

УДК 532.526.4

# Использование метода сверхзвукового безмашинного энергоразделения при редуцировании давления природного газа \*

С. С. Попович, А. Г. Здитовец, Н. А. Киселёв, М. С. Макарова

*НИИ механики МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, 119192, Россия*  
e-mail: pss@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 3.10.2018

После доработки 26.10.2018

Принята к публикации 2.11.2018

Приводится описание метода сверхзвукового безмашинного энергоразделения и его использования для решения проблемы гидратообразования, возникающей при редуцировании давления природного газа на газораспределительных станциях. Приводится обзор существующих и перспективных способов решения проблемы гидратообразования, отмечены их преимущества и недостатки. Дано описание способа реализации безогневого подогрева газа при редуцировании его давления, отмечены основные параметры, влияющие на эффективность процесса.

**Ключевые слова:** гидратообразование, дросселирование, газораспределительная станция, безмашинное энергоразделение, сверхзвуковой поток, адиабатная температура стенки, коэффициент восстановления температуры.

## Введение

В России на сегодняшний день действует более 4200 газораспределительных станций (ГРС) (в Европе – больше 7300), из них находящихся на эксплуатации больше 20 лет – около 3000 [1]. Редуцирование (снижение) давления газа на ГРС от магистральных 5–12 МПа до 0.6–1.2 МПа в населенных пунктах приводит к существенному падению температуры газа вследствие дроссель-эффекта. Интегральный дроссель-эффект снижения температуры природного газа составляет 4–6 градусов при снижении давления на 1 МПа [2]. При этом газ попадает в такие термобарические условия (рис. 1), при которых происходит гидратообразование из-за имеющейся влаги в составе газа. Зоной образования гидратов являются области, расположенные левее равновесных кривых. К гидратообразующим компонентам при-

родного газа относятся метан, этан, пропан, изобутан, углекислый газ, сероводород и некоторые другие [3]. В случае отсутствия подогрева природного газа перед дроссельным устройством сброс давления в нем приводит к выпадению конденсата в виде кристаллогидратов, образованию жидких пробок, обмерзанию регулирующих клапанов, запорной арматуры и приборов.

Для исключения эффекта гидратообразования на ГРС применяют системы огневого подогрева газа [4]. Блок подогрева газа представляет собой массивную конструкцию с котельной, на которой за счет сжигания части газа оставшая часть перекачиваемого объема подогревается. Основными недостатками такого способа, помимо стоимости самого подогревателя, является сложная система регулирования процесса горения, непрерывное потребление газа в качестве топлива и выбросы дымовых газов в атмосферу. Современная промышленность в основном идет по пути совершенствования подогревателей газа. Самые совершенные на сегодняшний день ос-

\* Работа поддержана Фондом поддержки научно-проектной деятельности студентов, аспирантов и молодых ученых «Национальное интеллектуальное развитие».

нащены сложной электронной аппаратурой для регулирования горелок, в том числе для работы на нерасчетных режимах.

Для решения проблемы гидратообразования на ГРС может быть использован метод сверхзвукового безмашинного энергоразделения потоков, предложенный академиком А. И. Леонтьевым [5, 6]. Принцип действия метода основан на тепловом взаимодействии дозвукового и сверхзвукового потоков через теплопроводную перегородку. Газ, подаваемый в первый канал, проходит через сверхзвуковое сопло, теряет полное давление при разгоне, движении по сверхзвуковому каналу и торможении в диффузоре, при этом подогреваясь за счет теплообмена через стенку с дозвуковым потоком. Газ, подаваемый во второй канал, практически сохраняет полное давление и охлаждается за счет теплопередачи через стенку к сверхзвуковому потоку. Отказ от огневого подогрева газа позволил бы упростить и обезопасить эксплуатацию ГРС, улучшить экологические показатели станции, сэкономить топливный природный газ.

### Перспективные способы редуцирования давления газа

В настоящее время основными способами борьбы с гидратообразованием являются предварительный огневой подогрев газа перед редуцированием, частичный или полный обогрев трубопроводов и использование ингибиторов гидратообразования – метанола, этанола, пропанола, этиленгликоля и др. [7]. В то же время, учитывая значительные потери газа, токсичность и стоимость ингибиторов и другие сопутствующие проблемы, актуальными являются альтернативные способы редуцирования давления газа с одновременным его подогревом.

Значительное количество публикаций и патентов [8–13] посвящено совершенствованию огневого подогрева газа. Базовым способом в патентных заявках, часто принимаемым за прототип, является способ предотвращения гидратообразования в природном газе, принцип действия которого заключается в предварительном подогреве газа перед этапом редуцирования в кожухотрубном рекуперативном теплообменнике с непосредственным огневым подогревом в газовых горелках [9]. Предлагаются различные способы повышения эффективности этого процесса.

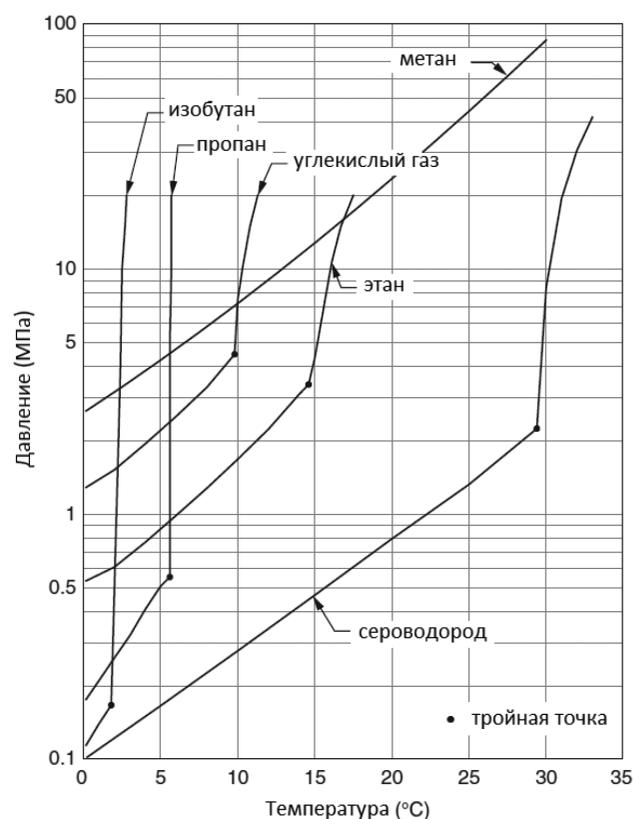
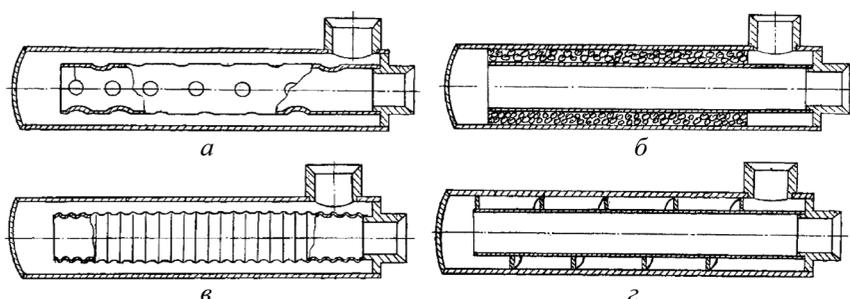


Рис. 1. Термобарические границы гидратообразования для различных компонентов природного газа [3]

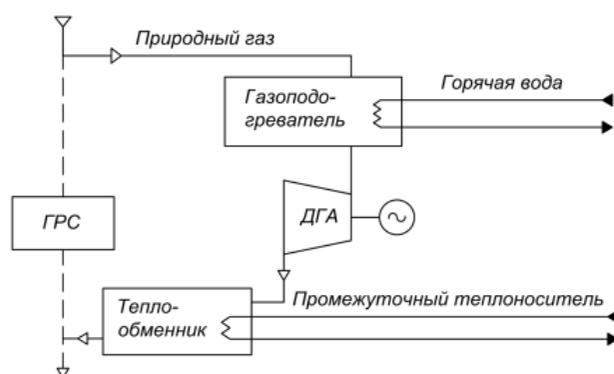
В работе [10] предполагается уменьшение перепада давления на регуляторе давления посредством увеличения гидравлических потерь газа при его движении в нагреваемых каналах теплообменника с огневым подогревом. Техническим результатом изобретения заявляется уменьшение энергозатрат (топливного газа) на подогрев газа, снижение вредных выбросов в окружающую среду с одновременным повышением надежности и ресурса технологического нагревателя газа.

В работе [11] предлагается применение различных интенсификаторов теплоотдачи: выштамповки на стенках теплообменных труб, использование скрученной ленты на стенках теплообменной трубы, гофр и др. (рис. 2). Целью интенсификации теплоотдачи заявлено повышение надежности и экономичности работы нагревателя при расширении диапазона тепловых нагрузок.

