

Исследование устройства температурной стратификации при работе на природном газе

#9 сентябрь 2004

DOI: 10.7463/0904.0516097

Бурцев С. А.

УДК 536.24

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

1 Введение

К настоящему времени предложено много примеров процесса газодинамического энергоразделения в газовом потоке. Причины, вызывающие температурную стратификацию, могут быть самыми различными. Иногда стратификация является результатом локального дисбаланса между генерацией и диссипацией теплоты при течении сжимаемого газа, 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 (аппаратного) метода получения разности температур.

Известно, что интенсивность теплообмена между потоком газа и обтекаемой поверхностью зависит от температурного напора между стенкой и потоком, равного разности между температурой торможения (восстановления) потока газа и температурой стенки. Это связано с тем, что возле стенки происходит искривление эпюры температуры торможения потока газа в пограничном слое (из-за разности между количеством теплоты, выделяемой при работе сил трения, и количеством теплоты, которое может быть отведено механизмами теплопроводности при данной температуре). Причём форма и величина искривления зависит от значения критерия Прандтля [1] для данного газа

$$Pr = \mu C_p / \lambda ,$$

где μ - динамическая вязкость, (Н·с)/м²; C_p - теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К); λ - теплопроводность газа, Вт/(м·К).

На рисунке 1 для трех значений критерия Прандтля представлены графики изменения относительной температуры торможения (восстановления) вблизи стенки ($\theta = T^*/T_0^*$, где T_0^* - температура торможения вне теплового и динамического пограничного слоя).

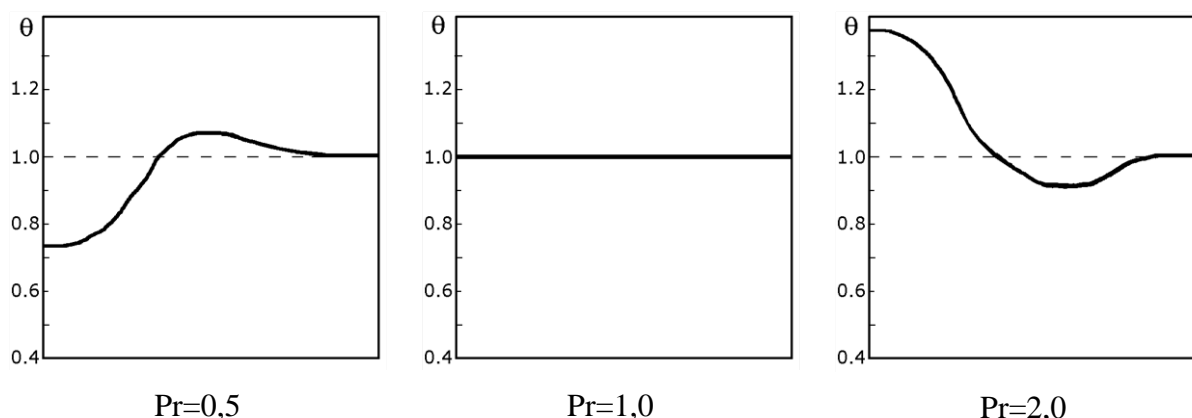


Рисунок 1 - Графики изменения относительной температуры торможения (восстановления) вблизи стенки при различных значениях критерия Прандтля

На использовании этой особенности и основан способ газодинамической температурной стратификации в сверхзвуковом потоке газа, предложенный Леонтьевым Александром Ивановичем в 1996 году. Им же было предложено устройство (см. работы [2, 3]) для реализации этого способа, получившее название трубы Леонтьева (далее ТЛ). В работе [3] было показано, что для температурной стратификации одним из определяющих параметров является коэффициент восстановления температуры r , который в наиболее общем случае зависит от теплофизических свойств потока, режима течения, геометрической формы и особенностей обтекаемой поверхности.

При исследовании течения газов для определения коэффициента восстановления температуры часто используют формулы (для ламинарного и турбулентного режимов течения соответственно) в виде:

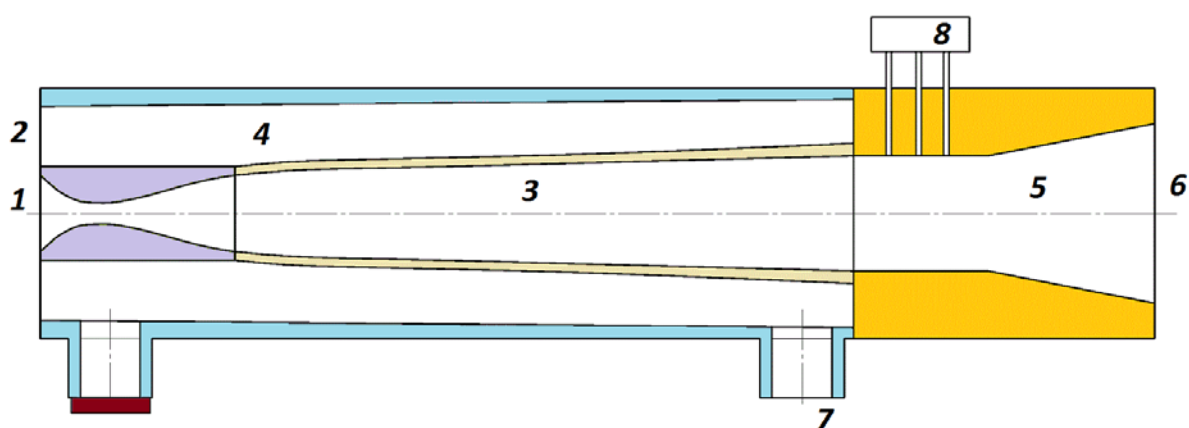
$$r_{\text{Л}} = \sqrt{\text{Pr}} \quad \text{и} \quad r_{\text{Т}} = \sqrt[3]{\text{Pr}} .$$

2 Постановка задачи

Предельные оценки эффекта температурной стратификации (при коэффициенте восстановления температуры $r \rightarrow 0$) были даны в работах [4, 5]. Методика расчета устройства температурной стратификации газа при разных законах изменения параметров

газовых потоков на базе одномерных уравнений газовой динамики приведена в работе [6]. Методики оптимизации формы сверхзвукового канала и учета толщины и термического сопротивления стенки проведены в работах [7, 8].

В работах [9, 10] представлены результаты экспериментального исследования устройства газодинамического энергоразделения (ТЛ) при работе на природном газе. Принципиальная схема устройства газодинамического энергоразделения (ТЛ), испытанного на природном газе представлена на рис. 2. Внешний вид экспериментальной установки, испытанной на полигоне (на открытой площадке ССУД МТ "ОРГЭНЕРГОГАЗ" в г. Саратове), представлен на рис. 3.



