

---

На правах рукописи

**БУРЦЕВ Сергей Алексеевич**

УДК: 536.24 : 621.184

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗДЕЛЕНИЯ В  
ПОТОКАХ СЖИМАЕМОГО ГАЗА**

01.04.14 - Теплофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель -  
академик РАН, д.т.н., проф.  
Леонтьев А.И.

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана (кафедра Э-3 "Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки") и отделе новых технологий Института высоких температур РАН.

Официальные оппоненты:

Губертов А.М.

д.т.н., профессор

Емин О.Н.

д.т.н., профессор

Институт механики МГУ

им. М.В. Ломоносова.

1572661

Бурцев С.А.

Исследование темпера-  
турного разделения в  
2001 0.00

10 10 2001 года в "14" часов  
совета Д.212.141.08 в Московском  
университете имени Н.Э. Баумана по  
наб. д. 1, корпус факультета

гся в библиотеке МГТУ им.

земплярах, заверенные печатью

дресу: 107005, М

Баумана, Ученому

10 2 2001 года

га,

Копосов Е.Б.



1572661

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** К настоящему времени описано много примеров процесса температурной стратификации в газовом потоке. Причины, вызывающие температурную стратификацию, могут быть самыми различными. Иногда стратификация является результатом дисбаланса между потоками тепла за счет теплопроводности и выделением тепла за счет работы сил вязкости. В других случаях температурная стратификация вызывается вихревыми течениями, пульсациями давления и возникновением звуковых волн. Некоторые из этих явлений нашли применение в различных технических устройствах, предназначенных для безмашинного метода получения разности температур.

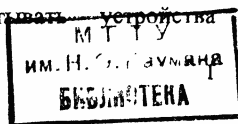
Тепловой поток между стенкой и сверхзвуковым потоком газа определяется как произведение коэффициента теплоотдачи на разности между температурой восстановления (а не температурой торможения) потока газа и температурой стенки. При этом температура восстановления равна температуре торможения только при числе Прандтля равном единице. Для большинства газов значение числа Прандтля меньше единицы и температура восстановления оказывается ниже температуры торможения.

На использовании этой особенности и основан способ температурной стратификации в сверхзвуковом потоке газа, предложенный Леонтьевым Александром Ивановичем в 1996 году. Им же и было предложено устройство для реализации этого способа, в дальнейшем получившее название трубы Леонтьева (ТЛ).

**Цель работы.** Исследование основных закономерностей и факторов, влияющих на величину эффекта температурной стратификации газа, и создание методики расчета устройств, использующих этот эффект.

**Научная новизна работы.** Впервые проведено исследование механизма температурной стратификации в сверхзвуковом потоке и определены оптимальные значения числа Прандтля рабочего тела, величины вдува и величины приведенных скоростей. Была разработана методика расчета устройств, использующих эффект температурной стратификации газа. С помощью программы, написанной по данной методике, была проведена оптимизация устройств различного назначения. Проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными, полученными при участии автора.

**Практическая ценность работы** состоит в том, что разработанная автором методика позволяет рассчитывать устройства



температурной стратификации газа. Предложено несколько вариантов устройств, использующих газодинамическую температурную стратификацию газа. С помощью созданного автором программного обеспечения проведена оптимизация схем устройств и на основании результатов выполнена патентная защита четырех устройств. В настоящее время ведутся работы по изготовлению опытно-промышленных образцов данных устройств.

**Апробация работы.** Основные положения работы были доложены на 2-й Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 26-30 октября 1998 г.); на Международной научной конференции студентов и молодых ученых (Москва, 21-23 апреля 1999 г.); на 12-й Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева (Москва, 25-28 мая 1999 г.); на Юбилейной научной конференции, посвященной 40-летию Института механики МГУ (Москва, 22-26 ноября 1999 г.), а также семинарах кафедры Э-3 МГТУ им. Баумана в 1998-2001 г.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ, в том числе соавторство в монографии, 4 статьи, 4 патента и 5 материалов конференций, а так же отчеты МГТУ и ИВТ РАН.

**Награды.** Постановлением Президиума Российской АН №165 от 20 июня 2000 г. автору данной работы присуждена медаль Российской АН для молодых ученых в области физико-технических проблем энергетики за цикл работ по температурной стратификации газа.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общего заключения и списка литературы. Она содержит 124 страницы, 67 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 67 наименований.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** кратко охарактеризовано состояние проблемы в целом, а так же показана ее новизна и актуальность.

**В первой главе** дан краткий обзор известных методов температурной стратификации газа: изменение температуры торможения в пограничном слое сжимаемого газа на тонкой пластине (Эккерт Е. и Древитц О.); особенности изменения температуры торможения при поперечном обтекании цилиндра (Эккерт Е. и Вайс В.); изменение температуры торможения по поперечному сечению струи газа, истекающей из сопла (Гольдштейн Р.Д. и Сеол В.С.); схема резонансной трубы Спрингера; схема и принцип работы эжектора с

отрицательным коэффициентом эжекции (Емин О.Н., Зарицкий С.П. Столяров А.А.); устройство для сепарации энергии двухфазных потоков (Столяров А.А.).