Разрабатываются различные способы повышения эффективности систем дозирования подачи ингибитора [12], а также ввода ингибитора в трубопровод перед регуляторами давления. Например, в отличие от базового способа впрыска метанола через одну форсунку на оси трубопровода

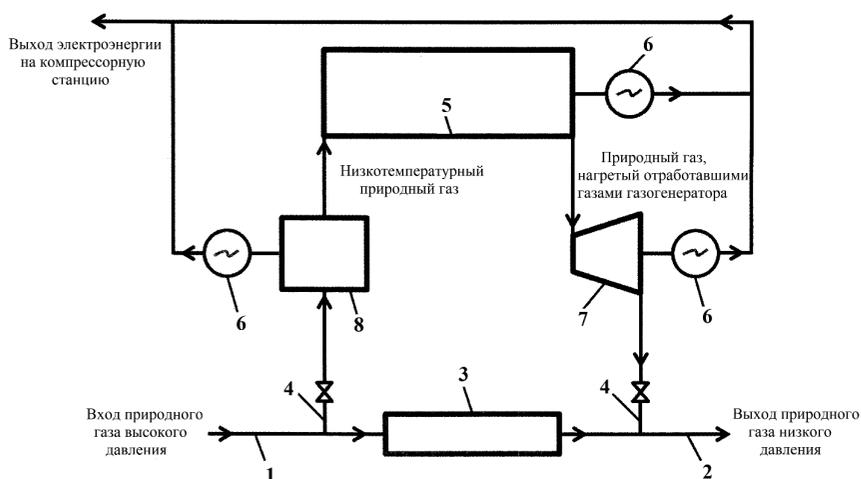


**Рис. 2.** Интенсификация теплоотдачи в теплообменном аппарате для предварительного подогрева газа перед редуцированием с помощью сферических выштамповок на стенках тепловых труб (а); пористой вставки в кольцевом зазоре между наружной и внутренней трубами (б); гофрированной внутренней трубы (в); скрученной ленты, расположенной во внешней и/или внутренней полостях (г). Данные работы [11]



**Рис. 3.** Энергетический модуль ГРС с детандер-генераторным агрегатом (ДГА) [16]

предлагается использование двух и более форсунок, установленных в стенках трубопровода [13]. Подобное решение технической задачи должно обеспечить сохранность форсунок и средств под-



**Рис. 4.** Блок-схема ГРС с выработкой электроэнергии, промышленного холода и конденсата [17]: 1 – магистраль высокого давления, 2 – магистраль низкого давления, 3 – редуцирующее устройство, 4 – байпасный газопровод, 5 – газотурбинная установка с обращенным газогенератором, 6 – электрогенератор, 7 – теплоутилизирующая турбодетандерная установка, 8 – энергоутилизирующая турбодетандерная установка

вода метанола, а также надежность функционирования системы, поскольку одна форсунка является или резервной, или дополнительной для варианта реализации, когда идет большой поток газа и не хватает расхода метанола.

Перспективной в определенных случаях представляется утилизация энергии избыточного давления природного газа в турбодетандере – расширительной турбине, механически связанной с потребителем

мощности – генератором, компрессором и др. (рис. 3). При этом для предотвращения гидратообразования при редуцировании давления в турбодетандере всегда предусмотрены нагреватели газа, которые могут быть выполнены электрическими или с подогревом от тепла сжигаемого газа [14]. В Германии, Нидерландах, Италии, США технология замены дроссельных устройств на детандер-генераторные агрегаты используется с 1970-х гг. [15]. В России существуют несколько установок, в основном работающих в режиме опытной эксплуатации на ГРС при электро-станциях.

В работе [17] предлагается способ работы ГРС с комбинированной выработкой электроэнергии, промышленного холода и конденсата с помощью утилизирующих турбодетандерных

установок (рис. 4). Природный газ забирают из магистрали высокого давления перед редуцирующим устройством и через байпасный газопровод направляют в магистраль низкого давления. Электроэнергия вырабатывается тремя генераторами, механически связанными с газотурбинной установкой, энергоутилизирующей турбодетандерными установками. Заявляемый технический результат – повышение коэффициента полезного действия, снижение вредных выбросов в окружающую среду, упрощение работы ГРС.

Основной недостаток турбодетандерной технологии для использования на ГРС – необходимость предварительного подогрева газа из-за опасности выпадения гидратов на рабочих элементах детандера – так же, как и при использовании дроссельных устройств. Кроме того, согласно оценкам некоторых специалистов [18], количество теплоты, используемое при подогреве газа перед утилизирующей турбиной, сопоставимо с вырабатываемой в результате электрической мощностью.

Имеются предложения использовать для целей редуцирования давления газа устройств

безмашинного энергоразделения. Технология безмашинного энергоразделения предполагает получение холодного и горячего потоков газа в устройствах без движущихся механизмов (поршней, лопаток и др.) [19]. Причины, вызывающие энергоразделение потока, могут быть различными. В некоторых случаях это вихревые течения, в других случаях это связано с пульсациями давления и возникновением ударных волн [20]. К методам безмашинного энергоразделения относятся вихревые, волновые, резонансные, эжекционные, пульсационные, газодинамические и некоторые другие.

Наибольшее распространение среди безмашинных методов энергоразделения получило применение вихревого эффекта в трубках Ранка–Хилша, более известных под названием вихревой трубы [21]. Принцип действия вихревой трубы заключается в подаче сжатого газа тангенциально в цилиндрическую камеру через сопловой вход, формирование в трубе закрученного потока и отбор горячего газа с периферийного сечения и холодного газа – через центральное отверстие в трубе (рис. 5).

Однако при использовании вихревых труб для редуцирования давления газа снижается давление обоих потоков на выходе – и горячего, используемого в качестве редуцируемого, и холодного, использование которого при низком давлении затруднительно. Поэтому в этом случае приходится использовать дополнительные теплообменные и хладоутилизирующие устройства, что усложня-

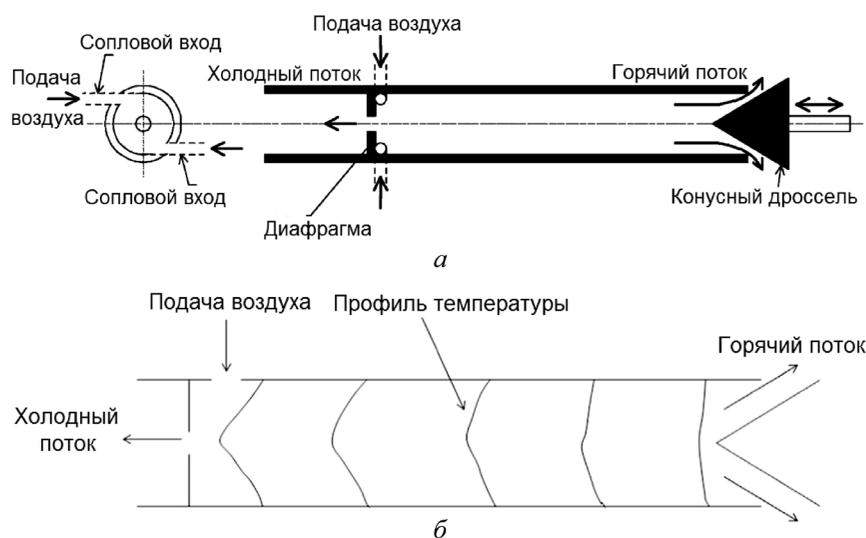


Рис. 5. Вихревая труба Ранка–Хилша противоточной компоновки [22] (а). Профили температуры по сечениям вихревой трубы [23] (б)

ет конструкцию и снижает преимущества использования технологии безмашинного энергоразделения. Так, например, в работе [24] холод и тепло утилизируют в дополнительных теплообменных аппаратах с проточной питьевой водой. В работе [25] подогрев низкотемпературной составляющей газового потока низкого давления после вихревой трубы осуществляется за счет отбора теплоты кристаллизации замораживаемой воды в паре попеременно вводимых и выводимых из работы теплообменных аппаратов. В работе [26] заявляется, что холодный поток газа из вихревой трубы нагревается за счет теплопритока из окружающей среды в одном из двух переключающихся атмосферных теплообменников (рис. 6). Далее этот поток объединяется с потоком газа низкого давления после ГРС, дополнительно подогревается в рекуперативном теплообменнике газом высокого давления и выводится в магистраль потребителя, объединяясь с горячим потоком. Часть подогретого в вихревой трубе газа используется для отогрева выведенного из работы атмосферного теплообменника.

