DOI: 10.31897/PMI.2021.2.9

УДК 621.6

Применение эффекта резонансного энергоразделения в пунктах редуцирования природного газа с целью повышения энергоэффективности системы газораспределения

А.М.ЩИПАЧЕВ, А.С.ДМИТРИЕВА✉
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

***Как цитировать эту статью*:** Щипачев А.М. Применение эффекта резонансного энергоразделения в пунктах редуцирования природного газа с целью повышения энергоэффективности системы газораспределения / А.М.Щипачев, А.С.Дмитриева // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С. 253-259. DOI: 10.31897/PMI.2021.2.9

Аннотация. Поддержание температуры газа и образование газовых гидратов – одна из главных проблем эксплуатации газопроводов. Разработка и внедрение новых эффективных способов проведения подогрева газа при редуцировании позволят снизить себестоимость транспорта газа, решить проблему ресурсо- и энергосбережения в топливной отрасли. Исследование направлено на повышение энергоэффективности процесса редуцирования природного газа путем использования резонансного подогревателя газа для поддержания заданной температуры на выходе из газораспределительной станции (ГРС) и предупреждения возможного гидратообразования и обледенения оборудования станции. Рассматривается осуществление безогневого подогрева природного газа и экономии топливного газа подогревателей за счет внедрения в схему узла редуцирования термоакустического редуктора, работающего на основе резонансного эффекта Гартмана – Шпренгера. С помощью анализа существующих методов разделения энергии и численного моделирования приводится обоснование эффективности устройства разделения энергии резонансного типа. Модификация блока редуцирования путем внедрения в него энергоразделяющих устройств позволит проводить общий или частичный подогрев природного газа за счет собственной энергии давления. Разрабатываемая технология позволит частично (в перспективе полностью) заменить выработку тепловой энергии на газораспределительной станции за счет сжигания природного газа.

***Ключевые слова*:** природный газ; газопровод; энергосбережение; энергоразделение; подогрев природного газа; эффект Гартмана – Шпренгера; редуцирование; газораспределительная станция

Введение. На сегодняшний день в России разработаны и внедрены программы повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и ресурсосбережения, в том числе по сокращению объемов потерь природного газа [21, 22, 33].

Дальние расстояния транспортировки газа обуславливают высокое давление перекачки, которое нужно снижать перед отправкой потребителю. Снижение происходит на пунктах редуцирования путем расходования энергии потока природного газа на преодоление местного сопротивления, представленного дроссельным органом регулятора давления [32].

Сети транспорта и распределения природного газа являются обширными и разветвленными системами с множеством пунктов редуцирования давления газа (ПРГ) и защиты газопроводов от коррозии, установок электрохимической защиты (ЭХЗ). Основное назначение ПРГ – понижение высокого давления (при котором газ транспортируется на дальние расстояния) до необходимого потребителям, а затем его поддержание на этом уровне.

Энергия, которой обладает поток газа, частично теряется при редуцировании, в процессе чего понижается температура газа и, следовательно, возникает необходимость в его подогреве. Также энергию можно эффективно преобразовывать в другие виды энергии: электроэнергию на нужды самой газораспределительной станции и/или тепловую энергию для нивелирования охлаждения газа при дросселировании.

Начиная с 30-х гг. XX в., в США, Британии, Канаде, России и других странах проводятся исследования в области утилизации энергии давления газа. В России работают государственные программы, стимулирующие разработку и внедрение энергосберегающих систем [12].

Объектом исследования статьи является узел редуцирования природного газа газораспределительной станции. Исследование направлено на решение задачи сокращения количества топливного газа, расходуемого для восстановления температуры потока природного газа, которая понижается при его редуцировании. Согласно ГОСТ 5542-2014, температура газа на выходе из пункта редуцирования должна превышать температуру точки росы, находящуюся в диапазоне –7…–12 °С

DOI: 10.31897/PMI.2021.2.9

и зависящую от температуры газа, давления и влажности. Расход газа после пункта редуцирования изменяется в течение года, недели, суток и одного часа. В среднем наибольшее значение расхода превышает наименьшее в течение месяца в 2,5 раза, в течение недели – в 1,2 раза, а в течение суток – в 1,8 раз. Данные соотношения указывают на нестационарность процесса движения газа в сети газораспределения.