Более подробно рассмотрен метод стратификации газа в вихревой трубе (труба Ранка-Хилша) и приведены типовые характеристики адиабатной вихревой трубы. Рассмотрена картина течения газа в камере энергоразделения вихревой трубы и проанализирована литература по данному вопросу. В результате сделан вывод о том, что видимо наиболее точно отражает процессы, происходящие в вихревой трубе, гипотеза преобразования вихря.

По этой гипотезе в процессе энергоразделения в вихревой трубе на газ действуют несколько механизмов передачи энергии: передача тепла теплопроводностью, турбулентная диффузия и передача механической работы за счет вязкостных сил. Основным механизмом передачи тепла от приосевых областей к периферийным служит передача механической работы, которую так же иногда называют перестройкой (преобразованием) вихря.

Рассмотрены последние работы западных авторов, в которых пытались численно рассчитать течение газа с помощью модернизированных  $k - \varepsilon$  моделей турбулентности. Кроме того, рассмотрены работы наших соотечественников, которые разработали модель энергоразделения и массообмена в многокомпонентном вихревом течении, основной идеей которой является наличие пограничного слоя между свободным и вынужденным вихрем.

Были рассмотрены принципы газодинамической температурной стратификации в сверхзвуковом потоке. Одним из основных параметров, определяющих величину стратификации, является коэффициент восстановления.

В наиболее общем случае коэффициент восстановления зависит от физических свойств потока, режима течения, геометрической формы и особенностей обтекаемой поверхности. При обтекании газом тела заданной формы коэффициент восстановления является функцией пяти переменных:  $r = f(\text{Pr}, \text{Pr}_\tau, k, \text{Re}, M)$ . Представлены известные зависимости для  $r$  и приведено сравнение их с известными экспериментальными данными.

Исследованиями в этой области занимались Абрамович Г.Н., Гухман А.А., Дейч М.Е., Джонсон Х., Дородницын А.А., Ибрагимов М.Х., Илюхин Н.В., Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И., Макк Л.М., Науриц Л.Н., Петухов Б.С., Рубезин М.В., Себан Р.А., Сталдер И.Р., Стоун Х.А., Субботин В.И., Тенделанд Т., Шеррер Р., Шлихтинг Г. и их ученики.

**Во второй главе** рассмотрены вопросы зависимости величины температурной стратификации газа от различных параметров.

В начале рассмотрен случай обтекания бесконечно тонкой непроницаемой пластины сверхзвуковым потоком газа. Принято, что в нижней части пластины на ее кромке возник прямой скачок уплотнения (Рис. 1).

В безразмерном виде получена зависимость количества тепла передаваемого через стенку от дозвукового потока к сверхзвуковому, записанная в виде функции от параметра скорости и показателя адиабаты (рис. 2)

$$\bar{q}_{CT} = \left[ (1 - U^2)^{\frac{k}{2(k-1)}} U^{2,5} \right] / \left[ 1 + (1 - U^2)^{0,5} \right].$$

Как видно из графиков, для каждого показателя адиабаты существуют оптимальные значения параметра скорости  $U$ . Причем, для любого показателя адиабаты это соответствует  $M \approx 2,0$ . Этот вывод достаточно интересен, т.к. с ростом числа Маха происходит уменьшение температуры теплоизолированной стенки, но в то же время неявно происходит уменьшение коэффициента теплопередачи.

Аналогичная картина наблюдается и при турбулентном режиме течения, только там еще добавляется влияние числа Прандтля. Было исследовано влияние числа Прандтля на величину температурной стратификации и получено, что максимум передачи тепла для непроницаемой пластины достигается при  $Pr_{ЭКСТ} = 0,08 \div 0,1$  (ростом  $U$  происходит уменьшение значения  $Pr_{ЭКСТ}$ ).

Далее было проведено аналитическое исследование влияние вдува однородного газа на величину температурной стратификации на тонкой пластине. Если для случая ламинарного течения газа влияние вдува на величину температурной стратификации было незначительно, то для турбулентного потока это воздействие позволяло значительно увеличить тепловой поток. Отношение теплового потока на проницаемой пластине к тепловому потоку на непроницаемой пластине зависит от параметра скорости, коэффициента восстановления и параметра вдува выражается в виде

$$\bar{q} = \frac{q_{СТП}}{q_{CT0}} = \frac{[1 - r_0(1 - 0,8\bar{b}_r)](1 - \bar{b}_r^2)^2}{(1 - r_0)} \cdot \frac{[1 - U^2(1 - r_0)]^{0,5} + (1 - U^2)^{0,5}}{(1 + \bar{b}_r)^2 \{1 - U^2[1 - r_0(1 - 0,8\bar{b}_r)]\}^{0,5} + (1 - U^2)^{0,5}(1 - \bar{b}_r)^2}.$$

Из графиков, представленных на рис. 3 видно, что с уменьшением  $r_0$  относительное влияние вдува на  $\bar{q}$  уменьшается. Кроме того, проведенный анализ показал, что при одинаковых значениях  $r_0$  с увеличением  $U$  происходит небольшое уменьшение  $\bar{q}_{ОП}$  при почти неизменном значении  $b_{ОП}$ .

Далее было рассмотрено турбулентное течение газа в коаксиально расположенных каналах (Рис. 4). Получена зависимость оптимального значения

параметра скорости  $U$  (при максимуме переданного тепла) от показателя адиабаты. Зависимость аналогична случаю обтекания пластины, только оптимальное значение  $U$  больше, что соответствует  $M \approx 2,3 \div 2,5$ .