В литературных источниках также можно встретить способ редуцирования давления природного газа, основанный на использовании другого метода безмашинного энергоразделения – резонансных труб Гартмана–Шпренгера [27]. При направлении газовой струи в трубку с закрытым дном температура поверхности дна при определенных режимах может в несколько раз превышать начальную температуру торможения

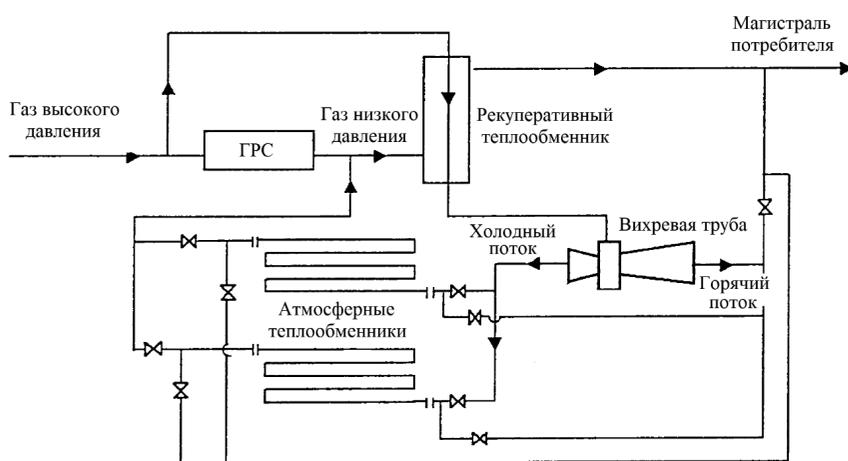


Рис. 6. Схема реализации способа редуцирования давления газа на ГРС с помощью вихревой трубы [26]

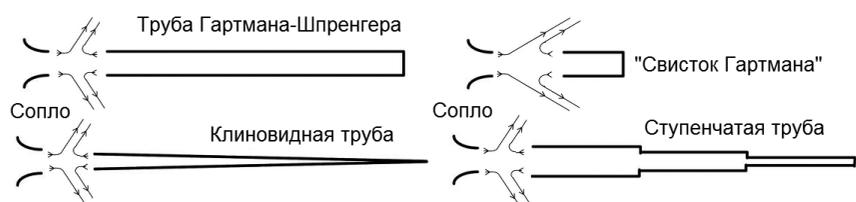


Рис. 7. Возможные конфигурации трубы Гартмана-Шпренгера [28]

газа (рис. 7). При этом температура газа в струе, вытекающей из трубки с закрытым дном, снижается. Этот эффект наблюдается при возникновении резонансных режимов, и величина температурного разделения существенно образом зависит от расстояния между соплом струи и открытым отверстием трубы, соотношения диаметров трубки и сопла, формы резонатора, начального перепада давления.

Так, например, в работе [29] предлагается использование после дроссельного сопла соосно установленного стакана, в котором, как заявлено авторами, газ низкого давления нагревается за счет трения молекул газа при движении в ограниченном пространстве. Недостатком данного метода является риск образования гидратов непосредственно в дроссельном устройстве, а также низкая эффективность подогрева газа в стакане, поскольку в аналогичных резонансных трубках Гартмана-Шпренгера нагревается только заглушенный торец стакана, при отводе теплоты от которого выходящий в обратном направлении газ охлаждается, что создает дополнительные угрозы образованию гидратов. Если же теплота от нагретого заглушенного торца стакана не отводится, то, согласно закону сохранения энергии, пол-

ная энтальпия газа на выходе из стакана не может быть выше, чем на входе, что также не способствует цели предотвращения гидратообразования.

Таким образом, после проведенного краткого обзора существующих и альтернативных способов редуцирования давления природного газа, можно отметить, что основной проблемой является функционирование большинства используемых на практике и предлагаемых способов редуцирования за счет прямых потерь газа при его сжигании в системах предварительного подогрева. Недостатком предлагаемых методов, на наш взгляд, также является наличие дополнительных теплообменных и утилизирующих устройств, снижающих универсальность решения проблемы

гидратообразования.

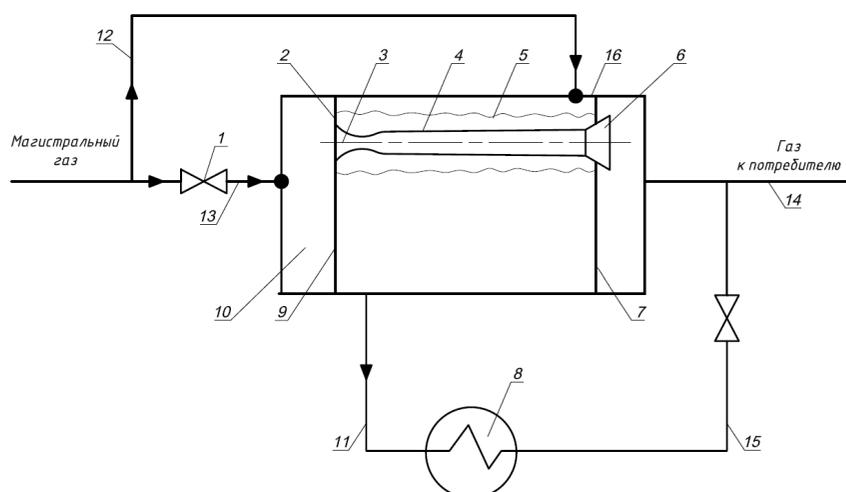
### Метод сверхзвукового безмашинного энергоразделения

Академик А. И. Леонтьев предложил способ и устройство сверхзвукового безмашинного энергоразделения потоков, с помощью которого можно решить проблему подогрева газа при редуцировании давления на ГРС [6]. В данном устройстве газовые потоки, имеющие одинаковые начальные температуры и давления и при этом движущиеся с существенно разными скоростями (дозвуковой и сверхзвуковой потоки), обмениваются теплотой через разделительную перегородку. В результате, один поток (сверхзвуковой) нагревается и теряет давление при разгоне, движении по каналу и последующем торможении, а второй (дозвуковой) охлаждается при сохранении своего давления. Работоспособность устройства безмашинного энергоразделения обоснована теоретическими расчетами [30–33] и подтверждена экспериментально [34–38].

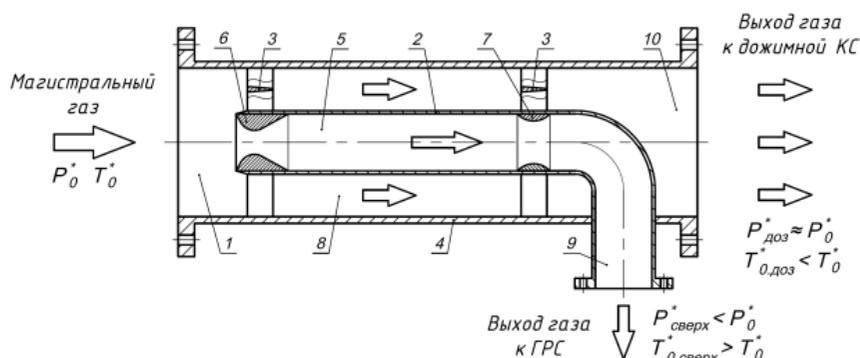
На основе метода сверхзвукового безмашинного энергоразделения потоков был предложен способ регулируемого бесподогревного редуцирова-

ния магистрального природного газа [39]. Принцип действия способа основан на использовании теплообменника в виде трубы с отдельными входами для дозвукового и сверхзвукового потоков (рис. 8). Часть газа поступает на редуцирующий орган устройства энергоразделителя, представляющий собой пучок сверхзвуковых каналов со сверхзвуковыми соплами, в которых газ разгоняется до чисел Маха 2–5, и диффузорами. В сверхзвуковых каналах газ редуцируется, а затем поступает к потребителю. Другая часть газа поступает в межтрубное пространство, а затем в аппарат утилизации холода, после чего поступает к потребителю. Основным недостатком данного технического решения так же, как у ранее рассмотренных методов редуцирования давления газа, является необходимость использования дополнительных систем утилизации холода, что снижает преимущества использования технологии безмашинного энергоразделения.