На этапе проектирования ГРС оцениваются потребности станции в электроэнергии и тепле в зависимости от ее назначения, условий расположения, площади и размеров, расчетной температуры в холодное время года, учета нормативных снеговой, ветровой нагрузок и других особенностей. Установка котельных на ГРС является распространенным решением для обеспечения тепловой и электрической энергий [25].

При редуцировании природного газа происходит резкое снижение температуры, и появляется риск гидратообразования в виде твердых кристаллических отложений на стенках трубопроводов. В основном гидраты образуются в местах сужения трубопровода, регуляторах давления и местах установки контрольно-измерительных приборов [10]. Помимо этого, в связи с существенным охлаждением газа, происходит обледенение трубопроводной арматуры.

На газораспределительных станциях в качестве мер по предотвращению обмерзания корпусов оборудования и образования гидратов применяют подогреватели газа, локальный обогрев корпусов регуляторов давления, ввод игибиторов гидратообразования в поток газа (чаще всего метанол) [16]. Наибольшее распространение на практике получил первый метод, ввиду того, что второй имеет наименьшую эффективность, а третий является капиталозатратным [10, 16].

Основные виды подогревателей: огневые (подогрев огнем) и водяные (обогрев посредством горячей воды или пара). Первый вид опасен в пожарном отношении, а второй требует большего расхода топлива и труда на обслуживание. Для работы подогревателей ГРС оснащают мощными котельными, установками электроснабжения и канализации. Требованиями по эксплуатации ГРС предписана установка как минимум двух подогревателей (один в резерве). Такая система подогрева природного газа требует большего количества энергии, чем расходуется на собственные нужды ГРС [12, 25].

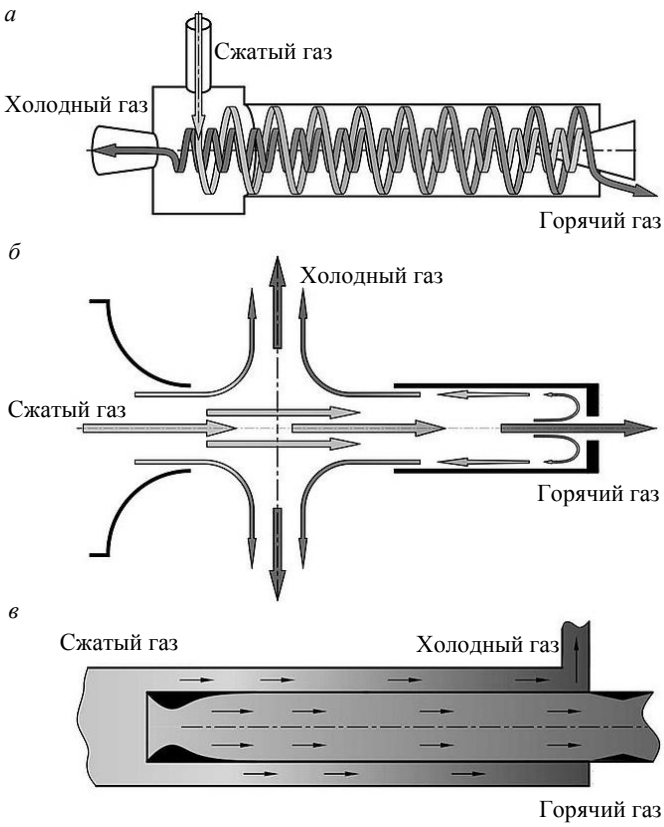


Рис.1. Устройства для безмашинного энергоразделения (температурного разделения) газового потока:
а – трубка Ранка – Хилша; *б* – трубка Гартмана – Шпренгера; *в* – труба, предложенная Леонтьевым [5]

Цель работы состоит в осуществлении безогневого подогрева природного газа и экономии топливного газа подогревателей за счет внедрения в схему узла редуцирования термоакустического редуктора, работающего на основе резонансного эффекта Гартмана – Шпренгера. Данное решение направлено на повышение энергоэффективности процесса редуцирования путем использования резонансного подогревателя газа для сохранения заданного значения температуры на выходе из ГРС и предупреждения возможного гидратообразования и обледенения оборудования станции.

