

Исследование работы устройства температурной стратификации на воде и природном газе

#5 Май 2005

DOI: 10.7463/0505.0529473

Бурцев С. А.

УДК 536.24

МГТУ им. Н.Э. Баумана

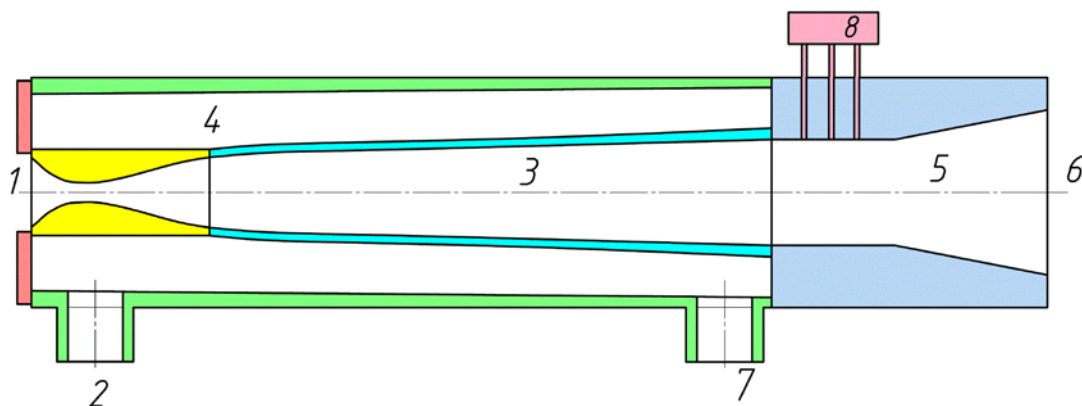
Введение

Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (Труба Леонтьева - ТЛ) были предложены Леонтьевым Александром Ивановичем в работах [1, 2]. Предельные оценки эффекта температурной стратификации (при обтекании плоской пластины) были даны в работе [3]. Оценка максимального количества теплоты, которое можно передать от дозвукового потока к сверхзвуковому потоку при обтекании плоской пластины и в коаксиальных каналах была дана в работе [4]. Методика расчета устройства температурной стратификации газа при разных законах изменения параметров газовых потоков на базе одномерных уравнений газовой динамики приведена в работе [5]. Методика оптимизации формы сверхзвукового канала и учета толщины и термического сопротивления стенки приведены в работах [6, 7]. В работах [8, 9] представлены результаты экспериментального исследования двух вариантов устройства газодинамического энергоразделения (ТЛ): первого - при работе только на природном газе и второго - при работе на воде и природном газе.

В работе [10] представлено сравнение результатов экспериментального исследования ТЛ при работе только на природном газе с данными численного исследования по базовой и модернизированной методикам. В данной работе выполнено сравнение результатов экспериментального исследования ТЛ при работе на воде и природном газе (ТЛ с независимым внешним контуром) с данными численного исследования по базовой и модернизированной методикам.

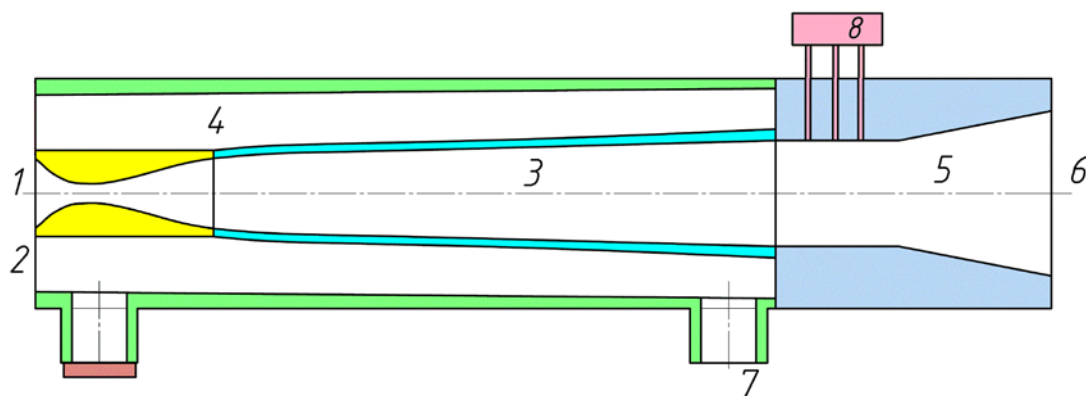
1 Постановка задачи

Принципиальная схема устройства газодинамического энергоразделения, испытанного на воде и природном газе (ТЛ с независимым внешним контуром) представлена на рис. 1. Для сравнения на рис. 2 представлена принципиальная схема устройства газодинамического энергоразделения (ТЛ), испытанного только на природном газе.