Задачу редуцирования давления газа можно решить следующим образом (рис. 9). Газ подается под давлением из магистрального газопровода на вход 1 устройства энергоразделения, состоящего из двух коаксиально расположенных каналов, разделенных теплопроводной перегородкой 2. Во внешнем канале установлены крепежные элементы аэродинамического профиля (пилон) 3 с упором на внешнюю стенку трубопровода 4. В центральном канале 5 за счет геометрического воздействия в конфузоре-диффузоре сопле 6 поток разгоняется до сверхзвуковой скорости, а затем тормозится в сверхзвуковом диффузоре 7. В кольцевом канале 8 поток остается высоконапорным дозвуковым. По мере движения вдоль разделяющей потоки перегородки 2 сверхзвуковой поток нагревается, а дозвуко-



**Рис. 8.** Способ регулируемого бесподогревного редуцирования магистрального природного газа [39]: 1 – узел плавного регулирования общего расхода газа; 2 – отсекающий клапан; 3 – профилированное сверхзвуковое сопло; 4 – пучок сверхзвуковых каналов; 5 – межтрубное пространство теплообменника; 6 – диффузор; 7, 9 – трубные доски; 8 – система утилизации холода; 10 – приемная камера; 11, 12, 13, 14, 15 – линии подвода/отвода газа; 16 – кожухотрубный теплообменник



**Рис. 9.** Схема устройства безогневого редуцирования давления природного газа на основе метода сверхзвукового безмашинного энергоразделения: 1 – ресивер подвода газа из магистрального газопровода; 2 – теплопроводная разделятельная перегородка; 3 – крепежный элемент (пилон); 4 – наружная стенка устройства; 5 – сверхзвуковой канал; 6 – сверхзвуковое сопло; 7 – сверхзвуковой диффузор; 8 – кольцевой дозвуковой канал; 9 – газоход сбора редуцированного подогретого газа, ведущий к ГРС; 10 – газоход сбора охлажденного газа, ведущий к дожимной КС

вой охлаждается. Редуцированный подогретый газ отводят через газоход 9 на газораспределительную станцию и далее к потребителю, а охлажденный высоконапорный газ направляют через газоход 10 на дожимную компрессорную станцию (КС) для дальнейшей транспортировки.

Принцип действия устройства энергоразделения поясняется следующим. Профиль температуры торможения при обтекании стенки существенно дозвуковым потоком газа практически равномерный, а значит температура обтекаемой стенки близка к температуре в ядре потока (рис. 10). Температура торможения в погранич-

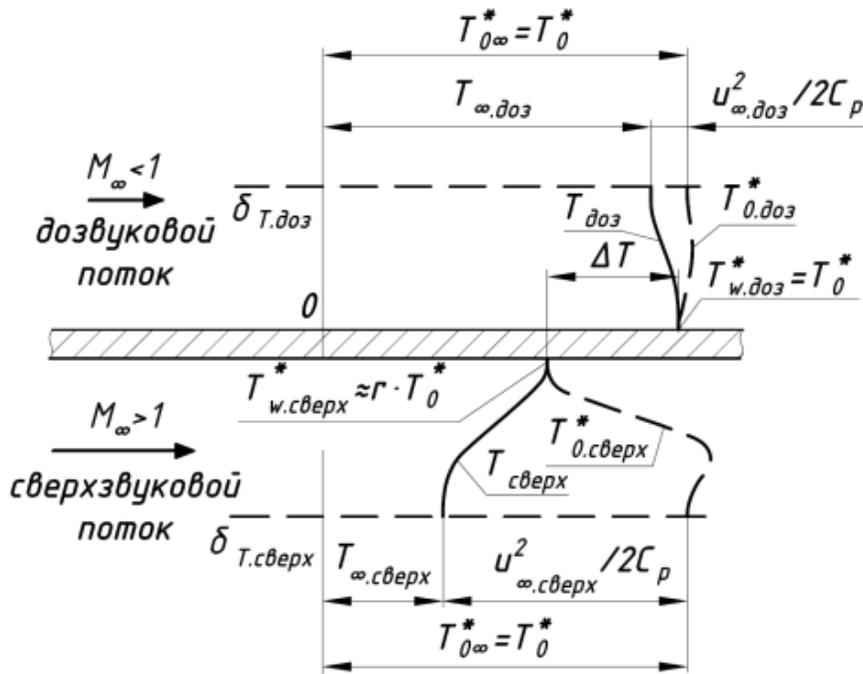


Рис. 10. Профили температуры в тепловом пограничном слое при обтекании теплоизолированной пластины дозвуковым и сверхзвуковым потоками

ном слое сверхзвукового потока газа, формирующегося в пристенной области, распределяется неравномерно вследствие больших градиентов скорости и диссипации значительной части кинетической энергии в теплоту. Температура во внутренней части пограничного слоя оказывается ниже, а во внешней части – выше, чем температура торможения в ядре потока (при числе Прандтля рабочего тела меньше 1, что характерно для большинства газов).

Этот эффект является одним из проявлений безмашинного энергоразделения в потоке сжимаемого газа [40]. Определяющей тепловой поток температурой в данном случае является адиабатная температура стенки  $T_w^*$  (температура пристенных слоев газа):

$$T_w^* = \frac{T_0^* \cdot \left(1 + r \cdot \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M_\infty^2\right)}{1 + \frac{\gamma - 1}{2} \cdot M_\infty^2} \quad (1)$$

Коэффициент восстановления температуры  $r$  показывает долю кинетической энергии потока, переходящей в тепло на стенке. Этот параметр может меняться в зависимости от режима течения, наличия/отсутствия внешних воздействий (градиента давления, отрывных течений, скачков уплотнения и др.), но в наибольшей степени определяется родом газа – числом Прандтля рабочего тела  $Pr$ :

$$r \approx Pr^n, \quad (2)$$

где  $n=1/2$  (ламинарный режим течения),  $n=1/3$  (турбулентный режим – чаще всего реализуется на практике).

Согласно (2), для природного газа ( $Pr \sim 0.7$ ) коэффициент восстановления температуры  $r=0.888 \pm 0.01$  при турбулентном безотрывном обтекании плоской стенки, а также цилиндрической и конической в продольном направлении [41].

Эффективность устройства безмашинного энергоразделения определяется прежде всего количеством теплоты, передаваемой через разделяющую потоки стенку [42–44]. При этом на стенке возникает температурный напор:

$$\Delta T = T_0^* - T_w^* = T_0^* \cdot (1 - r) \cdot \frac{M_\infty^2 \cdot (\gamma - 1)}{2 + M_\infty^2 \cdot (\gamma - 1)} \quad (3)$$

Из соотношения (1) следует, что увеличение числа Маха приводит к уменьшению адиабатной температуры стенки и, значит, способствует росту температурного напора в устройстве энергоразделения. Однако при этом за счет эффекта сжимаемости увеличение скорости сверхзвукового потока уменьшает коэффициент теплоотдачи по сверхзвуковой стороне устройства [45]. Следовательно, существует оптимальная скорость сверхзвукового потока, обеспечивающая максимальную передачу тепла от дозвукового потока газа к сверхзвуковому.

Удельный тепловой поток в устройстве безмашинного энергоразделения зависит от коэффициента теплопередачи  $K$ , начальной температуры торможения потока  $T_0^*$  и адиабатной температуры  $T_w^*$  стенки, обтекаемой сверхзвуковым потоком. Осредненный по поверхности коэффициент теплопередачи (термическим сопротивлением стенки в данном случае можно пренебречь) определяется теплоотдачей со стороны сверхзвукового  $\alpha_{сверх}$  и дозвукового  $\alpha_{доз}$  потоков. Тогда, с учетом (3) выражение для удельного теплового потока:

$$q_w = K \cdot \Delta T \approx \frac{\alpha_{сверх} \cdot \alpha_{доз}}{\alpha_{сверх} + \alpha_{доз}} \cdot T_0^* \cdot (1 - r) \cdot \frac{M_\infty^2 \cdot (\gamma - 1)}{2 + M_\infty^2 \cdot (\gamma - 1)} \quad (4)$$

Как следует из (4), эффективность энергоразделения существенным образом зависит от коэффициентов восстановления температуры  $r$  и теплоотдачи  $\alpha$ . Причем режим максимальной эффективности энергоразделения соответствует минимальному значению  $r$  и максимальному значению  $\alpha$ .

Таким образом, в устройстве безмашинного энергоразделения, реализующем предлагаемый способ безогневого редуцирования давления природного газа, с двух сторон перегородки, разделяющей сверхзвуковой и дозвуковой потоки газа, возникает температурный напор  $\Delta T$ . В результате теплопередачи через стенку сверхзвуковой поток нагревается, а дозвуковой охлаждается. Максимальная температура сверхзвукового потока на выходе из устройства, реализующего предлагаемый способ безогневого редуцирования давления природного газа, составляет  $T_0^*/r$ . Предел охлаждения дозвукового потока соответствует значению адиабатной температуры стенки  $-r \cdot T_0^*$ . Степень нагрева и охлаждения потоков в указанных пределах можно регулировать за счет изменения относительного соотношения расходов согласно уравнению сохранения энергии:

$$G_{\text{доз}} \cdot C_{p,\text{доз}} \cdot (T_0^* - T_{\text{доз.вых}}^*) = G_{\text{сверх}} \cdot C_{p,\text{сверх}} \cdot (T_{\text{сверх.вых}}^* - T_0^*). \quad (5)$$

При этом, согласно (5), если из магистрально-газопровода к газораспределительной станции отводится относительно небольшая часть газа, то охлаждение остальной части газа, пропускаемой по дозвуковому каналу устройства и направляемой на дальнейшую транспортировку, будет незначительным.