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 устойчивости сверхзвукового течения.

Рисунок 2 - Принципиальная схема устройства газодинамического энергоразделения (ТЛ), испытанного на природном газе

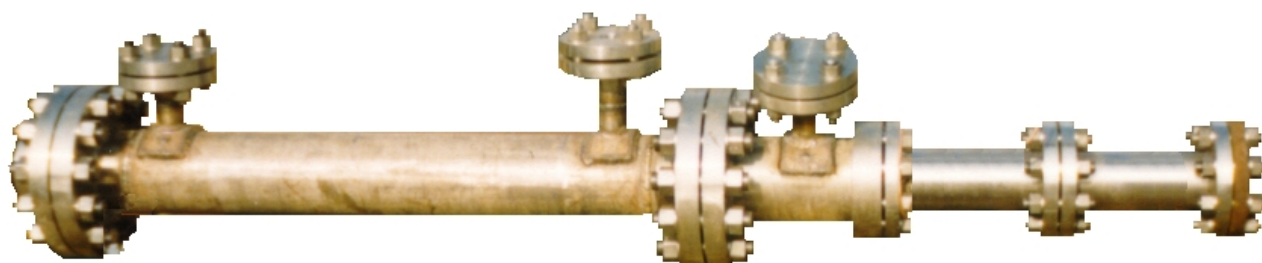


Рисунок 3 - Внешний вид (фото) экспериментальной установки, испытанной на полигоне (на открытой площадке ССУД МТ "ОРГЭНЕРГОГАЗ" в г. Саратове)

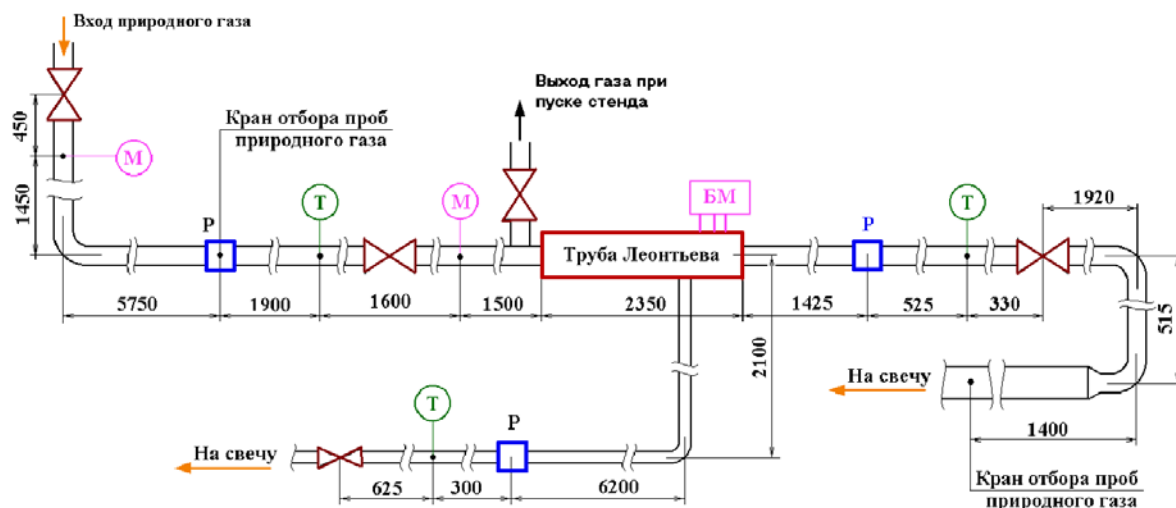
В ходе проведения испытаний на природном газе из общей форкамеры газ через входы 1 и 2 (см. рис. 2) подавался в сверхзвуковой 3 и дозвуковой 4 каналы ТЛ соответственно. В сверхзвуковом канале ТЛ газ разгонялся в специально спрофилированном сопле, затем проходил по рабочему участку конической формы и тормозился до дозвуковой скорости в диффузоре 5 и отводился через выход 6. Блок манометров 8 служил для контроля устойчивости сверхзвукового течения в канале 3. Работа блока манометров 8 основана на фиксации местоположения значительного изменения статического давления при торможении сверхзвукового потока в прямом скачке уплотнения. В ходе экспериментов изменяя входное и выходное давление добивались того, что бы первый по ходу течения газа манометр блока манометров 8 находился в сверхзвуковой области течения газа, а третий по ходу манометр - в области дозвукового течения. Это служило гарантией того, что во всем канале 3 установилось сверхзвуковое течение.

В рамках данной статьи проведено сравнение экспериментальных данных, полученных в ходе испытания ТЛ (см. [9, 10]), с результатами теоретических расчетов.

3 Схема и условия проведения экспериментальных исследований

Известно, что в природном газе при дросселировании происходит падение температуры при сохранении значения энтальпии. Так как при подводе теплоты к газу значение его энтальпии возрастает, а при отводе уменьшается, то для удобства дальнейших расчетов и сравнений все расчеты выполнены для энтальпии, определяемой по составу газа, давлению и температуре (см. [9, 10]).

Схема стенда для испытания устройства температурной стратификации газа (ТЛ) при работе на природном газе представлена на рисунке 4.



T, P - точки измерения температуры и давления газа комплексом "Суперфлоу";
M - манометры для визуального контроля давления в ходе эксперимента; БМ - блок манометров для контроля устойчивости сверхзвукового течения.

Рисунок 4 - Принципиальная схема стенда для испытания устройства температурной стратификации газа (ТЛ) при работе на природном газе

Подробно оценка погрешностей сбора и обработки экспериментальных данных представлена в работе [9]. Давление природного газа на входе в ТЛ в процессе проведения экспериментов варьировали в диапазоне от 2,5 МПа до 8,5 МПа. Температура газа на входе в ТЛ изменялась от 271 К до 290 К. Число Рейнольдса в сверхзвуковом канале находилось в диапазоне $(1,2 - 4) \cdot 10^8$. Класс погрешности манометров (блока манометров для контроля устойчивости сверхзвукового течения) 1.0.

Состав газа определялся 2 раза в день (отбор проб на хроматографический анализ производился в первой и второй половине рабочего дня) и оставался стабильным на протяжении всего периода экспериментов (точность 0,10 - 0,25 %).

