), 249-252.

7. Suleimanov, B. A. (2011). Mechanism of slip effect in gassed liquid flow. *Colloid Journal*, 73(6), 846-855.

8. Bagirov, L. A., Imaev, S. Z. (2015, October). Experience of 3S-technology application for natural gas processing at gas facilities in Russia and China. SPE-176649-MS. In: *SPE Russian Petroleum Technology Conference. Society of Petroleum Engineers*.

9. Alfyorov, V., Bagirov, L., Dmitriyev, L., et al. (2005). Supersonic nozzle efficiently sepsrstes natural gas components. *Oil & Gas Journal*, 23 May, 53-58.

10. Имаев, С. З., Сафьянников, М. И. (2016). Регулирование сверхзвуковых сепараторов. *Территория «Нефтегаз»*, 9, 98-104.

References

1. Suleimanov, B. A. (1995). Filtration of disperse systems in a nonhomogeneous porous medium. *Colloid Journal*, 57(5), 704-707.

2. Suleimanov, B. A. (1996). Experimental study of the formation of fractal structures in displacement of immiscible fluids using a Hele-Shaw cell. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 69(2), 182-187.

3. Suleimanov, B. A. (1996). Effect of a surface-active substance on nonequilibrium phenomena in filtration of gas-liquid systems in the subcritical region. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 69(4), 427-431.

4. Suleimanov, B. A. (1997). Slip effect during filtration of gassed liquid. *Colloid Journal*, 59(6), 749-753.

5. Suleimanov, B. A. (1999). The slip effect during filtration of gassed non-Newtonian liquids. *Colloid Journal*, 61(6), 786-790.

6. Suleimanov, B. A. (2004). On the effect of interaction between dispersed phase particles on the rheology of fractally heterogeneous disperse systems. *Colloid Journal*, 66(2), 249-252.

7. Suleimanov, B. A. (2011). Mechanism of slip effect in gassed liquid flow. *Colloid Journal*, 73(6), 846-855.

8. Bagirov, L. A., Imaev, S. Z. (2015, October). Experience of 3S-technology application for natural gas processing at gas facilities in Russia and China. SPE-176649-MS. In: *SPE Russian Petroleum Technology Conference. Society of Petroleum Engineers*.

9. Alfyorov, V., Bagirov, L., Dmitriyev, L., et al. (2005). Supersonic nozzle efficiently sepsrstes natural gas components. *Oil & Gas Journal*, 23 May, 53-58.

10. Imaev, S. Z., Safyannikov, M. I. (2016). Regulation of supersonic separators. *Oil and Gas Territory*, 9, 98-104.

Разработка новых технологических процессов на основе сверхзвукового течения природного газа

Э. Х. Искендеров, А. Н. Багиров, Ш. А. Багиров, П. Ш. Исмайилова
Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан

Реферат

Статья посвящена исследованию сверхзвукового движения природного газа в трубопроводе и возможности разработки новых технологических процессов охлаждения, осушки и разделения жидких углеводородов. Исследованы технологические процессы и комплекс оборудования, созданных с использованием сверхзвукового движения природного газа, проанализированы их преимущества и недостатки. Известно, что изменение в процессе закачки газа в ПХГ давления в широком диапазоне в течение сезона создает возможности для более эффективного использования компрессорного оборудования. Рассчитаны термобарические параметры охлаждения газа за счет сверхзвукового движения в различных конструктивных исполнениях и доказано наличие широких возможностей для создания новых технологических процессов. Разработаны рекомендации по пропускной способности установок по газу для обеспечения регулирования систем охлаждения, создаваемых для подземных хранилищ газа. Отмечено, что создаваемые на основе термобарических параметров и принципов регулирования системы охлаждения и сепарации газа будут полезны не только для подземных хранилищ газа, но и для других подотраслей газовой промышленности.

Ключевые слова: природный газ; сверхзвуковое движение; сопло Лаваля; подземное хранилище газа; охлаждение газа; сепарация; компрессор.

Təbii qazın supersəsli hərəkəti əsasında yeni texnoloji proseslərin yaradılması

E. X. İskəndərov, Ə. N. Bağırov, Ş. Ə. Bağırov, P. Ş. İsmayılova
Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti, Bakı, Azərbaycan

Xülasə

Məqalə sualtı təbii qazın supersəsli hərəkətinin tədqiqinə və bunun əsasında qazın soyudulması, qurudulması, tərkibində olan maye karbohidrogenlərin ayrılması üçün yeni texnoloji proseslərin işlənməsi imkanlarının araşdırılmasına həsr olunub. Təbii qazın supersəsli hərəkətindən istifadə etməklə yaradılmış texnoloji proseslər və avadanlıq kompleksi təhlil edilmiş, onların üstün və çatışmayan çəhətləri müəyyənləşdirilmişdir. Yeraltı qaz anbarlarının xüsusiyyətlərindən irəli gələn qazvurma prosesində mövsüm ərzində təzyiqlərin geniş intervalda dəyişməsinin quraşdırılmış kompressor avadanlıqlarının daha səmərəli istifadəsi üçün imkanlar yaratması qeyd olunmuşdur. Müxtəlif konstruktiv quruluşlarda supersəsli hərəkət hesabına formalaşan qazın soyudulmasının termobarik parametrlərinin hesabatı aparılmış və yeni texnoloji proseslərin yaradılması üçün geniş imkanların olduğu sübüt edilmişdir. Yeraltı qaz anbarları üçün yaradılacaq soyutma sistemlərinin tənzimlənməsinini təmin etmək üçün qurğunun qazburaxma qabiliyyəti üzrə tövsiyələr verilmişdir. Termobarik parametrlər və tənzimləmə prinsipləri əsasında yaradılan qazın soyutma qurğularının və onların texnoloji davamı olan separasiya sistemlərinin yeraltı qaz anbarları ilə yanaşı qaz sənayesinin digər sahələri üçün də faydalı olacağı qeyd olunmuşdur.

Açar sözlər: təbii qaz; supersəsli hərəkət; Laval soplosu; yeraltı qaz anbarı; qazın soyudulması; separasiya; kompressor.