При направлении сжатого газа в конфузорно-диффузорное сопло энергия давления газа преобразуется в скоростной напор, в результате чего статическое давление в потоке снижается и, следовательно, скорость потока возрастает [46]. При этом термодинамическая температура потока снижается согласно соотношению:

$$T_{\text{сверх}} = \frac{T_0^*}{1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_{\infty}^2}. \quad (6)$$

При снижении температуры потока ниже температуры точки росы компонент газа при данном статическом давлении в потоке начинается процесс конденсации. При этом температура стенки, обтекаемой двухфазным сверхзвуковым потоком газа, в пределе может принимать значение термо-

динамической температуры потока. Это приводит к значительному увеличению температурного напора на теплопроводной перегородке, разделяющей дозвуковой и сверхзвуковой потоки газа. В результате, эффективность способа безогневого редуцирования давления природного газа возрастает многократно, при этом теплопередача происходит интенсивнее. В работах [47, 48] показано, что наличие даже очень малой концентрации капель в пограничном слое может приводить к значительному снижению адиабатной температуры стенки, обтекаемой сверхзвуковым потоком газа, что в итоге положительно сказывается на эффективности процесса энергоразделения.

Сверхзвуковой режим течения в устройстве, реализующем предлагаемый способ безогневого редуцирования давления газа, предполагает возникновение в канале скачков уплотнения. В то же время, как показано в работах [37, 49, 50], инициация скачков уплотнения (ударных волн) при сверхзвуковых скоростях течения оказывает незначительное влияние на величину нагрева и охлаждения потоков в устройствах данного типа. С одной стороны, наличие скачков уплотнения приводит к дополнительным потерям полного давления, в результате чего скорость течения газа в канале снижается так же, как и температурный напор на перегородке разделительной камеры. С другой стороны, в области взаимодействия скачка уплотнения с пограничным слоем наблюдается интенсификация теплоотдачи, что компенсирует в определенной степени уменьшение температурного напора и способствует повышению эффективности процесса. Суммарно выявленный эффект воздействия скачков уплотнения на эффект энергоразделения позволяет рекомендовать использование в конструкции устройства для реализации способа безогневого редуцирования давления природного газа не профилированных сверхзвуковых сопел, а, например, осесимметричных конических сопел, что значительно снижает трудоемкость изготовления устройств данного типа.

### Сравнение эффективности различных способов редуцирования давления газа

Эффективность того или иного способа редуцирования давления газа необходимо сравнивать комплексно, с учетом как технических, так и экономических характеристик. Рассмотренные спо-

способы редуцирования давления газа значительно отличаются по принципу действия, составу используемого оборудования, степени освоенности промышленностью и другим характеристикам. Поэтому для сравнения рассмотренных способов был применен метод весовых коэффициентов на основе экспертных оценок, используемый при анализе рисков инновационных проектов и принятия решений при сравнении технического уровня сложных технических систем [51, 52]. Рассматриваемые способы редуцирования давления газа и весовые коэффициенты критериев эффективности оценивались по шкале от 1 до 5. Критерии эффективности были проранжированы с помощью весовых коэффициентов. Далее способы редуцирования сравнивались между собой по каждому критерию эффективности. После чего оценки нормировались относительно общей суммы баллов для каждого критерия. Наконец рассчитывалась интегральная оценка каждого способа путем суммирования нормированных оценок, умноженных на соответствующий нормированный весовой коэффициент каждого критерия эффективности.

Критериями эффективности с соответствующими весовыми коэффициентами были выбраны следующие.

- Сложность обслуживания (5 баллов) – стоимость и трудоемкость обслуживания оборудования. Важнейший критерий, определяющий общие эксплуатационные затраты при работе устройств, реализующих тот или иной способ редуцирования давления газа.

- Надежность способа (5 баллов) – наличие и многокомпонентность дополнительного оборудования, повышающего риск отказа работы всей системы редуцирования давления газа в целом.

- Безопасность эксплуатации (4 балла) – наличие высокооборотных машин, процессов горения, выбросы продуктов сгорания в атмосферу, использование токсичных рабочих тел в процессе эксплуатации.

- Сложность конструкции (3 балла) – стоимость начальных вложений в оборудование. Критерий важен, однако в меньшей степени, чем рассмотренные выше. К примеру, стоимость сжигаемого газа в котельной установке может значительно превосходить начальную стоимость установки редуцирования давления газа.

- Побочный полезный продукт (2 балла) – выработка в процессе эксплуатации электроэнергии/тепла/холода, которые могут быть с пользой утилизированы. По мнению авторов, этот критерий в сравнении с предыдущими не является определяющим при анализе эффективности процесса редуцирования давления газа.

- Степень готовности способа (1 балл) – освоенность данного метода промышленностью. На взгляд авторов, этот критерий наименее важен, поскольку доработка и внедрение более эффективного способа редуцирования давления газа позволит в дальнейшем экономить значительно большие ресурсы.

При этом необходимо отметить, что выбор критериев эффективности в данном случае носит субъективный характер, равно как и оценка способов редуцирования по каждому критерию. Этот недостаток характерен для любого метода экспертной оценки. Из преимуществ выбранного метода можно отметить простоту формализации и ясный физический смысл. Эффективность в данном случае не является прямым аналогом коэффициента полезного действия, а складывается из комплексной оценки каждо-

#### Оценка эффективности различных способов редуцирования давления природного газа методом весовых коэффициентов

Критерии эффективности способа	Весовой коэффициент критерия	ДСИ	ДСОП	ТД	ВТ	СБМЭ	Сумма
Сложность обслуживания	5/20	4/15	2/15	1/15	3/15	5/15	15
Надежность способа	5/20	4/15	2/15	1/15	3/15	5/15	15
Безопасность эксплуатации	4/20	3/16	2/16	1/16	5/16	5/16	16
Сложность конструкции	3/20	5/15	2/15	1/15	3/15	4/15	15
Побочный полезный продукт	2/20	1/10	3/10	5/10	2/10	1/10	10
Степень готовности способа	1/20	5/18	5/18	4/18	3/18	1/18	18
Сумма	20	–	–	–	–	–	–
Интегральная оценка, %	–	24.3	15.1	10.9	21.8	27.9	100

Примечание. ДСИ – дросселирование с ингибиторами; ДСОП – дросселирование с огневым подогревом; ТД – турбодетандер; ВТ – вихревые трубы; СБМЭ – сверхзвуковое безмашинное энергоразделение.

го способа по рассмотренным критериям эффективности.

Из таблицы видно, что использование турбодетандеров и традиционного дросселирования с подогревом газа являются наименее эффективными способами редуцирования давления газа. Такой результат обусловлен необходимостью использования котельных установок в данных способах, что снижает оценку по наиболее важным критериям сложности обслуживания, надежности и безопасности эксплуатации. Системы с турбодетандерами также характеризуются многокомпонентностью, включая помимо горелочного оборудования также детандер, электрогенератор и другие элементы. Все это усложняет обслуживание установки, снижает надежность и безопасность системы в целом. В то же время, по мнению авторов, возможность использования теплоты уходящих газов для обогрева помещений ГРС и выработка электроэнергии не являются приоритетными критериями, определяющими эффективность процесса редуцирования давления газа. Приоритетной является автономная и надежная работа системы, в идеальном случае не требующая обслуживания и специальных условий эксплуатации.

Использование вихревых труб и дросселирования с ингибиторами являются основными конкурентами предлагаемому способу безогневого редуцирования давления природного газа на основе сверхзвукового безмашинного энергоразделения (см. таблицу). Однако использование токсичного метанола и наличие специальной системы для его хранения и подачи в трубопровод усложняют обслуживание и снижают надежность и безопасность эксплуатации систем дросселирования с ингибиторами. Вихревые трубы проигрывают предлагаемому методу из-за наличия дополнительных устройств утилизации холода, которые, с одной стороны, могут производить полезный побочный продукт (лед, питьевую воду и др. [24, 25]), но, с другой стороны, также снижают надежность работы системы, повышают стоимость оборудования и обслуживания установки.

Таким образом, результатом, достигаемым при использовании предлагаемой идеи сверхзвукового безмашинного энергоразделения, является экономия природного газа, упрощение конструкции и создание универсального способа решения проблемы гидратообразования при редуцирова-

нии давления газа. Эти преимущества достигаются за счет применения метода безмашинного энергоразделения без огневого подогрева газа и отсутствия дополнительных устройств утилизации холода при использовании в качестве теплоносителя магистрального газа, направляемого на дальнейшую транспортировку.