При работе с измерительным комплексом "Суперфлоу" (использующимся на полигоне) для обеспечения заданной точности измерения необходимо наличие участков трубопроводов для стабилизации течения природного газа. Все необходимые условия для обеспечения заданной точности работы измерительного комплекса "Суперфлоу" по условиям окружающей среды и размерам участков стабилизации течения газа перед точками измерения и после них (см. рис. 4) были выполнены (подробнее см. работу [9]).

Точность измерения температуры газа измерительным комплексом "Суперфлоу" в заданном диапазоне температур составляет 0,4 К (при выполнении специальных условий по стабилизации потока и корректном задании состава газа, см. работу [9]).

Величина ошибки измерения давления газа измерительным комплексом "Суперфлоу" в заданном диапазоне давлений составляет не более 0,05 МПа (при выполнении специальных условий по стабилизации потока и корректном задании состава газа, см. работу [9]).

4 Результаты эксперимента при испытании ТЛ на природном газе

Увеличение энтальпии природного газа, вышедшего из сверхзвукового канала ТЛ (см. рис. 4) представлено в таблице 1 (по данным работы [9]). Кроме того, там же представлены отношение массового расхода газа по сверхзвуковому каналу ТЛ к массовому расходу газа по дозвуковому каналу ТЛ (m) и суммарная степень падения давления в сверхзвуковом канале ТЛ для всех режимов (π_{Σ}).

В ходе экспериментов № 1 и 2 по данной схеме испытаний (подробнее см. работу [9]) проверялась возможность работы одного сверхзвукового канала в течении длительного периода времени (проверялось не произойдет ли забивание гидратами). В дозвуковом канале ТЛ находился природный газ высокого давления, но выход 7 (см. рис. 2) был перекрыт.

Проведенные исследования показали, что данное устройство способно длительное время устойчиво работать (не забиваясь гидратами) при условии отключения подачи газа в дозвуковой канал. При этом изменение энтальпии сверхзвукового потока газа практически не происходило. Т.к. эти эксперименты носили чисто технологический характер, то для дальнейшего анализа их результаты использоваться не будут.

Таблица 1 - Результаты экспериментальных исследований эффективности работы ТЛ при работе на природном газе (по данным работы [9])

№ эксперимента	Увеличение энтальпии природного газа, вышедшего из сверхзвукового канала ТЛ, кДж/кг	Отношение массового расхода газа по сверхзвуковому каналу ТЛ к массовому расходу газа по дозвуковому каналу ТЛ, m	Суммарная степень падения давления в сверхзвуковом канале ТЛ
3	15,13	0,951	11,87
4	9,20	4,227	16,88
5	18,02	0,868	14,30

6	2,12	0,657	4,21
7	17,11	0,906	14,54
8	1,75	1,147	4,86
9	13,19	1,138	10,42
10	13,38	1,286	10,29
11	19,14	0,671	15,80
12	19,72	0,727	14,37

5 Сравнение значения экспериментальных данных с результатами теоретических исследований ТЛ

Для проведения расчетов был принят усредненный состав природного газа, приведенный в таблице 2 (по данным работы [9]). Согласно методике, изложенной в работе [11], для данного состава природного газа влияние конденсации высших углеводородов в сверхзвуковом потоке газа на значение коэффициента восстановления r очень мало и им можно пренебречь.

Таблица 2 - Усредненный состав природного газа по данным работы [9]

№	Наименование	Объемная доля, %
1	Метан	98,919
2	Этан	0,224
3	Пропан	0,211
4	Изо-бутан	0,041
5	Н-бутан	0,046
6	Изо-пентан	0,004
7	Н-пентан	0,002
8	Гексан	0,007
9	Азот	0,546
10	Углекислый газ	0

Для проведения сравнения экспериментальных значений увеличения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ с результатами теоретических расчетов сгруппируем все экспериментальные точки в 3 группы:

группа высокого давления – абсолютное давление на входе в сверхзвуковой канал ТЛ в пределах от 75,85 бар до 83,79 бар - эксперименты № 3, 4, 5, 6, 7 и 8 таблицы 1 (по данным работы [9]);

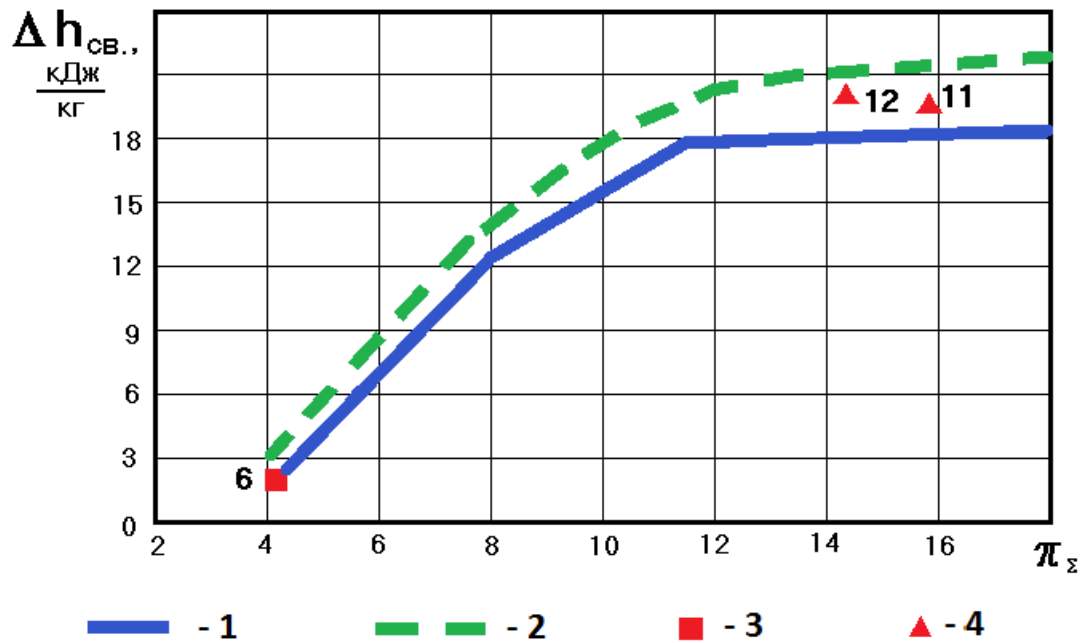
группа среднего давления – абсолютное давление на входе в сверхзвуковой канал ТЛ в пределах от 47.71 бар до 54.85 бар - эксперименты № 9 и 10 таблицы 1 (по данным работы [9]);

группа низкого давления – абсолютное давление на входе в сверхзвуковой канал ТЛ в пределах от 27.58 бар до 32.39 бар - эксперименты № 11 и 12 таблицы 1 (по данным работы [9]).

