

Formation of Temperature Distribution in a Regenerative Heat Exchanger During the Initial Cooling Period of a Cryogenic Reduction Unit of Main Natural Gas

**Kravchenko Yu.A., Baranov A.Yu., Kravchenko D.V., Logvinenko E.V.,
Baranov V.A., Ikonnikova A.Yu. Pashkova E.A.**

ITMO University
Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. This article examines the startup period of a natural gas pipeline cryogenic reduction unit (CRU) within a gas distribution station (GDS). The objective of the study is to determine the temperature distribution within a regenerative heat exchanger (RHE) during the CRU's initial cooling stage. This objective was achieved through an analysis of primary cooling methods for the regenerator packing and through numerical experiments to determine the optimal filtration rate and switching time. The study involved a CRU operating on a simple throttling cycle and using RHE. The numerical experiments yielded the optimal filtration rate and blast duration for the natural gas pipeline. Software was developed using a mathematical model of the CRU and implemented in the Python programming language. The most important result is the shape of the temperature distribution curve across the packing bed height during the initial startup of the CRU. Based on the research conducted, it has been shown that increasing the steady-state operating time of the CRU is accompanied by an expansion of the zone of active heat transfer to the upper portion of the packed heat exchanger. The significance of these results lies in the development of a methodology for studying the formation and height distribution of temperatures within the CRU's regenerative heat exchanger. This allows for an analysis of its operating efficiency during the initial cooling period and paves the way for further research under conditions of daily uneven gas consumption in the city network.

Keywords: liquefied natural gas, gas distribution station, cryogenic reduction unit, natural gas pipeline, regenerative heat exchanger, natural gas preparation for liquefaction.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2026.2-70.10>

UDC: 66.045.13

Formarea distribuției temperaturii într-un schimbător de căldură regenerativ în timpul perioadei inițiale de răcire a unei unități de reducere criogenică a gazului natural principal

**Kravchenko Yu.A., Baranov A.Yu., Kravchenko D.V., Logvinenko E.V.,
Baranov V.A., Ikonnikova A.Yu. Pașkova E.A.**

ITMO Universitatea, Sanct Petersburg, Federatia Rusă

Rezumat. Acest articol examinează perioada de pornire a unei unități criogenice de reducere (CRU) pentru conducte de gaze naturale în cadrul unei stații de distribuție a gazelor (GDS). Obiectivul studiului este de a determina distribuția temperaturii într-un schimbător de căldură regenerativ (RHE) în timpul etapei inițiale de răcire a CRU. Acest obiectiv a fost atins printr-o analiză a metodelor de răcire primară pentru umplutura regenerativului și prin experimente numerice pentru a determina rata optimă de filtrare și timpul de comutare. Studiul a implicat o CRU care funcționează pe un ciclu simplu de strangulare și utilizează RHE. Experimentele numerice au produs rata optimă de filtrare și durata de explozie pentru conducta de gaze naturale. Software-ul a fost dezvoltat folosind un model matematic al CRU și implementat în limbajul de programare Python. Cel mai important rezultat este forma curbei de distribuție a temperaturii pe înălțimea patului de umplură în timpul pornirii inițiale a CRU. Pe baza cercetărilor efectuate, s-a demonstrat că creșterea timpului de funcționare în regim staționar al CRU este însoțită de o extindere a zonei de transfer activ de căldură către porțiunea superioară a schimbătorului de căldură umplut. Semnificația acestor rezultate constă în dezvoltarea unei metodologii pentru studierea formării și distribuției înălțimii temperaturilor în schimbătorul de căldură regenerativ al CRU. Acest lucru permite o analiză a eficienței sale de funcționare în perioada inițială de răcire și deschide calea pentru cercetări ulterioare în condiții de consum zilnic neuniform de gaze în rețeaua orașului.

Cuvinte-cheie: gaz natural lichefiat, stație de distribuție a gazelor, unitate criogenică de reducere, conductă de gaze naturale, schimbător de căldură regenerativ, pregătirea gazelor naturale pentru lichefiere.

© Kravchenko Yu.A., Baranov A.Yu., Kravchenko D.V., Logvinenko E.V.,
Baranov V.A., Ikonnikova A.Yu. Pashkova E.A., 2026

Формирование распределения температур по высоте слоя насадки в регенеративном теплообменном аппарате в период начального охлаждения блока криогенного редуцирования магистрального природного газа

**Кравченко Ю.А., Баранов А.Ю., Кравченко Д.В., Логвиненко Е.В.,
Баранов В.А., Иконникова А.Ю., Пашкова Е.А.**

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. Статья посвящена исследованию пускового периода эксплуатации блока криогенного редуцирования (БКР) магистрального природного газа в составе газораспределительной станции (ГРС). Целью работы является формирование распределения температур в регенеративном теплообменном аппарате на этапе первичного охлаждения БКР. Для достижения поставленной цели был проведен анализ способов первичного охлаждения насадки регенератора, проведены численные эксперименты по поиску оптимальной скорости фильтрации и времени переключения. Объектом исследования являлся блок криогенного редуцирования магистрального природного газа, работающий по циклу простого дросселирования и с использованием регенеративных теплообменных аппаратов (регенераторов) с насыпной насадкой из кускового базальта. В результате проведенных численных экспериментов были подобраны оптимальная скорость фильтрации магистрального природного газа и продолжительность дутья. Разработано программное обеспечение на базе математической модели блока криогенного редуцирования, которое было реализовано с помощью высокоуровневого языка программирования Python. Наиболее важным результатом является форма кривой распределения температур по высоте слоя насадки при первичном запуске блока криогенного редуцирования. Исходя из проведенных исследований показано, что увеличение продолжительности работы БКР в установившемся режиме сопровождается расширением зоны активной передачи теплоты в верхнюю часть насадочного теплообменного аппарата. Значимость полученных результатов заключается в разработке методики, позволяющей исследовать формирование распределение температур по высоте регенеративного теплообменного аппарата БКР. Это позволяет проанализировать эффективность его работы в период начального охлаждения, а также создает предпосылки для дальнейших исследований в условиях суточной неравномерности расхода газа в городской сети.

Ключевые слова: сжиженный природный газ, газораспределительные станции, магистральный газ, энергоэффективность, подготовка газа к сжижению.

ВВЕДЕНИЕ

Большинство месторождений природного газа сосредоточено в труднодоступных местах, что повышает затраты на логистику и создание необходимой инфраструктуры. Природный многокомпонентная газовая смесь, в которой наряду с основным газом носителем – метаном содержится более дорогостоящие и ценные для промышленного использования «тяжелые» углеводороды этан, пропан, бутан и так далее [1,2]. Содержание этих примесей в потоке основного компонента газовой смеси метана зависит от состава газа, добываемого на конкретных месторождениях. В настоящее время ценные компоненты природного газа поступают в распределительные сети, где они используются в основном в качестве топлива. Развитие методов сжижения природного газа создает технологические возможности для извлечения и хозяйственного использования этих компонентов.

В сжиженном виде природный газ имеет плотность почти в 600 раз больше, чем в газообразном, поэтому его легче перевозить и хранить [3]. Производство и использование

сжиженного природного газа (СПГ) в последние годы стало самостоятельной и важной частью газовой отрасли. Крупнотоннажные заводы по производству СПГ ориентированы на экспорт сжиженного природного газа с помощью морского транспорта. Поступление продукции этих предприятий на внутренний рынок представляется маловероятным.