1 - вход в сверхзвуковой канал; 2 - вход в дозвуковой канал; 3 – внутренний сверхзвуковой канал; 4 - внешний дозвуковой канал; 5 - диффузор; 6 - выход из сверхзвукового канала; 7 - выход из дозвукового канала; 8 - блок манометров для контроля устойчивости сверхзвукового течения.

Рисунок 1 - Принципиальная схема устройства газодинамического энергоразделения, испытанного на воде и природном газе (ТЛ с независимым внешним контуром)



1 - вход в сверхзвуковой канал; 2 - вход в дозвуковой канал; 3 - внутренний сверхзвуковой канал; 4 - внешний 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 только на природном газе

Для упрощения проведения сравнительного анализа работы устройства газодинамического энергоразделения только на природном газе (подробнее см. [8, 9, 10]) и воде и природном газе (подробнее см. [8, 9]) была создана одна установка, которая (в зависимости от варианта подключения) позволяла работать только на природном газе (ТЛ) или на воде и природном газе (ТЛ с независимым внешним контуром).

Для случая испытания на воде и природном газе (ТЛ с независимым внешним контуром, см. рис. 1) во внешний дозвуковой канал 4 через вход 2 подавалась вода, которая затем отводилась через выход из дозвукового канала 7. В ходе проведения исследований определялся расход воды и ее температура на входе и выходе из дозвукового канала.

Для случая испытания только на природном газе (подробнее см. работу [10] и рис. 2) во внешний дозвуковой канал 4 через вход 2 подавался природный газ высокого давления, который затем отводился через выход из дозвукового канала 7. В ходе проведения исследований определялся расход природного газа и его давление и температура на входе и выходе из дозвукового канала.

В остальном процесс испытания по разным схемам не отличался. В обоих случаях (см. рис. 1 и 2) газ высокого давления через вход 1 подавался во внутренний сверхзвуковой канал 3, где 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.

На рис. 3 показан процесс монтажа экспериментальной установки на полигоне (на открытой площадке ССУД МТ "ОРГЭНЕРГОГАЗ" в г. Саратове).

В ходе проведения испытаний были выполнены эксперименты, в которых по внешнему контуру ТЛ вместо природного газа текла вода. Эти эксперименты подтвердили высокий коэффициент теплоотдачи к стенке со стороны дозвукового потока (замена дозвукового потока природного газа на воду незначительно изменила

коэффициент теплоотдачи) и показали, что возможно передавать тепло от теплоносителя (вода), имеющего более низкую температуру, к теплоносителю, имеющему более высокую среднемассовую температуру (природный газ). Разница среднемассовых температур на входе составляла порядка 10 градусов. Это оказалось возможным из-за локального перераспределения температур в сверхзвуковом потоке (за счет локального дисбаланса между генерацией и диссипацией теплоты при течении сжимаемого газа). Для большинства газов вблизи стенки сверхзвукового канала температура восстановления (для случая отсутствия теплопередачи – температура теплоизолированной стенки) оказывается ниже среднемассовой температуры по сечению сверхзвукового канала.



Рисунок 3 - Монтаж экспериментальной установки (ТЛ с независимым внешним контуром) на открытой площадке ССУД МТ "ОРГЭНЕРГОГАЗ"

Локальный дисбаланс между генерацией и диссипацией теплоты при течении сжимаемого газа возникает из-за того, что работа сил трения вблизи стенки переходит в теплоту, которая отводится за счет механизмов теплопроводности. При равенстве этих количеств теплоты (что соответствует значению критерия Прандтля равного единице) никаких особенностей нет. Но как только количество теплоты, которое при данной температуре можно отвести от стенки за счет теплопроводности, становится больше количества теплоты подводимого к стенке за счет работы сил трения ($Pr < 1$), то происходит перераспределение температуры газа в пограничном слое сверхзвукового

потока газа, аналогичное показанному на рис. 4. При этом среднеинтегральная температура газа в пограничном слое остается неизменной.