## Заключение

Представлен обзор существующих и перспективных способов решения проблемы гидратообразования на газораспределительных станциях, включая огневого подогрев, использование ингибиторов, турбодетандеров, методов безмашинного энергоразделения на базе вихревых и резонансных труб. Представлена идея реализации метода безогневого подогрева при редуцировании давления природного газа на основе устройства сверхзвукового безмашинного энергоразделения потоков. Приводится описание конструкции и механизм осуществления разделения исходного сжатого газа на подогретый редуцированный газ, направляемый к потребителю, и охлажденный газ с сохранением давления, направляемый на дальнейшую транспортировку. Отмечено влияние основных параметров газа, скачков уплотнения и конденсации компонентов на эффективность предлагаемого устройства. Проведено сравнение различных способов редуцирования давления газа методом весовых коэффициентов по предложенным критериям эффективности.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К);
- $G$  – массовый расход газа, кг/с;
- $K$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- $M$  – число Маха;
- $P$  – статическое давление в потоке, Па;
- $r$  – коэффициент восстановления температуры;
- $T, T_w^*$  – термодинамическая температура, адиабатная температура стенки, К;
- $u$  – скорость потока, м/с;
- $Pr$  – критерий Прандтля;
- $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);
- $\gamma$  – показатель адиабаты;
- $\delta$  – толщина пограничного слоя, м.

## ИНДЕКСЫ

- \* – параметр торможения;
- 0 – параметр набегающего потока;
- $\infty$  – параметр на внешней границе пограничного слоя;
- $N$  – показатель степени;

$T$  – тепловой (пограничный слой);  
 вых – параметр на выходе из устройства;  
 доз – параметр, относящийся к дозвуковому потоку (каналу);  
 сверх – параметр, относящийся к сверхзвуковому потоку (каналу);  
 $w$  – параметр на стенке.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Итоги VII Международной научно-практической конференции «Газораспределительные станции и системы газоснабжения»** // Территория Нефтегаз. 2016. № 2. С. 28–31.
- Ионин А. А.** Газоснабжение. М.: Стройиздат, 1989. 439 с.
- Carroll J.** Natural Gas Hydrates. A Guide for Engineers. Gulf Professional Publishing, 2009. 288 p.
- Нормы технологического проектирования.** Магистральные трубопроводы. Часть 1. Газопроводы. Раздел 5. Газораспределительные и газоизмерительные станции. СТО ГАЗПРОМ 2-3.5-051-2006. 196 с.
- Леонтьев А. И.** Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (Труба Леонтьева) // Патент на изобретение РФ № 2106581. Дата приоритета: 23.05.1996.
- Леонтьев А. И.** Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // ТВТ. 1997. Т. 35. № 1. С. 157–159.
- Мусакаев Н. Г., Уразов Р. Р.** Превентивные методы борьбы с гидратообразованием в трубопроводах // Нефть и газ. 2006. № 1. С. 50–56.
- Данилов А. А., Петров А. И.** Газораспределительные станции. СПб.: Недра, 1997. 240 с.
- Данилов А. А.** Автоматизированные газораспределительные станции: Справочник. СПб: ХИМИЗДАТ, 2004. 544 с.
- Добрянский В. Л.** Способ предотвращения гидратообразования в природном газе и устройство для его осуществления // Патент РФ № 2251644. Приоритет от 01.07.2003.
- Серазетдинов Б. Ф., Серазетдинов Ф. Ш., Тонконог В. Г.** Технологический нагреватель // Патент РФ № 2467260. Дата приоритета 11.01.2011.
- Котов Ю. И., Данилов А. Н.** Устройство предотвращения гидратообразования // Патент РФ № 2246701. Дата приоритета: 30.09.2002.
- Беляев А. Ю., Виленский Л. М.** Система подачи метанола в трубопровод // Патент РФ № 2413900. Дата приоритета 25.09.2009.
- Шпак В. Н.** Газораспределительная станция с энергетической установкой // Патент РФ № 2009389. Дата приоритета: 25.05.1992.
- Куличихин В. В.** Опыт эксплуатации детандер-генераторных агрегатов на ТЭЦ Мосэнерго. Исторический обзор // Надежность и безопасность энергетики. 2017. Т. 10. № 2. С. 159–166.
- Степанец А. А., Горюнов И. Т., Гуськов Ю. Л.** Энергосберегающие комплексы, основанные на использовании перепада давления на газопроводах // Теплоэнергетика. 1995. № 6. С. 33–35.
- Гафуров А. М.** Способ работы газораспределительной станции // Патент РФ № 2525041. Дата приоритета: 07.05.2013.
- Куличихин В. В., Лазарева О. О.** Использование избыточного давления природного газа на промышленных предприятиях // Надежность и безопасность энергетики. 2010. № 2 (9). С. 48–54.
- Леонтьев А. И.** Газодинамические методы температурной стратификации (обзор) // Изв. РАН. МЖГ. 2002. № 4. С. 6–26.
- Бурцев С. А., Леонтьев А. И.** Исследование влияния диссипативных эффектов на температурную стратификацию в потоках газа (обзор) // ТВТ. 2014. Т. 52. № 2. С. 310–322.
- Пириллишвили Ш. А.** Вихревой эффект (физическое явление, эксперимент, теоретическое моделирование). М.: ООО «Научтехлитиздат», 2012. 342 с.
- Eiamsa-ard S., Promvong P.** Review of Ranque–Hilsch effects in vortex tubes // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2008. V. 12. P. 1822–1842.
- Subudhi S., Sen M.** Review of Ranque–Hilsch vortex tube experiments using air // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. V. 52. P. 172–178.
- Борискин В. В., Данилов К. Л., Лаврик Н. Л., Максименко С. В., Тишечкин Н. Н., Фокин Г. А.** Способ редуцирования давления природного газа // Патент РФ № 2413901. Дата приоритета: 24.03.2009.
- Борискин В. В., Лаврик Н. Л., Плаксин Л. Л., Фокин Г. А., Фурсенко С. А.** Способ редуцирования давления природного газа // Патент РФ № 2309322. Дата приоритета: 20.10.2005.
- Борискин В. В., Глазунов В. Д., Кабанюк А. Е., Логинов Д. Н., Нелень А. Н., Сердюков С. Г., Стрельцов Ю. М., Ходорков И. Л.** Способ редуцирования давления природного газа // Патент РФ № 2180420. Дата приоритета: 19.04.2000.
- Murugappan S., Gutmark E.** Parametric study of the Hartmann Sprenger tube // Exp. Fluids. 2005. V. 38. Iss. 6. P. 813.
- Raman G., Srinivasan K.** The powered resonance tube: From Hartmann’s discovery to current active flow control applications // Progress in Aerospace Sciences. 2009. V. 45. P. 97–123.
- Бухарицин П. И., Беззубиков Л. Г., Ветрова А. А.** Способ редуцирования давления природного газа // Патент РФ № 2472062. Дата приоритета: 19.07.2010.
- Бурцев С. А.** Методика расчета устройств газодинамической температурной стратификации при течении реального газа // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5. № 9. С. 386–390.
- Вигдорович И. И., Леонтьев А. И.** К теории энергоразделения потока сжимаемого газа // Изв. РАН. МЖГ. 2010. № 3. С. 103–109.
- Azanov G. M., Osipov A. N.** The efficiency of one method of machineless gasdynamic temperature stratification in a gas flow // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. V. 106. P. 1125–1133.
- Вигдорович И. И., Леонтьев А. И.** Энергоразделение газов с малыми и большими числами Прандтля // Изв. РАН. МЖГ. 2013. № 6. С. 117–134.
- Здитовец А. Г., Титов А. А.** Экспериментальное исследование газодинамического метода безмашинного энергоразделения воздушных потоков // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5. № 9. С. 391–397.
- Здитовец А. Г., Виноградов Ю. А., Стронгин М. М.** Экспериментальное исследование безмашинного энергоразделения воздушных потоков в трубе Леонтьева //

- Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 9. С. 397–404.
36. **Попович С.С.** Экспериментальное исследование влияния ударных волн на эффект безмашинного энергоразделения газовых потоков // Наука и образование (МГТУ им. Н.Э. Баумана). 2016. № 3. С. 64–80.
  37. **Попович С.С.** Влияние ударных волн на эффект безмашинного энергоразделения. Дисс... канд. техн. наук. М.: ОИВТ РАН, 2016. 172 с.
  38. **Leontiev A. I., Zditovets A. G., Vinogradov Y. A., Strongin M. M., Kiselev N. A.** Experimental investigation of the machine-free method of temperature separation of air flows based on the energy separation effect in a compressible boundary layer // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2017. № 88. P. 202–219.
  39. **Бурцев С.А., Визель Я.М., Леонтьев А.И., Чижиков Ю.В.** Способ регулируемого бесподогретого редуцирования магистрального природного газа и устройство для его осуществления // Патент РФ № 2162190. Дата приоритета: 18.06.1999.
  40. **Eckert E. R. G.** Energy separation in fluid streams // *Int. Comm. Heat mass transfer*. 1986. V. 13. P. 127–143.
  41. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя. М: Наука, 1974. 711 с.
  42. **Волчков Э.П., Макаров М.С.** Газодинамическая температурная стратификация в сверхзвуковом потоке // *Изв. РАН. Энергетика*, 2006. № 2. С. 19–31.
  43. **Макаров М.С., Макарова С.Н.** Эффективность энергоразделения при течении сжимаемого газа в плоском канале // *Теплофизика и аэромеханика*. 2013. Т. 20. № 6. С. 777–787.
  44. **Бурцев С.А.** Исследование путей повышения эффективности газодинамического энергоразделения // *ТВТ*. 2014. Т. 52. № 1. С. 14–21.
  45. **Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И.** Теплообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
  46. **Shapiro A. H.** The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow. V. I. New York: Ronald Press, 1954. 647 p.
  47. **Леонтьев А.И., Осипцов А.Н., Рыбдылова О.Д.** Пограничный слой на плоской пластине в сверхзвуковом газокапельном потоке. Влияние испаряющихся капель на температуру адиабатической стенки // *Теплофизика высоких температур*. 2015. Т. 53. № 6. С. 910–917.
  48. **Азанов Г.М., Осипцов А.Н.** Влияние мелких испаряющихся капель на температуру адиабатической стенки в сжимаемом двухфазном пограничном слое // *Известия РАН. МЖГ*. 2016. № 4. С. 62–71.
  49. **Попович С.С.** Экспериментальное исследование влияния падающего скачка уплотнения на адиабатную температуру стенки в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа // *Тепловые процессы в технике*. 2014. Т. 6. № 3. С. 98–104.
  50. **Попович С.С., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М.** Экспериментальное исследование возможности интенсификации теплообмена в устройстве безмашинного энергоразделения потоков // *Вестник СГАУ*. 2015. Т. 14. № 2. С. 159–169.
  51. **Мушник Э., Мюллер П.** Методы принятия технических решений. М.: Мир, 1990. 208 с.
  52. **Орлов А.И.** Теория принятия решений. М.: Издательство «Март», 2004. 656 с.

## Application of supersonic machine-free energy separation method in pressure reduction of natural gas

**S. S. Popovich, A. G. Zditovets, N. A. Kiselev, M. S. Makarova**

*Institute of Mechanics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119192, Russia  
e-mail: pss@imec.msu.ru*

There are more than 4200 gas distribution stations operating in Russian Federation. Gas pressure reduction at the gas distribution station from 5–12 MPa in the main pipelines to 0.6–1.2 MPa in cities leads to a significant gas temperature drop due to the throttle effect. In case of absence of natural gas preheating prior to the throttling device, the pressure drop in it leads to condensate drop-out in the form of crystalline hydrates, liquid plugs formation, frosting-up of adjusting valves, check valves and instruments. The article presents an overview of the existing and promising ways of solving the problem of hydrate formation at gas distribution stations. Such methods as fire heating, inhibitors application, turbine expanders, methods of machine-free energy separation based on vortex and resonant tubes are considered. The main advantages and disadvantages of these methods are noted. The idea of implementing the method of fire-free heating during natural gas pressure reduction based on a supersonic machine-free energy separation is presented. The device principle of operation is based on the thermal interaction of subsonic and supersonic flows through a heat-conducting partition. The gas fed to the first channel passes through a supersonic nozzle, loses total pressure during acceleration, moving through the supersonic channel and decelerating in the diffuser, being heated herewith due to the heat exchange with subsonic flow through the wall. The gas, supplied to the second channel, practically retains the total pressure, and being cooled due to heat transfer to the supersonic flow through the partition wall. The heated gas with reduced pressure is directed to the consumer, while cooled compressed gas goes for further transportation. The article notes the main gas parameters, shock waves and components condensation impact on the

effectiveness of the proposed device. A comparison of various gas pressure reduction techniques by the weight coefficients method according to the proposed criteria, such as maintenance complexity, the technique reliability, operation safety, design complexity, useable by-product availability and the degree of the technique availability, was made. The abandonment of the fire heating will allow simplify and safe the gas distribution station operation, improve ecological figures and save natural fuel gas.

**Keywords:** hydrate formation, throttling, gas distribution station, machine-free energy separation, supersonic flow, adiabatic wall temperature, temperature recovery factor.

## REFERENCES

1. **Itogi VII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii «Gazoraspredelitel'nye stantsii i sistemy gazosnabzheniya»** [Results of the VII International Scientific and Practical Conference "Gas distribution stations and gas supply systems"]. *Territoriya Neftegaz – Oil and gas territory*, 2016, no. 2, pp. 28–31. In Russ.
2. **Ionin A.A.** *Gazosnabzhenie* [Gas supply]. Moscow: Stroyizdat, 1989. 439 p. In Russ.
3. **Carroll J.** *Natural Gas Hydrates. A Guide for Engineers*. Gulf Professional Publishing, 2009. 288 p.
4. **STO GAZPROM 2-3.5-051-2006.** *Normy tekhnologicheskogo proektirovaniya. Magistral'nye truboprovody. Chast' 1. Gazoprovody. Razdel 5. Gazoraspredelitel'nye i gazoizmeritel'nye stantsii.* [STO GAZPROM 2–3.5–051–2006. Standards of technological design. Main pipelines. Part 1. Gas pipelines. Section 5. Gas distribution and gas measuring stations]. 2006. 196 p. In Russ.
5. **Leontiev A.I.** *Sposob temperaturnoj stratifikatsii gaza i ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya (Truba Leont'eva)* [Gas temperature stratification method and device for its implementation (Leontiev Tube)]. Patent RF, no. 2106581, 1996.
6. **Leont'ev A.I.** Gas-dynamic method of energy separation of gas flows. *High Temperature*, 1997, vol. 35, no. 1, pp. 155–157.
7. **Musakaev N.G., Urazov R.R.** Preventivnye metody bor'by s gidratoobrazovaniem v truboprovodakh [Methods to prevent hydrate formation in pipelines]. *Neft' i gaz – Oil and gas*, 2006, no. 1, pp. 50–56. In Russ.
8. **Danilov A.A., Petrov A.I.** *Gazoraspredelitel'nye stantsii* [Gas distribution stations]. St. Petersburg: Nedra, 1997. 240 p. In Russ.
9. **Danilov A.A.** *Avtomatizirovannyye gazoraspredelitel'nye stantsii: Spravochnik* [Automated gas distribution stations: Handbook]. St. Petersburg: Khimizdat, 2004. 544 p. In Russ.
10. **Dobriansky V.L.** *Sposob predotvrashheniya gidratoobrazovaniya v prirodnom gaze i ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya* [The way to prevent hydrate formation in natural gas and the device for its implementation]. Patent RF, no. 2251644, 2003.
11. **Serazetdinov B.F., Serazetdinov F.Sh., Tonkonog V.G.** *Tekhnologicheskij nagrevatel'* [Technological heater]. Patent RF, no. 2467260, 2011.
12. **Kotov Yu.I., Danilov A.N.** *Ustrojstvo predotvrashheniya gidratoobrazovaniya* [Device for preventing hydrate formation]. Patent RF, no. 2246701, 2002.
13. **Belyaev A.Yu., Vilensky L.M.** *Sistema podachi metanola v truboprovod* [The methanol supply system in the pipeline]. Patent RF, no. 2413900, 2009.
14. **Shpak V.N.** *Gazoraspredelitel'naya stantsiya s energeticheskoy ustanovkoj* [Gas distribution station with a power plant]. Patent RF, no. 2009389, 1992.
15. **Kulichikhin V.V.** Opyt ekspluatatsii detander-generatornykh agregatov na TETS Mosehnergo. Istoricheskiy obzor [Operating experience of the expander-generator units at the Mosenergo thermal power plant. Historical review]. *Nadezhnost' i bezopasnost' ehnergetiki – Reliability and safety of power engineering*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 159–166. In Russ.
16. **Stepanets A.A., Goryunov I.T., Guskov Yu.L.** Energoberegayushhie komplekсы, osnovannyye na ispol'zovaniі perepada davleniya na gazoprovodakh [Energy-saving complexes based on the use of pressure drop on gas pipelines]. *Teploehnergetika – Thermal engineering*, 1995, no. 6, pp. 33–35. In Russ.
17. **Gafurov A.M.** *Sposob raboty gazoraspredelitel'noj stantsii* [The method of operation of the gas distribution station]. Patent RF, no. 2525041, 2013.
18. **Kulichikhin V.V., Lazareva O.O.** Ispol'zovanie izbytochnogo davleniya prirodnogo gaza na promyshlennyykh predpriyatiyakh [The use of overpressure of natural gas in industrial enterprises]. *Nadezhnost' i bezopasnost' ehnergetiki – Reliability and safety of power engineering*, 2010, no. 2 (9), pp. 48–54. In Russ.
19. **Leont'ev A.I.** Gas-dynamic methods of temperature stratification (a Review). *Fluid Dynamics*. 2002, vol. 37, no. 4, pp. 512–529.
20. **Burtsev S.A., Leont'ev A.I.** Study of the influence of dissipative effects on the temperature stratification in gas flows (Review). *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 2, pp. 297–307.
21. **Piralishvili Sh.A.** *Vikhrevoj effekt (fizicheskoe yavlenie, eksperiment, teoreticheskoe modelirovanie)* [Vortex effect (physical phenomenon, experiment, theoretical modeling)]. Moscow: Nauchtekhlitizdat, 2012. 342 p. In Russ.
22. **Eiamsa-ard S., Promvong P.** Review of Ranque–Hilsch effects in vortex tubes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, vol. 12, pp. 1822–1842.
23. **Subudhi S., Sen M.** Review of Ranque–Hilsch vortex tube experiments using air. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 52, pp. 172–178.
24. **Boriskin V.V., Danilov K.L., Lavrik N.L., Maksimenko S.V., Tishechkin N.N., Fokin G.A.** *Sposob reduktivirovaniya davleniya prirodnogo gaza* [Method of reducing the natural gas pressure]. Patent RF, no. 2413901, 2009.
25. **Boriskin V.V., Lavrik N.L., Plaksin L.L., Fokin G.A., Fursenko S.A.** *Sposob reduktivirovaniya davleniya prirodnogo gaza* [Method of reducing the natural gas pressure]. Patent RF, no. 2309322, 2005.
26. **Boriskin V.V., Glazunov V.D., Kabanyuk A.E., Loginov D.N., Nelen A.N., Serdyukov S.G., Streltsov Yu.M., Khodorkov I.L.** *Sposob reduktivirovaniya davleniya prirodnogo gaza* [Method of reducing the natural gas pressure]. Patent RF, no. 2180420, 2000.
27. **Murugappan S., Gutmark E.** Parametric study of the Hartmann Sprenger tube. *Experiments in Fluids*, 2005, vol. 38, iss. 6, pp. 813.