Нельзя не отметить, что несмотря на наличие больших запасов природного газа и развитую инфраструктуру для его транспортирования уровень газификации населения может оставаться на достаточно низком уровне. Поступление СПГ на внутренний рынок будет способствовать решению этой проблемы за счет развития систем автономной газификации поселений.

Для организации автономного газоснабжения поселений необходимы распределенные источники СПГ, транспортирование СПГ на расстояние до трехсот километров от такого источника позволит расширить ареал потребителей природного газа, что в свою очередь повысит уровень газификации населения.

Совокупность сложившихся на практике обстоятельств делает организацию распределенного производства сжиженного природного газа первоочередной научно-технической задачей в сфере развития энергетики.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В литературе имеются данные о добыче свыше 710 млрд м³ природного газа и потреблении на внутреннем рынке более 500 млрд м³ в год [4]. Регионы добычи и потребления природного газа находятся на достаточно большом расстоянии, для этого необходимо иметь разветвленную сеть магистральных газопроводов. Давление природного газа в магистральных трубопроводах поддерживается на уровне от 3.5 до 12 МПа [5]. Повышенное давление увеличивает плотность природного газа и пропускную способность газопроводов поэтому широко используется на практике. При сжатии природного газа перед подачей в трубопровод его удельное теплосодержание, энтальпия существенно снижается, что придает потоку магистрального природного газа дополнительные энергетические возможности. В распределительные сети населенных пунктов природный газ подается с давлением не более 1.2 МПа [5].

Для снижения давления газовый поток проходит процедуру редуцирования на газораспределительных станциях (ГРС), где его давление снижается в 7–10 раз. Из-за пониженного теплосодержания магистрального природного газа редуцирование природного газа на ГРС сопровождается понижением температуры, что негативно сказывается на его дальнейшем транспортировании. В зависимости от перепада давления на газовых сетях в связи с проявление эффекта Джоуля-Томсона температура газа может понизиться на 12–57 К. Для предупреждения негативных последствий понижения температуры газового потока используют его предварительный подогрев, на реализацию которого затрачивается до 1 % редуцируемого газа [22].

Пониженное теплосодержание магистрального природного газа можно использовать для перевода части этого газа в сжиженное состояние [24]. При наличии около 4000 газораспределительных станций в

стране, на которых можно внедрить технологию криогенного редуцирования сжатого газа с получением некоторого количества СПГ, позволяет создать распределенную по территории страны сеть источников сжиженного природного газа, от которых можно доставлять СПГ в автономные пункты газификации.

Известно большое количество научных публикаций о технологических решениях и реализованных проектах, направленных на выработку сжиженного природного газа на ГРС. Авторы [9-11] описывают исследования по повышению энергоэффективности малотоннажных циклов получения СПГ, а также рассматривают направления энергоэффективных решений для снижения его себестоимости. На основании материалов, изложенных в [12], в зависимости от выбранного способа редуцирования природного газа на ГРС удельное количество СПГ составляет от 2 до 42% от потока магистрального природного газа прошедшего через блок криогенного редуцирования магистрального природного газа. Эти известные технологические решения имеют общий существенный недостаток – в блок криогенного редуцирования направляется только часть потока природного газа, которая не превышает 35%. Основная часть потока газа высокого давления редуцируется по традиционной технологии, то есть предварительно подогревается за счет сжигания топливного газа.

Очевидной причиной неполного вовлечения потока газа с пониженной энтальпией в цикл криогенного редуцирования является необходимость удаления из потока высококипящих примесей: паров воды и углекислого газа. Этот процесс реализуется в адсорбционных блоках осушки и очистки природного газа, которые представляют собой громоздкие аппараты периодического действия. Для периодического восстановления поглощающей способности адсорбента необходимо выполнять режим регенерации, который предполагает разогрев адсорбера до температуры более 300 °С [23]. Затраты энергии на регенерацию возрастают пропорционально объему очищаемого газа [13,14].

Кроме этого, разработчики циклов получения СПГ на ГРС традиционно стремятся к высоким значениям

коэффициента ожижения, в то время как в данной технологической задаче следует стремиться к полной утилизации теплоотводящей способности магистрального природного газа и исключению затрат топливного газа. При выполнении этих условий СПГ, полученный в цикле криогенного редуцирования не только без дополнительных затрат энергии, но и с одновременным прекращением затрат топливного газа в узле подогрева газа перед редуцированием, может иметь себестоимость на уровне газа, поставляемого в местную распределительную сеть.

Рыночное предложение СПГ с минимальной добавленной стоимостью является определяющим требованием для развития сети потребления сжиженного природного газа.

Для преодоления ограничений связанных с необходимостью очищать и осушать магистральный газ перед блоком криогенного редуцирования можно воспользоваться технологиями из воздухоразделительной промышленности, где для осушки и очистки воздуха используют вымораживание в регенеративных теплообменных аппаратах [15]. Насадочные теплообменные аппараты, регенераторы, широко используется в ВРУ низкого давления, работающих по циклу П. Л. Капицы [15], где они обеспечивают передачу теплоты от потока воздуха высокого давления (прямой поток) к потокам азота и кислорода которые входят из воздухоразделительной установки под давлением близким к атмосферному (обратный поток). Пары воды и диоксид углерода вымораживаются из прямого потока на поверхности насадки регенератора, а затем возгоняются в обратный поток низкого давления. Таким образом очистка и осушка газового потока от примесей в значительной степени упрощаются. На крупных воздухоразделительных предприятиях перерабатывается до миллиона м³ воздуха в час, что сопоставимо с расходом магистрального газа через ГРС.

Внедрение регенеративных теплообменных аппаратов в схему получения СПГ на ГРС позволит произвести процедуру редуцирования природного газа, а также осушку и очистку природного газа без дополнительных затрат энергии, что приводит к созданию блока криогенного редуцирования магистрального природного газа на ГРС, который позволяет исключить затраты

топливного газа и одновременно, без дополнительных затрат энергии переводить в сжиженное состояние не менее 7% редуцируемого газа.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДЫ

Объектом исследования является блок криогенного редуцирования магистрального природного газа (БКР), работающий по циклу простого дросселирования и с использованием регенеративных теплообменных аппаратов (регенераторов). Условия работы регенераторов в составе БКР существенно отличаются от традиционного режима работу ВРУ, поэтому необходимо оценить работоспособность насадочных теплообменников применительно к новой технологической задаче. Для этого необходимо смоделировать основные технологические процессы, протекающие в реальных условиях: первичное захолаживание теплоаккумулирующей насадки (пуск регенератора), работа регенератора в установившемся режиме и при колебаниях производительности ГРС.