Температура торможения сверхзвукового потока (текущего над разделительной стенкой, см. рис. 4) равна температуре торможения дозвукового потока (текущего под разделительной пластиной). При этом температуру восстановления на стенке со стороны сверхзвукового потока (см. рис. 4) можно определить по формуле

$$T_{CT}^* = T^* \left[1 - (1 - r) \frac{k - 1}{k + 1} \lambda^2 \right].$$

Как видно из формулы температура восстановления на стенке со стороны сверхзвукового потока зависит от температуры торможения T^* , коэффициента восстановления температуры r , показателя адиабаты k и приведенной скорости потока λ . В дозвуковом потоке температура восстановления на стенке практически равна температуре торможения.

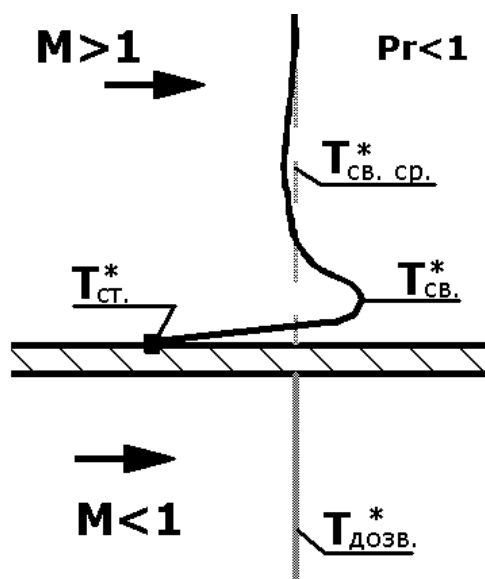


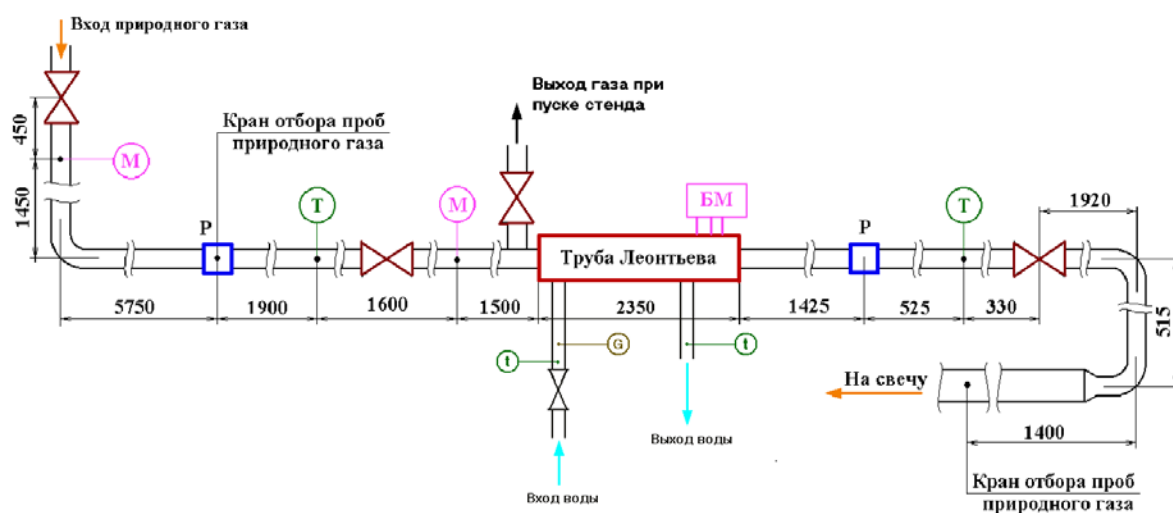
Рисунок 4 - Принцип возникновения газодинамического энергоразделения

2 Схема и условия проведения экспериментальных исследований

Течение газа в сверхзвуковом канале сопряжено с падением давления, что приводит к возникновению эффекта дросселирования (осуществлению процесса Джоуля-Томсона). Как известно 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 будем вести для энтальпии, определяемой по составу газа, давлению и температуре (подробнее см. работу [8]). Для расчета энтальпии примем свойства чистых веществ по данным работы [11].