Постановка проблемы. Применительно к условиям газораспределительной станции утилизация энергии природного газа при его редуцировании (рис.1) [24, 27, 36] осуществляется разными способами, например, с помощью устройства на основе вихревого эффекта Ранка – Хилша; температурной стратификации с использованием трубы Леонтьева; детандер-генераторных агрегатов; устройства на основе эффекта Гартмана – Шпренгера.

В качестве примера устройства, работающего на вихревом эффекте Ранка – Хилша, взят регулятор давления с теплогенератором РДУ-Т, который встроен в регулятор и обогревает редуцирующий узел регулятора давления за счет кинетической энергии газа [14, 23, 35]. В ходе процесса предотвращается гидратообразование и обмерзание узла при больших перепадах давления.

На основе температурной стратификации с использованием трубы Леонтьева [7, 18] автором [23] предложено устройство для безогневого подогрева и редуцирования природного газа без использования дополнительных машин и оборудования. Устройство работает следующим образом. Проистекающий поток газа разделяется на два: один разгоняется до сверхзвуковой скорости в сопле Лаваля, второй – высоконапорный, с дозвуковой скоростью, протекает с противоположной стороны в межстенном пространстве. В процессе происходит взаимодействие потоков газа через теплопроводную стенку устройства: сверхзвуковой нагретый поток направляется на газораспределительную станцию, охлажденный дозвуковой – на компрессорную станцию [2, 28, 34].

Если использовать энергию давления потока для вращения какой-либо расширительной машины (детандера), то это позволит утилизировать и направить ее на различные полезные нужды [1]. Такое использование давления магистральных газопроводов академик М.Д.Миллионщиков предложил еще в 1947 г. В настоящее время детандер-генераторные агрегаты используются на газоредуцирующих пунктах магистральных газопроводов. Энергия потока газа преобразовывается в механическую энергию в детандере и электроэнергию в генераторе. Полученная электроэнергия расходуется на нужды газоредуцирующего пункта, в том числе на подогрев газа после дросселирования [1, 19, 29].

Эффект Гартмана – Шпренгера, открытый во второй половине XX в., заключается в том, что при обтекании стационарным потоком воздуха, направленных к нему полостей (трубок) определенной глубины, образуются пульсации давления газа и повышение температуры стенок полостей до величин, превышающих (на десятки, а иногда и сотни градусов) температуру торможения в набегающем потоке [13]. Такое превышение температуры, недопустимое с точки зрения закона сохранения энергии, происходит в результате протекания нестационарных ударно-волновых процессов, образующихся при взаимодействии обтекающего открытый конец полости потока газа с объемом газа внутри этой полости [4, 13, 17]. Впервые данный эффект был обнаружен Юлиусом Гартманом.

Газ, набегающий на открытый конец полости, возбуждает колебания, частота которых равна частоте столба газа в области отрыва [13]. Частота колебаний находится на одном уровне за счет энергии внешнего потока газа [4, 13]. От колеблющейся поверхности раздела потока набегают волны сжатия или разряжения внутрь полости и отражаются, столкнувшись с закрытым концом полости. Взаимодействующие между собой волны сжатия на входе в полость генерируют ударную волну конечной амплитуды, распространение которой в потоке газа приводит к росту энтропии, сопровождающемуся необратимым выделением тепла. Внутри закрытого конца полости происходит аккумуляция образующегося тепла и постепенный разогрев газа.

В случае образования колебаний из-за обрывов потока у входа в заглушенную полость частота колебаний давления будет зависеть только от длины полости ($l_т$, м) и скорости звука в среде (c, м/с) и составит $f = c/2l_т$ [4, 31].

Частота в резонансе будет меньше в два раза: при отражении от открытого конца полости волна меняет знак, отраженная ударная волна перейдет в волну разрежения. Поэтому теоретическая частота колебаний в резонансе равна $f_{теор} = c/4l_т$.

При протекании данного эффекта конечная температура газа зависит от условий теплоотдачи во внешний незаглушенный поток через стенки, а также от интенсивности процесса массообмена в области открытого конца полости [3, 15, 31].