Было исследовано влияние числа Прандтля на величину температурной стратификации и получено, что максимум передачи тепла достигается при  $Pr_{экстр} = 0,12 \div 0,18$ , что соответствует смесям газов  $He-Xe$  и  $H_2-Xe$ .

Кроме того, исследовано влияние на количество переданного тепла скорости дозвукового потока и соотношения массовых расходов дозвукового и сверхзвукового потоков.

На базе одномерных уравнений газовой динамики была создана расчетная методика, позволяющая проводить численный расчет устройств, использующих эффект температурной стратификации газа.

В качестве исходных уравнений были взяты уравнения баланса тепла, переданного от дозвукового потока к сверхзвуковому, и закон обращения воздействий Вулиса Л.А.

$$(M^2 - 1) \frac{dW}{W} = \frac{dF}{F} - \frac{dG}{G} - \frac{1}{a^2} dL - \frac{k-1}{a^2} dq - \frac{k}{a^2} dL_{TP}, \text{ где } \frac{dG}{G} = 0 \text{ и } \frac{1}{a^2} dL = 0.$$

После наложения условия постоянства площади поперечного сечения дозвукового канала и проведенных преобразований была получена система уравнений, описывающих течение газа в ТЛ

$$\left( \frac{\lambda_1^2 - 1}{\lambda_1^2} \right) \frac{d\lambda_1}{\lambda_1} + \left( \frac{\lambda_1^2 + 1}{\lambda_1^2} \right) \frac{d\theta_1}{2\theta_1} = \left( \frac{1}{\lambda_1^2} - \frac{k-1}{k+1} \right) \frac{dF_1}{F_1} - \xi_1 \frac{k}{k+1} \sqrt{\frac{F_{01}}{F_1}} d\bar{x} \quad (1)$$

$$\left( \frac{\lambda_2^2 - 1}{\lambda_2^2} \right) \frac{d\lambda_2}{\lambda_2} + \left( \frac{\lambda_2^2 + 1}{\lambda_2^2} \right) \frac{d\theta_2}{2\theta_2} = -\xi_2 \frac{k}{k+1} d\bar{x} \quad (2)$$

$$\frac{d\theta_1}{\frac{K}{\alpha_1} \left[ (m+1) - \theta_1 \left( \frac{T_{cr}^*}{T_1^*} + m \right) \right]} = \sqrt{\frac{F_0}{F}} \frac{\xi}{2} f(Pr) d\bar{x} \quad (3) \quad d\theta_2 = m d\theta_1 \quad (4)$$

$$\text{где: } \xi_1 = \frac{\xi}{\xi_{10}} \xi_{10} = \xi_{10} \sqrt{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2}, \quad T_{cr}^* = T^* \left[ 1 - (1-r) \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2 \right].$$

Полученная система состоит из 4 уравнений и имеет 5 неизвестных ( $F_1, \lambda_1, \theta_1, \lambda_2, \theta_2$ ). Для замыкания системы уравнений, описывающих течение идеального газа в ТЛ, был взят закон линейного изменения диаметра сверхзвукового канала

$$d\bar{F}_1 = 2 \left[ 1 + \left( \sqrt{\frac{F_{K1}}{F_{H1}}} - 1 \right) \frac{x}{L} \right] d\bar{D}, \quad (5) \quad \text{где: } d\bar{D} = \frac{D_H \left( \sqrt{\frac{F_{K1}}{F_{H1}}} - 1 \right)}{L} d\bar{x}; \quad d\bar{x} = \frac{x}{D_{H1}}.$$

В системе - 5 дифференциальных уравнений (1)-(5) и 5 неизвестных. Система уравнений замкнута.

В третьей главе приведены примеры реализации устройств, использующих способ температурной стратификации газа. Были рассмотрены новые идеальные циклы тепловых и холодильных машин с газодинамической регенерацией. По своей эффективности они аналогичны циклу Карно, но для их реализации вместо больших компрессоров и турбин можно использовать профилированные каналы.

Наиболее ярко преимущества использования газодинамического метода энергоразделения потоков проявляются при разработке таких перспективных компактных устройств двухцелевого назначения как мощные космические сверхзвуковые коротковолновые непрерывные замкнутые газовые лазеры.

Благодаря высокому КПД цикла ЗГТУ со встроенным лазерным каналом и повышенной величине эффективной температуры отвода тепла при разделении потоков в охлаждаемом сверхзвуковом диффузоре тепловая мощность ядерного реактора снижается в 2-3 раза, а площадь поверхности радиатора может быть сокращена на порядок по сравнению с традиционным комплексом. Это дает возможность использовать для вывода на орбиту вышеупомянутого комплекса РН "Протон" вместо РН "Энергия".

В работе была рассмотрена схема ракетного двигателя с применением эффекта температурной стратификации газа. Данная схема позволит при тех же параметрах двигателя снизить расход водорода на 25%.