Схема стенда для испытания устройства газодинамического энергоразделения на воде и природном газе (ТЛ с независимым внешним контуром) представлена на рисунке 5. При работе с измерительным комплексом "Суперфлоу" для обеспечения заданной точности измерения необходимо использование участков трубопроводов для стабилизации течения природного газа, расположенных до и после точек измерения. В ходе подготовки проведения экспериментов были выполнены все необходимые требования (подробнее см. рис. 5).



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

Рисунок 5 – Принципиальная схема измерений при работе устройства газодинамического энергоразделения на воде и природном газе (ТЛ с независимым внешним контуром)

В созданной схеме стенда для исследования устройства газодинамического энергоразделения возможно регулировать расходы теплоносителей в достаточно широком диапазоне параметров. Подробно оценка погрешностей сбора и обработки экспериментальных данных представлена в работе [8]. Давление торможения природного газа на входе в сверхзвуковой канал ТЛ с независимым внешним контуром

в процессе проведения экспериментов варьировали в диапазоне от 2,75 МПа до 8,38 МПа. Температура газа на входе в сверхзвуковой канал ТЛ с независимым внешним контуром изменялась от 271 К до 290 К. Число Рейнольдса в сверхзвуковом канале ТЛ 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 0,12 - 0,20 %).

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 [8]).

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 [8]).

3 Результаты экспериментов при испытании ТЛ на воде и природном газе

Увеличение энтальпии природного газа, вышедшего из сверхзвукового канала, и суммарная степень падения давления в сверхзвуковом канале ТЛ (π_{Σ}) при проведении испытаний устройства газодинамического энергоразделения, проведенных по схеме, представленной на рисунке 5, приведено в таблице 1.

Таблица 1 - Результаты экспериментальных исследований эффективности работы устройства газодинамического энергоразделения на воде и природном газе (ТЛ с независимым внешним контуром) по данным работы [8]

№	Увеличение энтальпии природного газа, вышедшего из сверхзвукового канала ТЛ, кДж/кг	Суммарная степень падения давления в сверхзвуковом канале ТЛ
1	18,23	15,24
2	16,19	12,38
3	12,59	7,58
4	1,41	2,42
5	18,35	15,55
6	16,47	11,91
7	14,37	9,02
8	1,65	2,69
9	1,48	2,60
10	13,53	7,66
11	15,65	10,72
12	16,45	15,16
13	17,26	14,04
14	13,91	7,13
15	11,01	5,63
16	16,12	15,71
17	14,86	15,00
18	13,88	11,98
19	9,60	7,84
20	1,29	2,63

4 Сравнение экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов

Для проведения теоретических расчетов примем состав природного газа, определенный методом хроматографического анализа и приведенный в таблице 2 (по данным работы [8]). Методика учета влияния капельной жидкости на коэффициент восстановления температуры представлена в работе [12]. Согласно этой методике для

данного состава природного газа влияние конденсации высших углеводородов в сверхзвуковом потоке газа на значение коэффициента восстановления температуры r очень мало и им можно пренебречь.

Таблица 2 - Усредненный состав природного газа по данным работы [8]

№	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

Все эксперименты, выполненные по схеме, представленной на рис. 5 (исследование ТЛ с независимым внешним контуром), можно разделить на 4 серии экспериментов (подробнее см. работу [8]).

Серия 1 - высокое давление газа и большой и средний расход воды – абсолютное давление природного газа от 80,16 бар до 83,79 бар, осредненный по времени расход воды по внешнему контуру от 30,75 л/с до 62,25 л/с (эксперименты номер 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 таблицы 1).

Серия 2 - высокое давление газа и малый расход воды – абсолютное давление природного газа от 82,22 бар до 83,40 бар, осредненный по времени расход воды по внешнему контуру от 16,75 л/с до 19,75 л/с (эксперименты номер 16, 17, 18, 19 и 20 таблицы 1).

Серия 3 - среднее давление газа и средний расход воды – абсолютное давление природного газа от 53,57 бар до 54,85 бар, осредненный по времени расход воды по внешнему контуру от 31,25 л/с до 32,75 л/с (эксперименты номер 9, 10, 11 и 12 таблицы 1).