Известно применение эффекта Гартмана – Шпренгера в авиастроении, нефтепромысле, малотоннажном производстве сжиженного природного газа (СПГ) [13, 23]. Стоит отметить, что данный эффект в газотранспортной системе до этого не нашел применения в РФ и за рубежом, так как считался исключительно негативным.

Проведенная оценка экономической эффективности применения данного эффекта в пунктах редуцирования природного газа показала положительный результат и подтверждает эффективность капиталовложений в разработку устройств редуцирования, работающих на резонансном эффекте.

DOI: 10.31897/PMI.2021.2.9

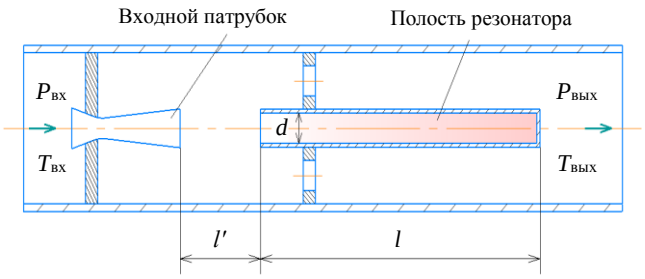


Рис.2. Геометрия устройства

$P_{вх}$, $T_{вх}$ – давление и температура на входе; $P_{вых}$, $T_{вых}$ – давление и температура на выходе; l – длина полости резонатора; l' – расстояние между входным патрубком и полостью резонатора; d – диаметр полости резонатора

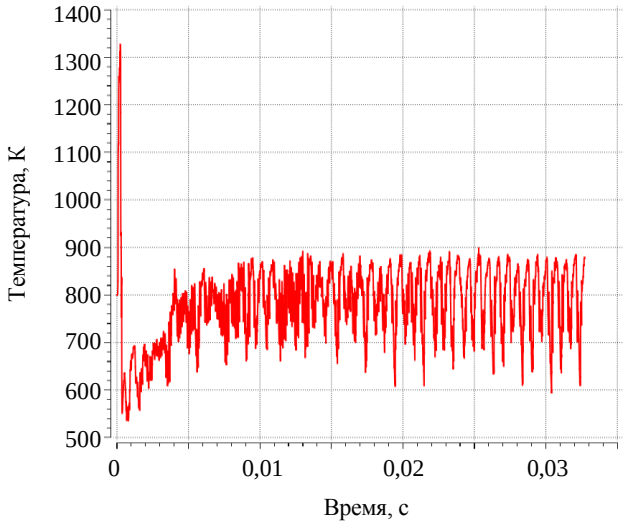


Рис.3. График пульсаций температуры в точке у основания резонатора

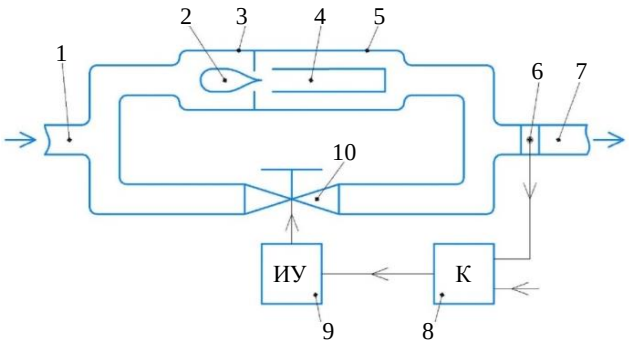


Рис.4. Принципиальная схема устройства бесподогревного редуцирования природного газа [20]

Методология. Цель моделирования – качественное получение резонансного эффекта Гартмана – Шпренгера. Численный анализ производится методом конечных элементов в программном комплексе Ansys Fluent. Расчетная модель построена на основе геометрии устройства, предназначенной для дальнейшего изготовления конструкции и проведения опытных исследований (рис.2).