Для выполнения этих исследований была разработана математическая модель основных элементов БКР – регенеративных теплообменных аппаратов. Основу математической модели составляет численное решение уравнения энергии для потока газа и насадки регенеративного теплообменника [16,17]:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial \tau} = -\rho w \frac{\partial h}{\partial x} - a_0 \alpha (T - T_w) - \sum q_v, \quad (1)$$

$$(1 - \varepsilon) \rho_w \frac{\partial h_w}{\partial \tau} = \alpha a_0 (T - T_w) + (1 - \varepsilon) \lambda_w^* \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2}; \quad (2)$$

где: h, h_w - энтальпия газа и насадки соответственно, ρ, ρ_w - плотность газа и насадки соответственно, a_0 - удельная теплопередающая поверхность слоя насадки, α - коэффициент конвективной теплоотдачи, ε - пористость слоя насадки, T, T_w - температура газа и насадки соответственно, λ_w^* - эффективная теплопроводность слоя насадки, $\sum q_v$ - распределенный подвод теплоты в единицу объема слоя насадки.

Учитывая сложность проводимых численных экспериментов, связанных с

определением точных значений энтальпии газа и насадки в каждый момент времени создано соответствующее программное обеспечение, которое было реализовано с помощью высокоуровневого языка программирования Python.

Во встроенных библиотеках Python отсутствуют необходимые для расчета сведения о значениях энтальпии и теплоемкости базальтовой насадки, поэтому была разработана собственная библиотека, которая решает эту проблему.

Программное обеспечение построено на база математической модели блока криогенного редуцирования магистрального природного газа [17], а также включает в себя несколько подпрограмм, позволяющих определить энтальпию насадки по ее известной температуре $h_{wi} = f(T_{wi})$ и наоборот, определить температуру насадки по значению энтальпии материала $T_{wi} = f(h_{wi})$ а также определить значение объемного коэффициент теплоотдачи с поверхности насадки для каждого элементарного сечения регенеративного теплообменника α_{wi} .

В рамках подготовки к проведению численного эксперимента была проведена верификация математической модели и программного обеспечения для ее реализации. В качестве объекта пригодного для верификации выбран регенеративный теплообменный аппарат, где в качестве насадки используется кусковой базальт с диаметром гранул 6 мм, параметры насадки выбраны в соответствии с рекомендациями, представленными в литературе [17]. Рабочим веществом являлся воздух с давлениями $p_{hp} = 0.603$ МПа и обратного $p_{lp} = 0.113$ МПа, как наиболее характерные для данных воздуходелительных установок, работающих по циклу низкого давления. Высота насыпного слоя насадки регенеративного теплообменного аппарата составляла 7676 мм [15]. Полученные численные результаты были представлены в виде графиков по изменению средней температуры прямого и обратного потоков по высоте регенератора, сопоставление которых с графиками, полученными независимыми исследователями позволил сделать вывод о работоспособности математической модели и программного обеспечения, что позволило перейти к основному этапу проводимых численных исследований.

Для исследования работы насадочного теплообменного аппарата в период начального охлаждения принималось, что температура насадки и температура газа имеют одинаковую температуру, равную температуре окружающей среды:

$$T_{i=0}^{lp, hp} = T_i^{lp, hp} = T_{i=n}^{lp, hp} = T_{at}, \quad (3)$$

$$T_{wi=0}^{lp, hp} = T_{wi}^{lp, hp} = T_{wi=n}^{lp, hp} = T_{at}. \quad (4)$$

Продолжительность дутья принималась из установившегося режима работы блока криогенного редуцирования [19].

Исходя из известного диапазона выбора давлений природного газа в магистральных трубопроводах (3.5–12.0 МПа) и распределительных сетях (0.3–1.2 МПа), в численном эксперименте давление прямого потока высокого давления (магистрального газа) на входе в БКР принималось равным $p_{hp} = 5$ МПа, давление обратного потока низкого давления (давление распределительной сети) $p_{lp} = 1$ МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Ранее при проведении вычислительных экспериментов [18] в качестве начальных условий использовалось допущение о линейном распределении температур по высоте слоя теплоаккумулирующей насадки регенеративных теплообменных аппаратов блока криогенного редуцирования. Такое допущение представлялось справедливым, потому что после многочисленного повторения циклов прямого и обратного дутья внутри слоя формируется некоторое постоянно воспроизводимое начальное распределение температур, но такое распределение температур может сформироваться после достаточно большого числа циклов, что может существенно сказаться на работе особенно в режиме с переменным расходом магистрального природного газа, поэтому необходимо выполнить вычислительный эксперимент, в рамках которого удастся исследовать порядок формирования распределения температур по высоте слоя насадки при первичном запуске блоке криогенного редуцирования, а также интенсивность переноса теплоты на разных участках теплообменного аппарата.

Принципиальное значение имеет выбор способа первичного охлаждения насадки

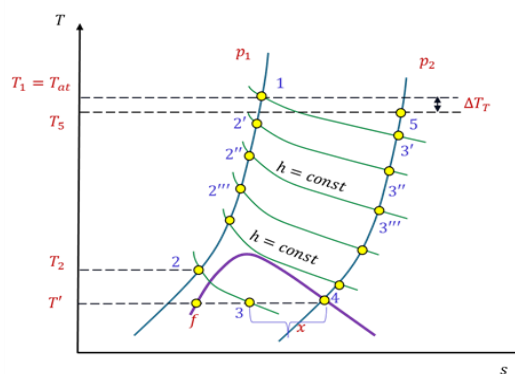
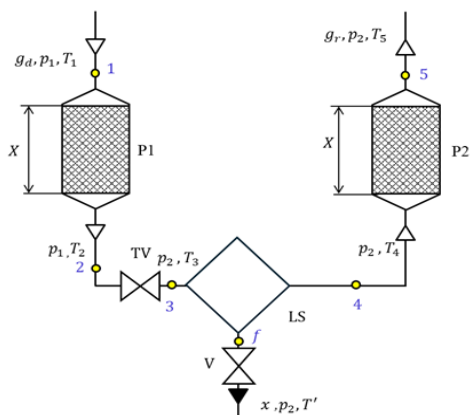
регенератора. В воздухоразделительной промышленности, где целью работы регенеративных теплообменников является получение продуктов разделения воздуха разработаны некоторые специализированные способы первичного охлаждения регенератора: холодным обратным потоком и чередованием прямого и обратного потоков [17].

Охлаждение насадки только обратным потоком является более эффективным, ввиду отсутствия потока, который нагревает насадку. В то же время применение данного способа охлаждения возможно только в том случае, когда воздух, прошедший через регенераторы, не используется для получения холода и когда имеется возможность охладить воздух, проходящий через регенераторы в холодильном цикле. Охлаждение регенераторов продолжается до тех пор, пока температура воздуха в середине регенератора не понизится до 170–180 К. После достижения данной температуры можно переходить к обычному чередованию потоков высокого и низкого давления.

Второй способ охлаждения применяется в криогенных ВРУ низкого давления, работающих по циклу П. Л. Капицы, где

низкотемпературный поток, полученный в результате расширения воздуха в детандере низкого давления, вместо воздухоразделительной колонны направляется либо в регенеративный теплообменник, либо предварительного нагревается в других аппаратах блока разделения и затем подается в регенераторы [17].

Предлагаемая схема установки блока криогенного редуцирования основана на простом дроссельном цикле [20], где отсутствуют внутренние ступени охлаждения, поэтому охлаждение насадки в пусковом периоде производится потоком газа низкого давления, поступающего в регенеративный теплообменник после прохождения дроссельного устройства TV и отделителя жидкости LS (см. рис. 1). Охлаждение насадки можно считать окончанным, когда после значительного числа переключений в регенераторе в каждом последующем цикле распределение температур по высоте аппаратов в каждый определенный момент времени регулярно воспроизводится в период теплого и холодного дутья.