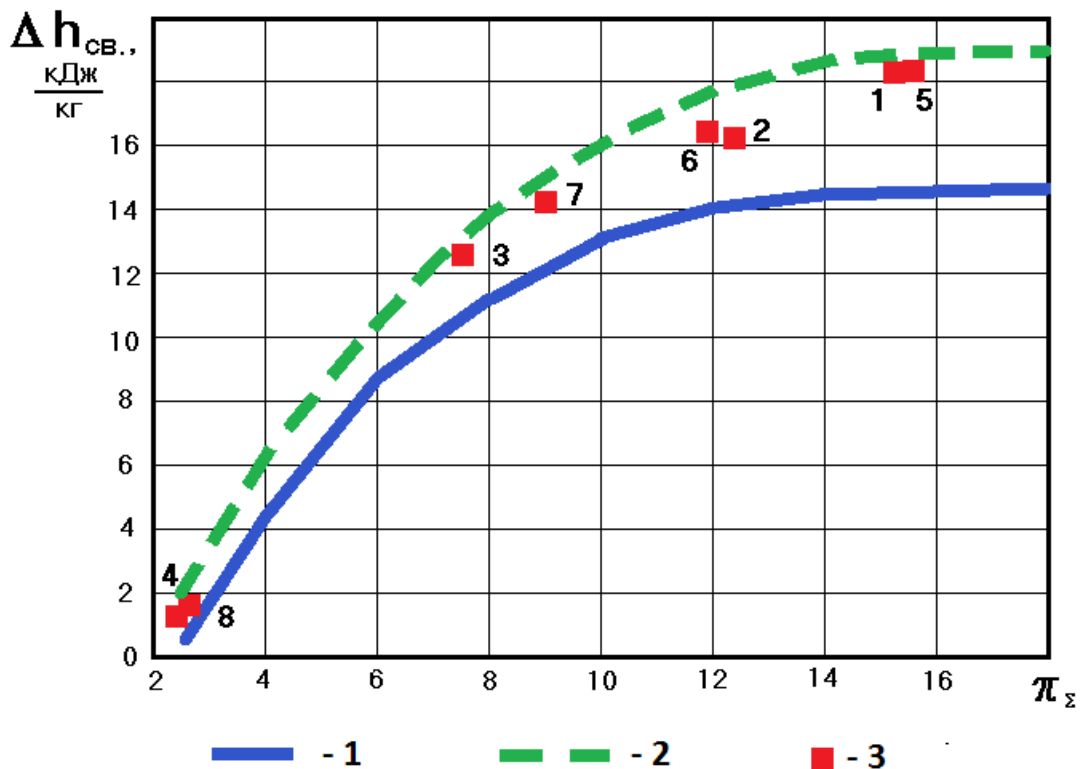
Серия 4 - низкое давление газа и средний расход воды – абсолютное давление природного газа от 27,58 бар до 28,13 бар, осредненный по времени расход воды по внешнему контуру от 32,75 л/с до 33,50 л/с (эксперименты номер 13, 14 и 15 таблицы 1.).

Проведем сравнение экспериментальных данных и данных численных исследований, представленных в работах [8, 9], с расчетом по модифицированной методике, изложенной в работах [5, 6, 7] с учетом интенсификации теплообмена на начальном участке (см. работы [13, 14]) и влияния продольного градиента давления (см. работу [15]) и продольной теплопроводности (см. работу [14]).

Для сравнения экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов построим график увеличения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале в зависимости от суммарной степени падения давления в сверхзвуковом канале.

По аналогии с работами [8, 9] для построения графика увеличения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ в зависимости от суммарной степени падения давления в сверхзвуковом канале (π_{Σ}) примем (вместо отношения массового расхода газа по сверхзвуковому каналу ТЛ к массовому расходу газа по дозвуковому каналу ТЛ) отношение водяных эквивалентов потока природного газа, текущего по сверхзвуковому каналу ТЛ, и среднего по времени потока воды, текущего по независимому контуру ТЛ.

Результаты расчетов, соответствующие 1 серии экспериментов, представлены на рисунке 6. Там же представлены экспериментальные точки 1 серии (эксперименты номер 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 и 8 таблицы 1) и теоретическая кривая, представленная в работе [8].