Построена сеточная область с высокой детализацией пристенных зон и зон с наибольшей скоростью потока газа [30]. В качестве газовой среды принимается воздух, описываемый законом реального газа Редлиха – Квонга [6, 8, 26, 31]. На входе и выходе модели устройства заданы граничные условия: $P_{вх}$ = = 600 000 Па; $P_{вых}$ = 0 Па (давления избыточные); Q_m = 0,0090375 кг/с (187 м^3/ч при стандартных условиях), соотношение температур $T_{вх}$ и $T_{вых}$ не должно превышать 1,42 (коэффициент адиабаты 1,4). Длина полости резонатора равна 73 мм, толщина его стенки – 2 мм. Расчет выполнен на основе DES-модели турбулентности [9, 11, 31].

По итогам численного моделирования получены значения пульсаций температуры в точке, расположенной в нижней части резонатора (рис.3).

С использованием преобразования Фурье получена искомая частота резонансных колебаний – 1111 Гц. Найдена теоретическая частота резонансных колебаний: $f_{теор}$ = 1133 Гц. Отклонение рассчитанной частоты резонансных колебаний от теоретической составило 1,94 %, что свидетельствует о корректном составлении расчетной модели.

Обсуждение. На основе проведенного анализа методов утилизации энергии природного газа предлагается устройство бесподогревного и безогневого редуцирования природного газа на основе резонансного эффекта Гартмана – Шпренгера (рис.4). Устройство состоит из сверхзвукового сопла, соосно расположенного с ним резонатора и параллельно подключенного регулятора давления для компенсации суточных и сезонных неравномерностей расхода газа.

Разработанный термоакустический регулятор давления содержит единый проточный корпус 5, внутри которого располагается сопло 3 с центральным телом 2 и резонатор 4, при этом вход и выход корпуса 5 соединены соответственно с патрубками высокого 1 и низкого 7 давлений, а также между собой трубопроводом с регулирующим клапаном 10; выход датчика давления 6, установленного на выходе термоакустического регулятора, связан с входом управляющего контроллера 8, выход которого связан с входом исполнительного устройства 9 регулирующего клапана 10.

Первый поток, теряя давление и температуру, разгоняется в сопле 3 с центральным телом 2 и набегает на заглушенную полость конического резонатора 4, возбуждая разогревающие находящийся в нем газ высокочастотные ударные волны. Разогретый газ периодически истекает из резонатора 4 в проточную часть единого с соплом 3 корпуса 5, где смешивается с обтекающим резонатор 4 газом низкой температуры, образуя с ним поток газа усредненной температуры, направляемый на смешение с отделенным ранее после входного патрубка высокого давления 6 вторым потоком газа.

Газ высокого давления попадает в сопло, рассчитанное под конкретный диапазон давлений. На выходе из сопла сосредоточенный ускоренный поток газа поступает в соосный с соплом резонатор определенной длины, находящийся на определенном расстоянии от сопла. В резонаторе возникает эффект Гартмана – Шпренгера, вследствие которого газ нагревается выше температуры торможения. Охлаждение при дросселировании газа нивелируется его локальным нагревом в резонаторе.

Поддержание давления на выходе из термоакустического регулятора на заданном уровне, вместе с автоматическим регулированием высотности сопла 3 его центральным телом 2, позволяют обеспечить стабильность работы термоакустического регулятора, зависящую от постоянства перепада давлений на нем. Это обеспечивает большую линейность зависимости температуры на выходе из регулятора от расхода через него и надежность технологической операции редуцирования в целом.

На базе Центра компетенций в области техники и технологии освоения месторождений в арктических условиях (ЦК «Арктика») Санкт-Петербургского горного университета по схеме (рис.4) [20] создана экспериментальная установка, которая имеет дополнительный датчик температуры, установленный у основания резонатора внутри корпуса.

Проведены экспериментальные исследования, апробирующие результаты моделирования и подтверждающие возникновение резонансного эффекта и нагрев газа в разработанном устройстве. В качестве условий проведения эксперимента использовались те же значения давлений, что и при проведении численного моделирования. Рабочий газ – воздух. В результате была достигнута резонансная частота колебаний – 2000 Гц. Таким образом, достижение эффекта Гартмана – Шпренгера подтверждено. Экспериментальная частота колебаний давления отличается от теоретической на 12 %, что можно объяснить большой концентрацией масла в воздухе, выходящем из компрессора и непостоянством градиента давления.