Было предложено, несколько вариантов устройств, использующих газодинамическую температурную стратификацию газа. Проведены исследования и оптимизация их схем. В настоящее время выполнена патентная защита четырех устройств и ведутся работы по проектированию и изготовлению опытно-промышленных образцов. Этими устройствами являются:

#### *1. Установка низкотемпературной сепарации промыслового газа с ТЛ*

В состав промыслового газа входят метан, этан, азот, вода, высшие углеводороды и твердые частицы (песок, стружка и т.д.). Для передачи по трубопроводу газ должен быть подготовлен, т.е. очищен от примесей и высших углеводородов, которые являются очень ценным сырьем для химической и нефтехимической промышленности.

Промысловый газ из скважины поступает в установку низкотемпературной сепарации (НТС). Схема предложенной установки НТС промыслового газа показана на рис. 5. Газ из высокотемпературного

сепаратора 1 поступает в ТЛ 3, причем часть газа, идущего в дозвуковой канал ТЛ, проходит через теплообменник 2, где его температура понижается.

В дозвуковом канале ТЛ газ дополнительно охлаждается и затем поступает в дроссельный штуцер 4, откуда попадает в низкотемпературный сепаратор 5. В сверхзвуковом канале ТЛ газ нагревается и затем поступает в теплообменник 7, где и охлаждается. Затем он смешивается с газом, выходящим из низкотемпературного сепаратора 5, и поступает в среднетемпературный сепаратор 6. Затем газ через теплообменники 2 и 7 поступает на дальнейшую обработку. Выпадение конденсата высших углеводородов происходит во всех трех сепараторах. Перепад давлений в установке НТС с ТЛ принят таким же, как на дроссельном штуцере в реально существующих установках.

Проведенные расчеты показали, что предложенная схема установки позволяет получить температуру газа на 5-7 градусов ниже, чем у существующих установок, т.е. предлагаемый способ позволяет увеличить выход конденсата от 2000 до 3000 т/год для одной скважины. Данный способ НТС защищен патентом на изобретение [Список публ. 7]. В настоящее время идет выполнение эскизного проекта.

## ***2. Регулятор давления природного газа с ТЛ***

Как известно, природный газ при дросселировании охлаждается. В настоящее время на газораспределительных станциях (ГРС) при редуцировании газ охлаждается на 15-25К. Для избежания опасности, связанной с выпадением гидратов, на ГРС редуцированный природный газ подогревают. Причем подогрев ведут так называемым "огневым" методом, т.е. сжигают до 1% проходящего газа.

Предложена схема устройства, позволяющая осуществлять бесподогревное регулируемое редуцирование природного газа на ГРС с отводом холода в часть нерасширившегося газа, который затем поступает в систему сжижения. На рис. 5 представлена схема регулятора давления магистрального природного газа с ТЛ (РДТЛ).

Природный газ из магистрального газопровода поступает в узел регулирования расхода газа 1. Затем газ поступает в приемную камеру 2, содержащую трубную доску с профилированными сверхзвуковыми каналами 3. В каналах 3 газ разгоняется до сверхзвуковой скорости, нагревается и потом тормозится в диффузоре. После диффузора природный газ подается потребителям газа. В межтрубное пространство 4 газ отбирается из магистрального трубопровода до регулирующего узла 1, и на выходе из межтрубного пространства заохоложенный газ проходит через систему сжижения

природного газа 5. После чего его часть, вместе с газом из сверхзвуковых каналов, поступает к потребителю. Сжиженный природный газ (СПГ) отводится из системы сжижения 5 в специальные криогенные емкости, и затем он поступает потребителю.

Затраты на сжижение увеличат стоимость газа на 25%, что приемлемо, по сравнению с детандерными методами, повышающими стоимость в 2-2,5 раза.

Данный способ бесподогревного редуцирования защищен патентом [Список публ. 9]. В настоящее время выполнено 2 эскизных проекта и идет выполнение технического проекта.

В нашей стране принята программа перевода транспорта на СПГ, однако, нет серийных установок для его производства. В России 3000 ГРС и если треть оснастить данными установками, то потребности России в СПГ будут удовлетворены до 2015-2020 г.

### *3. Установка охлаждения газа после компрессорных станций*

Одной из проблем освоения газовых месторождений в районах Крайнего Севера является необходимость установки на газопроводах компрессорных станций (КС). Они повышают давление газа в трубопроводе и нагревают газ. В зоне многолетнемерзлых пород это приводит к очень быстрому выходу из строя газопроводов. Существующие безмашинные (чаще всего дроссельные) системы охлаждения природного газа после КС не обеспечивает достаточного уровня снижения температуры газа (допустимая температура 283 К).

Предложена схема установки, обеспечивающая большее снижение температуры газа в выходном коллекторе по сравнению с дроссельными методами, что достигается более простым способом по сравнению с использованием парокompрессионных, детандерных и других холодильных машин.

Схема установки для охлаждения природного газа после КС приведена на рис. 5. Природный газ из газопровода поступает в рекуперативный теплообменник прямого потока (РТО) 1, где он нагревается. Затем газ попадает в нагнетатель 2 и оттуда в аппарат воздушного охлаждения 3, где его температура снижается до 302,9К, затем охлаждается в РТО 1, где его температура снижается до 292К.

После этого газ поступает в ТЛ 4, где происходит его разделение на дозвуковой и сверхзвуковой потоки. Сверхзвуковой поток нагревается от дозвукового газового потока и охлаждается за счет эффекта Джоуля-Томсона и на выходе из диффузоров его температура составляет 276К. Затем он с помощью дожимного компрессора 5 подается на вход нагнетателя 2.