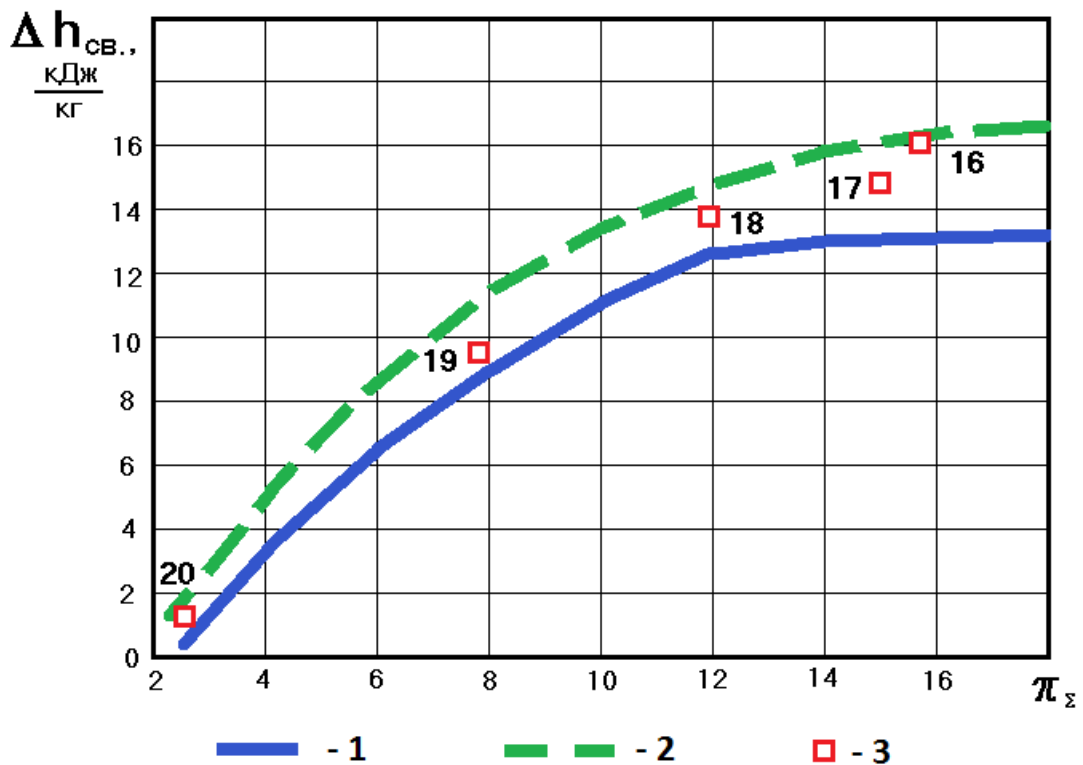


1 – результаты расчета, взятые из работы [8]; 2 – результаты расчета, выполненные по модифицированной методике, 3 – экспериментальные точки серии 1 (высокое давление газа и большой и средний расход воды)

Рисунок 6 - Увеличение энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ с независимым контуром в зависимости от π_{Σ} для 1 серии экспериментов (номера экспериментальных точек приняты по таблице 1)

Для второй серии экспериментов (высокое давление газа и малый расход воды) построим график увеличения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале в зависимости от суммарной степени падения давления в сверхзвуковом канале, представленный на рисунке 7.

Данным значениям теоретических расчетов удовлетворяют эксперименты номер 16, 17, 18, 19 и 20 таблицы 1 и теоретическая кривая, представленная в работе [8] (см. рис. 7).