Проведем сравнение экспериментальных данных и данных численных исследований, представленных в работах [9, 10] с расчетом по методике, изложенной в работах [6, 7, 8] с учетом интенсификации теплообмена на начальном участке (см. работы [12, 13]) и влияния продольного градиента давления (см. работу [14]) и продольной теплопроводности (см. работу [13]).

Построим графики изменения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале в зависимости от суммарной степени падения давления в сверхзвуковом канале (с учетом диффузора) для различных значений отношения массового расхода газа по сверхзвуковому каналу ТЛ к массовому расходу газа по дозвуковому каналу ТЛ (m).

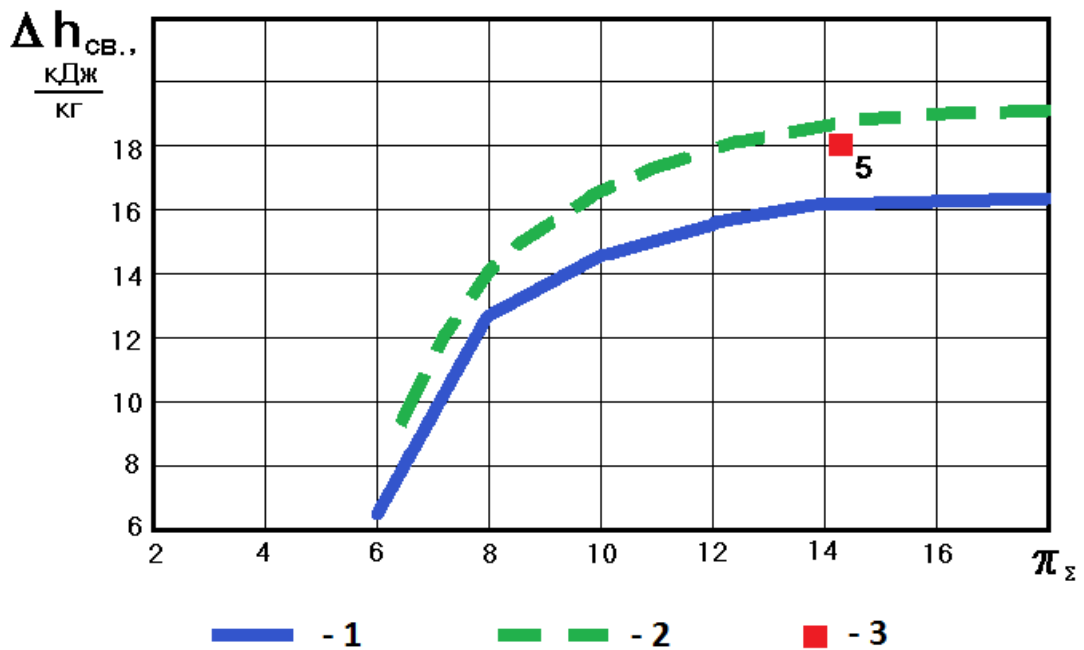
Для построения графика увеличения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале в зависимости от суммарной степени падения давления в сверхзвуковом канале (π_{Σ}) примем отношение массового расхода по сверхзвуковому каналу ТЛ к массовому расходу по дозвуковому каналу ТЛ $m \approx 0,7$. Данным значениям теоретических расчетов удовлетворяют эксперименты № 6 ($m=0,657$), № 11 ($m=0,671$) и № 12 ($m=0,727$) таблицы 1 (см. рисунок 5).



1 – результаты расчета, взятые из работы [9]; 2 – результаты расчета, выполненные с учетом продольного градиента давления и интенсификации теплообмена, 3 – экспериментальная точка группы высокого давления (эксп. № 6); 4 – экспериментальные точки группы низкого давления (эксп. № 11 и 12).

Рисунок 5 - Увеличение энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ в зависимости от π_{Σ} при $m \approx 0,7$ (номера экспериментальных точек приняты по таблице 1)

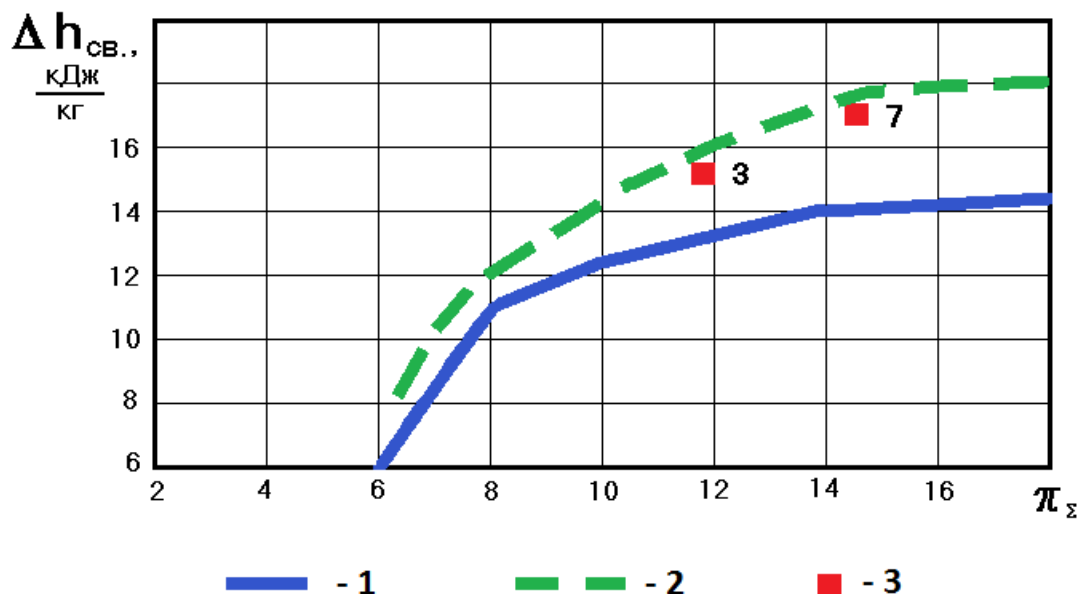
Для построения графика увеличения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале в зависимости от суммарной степени падения давления в сверхзвуковом канале (π_{Σ}) примем отношение массового расхода по сверхзвуковому каналу ТЛ к массовому расходу по дозвуковому каналу ТЛ $m \approx 0,87$. Данным значениям теоретических расчетов удовлетворяет эксперимент № 5 ($m=0,868$) таблицы 1 (см. рисунок 6).