P1, P2 –регенераторы, TV – дроссельный вентиль, LS – отделитель жидкости, V – запорный вентиль

Рис. 1. Начальное охлаждение насадки регенератора в составе БКР.

P1, P2 – regenerators, TV – throttle valve, LS – liquid separator, V – valve

Fig. 1. Initial cooling of the regenerator packing as part of the CRU.

Магистральный газ с температурой окружающей среды и давлением магистрального трубопровода преодолевает неохлажденный регенератор P1 без изменения температуры, но проходя через дроссельный вентиль TV расширяется до давления распределительной сети p_2 . Изменение давления с p_1 до p_2 в адиабатных условиях вызывает понижение температуры потока от

T_1 до T_3 . Охлажденный газ направляется в распределительную сеть через неохлажденный регенератор P2, в котором температура газа за счет подвода теплоты от слоя насадки повышается до уровня близкого к температуре окружающей среды. После переключения регенераторов, прямой поток через охлажденный регенератор P2 поступает в дроссельный вентиль TV с температурой

$T_2 < T_{at}$, поэтому после дросселирования температура потока поступающего в неохлажденный регенератор PI становится ниже чем в первом полуцикле $T_3 < T_3'$, однако благодаря подводу теплоты от слоя насадки в распределительную сеть продолжает поступать газ с температурой близкой к температуре окружающей среды. С каждым новым переключением регенераторов энтальпия и температура потока высокого давления перед дросселированием снижается, за счет использования теплоотводящей способности магистрального природного газа. Этот процесс продолжается до тех пор, пока энтальпия газа перед дроссельным устройством не опустится до значения менее энтальпии насыщенного пара при давлении обратного потока $h_2 < h_2 = f(P_2)$. С этого момента начинается переход части потока газа в жидкое состояние, который происходит за счет использования теплоотводящей способности (пониженной энтальпии) потока магистрального природного газа.

Описанный выше процесс выхода БКР на установившийся режим работы был исследован в численном эксперименте. Высота слоя базальтовой насадки в регенераторе была принята равной 6 м, размер частиц насадки составил 6 мм, скорость фильтрации газового потока составляла $2 \text{ кг}(\text{с}\cdot\text{м}^2)$. Проводимый численный эксперимент потребовал усложнения реализованного программного обеспечения для моделирования реального процесса первичного пуска блока криогенного редуцирования магистрального природного газа. В этом случае потребовалась моделировать работу регенеративного теплообменного аппарата в режиме двойного дутья, то есть одновременно проводить исследования в период теплого и холодного дутья. Блок-схема алгоритма проводимого эксперимента представлена на рис. 2.

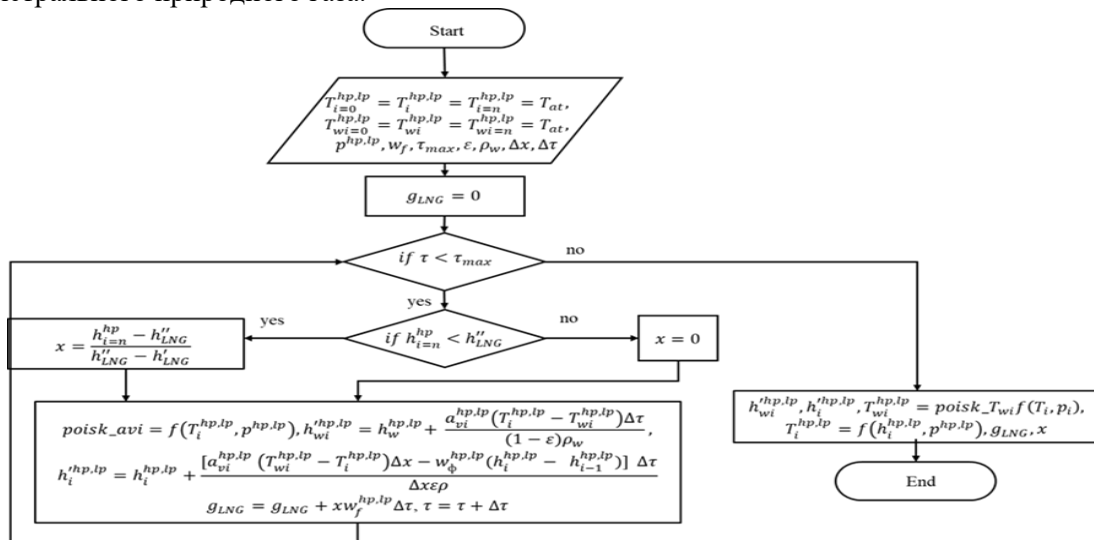


Рис.2. Блок-схема программного кода, осуществляющего пусковой режим БКР магистрального природного газа.

Fig. 2. Block diagram of the software code implementing the start-up mode of the main natural gas CRU.

Следует отметить, что даже во время пускового периода блок криогенного редуцирования магистрального природного газа выполняет свою технологическую функцию по редуцированию потока магистрального природного газа, поступающего на ГРС до требуемого уровня давления в городской распределительной сети без снижения температуры потока низкого давления. Численный эксперимент продолжается до достижения постоянства

характера распределения температур в насадке и газе во время двойного дутья после значительного числа переключений.

Массовая скорость обратного потока газа меняется в зависимости от количества отведенной жидкости в период теплого дутья. Удельное количество жидкости, полученное в результате дросселирования потока высокого давления, может быть определено с помощью выражения:

$$x = \frac{h_{LNG}^{in} - h_{i=n}^{hp}}{h_{LNG}^{in} - h_{LNG}^{hp}} \quad (5)$$

В случае, если выход жидкости отсутствует массовая скорость фильтрации потока низкого и высокого давления равны между собой:

$$\text{if } x = 0 \text{ then } w_f^{lp} = w_f^{hp} \quad (6)$$

А в случае, если коэффициент ожигения $x > 0$, то массовая скорость фильтрации потока низкого давления может быть определена с помощью выражения:

$$\text{if } x > 0 \text{ then } w_f^{lp} = w_f^{hp} (1 - x) \quad (7)$$

По результатам предварительного эксперимента установлено, что «верхние» сечения регенераторов не участвуют в переносе теплоты между потоками природного газа, так как из температура практически не изменилась за время работы в пусковом режиме. С учетом этого высота слоя теплоаккумулирующей насадки и шаг элементарных участков были уменьшены в два раза $X = 3 \text{ м}$, $dx = 0.15 \text{ м}$.

Кроме этого, было предложено уменьшить продолжительность работы регенератора в режиме прямого дутья, так как в предварительном эксперименте выбранное на основании опыта эксплуатации время переключения оказалось избыточным, из-за чего на завершающем этапе работы регенератора прекращалось выпадение жидкой фракции природного газа в отделителе жидкости. В следующей серии экспериментов время переключения выбиралось в пределах $\tau = 240 - 540 \text{ с}$, а массовая скорость фильтрации газа варьировалась в диапазоне $w_f = 0.1 - 0.5 \text{ кг/с}\cdot\text{м}^2$.

В ходе эксперимента моделировалась работа блока криогенного редуцирования в течение 4 часов. Эксперимент показал, что после начала выделения жидкой фракции природного газа, распределение температур по высоте насадке регенератора существенно не изменялось, то есть теплообменный аппарат вышел на квазистационарный режим работы.