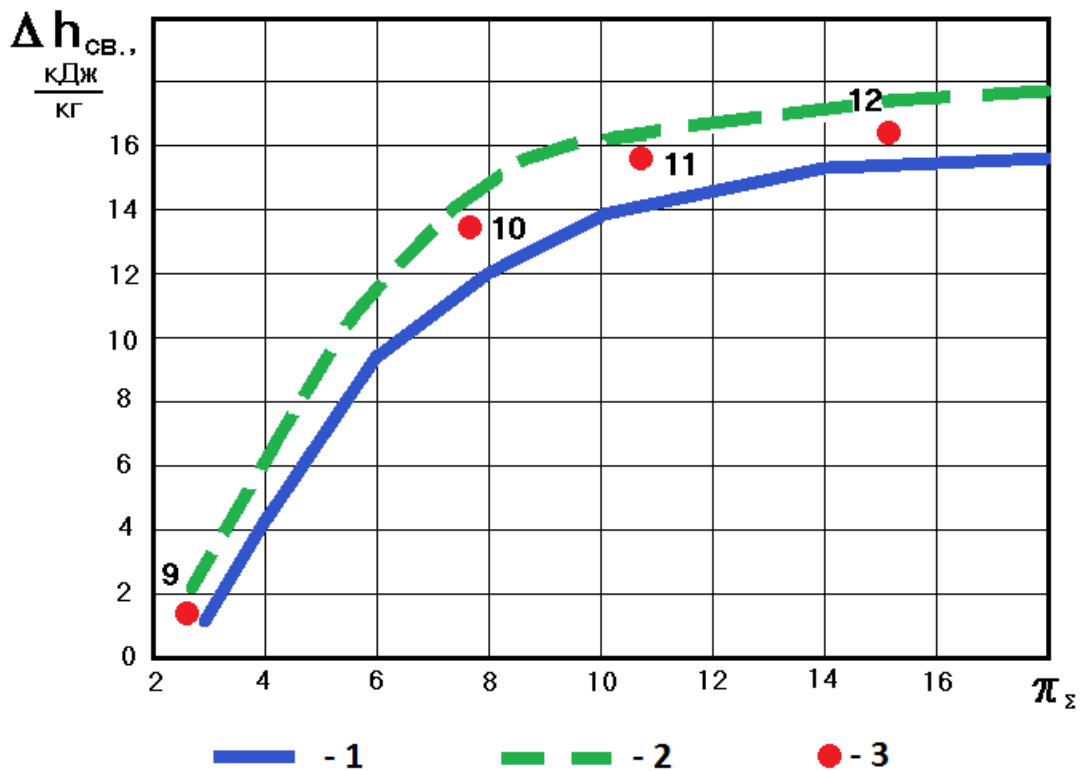


1 – результаты расчета, взятые из работы [8]; 2 – результаты расчета, выполненные по модифицированной методике, 3 – экспериментальные точки серии 2 (высокое давление газа и малый расход воды)

Рисунок 7 - Увеличение энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ с независимым контуром в зависимости от π_{Σ} для 2 серии экспериментов (номера экспериментальных точек приняты по таблице 1)

Для 3 серии экспериментов (среднее давление газа и средний расход воды) построим график увеличения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале в зависимости от суммарной степени падения давления в сверхзвуковом канале, представленный на рисунке 8.

Данным значениям теоретических расчетов удовлетворяют эксперименты номер 9, 10, 11 и 12 таблицы 1 и теоретическая кривая, представленная в работе [8] (см. рис. 8).

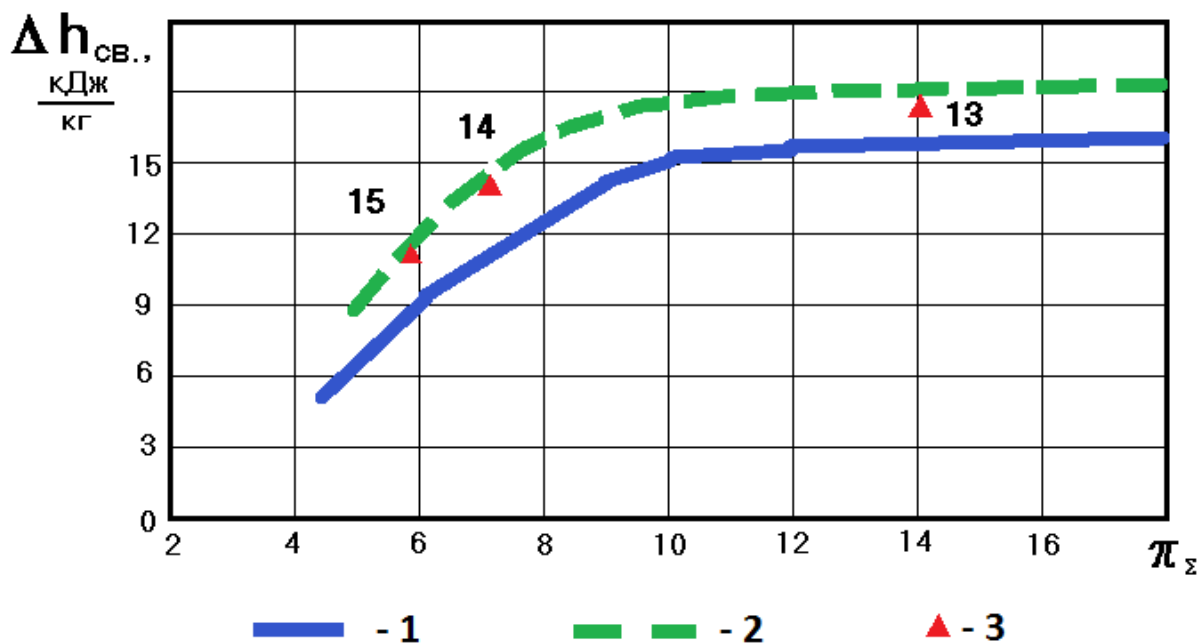


1 – результаты расчета, взятые из работы [8]; 2 – результаты расчета, выполненные по модифицированной методике, 3 – экспериментальные точки серии 3 (среднее давление газа и средний расход воды)