Газ из дозвукового канала (межтрубного пространства) ТЛ с температурой 283К подается в газопровод. В результате на выходе КС температура газа такая же, какой она была на входе, чем предотвращается опасность растепления многолетнемерзлых пород, расположенных под первой после КС опорой газопровода.

Данный способ охлаждения газа после КС защищен патентом [Список публ. 8]. В настоящее время идет выполнение эскизного проекта.

#### *4. Холодильная установка с ТЛ*

Разработана схема холодильной установки, использующей эффект температурной стратификации газа, и выполнен ее расчет.

На рис. 5 представлена принципиальная схема этой установки. В качестве рабочего тела используется смесь водорода с бутаном с массовым содержанием водорода 10%. Сжатая смесь после компрессора 1 охлаждается в охладителе 2 до температуры, при которой еще не происходит конденсация бутана, а статические давление и температура близки к полным.

Затем рабочее тело поступает во входной коллектор кожуха 4 и затем в профилированные трубы 3. В них происходит конденсация 10-50% бутана, после чего часть (60-80%) конденсата оседает на стенках сверхзвуковых каналов, создавая пленку. Пленка конденсата позволяет получить наиболее низкие температуры стенки канала и пристенного слоя газообразной составляющей рабочего тела (водорода), так как при наличии сплошной пленки жидкости на поверхности сверхзвукового канала  $r \rightarrow 0$ .

Газообразная водородная составляющая рабочего тела за счет своей высокой теплоемкости и низкой температуре в пристенном слое обеспечивает дополнительное поглощение внешнего тепла.

В диффузорной части профилированной трубы происходит торможение потока с повышением статического давления и падением полного давления. Из диффузорной части профилированной трубы рабочее тело поступает в выходной коллектор кожуха 5, откуда подается на вход компрессора 1.

Использование в качестве рабочего тела смеси конденсирующегося и неконденсирующегося газовых компонентов (водорода и бутана) позволяет получить преимущества как газовых, так и пароконденсационных холодильных машин. За счет наличия газовой составляющей (водорода) – получить малую инерционность, присущую газовым машинам. За счет низких температур стенки трубы и пристенного слоя, обеспечиваемых жидкой пленкой (конденсатом) и высокой теплоемкостью газовой составляющей рабочего тела - низкий уровень термостатирования и достаточно высокий холодильный коэффициент.

Можем предположить, что в холодильной камере 8 средняя температура с учетом недорекуперации составляет 180-200К.

Данная холодильная установка с ТЛ защищена патентом [Список публ. 7]. В настоящее время идет выполнение эскизного проекта.

**В четвертой главе** приведено сравнение результатов численного расчета, проведенного с помощью программного продукта, разработанного автором, с результатами эксперимента.

На основании своей методики расчета устройств температурной стратификации газа автором данной работы была рассчитана установка для редукционирования и подогрева природного газа. Далее она была спроектирована при участии автора и изготовлена на ОАО "НПО Наука". Установка была смонтирована и испытана на открытой площадке ССУД МТ "ОРГЭНЕРГОГАЗ" в г. Саратове в период с 12.10.98 по 19.10.98 при участии автора данной работы.

В природном газе при дросселировании происходит падение температуры при сохранении значения энтальпии. Так как при подводе теплоты к газу значение энтальпии возрастает, а при отводе уменьшается, то для удобства дальнейших расчетов и сравнений все делается для энтальпии природного газа.

Схема стенда для испытания устройства температурной стратификации газа (ТЛ) на природном газе представлена на рис. 6.

В ходе проведения испытаний была выполнена серия экспериментов, в которых во внешнем контуре ТЛ вместо природного газа была вода. Эти эксперименты подтвердили высокий коэффициент теплоотдачи со стороны дозвукового потока (замена дозвукового потока газа на воду почти не изменила коэффициент теплопередачи) и показали, что возможно передавать тепло от более холодного теплоносителя (вода), к более горячему (газ). Для прямоточной схемы движения теплоносителей разница температуры на входе составляла порядка 10 градусов.

Все необходимые условия для обеспечения заданной точности работы измерительного комплекса "Суперфлюу" по условиям окружающей среды и размерам участков стабилизации течения газа перед точками измерения и после них (рис. 6) были выполнены. Суммарная погрешность измерения увеличения энтальпии газа в сверхзвуковом канале составила 2 кДж/кг. Изменение энтальпии газа при устойчивом сверхзвуковом течении было от 10 кДж/кг до 20 кДж/кг, т.е. погрешность не превышала 20%.

График изменения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале в зависимости от  $\pi_c$  для  $m = 1.2$  представлен на рис. 8. Данным значениям

теоретических расчетов удовлетворяют эксперименты № 8 ( $m=1.147$ ), № 9 ( $m=1.138$ ) и № 10 ( $m=1.286$ ) [Список публ. 11]. Аналогичная картина наблюдается для большинства экспериментальных точек, которые лежат выше теоретических кривых на  $1 \div 4 \text{ кДж/кг}$  (в среднем на  $2 \text{ кДж/кг}$ ).

На основании всего, приведенного выше, можно сделать вывод, что предложенный метод расчета на базе одномерных уравнений газовой динамики дает достаточно точное решение.