Результаты проведенного эксперимента представлены на рис. 3.

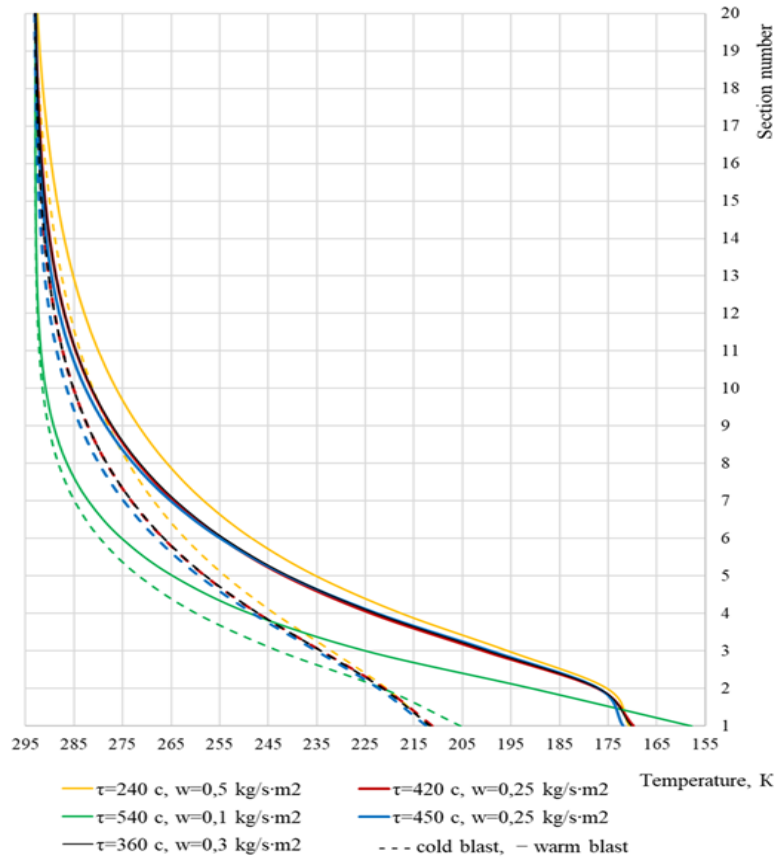


Рис.3. Моделирование работы БКР магистрального природного газа в пусковом режиме.
Fig. 3 – Simulation of the operation of a natural gas mainline CRU in start-up mode.

Анализ графиков распределения температуры по высоте слоя насадки в режиме прямого и обратного дутья с различной скоростью и временем переключения регенераторов, (см. рис. 3) позволяет обосновать выбор оптимального сочетания массовой скорости фильтрации природного газа высокого давления и времени переключения. $w_f = 0.25 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ и $\tau = 450 \text{ с}$. За счет вовлечения насадки в верхних сечениях аппарата в процесс переноса теплоты и рекомендаций по времени переключения регенеративных теплообменных аппаратов [21].

Учитывая большие размеры регенеративного теплообменного аппарата и высокую теплоемкость теплоаккумулирующей насадки, завершение работы БКР пусковым режиме после того, как в отделителе жидкости начинает образовываться сжиженный природный газ, является достаточно условным. Даже после этого продолжается постепенное переохлаждение слоёв теплоаккумулирующей насадки, расположенных в верхней части регенеративных аппаратов. Это наглядно показывают графики распределения температуры теплоаккумулирующей насадки по высоте регенеративного аппарата на различных этапах его эксплуатации (см. рис. 4).

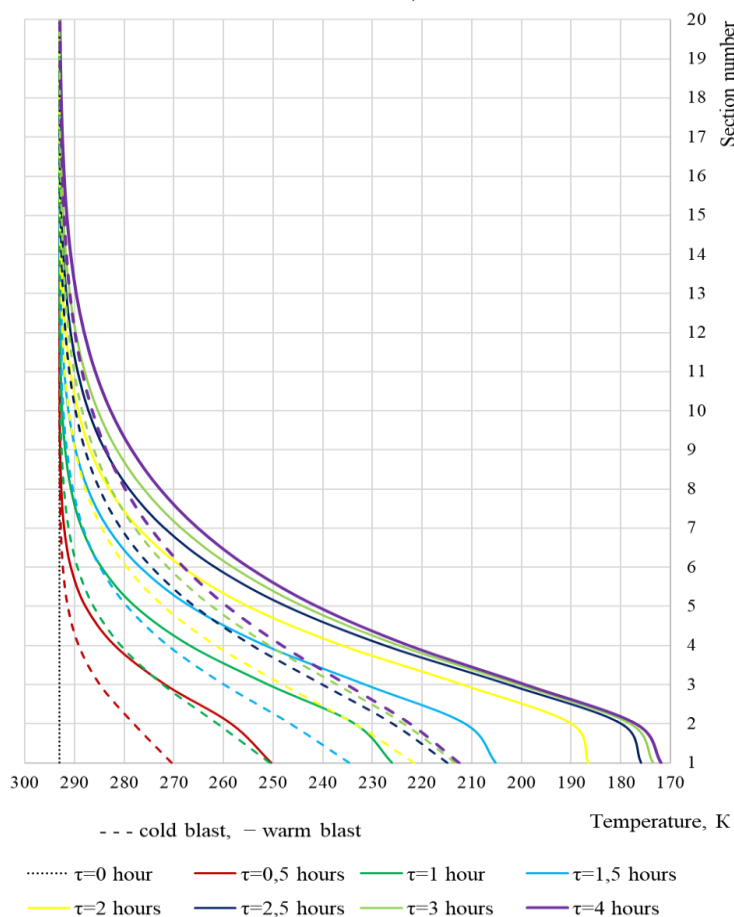


Рис.4. Изменение распределения температуры насадки по высоте регенеративного аппарата в момент переключения в режим теплового дутья через разное время работы БКР пусковом режиме

$$w_{\phi} = 0.25 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}, \tau = 450 \text{ с}.$$

Fig. 4. Change in the temperature distribution of the packing along the height of the regenerative apparatus at the moment of switching to the warm blast mode after different operating times of the CRU

$$\text{in the starting mode } w_f = 0.25 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}, \tau = 450 \text{ s}.$$

По мере увеличения продолжительности работы БКР в пусковом режиме наблюдается

постепенная снижение температуры насадки регенеративного аппарата в начальный

момент фазы прямого дутья. За первые полчаса работы БКР насадки снижается от 293 до 250 К. В момент $\tau=1$ час температура насадки опускается до уровня 225 К, т. е. температура переохлаждения насадки в период $0.5 < \tau \leq 1$ час составляет примерно 50 К/час. На следующем этапе эксплуатации процесс снижения температуры замедляется, к моменту $\tau=1,5$ часа температура насадки в начальный момент фазы теплого дутья составляет 205 К, а темп падения температуры уменьшается до уровня 40 К/час. В период $1.5 < \tau \leq 2$ час температура насадки в момент переключения с холодного на теплое дутье уменьшается до 187 К, т. е. темп охлаждения составляет 36 К/час. В период $2 < \tau \leq 2.5$ часа темп изменения температуры насадки составляет 20 К/час, а к моменту $\tau \leq 4$ час скорость изменения температур опускается до уровня 2 К/час.