В связи с малыми габаритами резонатора было принято решение не устанавливать датчик температуры непосредственно в газовую среду, находящуюся внутри него, так как это вызвало бы дополнительные трудности при изготовлении. Однако такое решение привело к косвенному определению температуры воздуха внутри резонатора.

Используя построенную модель устройства в Ansys Fluent, определена температура газа у основания резонатора. Исходные данные для численного моделирования, согласно полученным экспериментальным значениям: $T_{вх}$ = 13,88 ºС; $T_{вых}$ = 14,61 °С; $P_{вх}$ = 600 000 Па; $P_{вых}$ = 3615 Па; Q_m = 0,0090375 кг/с. Все давления являются избыточными.

Определение температуры у основания резонатора проводилось методами подмоделирования и итераций для подбора температуры ¼ газа в резонаторе, при которой динамика роста температуры основания резонатора и его абсолютная величина соответствуют опытным данным.

Визуализация результатов моделирования представлена на рис.5.

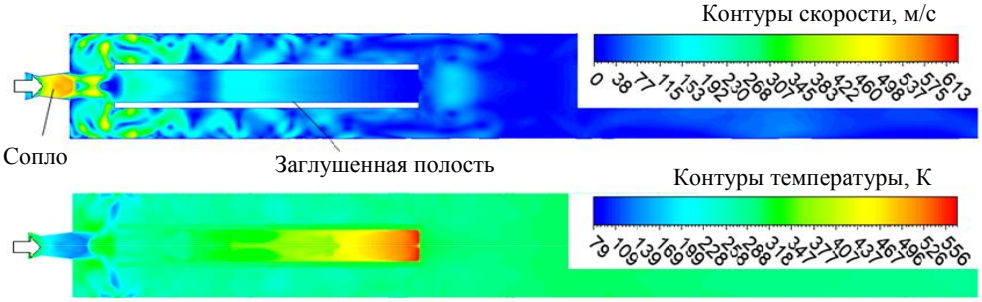


Рис.5. Распределение температуры в резонаторе

Проанализировав данные, полученные при моделировании и в результате эксперимента, можно сделать вывод, что температура газа в резонаторе при рабочем режиме устройства текущей конфигурации составляет от 467 до 556 К или от 194 до 283 °С.

Была достигнута основная цель – нагрев газа, характеризующийся повышением температуры основания резонатора при протекании резонансного эффекта, со стабильным поддержанием значения температуры потока на выходе из устройства, равной значению температуры на входе в него.

Заключение. В работе проанализирована возможность применения безогневых и бесподогревных регуляторов давления для газораспределительных станций. Предложено устройство бесподогревного редуцирования природного газа на основе резонансного эффекта Гартмана – Шпренгера.

На основе расчетной модели произведено численное моделирование эффекта Гартмана – Шпренгера в Ansys Fluent, в результате которого исследуемый эффект был качественно достигнут. Отклонение частоты, полученной при моделировании резонансного эффекта, от теоретического значения составило 1,94 %.

По результатам теоретического анализа способов и устройств, утилизирующих энергию газа, и численного моделирования разработана схема, и изготовлена экспериментальная установка устройства бесподогревного редуцирования природного газа. Проведены эксперименты, подтверждающие действие резонансного эффекта с нагревом газа и поддержанием заданной температуры на выходе из устройства.

Косвенным методом с помощью моделирования в Ansys Fluent определена температура газа в резонаторе, которая находится в диапазоне от 467 до 556 К.

Таким образом, в ходе данной работы была полностью подтверждена и обоснована возможность применения бесподогревных регуляторов давления для газораспределительных станций. Такие устройства могут получить широкое применение в пунктах редуцирования газов, где существуют риски гидратообразования, обледенения трубопроводной арматуры и ее рабочих компонентов. Установка таких устройств полностью заменит необходимость в сжигании топливного газа, что несет положительный экономический эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белоусов А.Е.* Обоснование способа редуцирования природного газа в системе газораспределения при помощи детандеров объемного типа: Автореф. дис. … канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2018. 19 с.