1 – результаты расчета, взятые из работы [9]; 2 – результаты расчета, выполненные с учетом продольного градиента давления и интенсификации теплообмена, 3 – экспериментальная точка группы высокого давления (эксп. № 5).

Рисунок 6 - Увеличение энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ в зависимости от π_{Σ} при $m \approx 0,87$ (номер экспериментальной точки принят по таблице 1)

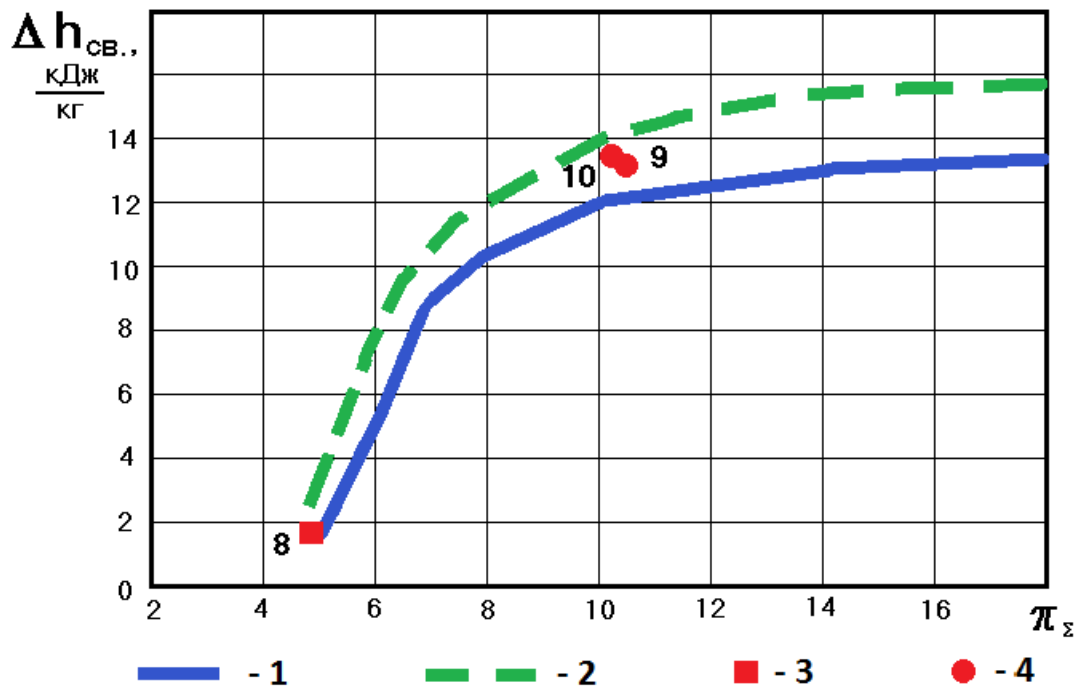
Для построения графика увеличения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале в зависимости от суммарной степени падения давления в сверхзвуковом канале (π_{Σ}) примем отношение массового расхода по сверхзвуковому каналу ТЛ к массовому расходу по дозвуковому каналу ТЛ $m \approx 0,95$. Данным значениям теоретических расчетов удовлетворяют эксперименты № 3 ($m=0,951$) и № 7 ($m=0,906$) таблицы 1 (см. рисунок 7).



1 – результаты расчета, взятые из работы [9]; 2 – результаты расчета, выполненные с учетом продольного градиента давления и интенсификации теплообмена, 3 – экспериментальные точки группы высокого давления (эксп. № 3 и 7).

Рисунок 7 - Увеличение энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ в зависимости от π_{Σ} при $m \approx 0,95$ (номера экспериментальных точек приняты по таблице 1)

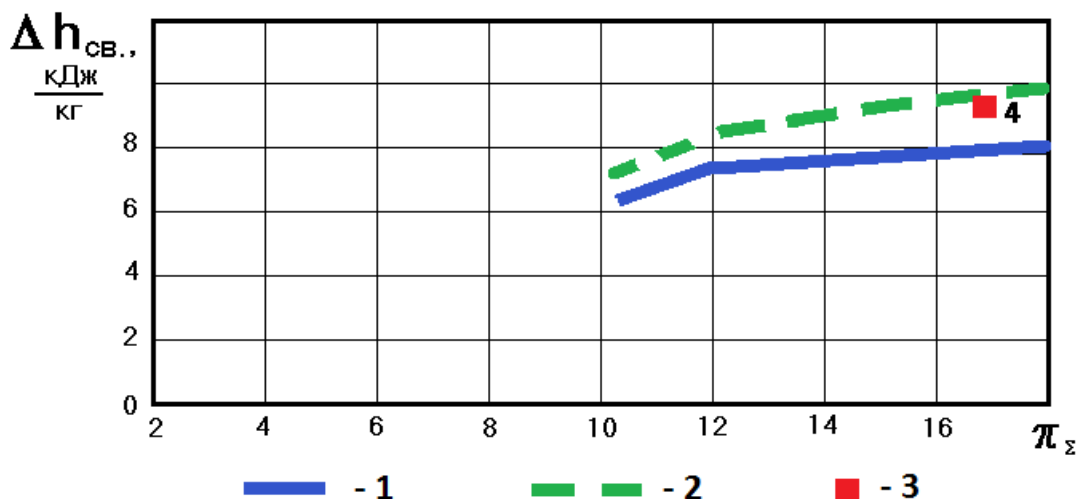
Для построения графика увеличения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале в зависимости от суммарной степени падения давления в сверхзвуковом канале (π_{Σ}) примем отношение массового расхода по сверхзвуковому каналу ТЛ к массовому расходу по дозвуковому каналу ТЛ $m \approx 1,2$. Данным значениям теоретических расчетов удовлетворяют эксперименты № 8 ($m=1,147$), № 9 ($m=1,138$) и № 10 ($m=1,286$) таблицы 1 (см. рисунок 8).



1 – результаты расчета, взятые из работы [9]; 2 – результаты расчета, выполненные с учетом продольного градиента давления и интенсификации теплообмена, 3 – экспериментальная точка группы высокого давления (эксп. № 8), 4 – экспериментальные точки группы среднего давления (эксп. № 9 и 10).