Проведенные эксперименты показали, что при  $\pi_\Sigma = 8 \div 12$  происходило увеличение энтальпии природного газа на  $12 \div 20 \text{ кДж/кг}$ , что соответствует увеличению температуры природного газа на  $5 \div 9 \text{ К}$ . Эта величина недостаточна для решения проблемы безогневого подогрева природного газа (РДТЛ). Необходимо увеличение количества переданного тепла в 2 раза.

На рис. 9. представлено сопоставление результатов расчета увеличения энтальпии природного газа в зависимости от  $\pi_\Sigma$  с экспериментом. Там же показаны результаты расчета для канала с толщиной стенки  $\delta = 2,5 \text{ мм}$ , изготовленной из стали 30ХГСА. Как видно из рис.9 термическое сопротивление стенки оказывает существенное влияние на эффективность установки.

### Основные выводы и результаты

Основные положения и выводы, характеризующие представленные результаты исследования способа температурной стратификации газа и созданную методику расчета устройств для его реализации, следующие:

1. Проведено исследование влияния различных свойств газа и скоростей его течения на величину газодинамической температурной стратификации газа на пластине и коаксиально расположенных каналах. Получены зависимости для определения оптимальных значения числа Прандтля рабочего тела, показателя адиабаты и величины приведенных скоростей в дозвуковом и сверхзвуковом потоках.

2. Показаны возможности увеличения температурной стратификации газа за счет вдува газа и определены оптимальные значения параметров проницаемости.

3. Разработана методика расчета устройств газодинамической температурной стратификации реальных газов на базе одномерных уравнений газовой динамики и показано, что наиболее оптимальным, с точки зрения термодинамических и технологических требований, является коническая форма сверхзвукового канала, близкая к условию постоянства статического давления.

4. Проведены численные исследования влияния толщины стенки сверхзвукового канала, концентрации конденсирующегося компонента рабочей смеси и влияния шероховатости стенки на величину температурной стратификации реального газа и показано, что существенное влияние на величину температурной стратификации оказывает процесс конденсации компонента рабочей смеси.

5. При участии автора была рассчитана, затем спроектирована, изготовлена и испытана установка температурной стратификации природного газа. Проведено сравнение полученных данных с результатами расчетов и внесены изменения в расчетную модель.

6. Предложено несколько вариантов устройств, использующих газодинамическую температурную стратификацию газа. Проведена оптимизация схем и выполнена патентная защита четырех устройств. В настоящее время ведутся работы по проектированию и изготовлению опытно-промышленных образцов по следующим разработкам:

- ◆ холодильная установка с ТЛ;
- ◆ установка НТС промыслового природного газа;
- ◆ установка охлаждения природного газа после КС;
- ◆ установка редуцирования с безогневым подогревом и сжижением части магистрального природного газа (РДТЛ).

### Обозначения

ТЛ - труба Леонтьева;

НТС - низкотемпературная сепарация газа;

КС - компрессорная станция;

$r$  - коэффициент восстановления температуры,  $r = (T_{cr}^* - T)/(T^* - T)$ ;

$T_{cr}^*$  - температура теплоизолированной стенки, К;

$T$ ,  $T^*$  - статическая температура и температура торможения потока газа, К;

$Pr$ ,  $Pr_T$  - число Прандтля и турбулентное число Прандтля;

$Re$  - число Рейнольдса;

$k$  - показатель адиабаты газа;

$M$ ,  $\lambda$  - число Маха и приведенная скорость;

$U = W_0/W_{max} = \sqrt{(k-1)/(k+1)}\lambda$  - параметр скорости газа;

$\xi_0$  - коэффициент трения в стандартных условиях;

$F$  - площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>;

$\theta$  - относительная температура торможения в канале,  $\theta = T^*/T_0^*$ ;

$\pi_\Sigma$  - степень понижения давления в сверхзв. канале ТЛ (вместе с диффузором);

$m$  - отношения массовых расходов сверхзвукового и дозвукового потоков газа;

## Индексы

0 - начальное значение;

1 - сверхзвуковой поток газа;

2 - дозвуковой поток газа;

Н - параметры в начале сверхзвукового канала;

К - параметр в конце сверхзвукового канала.

## Основные публикации и патенты по теме диссертации

По теме диссертационной работы опубликовано 12 печатных работ, в том числе, 3 статьи, 4 патента и 4 материала конференций (в списке приведены 2) и соавторство в монографии