2. *Бурцев С.А.* Исследование влияния диссипативных эффектов на температурную стратификацию в потоках газа (обзор) / С.А.Бурцев, А.И.Леонтьев // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 2. С. 310-322. DOI: 10.7868/S0040364413060069

3. *Вигдорович И.И.* Энергоразделение газов с малыми и большими числами Прандтля / И.И.Вигдорович, А.И.Леонтьев // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2013. № 6. С. 117-134.

4. *Глазнев В.Н.* Эффект Гартмана. Область существования и частоты колебаний / В.Н.Глазнев, Ю.Г.Коробейников // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42. № 4. С. 62-67.

5. *Гурин С.В.* Разработка технологии квазиизотермического редуцирования давления для объектов системы транспортировки и распределения природного газа: Автореф. дисс. … канд. техн. наук. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2008. 21 с.

6. *Егоров К.С.* Численное моделирование влияния числа Прандтля газа и схемы течения на эффективность работы устройства безмашинного энергоразделения / К.С.Егоров, К.С.Рогожинский // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э.Баумана. Электронный журнал. 2015. № 10. С. 21-35. DOI: 10.7463/1015.0814490

7. *Здитовец А.Г.* Экспериментальное исследование безмашинного энергоразделения воздушных потоков в трубе Леонтьева / А.Г.Здитовец, Ю.А.Виноградов, М.М.Стронгин // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 9. С. 397-404.

8. *Иванов И.Э.* Численное исследование газодинамики сопел малоразмерных газогенераторов и вытекающих из них струй / И.Э.Иванов, И.А.Крюков, С.А.Шустов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2014. Т. 13. № 1. С. 112-122. DOI: 10.18287/1998-6629-2014-0-1(43)-112-122

9. Интенсификация теплообмена при ламинарном и турбулентном течении в узком канале с однорядными овальными лунками / С.А.Исаев, А.И.Леонтьев, Н.В.Корнев и др. // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53. № 3. С. 390-402. DOI: 10.7868/S0040364415030060

10. *Катаев К.А.* Гидратообразование в трубопроводах природного газа // Всероссийский журнал научных публикаций. 2011. № 1(2). С. 22-23.

11. Компьютерное моделирование физических процессов в газожидкостном реакторе / В.М.Сизяков, Д.В.Градов, И.Турунен, А.Лаари // Записки Горного института. 2013. Т. 202. С. 284-287.

12. *Кулигин П.А.* Использование инновационных технологий для достижения энергоэффективности и энергосбережения – путь к энергетической безопасности страны // Записки Горного института. 2011. Т. 191. С. 121-124.

13. *Ли Чжун Мин.* Исследование термоакустического нагрева газа в газоструйных генераторах Гартмана: Автореф. дис. … канд. техн. наук. М.: Московский авиационный институт, 2004. 22 с.

14. *Макаров М.С.* Эффективность энергоразделения при течении сжимаемого газа в плоском канале / М.С.Макаров, С.Н.Макарова // Теплофизика и аэромеханика. 2013. Т. 20. № 6. С. 777-787.

15. Метод воздействия на свободные нестационарные воздушные вихри / А.Ю.Вараксин, М.Э.Ромаш, В.Н.Копейцев, М.А.Горбачев // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. № 4. С. 533-537. DOI: 10.1134/S0018151X12040219

16. *Мусакаев Н.Г.* Превентивные методы борьбы с гидратообразованием в трубопроводах / Н.Г.Мусакаев, Р.Р.Уразов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 2006. № 1. С. 50-56.

17. *Парфенов Д.В.* Предупреждение нагрева элементов крановых узлов при заполнении газом участков магистральных газопроводов: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2018. 18 с.

18. Патент № 2106581 РФ. Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (Труба Леонтьева) / А.И.Леонтьев. Опубл. 10.03.1998. Бюл. № 7.

19. Патент № 2620624 РФ. Детандер-генераторный агрегат с системой его регулирования / А.Е.Белоусов, О.В.Кабанов. Опубл. 29.05.2017. Бюл. № 16.

20. Патент № 2737214 РФ. Термоакустический регулятор давления / А.Е.Белоусов, А.С.Дмитриева, А.М.Щипачев. Опубл. 26.11.2020. Бюл. № 33.