Рисунок 8 - Увеличение энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ в зависимости от π_{Σ} при $m \approx 1,2$ (номера экспериментальных точек приняты по таблице 1)

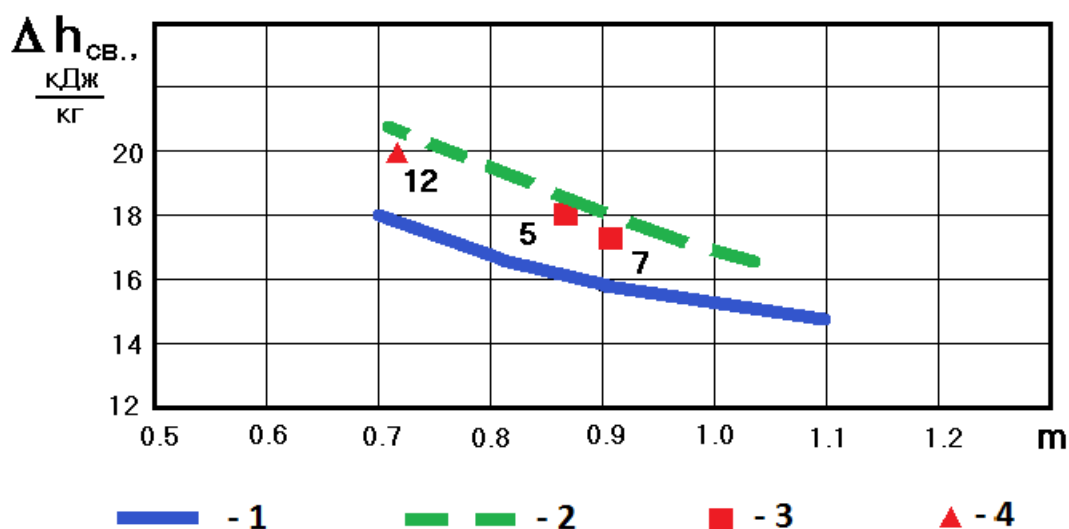
Для построения графика увеличения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале в зависимости от суммарной степени падения давления в сверхзвуковом канале (π_{Σ}) примем отношение массового расхода по сверхзвуковому каналу ТЛ к массовому расходу по дозвуковому каналу ТЛ $m \approx 4,2$. Данным значениям теоретических расчетов удовлетворяет эксперимент № 4 ($m=4,227$) таблицы 1 (см. рисунок 9).



1 – результаты расчета, взятые из работы [9]; 2 – результаты расчета, выполненные с учетом продольного градиента давления и интенсификации теплообмена, 3 – экспериментальная точка группы высокого давления (эксп. № 4).

Рисунок 9 - Увеличение энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ в зависимости от π_Σ при $m \approx 4,2$ (номер экспериментальной точки принят по таблице 1)

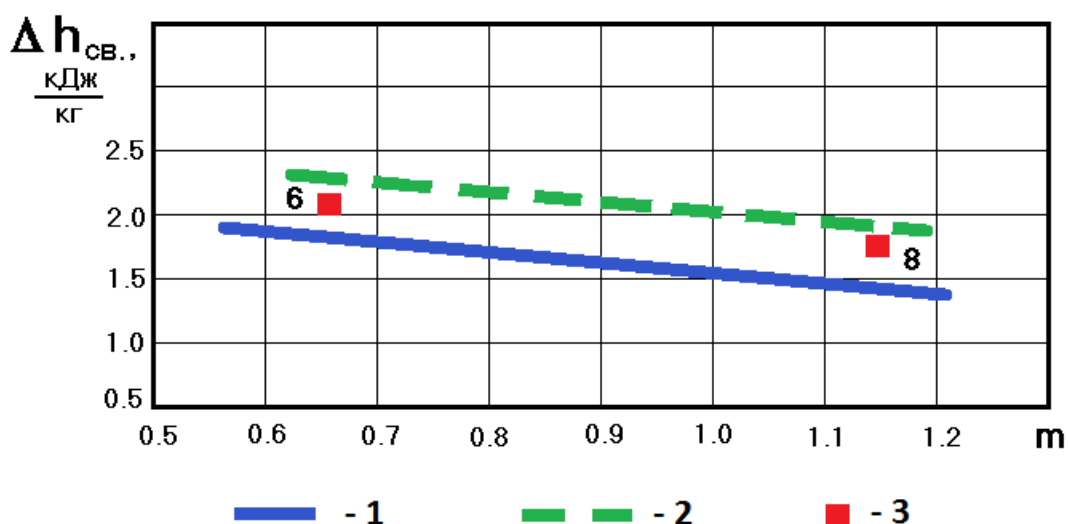
Примем суммарную степень падения давления в сверхзвуковом канале $\pi_\Sigma \approx 14,4$. Построим график увеличения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ в зависимости от отношения массового расхода по сверхзвуковому каналу ТЛ к массовому расходу по дозвуковому каналу ТЛ (m). Данным значениям теоретических расчетов удовлетворяют эксперименты № 5 ($\pi_\Sigma = 14,30$), № 7 ($\pi_\Sigma = 14,54$) и № 12 ($\pi_\Sigma = 14,37$) таблицы 1 (см. рисунок 10).



1 – результаты расчета, взятые из работы [9]; 2 – результаты расчета, выполненные с учетом продольного градиента давления и интенсификации теплообмена, 3 – экспериментальные точки группы высокого давления (эксп. № 5 и 7), 4 – экспериментальная точка группы низкого давления (эксп. № 12).

Рисунок 10 - Увеличение энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ в зависимости от m при $\pi_{\Sigma} \approx 14,4$ (номера экспериментальных точек приняты по таблице 1)

Примем суммарную степень падения давления в сверхзвуковом канале $\pi_{\Sigma} \approx 4,5$. Построим график увеличения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ в зависимости от отношения массового расхода по сверхзвуковому каналу ТЛ к массовому расходу по дозвуковому каналу ТЛ (m). Данным значениям теоретических расчетов удовлетворяют эксперименты № 6 ($\pi_{\Sigma} = 4,21$) и № 8 ($\pi_{\Sigma} = 4,86$) таблицы 1 (см. рисунок 11).



1 – результаты расчета, взятые из работы [9]; 2 – результаты расчета, выполненные с учетом продольного градиента давления и интенсификации теплообмена, 3 – экспериментальные точки группы высокого давления (эксп. № 6 и 8).

Рисунок 11 - Увеличение энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ в зависимости от m при $\pi_{\Sigma} \approx 4,5$ (номера экспериментальных точек приняты по таблице 1)

Анализ данных, представленных на рисунках 5 – 11 показывает, что результаты численных исследований по методике, представленной в работах [6, 7, 8] (взятые из работы [9] – линия 1 на рис. 5 - 11) дают значения ниже экспериментальных данных на 1 – 3 кДж/кг (в среднем на 2 кДж/кг).