28. **Raman G., Srinivasan K.** The powered resonance tube: From Hartmann's discovery to current active flow control applications. *Progress in Aerospace Sciences*, 2009, vol. 45, pp. 97–123.
29. **Bukharitsin P. I., Bezzubikov L. G., Vetrova A. A.** *Sposob redutsirovaniya davleniya prirodnogo gaza* [Method of reducing the natural gas pressure]. Patent RF, no. 2472062, 2010.
30. **Burtsev S. A.** Metodika rascheta ustrojstv gazodinamicheskoj temperaturnoj stratifikatsii pri techenii real'nogo gaza [Analysis technique for devices for gas-dynamic temperature stratification in real gas flow]. *Teplovyje protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2013, vol. 5, no. 9, pp. 386–390. In Russ.
31. **Vigdorovich I. I., Leont'ev A. I.** Theory of the energy separation of a compressible gas flow. *Fluid Dynamics*, 2010, vol. 45, iss. 3, pp. 434–440. DOI: 10.1134/S0015462810030105
32. **Azanov G. M., Osiptsov A. N.** The efficiency of one method of machineless gasdynamic temperature stratification in a gas flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, vol. 106, pp. 1125–1133.
33. **Vigdorovich I. I., Leontiev A. I.** Energorazdelenie gazov s malymi i bol'shimi chislami Prandtlya [Energy separation of gases with high and low Prandtl numbers]. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza – Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Fluid dynamics*, 2013, no. 6, pp. 117–134. In Russ.
34. **Zditovets A. G., Titov A. A.** Eksperimental'noe issledovanie gazodinamicheskogo metoda bezmashinnogo energorazdeleniya vozdušnykh potokov [Experimental study of a gas-dynamic method for an air stream energy separation]. *Teplovyje protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2013, vol. 5, no. 9, pp. 391–397. In Russ.
35. **Zditovets A. G., Vinogradov Yu. A., Strongin M. M.** Eksperimental'noe issledovanie bezmashinnogo energorazdeleniya vozdušnykh potokov v trube Leont'eva [Experimental investigation of air flow energy separation in Leontiev tube]. *Teplovyje protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2015, vol. 7, no. 9, pp. 397–404. In Russ.
36. **Popovich S. S.** Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya udarnykh voln na ehfekt bezmashinnogo energorazdeleniya gazovykh potokov [Experimental research of machineless energy separation effect influenced by shock waves]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N. E. Baumana – Science and education: Scientific edition of Bauman Moscow State Technical University*, 2016, no. 3, pp. 64–80. In Russ.
37. **Popovich S. S.** *Vliyanie udarnykh voln na ehfekt bezmashinnogo energorazdeleniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Shock wave influence on the effect of the machine-free energy separation. Diss. cand. tech. sci.]. Moscow, 2016. 172 p.
38. **Leontiev A. I., Zditovets A. G., Vinogradov Y. A., Strongin M. M., Kiselev N. A.** Experimental investigation of the machine-free method of temperature separation of air flows based on the energy separation effect in a compressible boundary layer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, no. 88, pp. 202–219.
39. **Burtsev S. A., Viezeli Y. M., Leontiev A. I., Chizhikov Yu. V.** *Sposob reguliruemogo bespodogrevnogo redu-*  
*tsirovaniya magistral'nogo prirodnogo gaza i ustrojstvo dlya ego osushhestvleniya* [Method for controlled non-heating reduction of the main pipeline natural gas and device for its implementation]. Patent RF, no. 2162190, 1999.
40. **Eckert E. R. G.** Energy separation in fluid streams. *Int. Comm. Heat mass transfer*, 1986, vol. 13, pp. 127–143.
41. **Schlichting H.** *Boundary layer theory*. McGraw-Hill, 1968. 747 p.
42. **Volchkov E. P., Makarov M. S.** Gazodinamicheskaya temperaturnaya stratifikatsiya v sverkhzvukovom potoke [Gas-dynamic temperature stratification in a supersonic flow]. *Izvestiya RAN. Energetika – Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2006, no. 2, pp. 19–31. In Russ.
43. **Makarov M. S., Makarova S. N.** Efficiency of energy separation at compressible gas flow in a planar duct. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2013, vol. 20, no. 6, pp. 757–767. DOI: 10.1134/S0869864313060139
44. **Burtsev S. A.** Exploring ways to improve efficiency of gasdynamic energy separation. *High Temperature*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 12–18. DOI: 10.1134/S0018151X14010064
45. **Kutateladze S. S., Leontiev A. I.** *Heat Transfer, Mass Transfer, and Friction in Turbulent Boundary Layers*. New York: Taylor and Francis, 1990. 325 p.
46. **Shapiro A. H.** *The dynamics and thermodynamics of compressible fluid flow*. V. I. New York: Ronald Press, 1954. 647 p.
47. **Leontiev A. I., Osiptsov A. N., Rybdylova O. D.** The boundary layer on a flat plate in a supersonic gas-droplet flow: Influence of evaporating droplets on the temperature of an adiabatic wall. *High Temperature*, 2015, vol. 53, no. 6, pp. 865–872. 10.7868/S0040364415060162
48. **Azanov G. M., Osiptsov A. N.** The effect of fine evaporating droplets on the adiabatic-wall temperature in a compressible two-phase boundary layer. *Fluid Dynamics*, 2016, vol. 51, no. 4, pp. 498–506.
49. **Popovich S. S.** Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya padayushhego skachka uplotneniya na adiabatnuyu temperaturu stenki v sverkhzvukovom potoke szhimaemogo gaza [Experimental study of influence of falling shock wave on adiabatic wall temperature of a supersonic air flow around plane surface]. *Teplovyje protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2014, vol. 4, no. 4, pp. 98–104. In Russ.
50. **Popovich S. S., Vinogradov Yu. A., Strongin M. M.** Eksperimental'noe issledovanie vozmožnosti intensifikatsii teploobmena v ustrojstve bezmashinnogo energorazdeleniya potokov [Experimental research of the possibility of heat transfer enhancement in gas dynamic energy separation process]. *Vestnik SGAU – Vestnik of the Samara State Aerospace University (Vestnik SSAU)*, 2015, vol. 14, no. 2, pp. 159–169. In Russ. DOI: 10.18287/2412–7329–2015–14–2-159–169
51. **Muschick E., Muller P. H.** *Metody prinyatiya tekhnicheskikh reshenij* [Methods of making technical decisions]. Moscow: Mir, 1990. 208 p. In Russ.
52. **Orlov A. I.** *Teoriya prinyatiya reshenij. Uchebnoe posobie* [Decision making theory. Tutorial]. Moscow: Publisher "Mart", 2004. 656 p. In Russ.