Снижение темпа уменьшения температуры насадки более чем 20 раз по сравнению с периодом начальной эксплуатации, $\tau < 1.5$ ч свидетельствует о завершении пускового режима работу БКР. Это косвенно подтверждается графиком распределения температуры в верхних ($i > 15$) сечениях регенеративного теплообменника, где в период, $1.5 < \tau \leq 4$ часа график распределения температуры насадки по элементарным участкам почти не меняется.

В режиме теплого дутья за счет подвода теплоты от потока газа высокого давления происходит постепенный разогрев материала насадки регенеративного теплообменника (см. рис. 5). Температура 1 элементарного участка слоя теплоаккумулирующей насадки возрастает от начального значения 172 К до максимального значения 213 К при $\tau = 450$ с. При этом в верхней части регенеративного теплообменника ($i > 15$) температура материала насадки практически не изменяется.

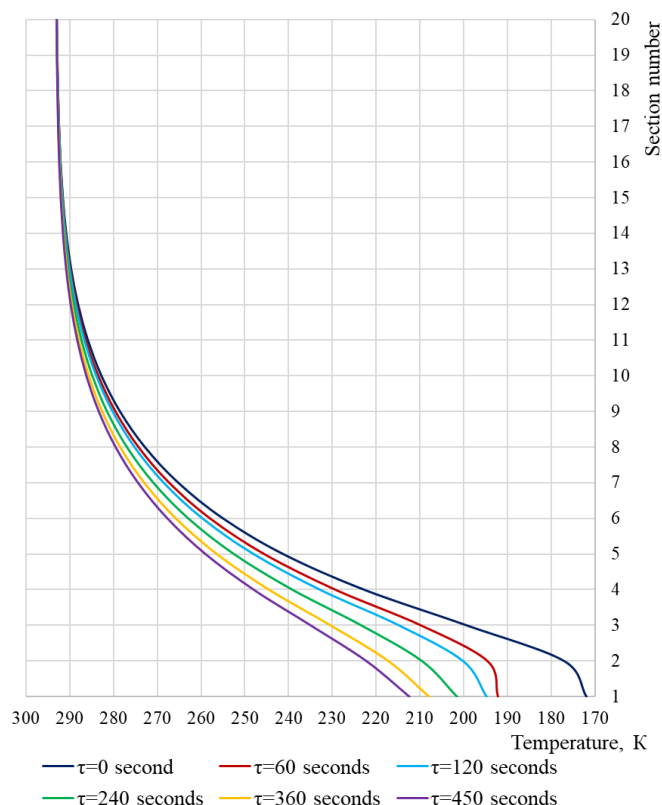


Рис.5. Изменение температуры насадки по высоте регенератора на разных этапах реализации фазы теплого дутья при оптимальных значениях скорости фильтрации газа $w_f = 0.25 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ и времени переключения регенеративных теплообменников $\tau = 450$ с.

Fig. 5. Change in the packing temperature along the height of the regenerator at different stages of the warm blast phase at optimal values of gas filtration rate $w_f = 0.25 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$ and switching time of regenerative heat exchangers $\tau = 450$ s.

Анализ данных о температуре теплоаккумулирующей насадки в нижнем сечении регенеративного аппарата показывает, что выбранное сочетание экспозиции режима теплого дутья $\tau = 450$ и значения массовой скорости фильтрации природного газа высокого давления через слой насадки регенератора обеспечивают устойчивый выход из теплообменного аппарата потока газа с температурой, который обеспечивает выделение жидкой фракции из потока газа низкого давления.

Способность регенеративного теплообменника поддерживать температуру газа на входе в дроссельный вентиль на уровне достаточном для получения жидкой фракции после расширения потока, основана, на эффективной организации отвода теплоты к потоку газа низкого давления в фазе холодного дутья.

На этом этапе работы регенеративного теплообменника поток газа низкого давления поступает в нижнее сечение регенеративного теплообменника с температурой насыщенного пара СПГ при давлении распределительной сети. Регенеративный теплообменник обеспечивает перегрев потока газа низкого давления от температуры насыщения до температуры близкой к температуре окружающей среды.

Перегрев потока газа обеспечивается за счет подвода теплоты от материала теплоаккумулирующей насадки. При этом температура слоя теплоаккумулирующей насадки снижается (см. рис. 6). Максимальное изменение температуры материалы тепла аккумулирующие насадки наблюдается в нижнем сечении регенератора.

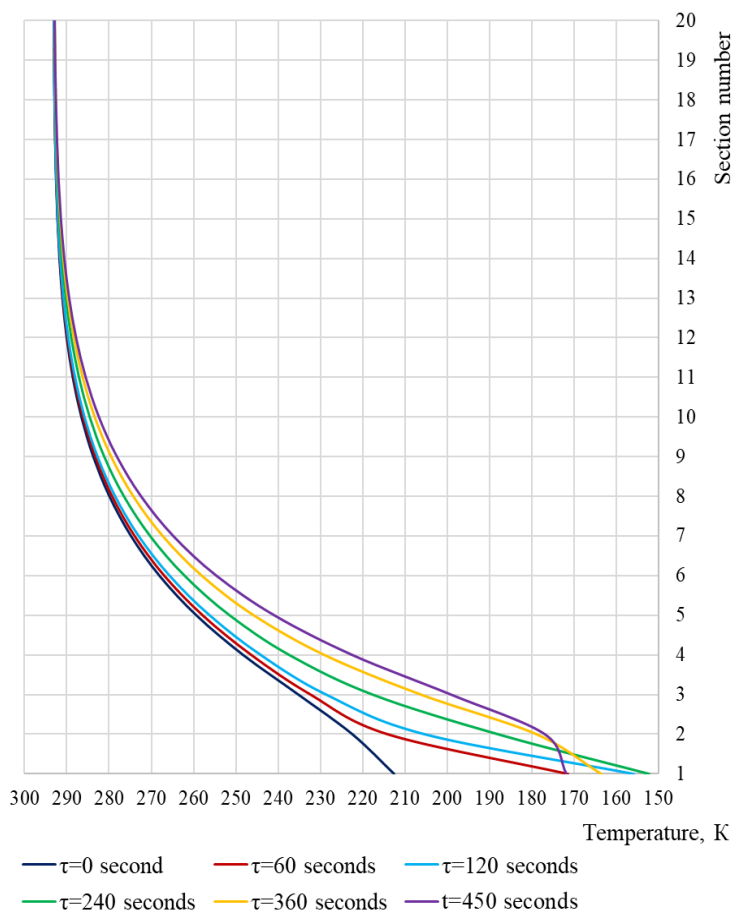


Рис.6. Изменение температуры насадки по высоте регенератора на разных этапах реализации фазы холодного дутья при оптимальных значениях скорости фильтрации газа $w_f = 0.25 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$ и времени переключения регенеративных теплообменников $\tau = 450\text{с}$.

Fig. 6. Change in the packing temperature along the height of the regenerator at different stages of the cold blast phase at optimal values of the gas filtration rate $w_f = 0.25 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$ and the switching time of the regenerative heat exchangers $\tau = 450\text{s}$.