При этом в работе [9] отмечено, что в сверхзвуковом канале присутствовала система косых скачков уплотнения, которая немного снижала скорость потока и должна была привести к уменьшению количества переданной теплоты (уменьшению роста энтальпии).

Результаты численного исследования, выполненные по методике представленной в работах [6, 7, 8] с учетом интенсификации теплообмена на начальном участке (см. работы [12, 13]) и влияния продольного градиента давления (см. работу [14]) и продольной теплопроводности (см. работу [13]) представлены на рис. 5 - 11 в виде линии 2.

Сравнение двух результатов численного исследования показывает, что учет интенсификации теплообмена и влияния продольного градиента давления и теплопроводности привел к тому, что увеличение энтальпии сверхзвукового потока стало больше на 1 – 4 кДж/кг (в диапазоне суммарной степени падения давления в сверхзвуковом канале 8 - 16 в среднем на 3 кДж/кг).

Сравнение результатов численного исследования при учете влияния продольного градиента давления и теплопроводности с экспериментальными данными, представленными в работе [9], показывает, что по результатам численного исследования увеличение энтальпии сверхзвукового потока больше, чем полученное экспериментально на 0,5 – 2 кДж/кг.

Это расхождение можно объяснить наличием системы косых скачков уплотнения в сверхзвуковом канале (подробнее см. работы [9, 10]), приводящих к снижению эффективности работы устройства.

6 Заключение

Была модернизирована методика численного исследования, позволяющая рассчитать процесс теплопередачи в устройстве газодинамического энергоразделения (ТЛ) с учетом интенсификации теплообмена на начальном участке сверхзвукового канала и влияния продольного градиента давления и продольной теплопроводности.

Выполнена верификация данной методики и показано, что данная методика с учетом поправок дает расхождение с экспериментальными данными в пределах 0,5 – 2 кДж/кг, что объясняется отличием реальной скорости сверхзвукового потока в экспериментальной установке от расчетной.

При точном задании скорости сверхзвукового потока (соответствующей реальной скорости в сверхзвуковом канале) точность расчета в рабочем диапазоне параметров будет на уровне 5-7 % и точнее.

На основании вышеприведенного можем сделать вывод, что предложенный метод расчета на базе одномерных уравнений газовой динамики после модификации позволяет получить достаточно точное решение.

Проведенные расчеты показывают, что предложенные на основе экспериментальных данных (см. работу [9]) варианты практической реализации эффекта температурной стратификации газа (подробнее см. работы [15, 16, 17, 18, 19]) подтверждаются результатами численных экспериментов.

Список литературы

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. М.: Наука, 1991. Ч. 1. 600 с.; Ч. 2. 304 с.
2. Леонтьев А.И. Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (Труба Леонтьева) : пат. 2106581 РФ. Заявл 23.05.1996; опубл. 10.03.1998, Бюл. № 7.
3. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35, № 1. С. 157-159.
4. Леонтьев А.И. Температурная стратификация сверхзвукового газового потока // Доклады Академии Наук. 1997. Т. 354, № 4. С. 475-477.
5. Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Температурная стратификация в сверхзвуковом потоке газа // Известия АН. Энергетика. 2000. № 5. С. 101-113.
6. Бурцев С.А. Исследование температурной стратификации газа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1998. № 2. С. 65-72.
7. Бурцев С.А. Оптимизация геометрии сверхзвукового канала в устройстве для энергоразделения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1999. № 2. С. 48-54.
8. 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. М.: Изд-во МЭИ, 1998. С. 27-30.
9. Бурцев С.А. Исследование температурного разделения в потоках сжимаемого газа : дис. ... канд. техн. наук. М., 2001. 124 с.
10. Леонтьев А.И., Бурцев С.А., Визель Я.М., Чижиков Ю.В. Экспериментальное исследование газодинамической температурной стратификации природного газа // Газовая промышленность. 2002. № 11. С. 72-75.
11. Бурцев С.А. Исследование температурной стратификации газа и коэффициента восстановления при образовании конденсата газа // Труды 2-й Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 8. М.: Издательство МЭИ. 1998. С. 58-59.
12. Леонтьев А.И., Миронов Б.П., Фафурин А.В. Длина начального участка при турбулентном течении газа в цилиндрической трубе в условиях существенной неизотермичности // Журнал прикладной механики и технической физики. 1968. № 4. С. 99-104.
13. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
14. Бурцев С.А., Виноградов Ю.А., Ермолаев И.К., Леонтьев А.И. Эффект температурной стратификации газа // Труды 14-й Школы семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. Т. 2. М.: Изд-во МЭИ, 2003. С. 189-194.
15. Бурцев С.А., Визель Я.М., Леонтьев А.И., Чижиков Ю.В. Способ охлаждения природного газа после компрессорных станций : пат. 2155303 РФ. 2000. Бюл. № 24.

16. Бурцев С.А., Визель Я.М., Леонтьев А.И., Чижиков Ю.В. Способ низкотемпературной сепарации промышленного газа : пат. 2156271 РФ. 2000. Бюл. № 26.
17. Бурцев С.А., Визель Я.М., Леонтьев А.И., Чижиков Ю.В. Холодильная установка : пат. 2156413 РФ. 2000. Бюл. № 26.
18. Бурцев С.А., Визель Я.М., Леонтьев А.И., Чижиков Ю.В. Способ регулируемого бесподогревного редуцирования магистрального природного газа и устройство для его осуществления : пат. 2162190 РФ. 2001. Бюл. № 2.
19. Научные основы технологии XXI века / под. общ. ред. А.И. Леонтьева, Н.Н. Пилюгина, Ю.В. Полежаева, В.М. Поляева. М.: УНПЦ "Энергомаш", 2000. 136 с.

Investigation of the operation of temperature lamination device working on the natural gas

9, September 2004

DOI: 10.7463/0904.0516097

Burtsev S.A.

Bauman Moscow State Technical University, 105005, Moscow, Russian Federation

This work describes the test configuration of gas dynamic energy disjunction device (Leontiev's tube) working on the natural gas. This device works by means of local disbalance between heat generation and dissipation during the flow of compressible gas. Results of experimental investigation of the specified device and measuring error estimate were presented in this article. Updated method of calculating this class of devices was proposed; it allows one to consider the intensification of heat transfer at the initial section of a supersonic channel along with the influence of the longitudinal pressure gradient and the longitudinal thermal conductivity of this device's walls. The comparison of the results obtained from numerical experiments with a use of updated method with the results obtained from the same experiments with a use of basic method and experimental data was carried out. It was also shown that results of this research obtained using the updated method describe the growth of natural gas' enthalpy better than ones obtained with a use of basic method.