21. *Пашкевич М.А.* Мониторинг техногенного воздействия экологически опасных объектов ОАО «Газпром» / М.А.Пашкевич, И.Б.Мовчан, Т.А.Петрова // Записки Горного института. 2007. Т. 172. С. 201-204.

22. *Петрова Т.А.* Подходы к разработке системы производственного экологического мониторинга городских систем газоснабжения // Записки Горного института. 2013. Т. 203. С. 205-208.

23. *Попович С.С.* Влияние ударных волн на эффект безмашинного энергоразделения: Автореф. дис. … канд. техн. наук. М.: Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В.Ломоносова, 2016. 21 с.

24. *Репин Л.А.* Возможности использования энергии давления природного газа на малых газораспределительных станциях // Энергосбережение. 2004. № 3. С. 34-39.

25. *Фокин Г.А.* Методология создания автономных турбинных источников электрической энергии, использующих энергию сжатого природного газа для собственных нужд газотранспортной системы России: Автореф. дис. … д-ра техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2015. 40 с.

26. *Хазов Д.Е.* Численное исследование безмашинного энергоразделения воздушного потока // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10. № 1-2. С. 25-36.

27. *Хаит А.В.* Исследование эффекта энергоразделения с целью улучшения характеристик вихревой трубы: Автореф. дис. … канд. техн. наук. Екатеринбург: Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, 2012. 20 с.

28. *Цынаева А.А.* Интенсификация теплообмена в энергетических устройствах на основе газодинамической температурной стратификации с помощью тепловых труб / А.А.Цынаева, Е.А.Цынаева, М.Н.Никитин // Промышленная энергетика. 2014. № 12. С. 36-39.

29. *Черных А.С.* Перспективы применения автономных источников энергии при транспортировке и распределении газа / А.С.Черных, В.А.Карасевич, А.А.Яковлев // Научный журнал российского газового общества. 2016. № 1. С. 59-61.

30. Численное моделирование в ANSYS CFX явления нагрева тупиковых ответвлений крановых узлов / С.В.Савченков, Р.В.Агиней, Д.Г.Репин и др. // Газовая промышленность. 2013. № 10. С. 13-16.

31. *Шубин А.В.* Внедрение энергоразделяющего устройства на основе эффекта Гартмана – Шпренгера в узел редуцирования газораспределительной станции, оснащенной детандер-генератором / А.В.Шубин, А.С.Дмитриева, А.Е.Белоусов // Труды научно-практической конференции с международным участием «Инженерные системы – 2019», 3-5 апреля 2019, Москва, Россия. Российский университет дружбы народов, 2019. С. 411-420.

32. *Шушин Н.А.* О нагреве газа при дросселировании // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2011. № 4. С. 67-69.

33. *Щипачев А.М.* Повышение эффективности редуцирования природного газа на газораспределительных станциях / А.М.Щипачев, А.Е.Белоусов, А.С.Дмитриева // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2020. № 3(99). С. 92-96.

34. *Azanov G.M.* The efficiency of one method of mashineless temperature stratification in a gas flow / G.M.Azanov, A.N.Osiptsov // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 106. P. 1125-1133. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.090

35. *Eiasma-ard S.* Review of Ranque – Hilsch effects in vortex tubes / S.Eiasma-ard, P.Promvonge // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2008. Vol. 12. Iss. 7. P. 1822-1842. DOI: 10.1016/j.rser.2007.03.006

36. Pure- and pseudo-pure fluid thermophysical property evaluation and the open-source thermophysical property library cool prop / I.H.Bell, J.Wronski, S.Quoilin, V.Lemort // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2014. Vol. 53. Iss. 6. P. 2498-2508. DOI: 10.1021/ie4033999

***Авторы*: А.М.Щипачев,** *д-р техн. наук, профессор, schipachev_am@pers.spmi.ru, https://orcid.org/0000-0001-6148-6073* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*), **А.С.Дмитриева,** *аспирант, alena_dmitrieva57@rambler.ru, https://orcid.org/0000-0002-1180-3226* (*Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.03.2021.
Статья принята к публикации 29.03.2021.