За время работа регенератора в режиме холодного дутья температура насадки снижается в диапазоне:

$$\text{if } 0 \leq \tau \leq 240\text{s then } 212 \geq T_{wi=1} \geq 152\text{K.} \quad (8)$$

Затем, температура потока низкого давления на выходе из отделителя жидкости возрастает, что сопровождается ростом температуры насадки в нижнем сечении регенеративного теплообменника:

$$\text{if } 240 < \tau \leq 450\text{s then } 152 < T_{wi=1} \leq 171.4\text{K.} \quad (9)$$

При работе БКР на завершающей фазе пускового режима эксплуатацию средний коэффициент оживания природного газа составил $\chi = 0.078$. Учитывая то, что основной технологической задачей БКР является предупреждение переохлаждения потока газа низкого давления на входе в распределительную сеть и отказ от использования принудительного нагрева потока высокого давления, возможность переводить в жидкое состояние более 7% потока природного газа, проходящего через ГРС, можно считать хорошим результатом. При этом нельзя не отметить, что выделение жидкой фракции достигнуто не только без дополнительных затрат энергии, но и с отказом от затрат топливного газа в блоке подогрева.

Этот дополнительный энергетический выигрыш можно рассматривать как основной стимул владельцев к модернизации действующих ГРС и включении БКР в состав проектируемых газораспределительных станций. Удельный выход сжиженного природного газа из потока газа высокого давления прошедшего через единицу поперечного сечения регенеративного теплообменника за время холодного дутья составил $g_{LNG} = 8.84 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$

Максимальный перегрев нижнего слоя теплоаккумулирующей насадки в фазе теплого дутья составил $\Delta T_{wi=1}^{hp} = 40.5 \text{ K}$, максимальное переохлаждение насадки в том же сечении в фазе холодного дутья $\Delta T_{wi=1}^{lp} = 40.7 \text{ K}$.

Выполненный численный эксперимент расширил представления о физике процессов, протекающих в регенеративных теплообменных аппаратах блока криогенного

редуцирования магистрального природного газа при первичном пуске установки. Полученную информацию необходимо использовать в дальнейших экспериментах для анализа работы регенератора в условиях близким к реальным.

Несмотря на большое время, затраченное на выполнение эксперимента физические процессы, которые в них исследованы протекали относительно короткое, с точки зрения низкотемпературной кампании криогенных устройств время. Можно предположить, что по мере роста продолжительности работы блока криогенного редуцирования в квазиустановившемся режиме область регенеративного теплообменного аппарата, в которой происходит процесс передачи теплоты, распространится в более верхние участки насадочного теплообменного аппарата.

Это предположение косвенно подтверждают результаты проведенного вычислительного эксперимента по исследованию длительной работы БКР при постоянных значениях скорости фильтрации и времени переключения регенеративных теплообменников ($w_f = 0.25 \frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}, \tau = 450\text{с}$). Результаты этого эксперимента представлены на рис. 7.

Анализ графиков на рис. 7 показывает, что увеличение продолжительности работы БКР в установившемся режиме сопровождается расширением зоны активной передачи теплоты в верхнюю часть насадочного теплообменного аппарата

Через четверо суток после начала эксплуатации БКР температура теплоаккумулирующей насадки в среднем сечении регенеративного теплообменного аппарата $i=10$ в режиме теплого дутья уменьшилась от $T_{wi=10}^{hp} = 283 \text{ K}$ в момент завершения работы в пусковом $\tau = 4$ часа, до $T_{wi=10}^{hp} = 278 \text{ K}$ после 4 суток непрерывной эксплуатации, $\Delta T_{wi=10}^{hp} = 5 \text{ K}$.

Аналогичные изменения претерпели значения температуры насадки в том же сечении $i=10$ в фазе холодного дутья. На момент времени $\tau = 4$ часа температура насадки $T_{wi=10}^{lp} = 287 \text{ K}$, спустя 4 суток непрерывной эксплуатации температура этого

участка опустилась до $T_{wi=10}^{lp} = 281.5$ К,
 $\Delta T_{wi=10}^{lp} = 5.5$ К.

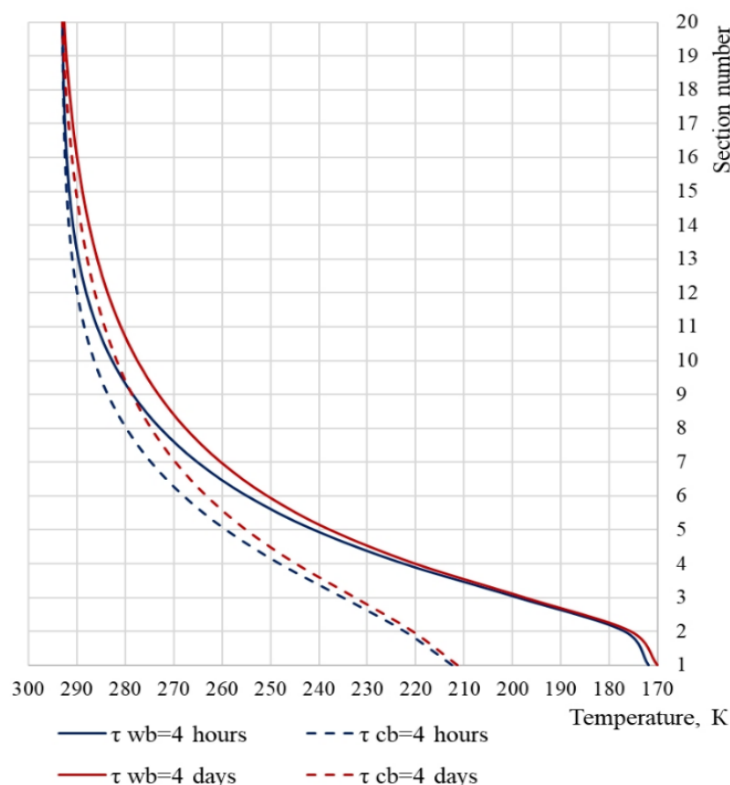


Рис.7. Изменение температуры насадки по высоте регенератора в период теплого и холодного дутья по завершению пускового периода и после длительной эксплуатационной кампании.
Fig. 7. Change in packing temperature along the height of the regenerator during the warm and cold blast periods at the end of the start-up period and after a long operating campaign.

Амплитуда колебания температуры насадки в среднем сечении регенеративного теплообменника за полный технологический цикл работы БКР:

$$\Delta T_{wi=10} = T_{wi=10}^{hp} - T_{wi=10}^{lp} \quad (10)$$

за четверо суток эксплуатации выросла с $\Delta T_{wi=10} = 2$ К в момент времени $\tau = 4$ часа до $T_{wi=10} = 3.5$ К через четверо суток эксплуатации.

Нельзя не отметить, что несмотря на длительный период эксплуатации, амплитуда колебаний в верхней части регенеративного теплообменника остаётся значительно меньше аналогичного показателя для нижней части аппарата.

Учитывая технологическую задачу, которую решает БКР такое распределение температур можно считать оптимальным, так

как оно полностью исключает возможность поступления недогретого газа низкого давления в распределительную сеть.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного численного исследования по моделированию работы блока криогенного редуцирования в период начального охлаждения позволили получить некоторый установившийся характер распределения температур в насадке регенератора, воспроизводимый в течение нескольких циклов полудутья.