Publications with keywords: natural gas, temperature stratification, the gas-dynamic energy separation, Prandtl number, tube de Leontiev, reduction factor of temperature

Publications with words: natural gas, temperature stratification, the gas-dynamic energy separation, Prandtl number, tube de Leontiev, reduction factor of temperature

References

1. Abramovich G.N. *Prikladnaia gazovaia dinamika. V 2 ch.* [Applied gas dynamics. In 2 parts]. Moscow, Nauka, 1991. Part. 1. 600 p.; Part. 2. 304 p.
2. Leont'ev A.I. *Sposob temperaturnoi stratifikatsii gaza i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia (Truba Leont'eva)* [The method of temperature stratification of gas and device for its implementation (Pipe Leontiev)]. Patent RF, no. 2106581. 1998.
3. Leont'ev A.I. *Gazodinamicheskii metod energorazdeleniia gazovykh potokov* [Gas-dynamic method of energy separation of gas flows]. *Teplofizika vysokikh temperature*, 1997, vol. 35, no. 1, pp. 157-159.

4. Leont'ev A.I. Temperaturnaia stratifikatsiia sverkhzvukovogo gazovogo potoka [Thermal stratification of supersonic gas flow]. *Doklady Akademii Nauk*, 1997, vol. 354, no. 4, pp. 475-477.
5. Burtsev S.A., Leont'ev A.I. Temperaturnaia stratifikatsiia v sverkhzvukovom potoke gaza [Temperature stratification in supersonic gas flow]. *Izvestiia RAN. Energetika*, 2000, no. 5, pp. 101-113.
6. Burtsev S.A. Issledovanie temperaturnoi stratifikatsii gaza [Investigation of the temperature stratification of gas]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering], 1998, no. 2, pp. 65-72.
7. Burtsev S.A. Optimizatsiia geometrii sverkhzvukovogo kanala v ustroistve dlia energorazdeleniia [Optimization of the geometry of supersonic channel in device for energy separation]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Bulletin of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering], 1999, no. 2, pp. 48-54.
8. Burtsev S.A. Issledovanie vliianiia tolshchiny stenki sverkhzvukovogo kanala i ee termicheskogo soprotivleniia na temperaturnuiu stratifikatsiiu real'nogo gaza [Investigation of the influence of the wall thickness of supersonic channel and its thermal resistance at temperature stratification of real gas]. *Trudy 12-i Shkoly seminara molodykh uchenykh i spetsialistov pod rukovodstvom akademika RAN A.I. Leont'eva* [Proc. of the 12th School-seminar of young scientists and specialists under the leadership of RAS academician, A.I. Leontiev]. Moscow, MEI Publ., 1998, pp. 27-30.
9. Burtsev S.A. *Issledovanie temperaturnogo razdeleniia v potokakh szhimaemogo gaza. Kand. diss.* [Investigation of temperature separation in the flows of compressible gas. Cand. diss.]. Moscow, 2001. 124 p.
10. Leont'ev A.I., Burtsev S.A., Vizeľ Ia.M., Chizhikov Iu.V. Eksperimental'noe issledovanie gazodinamicheskoi temperaturnoi stratifikatsii prirodnogo gaza [Experimental investigation of gas dynamic temperature stratification of natural gas]. *Gazovaia promyshlennost'* [Gas Industry], 2002, no. 11, pp. 72-75.
11. Burtsev S.A. Issledovanie temperaturnoi stratifikatsii gaza i koeffitsienta vosstanovleniia pri obrazovanii kondensata gaza [Investigation of the temperature stratification of gas and recovery coefficient in the formation of gas condensate]. *Trudy 2-i Rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu. T. 8.* [Proc. of the 2nd Russian National Conference on Heat Transfer. Vol. 8]. MEI Publ., 1998, pp. 58-59.
12. Leont'ev A.I., Mironov B.P., Fafurin A.V. Dlina nachal'nogo uchastka pri turbulentnom techenii gaza v tsilindricheskoi trube v usloviiakh sushchestvennoi neizotermichnosti [The length of the initial section at turbulent gas flow in cylindrical tube in conditions of essential non-isothermality]. *Zhurnal prikladnoi mekhaniki i tekhnicheskoi fiziki* [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics], 1968, no. 4, pp. 99-104.
13. Kutateladze S.S., Leont'ev A.I. *Tplomassoobmen i trenie v turbulentnom pogranichnom sloe* [Heat-mass-exchange and friction in a turbulent boundary layer]. Moscow, Energoatomizdat, 1985. 320 p.

14. Burtsev S.A., Vinogradov Iu.A., Ermolaev I.K., Leont'ev A.I. Effekt temperaturnoi stratifikatsii gaza [The effect of temperature stratification of gas]. *Trudy 14-i Shkoly seminara molodykh uchenykh i spetsialistov pod rukovodstvom akademika RAN A.I. Leont'eva. T. 2.* [Proc. of the 14th School-seminar of young scientists and specialists under the leadership of RAS academician, A.I. Leontiev. Vol. 2]. Moscow, MEI Publ., 2003, pp. 189-194.
15. Burtsev S.A., Vizel' Ia.M., Leont'ev A.I., Chizhikov Iu.V. *Sposob okhlazhdeniia prirodnogo gaza posle kompressornykh stantsii* [Method of cooling of natural gas after the compressing]. Patent RF, no. 2155303. 2000.
16. Burtsev S.A., Vizel' Ia.M., Leont'ev A.I., Chizhikov Iu.V. *Sposob nizkotemperaturnoi separatsii promyslovogo gaza* [The method of low temperature separation of commercial gas]. Patent RF, no. 2156271. 2000.
17. Burtsev S.A., Vizel' Ia.M., Leont'ev A.I., Chizhikov Iu.V. *Kholodil'naia ustanovka* [Refrigeration unit]. Patent RF, no. 2156413. 2000.
18. Burtsev S.A., Vizel' Ia.M., Leont'ev A.I., Chizhikov Iu.V. *Sposob reguliruemogo bespodogrevnogo redutsirovaniia magistral'nogo prirodnogo gaza i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia* [Way of adjustable non-heated reduction of main natural gas and device for its implementation]. Patent RF, no. 2162190. 2001.
19. Leont'eva A.I., Piliugina N.N. Polezhaeva Iu.V., Poliaeva V.M., eds. *Nauchnye osnovy tekhnologii 21 veka* [Scientific bases of technology of the 21century]. Moscow, UNPTs "Energomash" Publ., 2000. 136 p.