1. Энерготехнологии / В.П. Александренков, Т.В. Баженова, С.А. Бурцев и др. // Научные основы технологий XXI века / Под ред. А.И. Леонтьева, Н.Н. Пилюгина, Ю.В. Полежаева, В.М. Поляева, - М.: УНПЦ Энергомаш, 2000. - С. 58-96.
2. Бурцев С.А. Исследование температурной стратификации газа // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1998. - № 2. - С. 65-72.
3. Бурцев С.А. Исследование температурной стратификации газа и коэффициента восстановления при образовании конденсата газа // Труды 2-й Российской национальной конференции по теплообмену. - Москва, 1998. - Т. 8. - С. 58-59.
4. Бурцев С.А. Оптимизация геометрии сверхзвукового канала в устройстве для энергоразделения // Вестник МГТУ. Машиностроение. - 1999. - № 2. - С. 48-54.
5. Бурцев С.А. Исследование влияния толщины стенки сверхзвукового канала и ее термического сопротивления на температурную стратификацию реального газа // Труды 12-й Школы семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. - Москва, 1999. - С. 27-30.
6. Патент № 2156413 (РФ). Холодильная установка / С.А. Бурцев, Я.М. Визель, А.И. Леонтьев, Ю.В. Чижигов. // БИ. - 20.09.00. - № 26.
7. Патент № 2156271 (РФ). Способ низкотемпературной сепарации промышленного газа / С.А. Бурцев, Я.М. Визель, А.И. Леонтьев, Ю.В. Чижигов. // БИ. - 20.09.00. - № 26.
8. Патент № 2155303 (РФ). Способ охлаждения природного газа после компрессорных станций / С.А. Бурцев, Я.М. Визель, А.И. Леонтьев, Ю.В. Чижигов. // БИ. - 27.08.00. - № 24.
9. Патент № 2162190 (РФ). Способ регулируемого бесподогревного редуцирования магистрального природного газа и устройство для его осуществления / С.А. Бурцев, Я.М. Визель, А.И. Леонтьев, Ю.В. Чижигов. // БИ. - 20.01.01. - № 2.
10. Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Температурная стратификация в сверхзвуковом потоке газа // Известия АН. Энергетика. - 2000. - № 5. - С. 101-113.

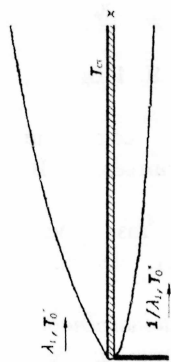


Рис. 1. Схема обтекания плоской тонкой пластины сверхзвуковым потоком газа с одной стороны и дозвуковым потоком с другой стороны.

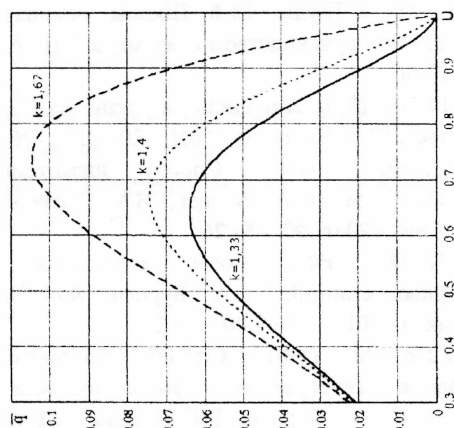


Рис. 2. Зависимость относительного количества переданного тепла при ламинарном течении от значений  $U$  и  $k$ .

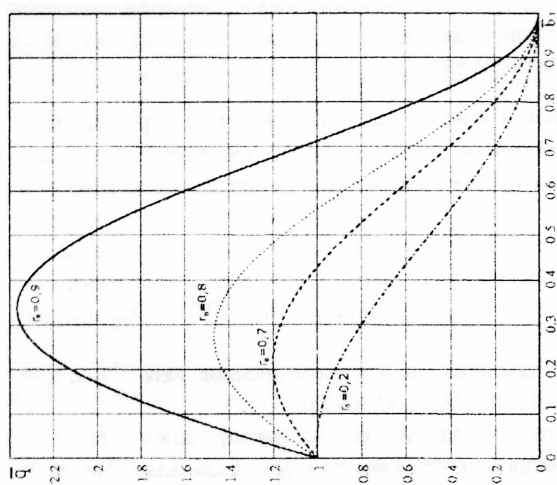


Рис. 3. Влияние величины вдува газа на количество тепла, передаваемого через тонкую проницаемую пластину для случая турбулентных пограничных слоев,  $U=0,8$  и разных  $\gamma$ .

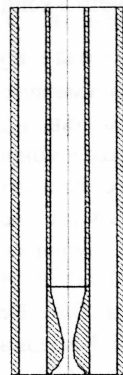


Рис. 4. Расчетная схема трубы Леонтьева (ТЛ).

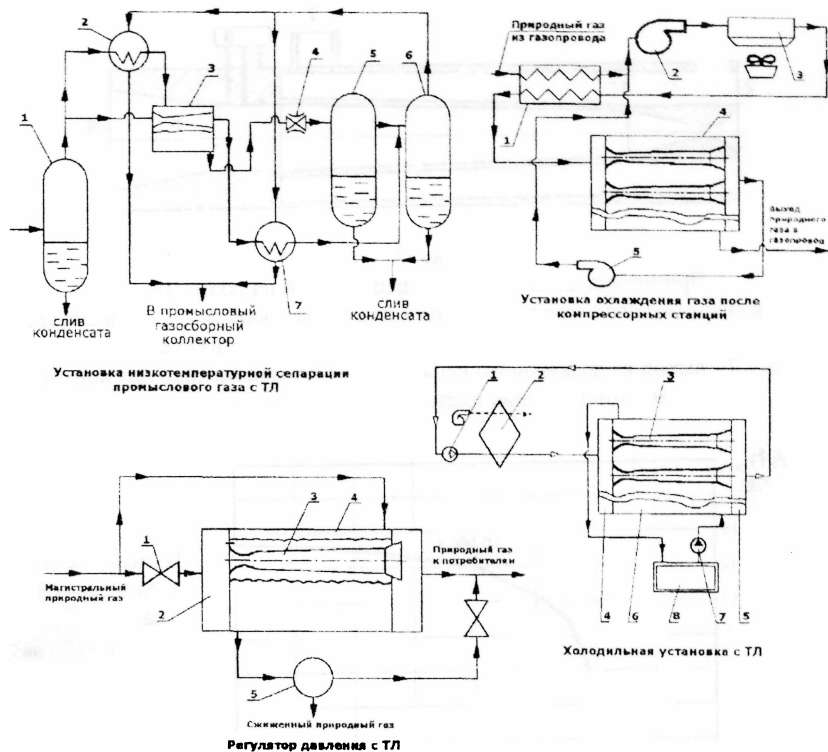


Рис. 5.