Подобрана оптимальная скорость фильтрации магистрального природного газа и продолжительностью дутья.

На основании результатов исследования в установившемся режиме работы ГРС был получен средний коэффициент ожижения за цикл полудутья, а также значение выхода жидкости. Регенеративные теплообменные

аппараты в составе блока криогенного редуцирования магистрального природного газа на ГРС показали устойчивую работу вовремя проведения численного эксперимента, что создает предпосылки для проведения дальнейших исследований.

Учитывая специфику работы ГРС следует продолжить численные исследования, в частности оценить работоспособность БКР в условиях суточного колебания расхода природного газа в распределительной сети.

Анализ доступных данных показывает, что в течение суток потребление природного газа может существенно изменяться, что неизбежно скажется на величине скорости фильтрации газа высокого и низкого давления через слой теплоаккумулирующей насадки. Необходимо оценить устойчивость БКР к колебаниям расхода природного газа.

References

- [1] Barmin I.V. Liquefied natural gas yesterday, today and tomorrow / I.V. Barmin, I.D. Kunis. - Moscow: Bauman Moscow State Technical University, 2009. - 256 p.
- [2] Akulov L.A. Low-temperature equipment installations and systems. Liquefaction of natural gas and utilization of the cold of liquefied natural gas during its regasification: Textbook. - St. Petersburg: SPbGUNIPT, 2006. - 175 p.
- [3] Kravchenko D.V., Baranov A.Y., Sokolova E.V., Solonina Y.A., Spiridonova A.P. Choosing and justifying technological solutions to reduce LNG evaporation losses in large-capacity storage facilities // AIP Conference Proceedings - 2021, Vol. 2412, pp. 030051. DOI:10.1063/5.0075778
- [4] Energy Trends, Issue No. 107, April 2022.
- [5] Nomenclature list of gas distribution stations of main gas pipelines, VRD 39-1.8-022-2001, Information and Advertising Center of the Gas Industry (IRC Gazprom)
- [6] Castillo, L., & Dorao, C. A. (2010). Influence of the plot area in an economic analysis for selecting small scale LNG technologies for remote gas production. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2(6), 302-309.
- [7] He, T., Liu, Z., Ju, Y., & Parvez, A. M. (2019). A comprehensive optimization and comparison of modified single mixed refrigerant and parallel nitrogen expansion liquefaction process for small-scale mobile LNG plant. *Energy*, 167, 1-12.
- [8] Qyyum, M. A., Naquash, A., Sial, N. R., & Lee, M. (2023). CO₂ precooled dual phase expander refrigeration cycles for offshore and small-scale LNG production: Energy, exergy, and economic evaluation. *Energy*, 262, 125378
- [9] Qyyum, M. A., Qadeer, K., & Lee, M. (2017). Comprehensive review of the design optimization of natural gas liquefaction processes: current status and perspectives. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(17), 5819-5844.
- [10] Cao, W. S., Lu, X. S., Lin, W. S., & Gu, A. Z. (2006). Parameter comparison of two small-scale natural gas liquefaction processes in skid-mounted packages. *Applied Thermal Engineering*, 26(8-9), 898-904.
- [11] Shi, Y., Gu, A., Wang, R., & Zhu, G. (2005, January). Optimization analysis of peakshaving cycle to liquefy the natural gas. In *Proceedings of the Twentieth International Cryogenic Engineering Conference (ICEC20)* (pp. 741-744). Elsevier Science.
- [12] Kondratenko, A. D., Karpov, A. B., Kozlov, A. M., & Meshcherin, I. V. (2016). Russian small-scale natural gas liquefaction plants. *Oil and Gas Chemistry*, (4), pp. 31-36.
- [13] Calculation of cryogenic installations. Textbook for refrigeration and technological universities. / Ed. S.S. Budnevich. - 2nd ed., revised and enlarged. L: Mechanical Engineering, Leningrad Department, 1979.-367 p. ill.
- [14] Campbell D.M. Purification and Processing of Natural Gases. Norman, USA 1972. Translated from English edited by Doctor of Technical Sciences Gudkov S.F. — Moscow: Nedra, 1977. — 349 p.
- [15] Arkharov A.M. et al. Cryogenic systems. Volume 2. Fundamentals of designing devices, installations, and systems. Moscow: Mashinostroenie, 1999. — 720 p.
- [16] Alekseev V.P., Weinstein G.E., Gerasimov P.V. Calculation and modeling of cryogenic plant apparatuses, D.: Energoatomizdat., 1987. - 280 p.
- [17] Epifanova V. I., Akselrod L. S. (eds.) Air separation by deep cooling: Technology and equipment: In 2 volumes. – 1973.
- [18] Baranov, A. Y., Kravchenko, Y. A., & Ikonnikova, A. Y. (2025, May). Numerical Modeling of the Operation of a Packaged Heat Exchanger in Obtaining Liquefied Natural Gas at Gas Distribution Stations. In *2025 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)* (pp. 128-133). IEEE.
- [19] Barron R. F. Cryogenic systems: Trans. from English. - 2nd ed. - M: Energoatomizdat, 1989. - 408 p.: ill.
- [20] Glizmanenko D.L. Oxygen Production. 5th edition. Moscow: Chemistry, 1972, 752 p.; 46 tables; 339 figures; bibliography 15 references.
- [21] Burtsev, S. A., Karpenko A. P., Leontyev A. I. (2016). Method of distributed production of liquefied natural gas at gas distribution stations. *High-Temperature Thermophysics*, 54(4), 605-608.

[22] Ivanov V.I. Operation of air separation units: Textbook. St. Petersburg: National Research University of Information Technologies,

Mechanics and Optics; Institute of Chemical Technology, 2012, 93 p.

Information about authors.



Кравченко Юлия Андреевна,
Университет ИТМО,
к.т.н.
Область научных интересов: технологии сжиженного природного газа.

E-mail: asolonina@itmo.ru
ORCID 0000-0002-5564-9312;



Кравченко Денис Владимирович,
Университет ИТМО,
к.т.н. Область научных интересов: техника и технологии сжиженного природного газа.

E-mail: dvkravchenko@itmo.ru
ORCID 0000-0003-3675-5678



Баранов Александр Юрьевич,
Университет ИТМО,
д.т.н., профессор.
Область научных интересов: низкотемпературные технологии.

E-mail: abaranov@itmo.ru
ORCID 0000-0002-9263-8153



Логвиненко Екатерина Владимировна,
Университет ИТМО,
к.т.н. Область научных интересов: вакуумная техника.

E-mail: evlogvinenko@itmo.ru,
ORCID 0000-0002-5127-9959



Баранов Владимир Александрович,
Аспирант Университета ИТМО.

Область научных интересов: хранение и транспортирование сжиженного природного газа.

E-mail: baranov@krypton.ru,
ORCID 0009-0002-6067-4982



Иконникова Анастасия Юрьевна,
Аспирант Университета ИТМО. Область научных интересов: криогенные технологии, технологии сжижения природного газа.

E-mail: aikonnikova@itmo.ru
ORCID 0000-0003-2665-5788



Пашкова Евгения Александровна,
Преподаватель Университета ИТМО

Область научных интересов: промышленная автоматизация, автоматизация низкотемпературных процессов.

E-mail: eatravina@itmo.ru
ORCID 0009-0003-9474-1415