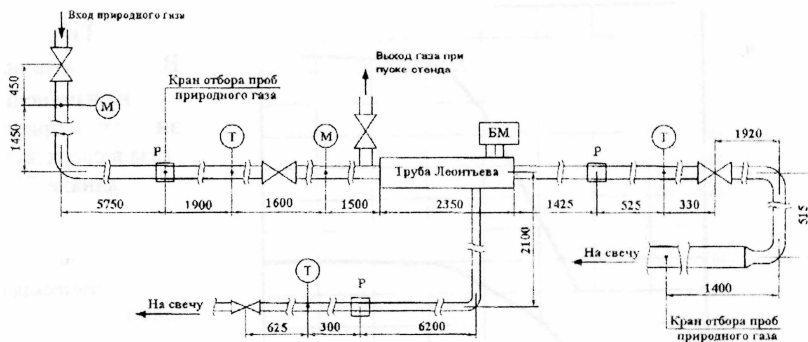


Рис. 6.

Схема стенда для испытаний ТЛ на природном газе.

Т, Р - измерение температуры, давления и расхода газа комплексом "Суперфлоу"; М - манометры для контроля давления в ходе эксперимента; БМ - блок манометров для контроля устойчивости сверхзвукового течения.

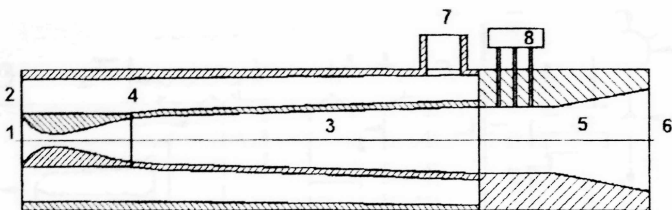


Рис. 7.

Принципиальная схема ТЛ, испытанной на полигоне.

1 - вход в сверхзвуковой канал; 2 - вход в дозвуковой канал; 3 - сверхзвуковой канал; 4 - дозвуковой канал; 5 - диффузор; 6 - выход из сверхзвукового канала; 7 - выход из дозвукового канала; 8 - блок манометров для контроля местоположения прямого скачка уплотнения.

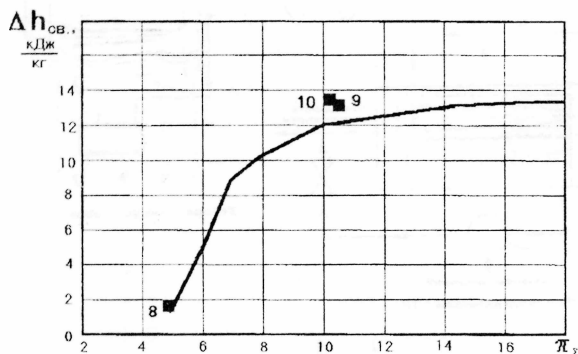


Рис. 8.

Изменение энтальпии газа в сверхзвуковом канале. Сравнение результатов расчета и экспериментов при  $m=1,2$ .

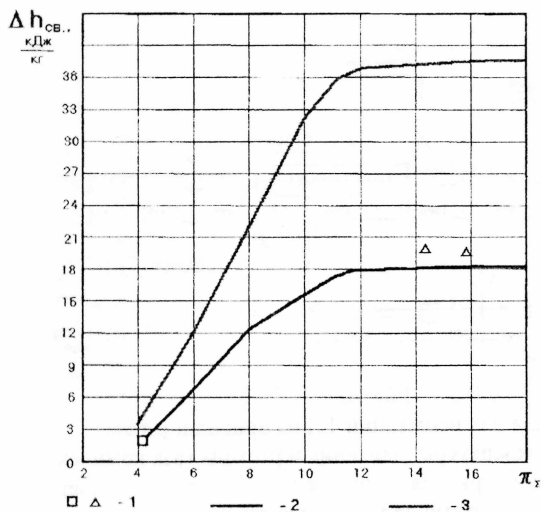


Рис. 9.

Влияние величины  $\pi_\Sigma$  на изменение энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ.

1 - экспериментальные точки;  
2 - теоретическая кривая для ТЛ, испытанной на полигоне;  
3 - теоретическая кривая для ТЛ, аналогичной 2, но с толщиной стенки 2.5 мм, изготовленной из стали 30ХГСА.

Подписано к печати 16.04.2001 г. Заказ 625. Тираж 100 экз.

---

ООО "Фирма Блок" 107140, г. Москва, ул. Русаковская, д.1. т. 264-30-73

Изготовление брошюр, авторефератов и переплет диссертаций.