Рисунок 8 - Увеличение энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ с независимым контуром в зависимости от π_{Σ} для 3 серии экспериментов (номера экспериментальных точек приняты по таблице 1)

Для 4 серии экспериментов (низкое давление газа и средний расход воды) построим график увеличения энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале в зависимости от суммарной степени падения давления в сверхзвуковом канале, представленный на рисунке 9.

Данным значениям теоретических расчетов удовлетворяют эксперименты номер 13, 14 и 15 таблицы 1 и теоретическая кривая, представленная в работе [8] (см. рис. 9).



1 – результаты расчета, взятые из работы [8]; 2 – результаты расчета, выполненные по модифицированной методике, 3 – экспериментальные точки серии 4 (низкое давление газа и средний расход воды)

Рисунок 9 - Увеличение энтальпии природного газа в сверхзвуковом канале ТЛ с независимым контуром в зависимости от π_{Σ} для 4 серии экспериментов (номера экспериментальных точек приняты по таблице 1)

Анализ данных, представленных на рисунках 6 – 9 показывает, что результаты численных исследований по методике, представленной в работах [5, 6, 7] (взяты из работы [8] - линия 1 на рис. 6 - 9), дают значения ниже экспериментальных данных на 0,5 – 4 кДж/кг (в среднем на 2 кДж/кг).

При этом в работе [8] отмечено, что в сверхзвуковом канале ТЛ присутствовала система косых скачков уплотнения, которая немного снижала скорость потока и должна была привести к уменьшению количества переданной теплоты (уменьшению роста энтальпии), что противоречит полученным результатам.

Результаты численных исследований, выполненных по модифицированной методике, представленной в работах [5, 6, 7] с учетом интенсификации теплообмена на начальном участке (см. работы [13, 14]) и влияния продольного градиента давления (см. работу [15]) и продольной теплопроводности (см. работу [14]), представлены на рис. 6 - 9 в виде линии 2.

Сравнение результатов двух численных исследований показывает, что модификация методики (учет интенсификации теплообмена и влияния продольного

градиента давления и теплопроводности) привела к тому, что увеличение энтальпии сверхзвукового потока стало больше на 1 – 5 кДж/кг. При этом в диапазоне суммарной степени падения давления в сверхзвуковом канале (π_{Σ}) от 8 до 16 стало больше на 2,5 – 5 кДж/кг.

Сравнение результатов численного исследования при учете влияния продольного градиента давления и теплопроводности с экспериментальными данными, представленными в работе [8], показывает, что по результатам численного исследования увеличение энтальпии сверхзвукового потока больше, чем полученное экспериментально на 0,5 – 2 кДж/кг или равно.

Имеющееся расхождение можно объяснить наличием системы косых скачков уплотнения в сверхзвуковом канале (подробнее см. работы [8, 9]), приводящих к снижению эффективности работы устройства.

5 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.

Кроме того данная методика численного исследования позволила рассчитать процесс теплопередачи в устройстве газодинамического энергоразделения с независимым внешним контуром, т.е. теплоносители текущие по разным контурам могли иметь разные начальные температуры, давления, состав, теплофизические и транспортные свойства.

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 скорости.

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.

Экспериментально показано, что в устройстве газодинамического энергоразделения с независимым внешним контуром за счет возникающего локального дисбаланса распределения температуры восстановления по диаметру сверхзвукового канала возможна организация передачи теплоты от теплоносителя, имеющего более

низкую среднемассовую (среднеинтегральную) температуру к теплоносителю имеющему более высокую среднемассовую (среднеинтегральную) температуру.

Проведенные расчеты показывают, что предложенные на основе экспериментальных данных (см. работу [8]) варианты практической реализации эффекта газодинамической температурной стратификации газа (подробнее см. работы [16, 17, 18, 19, 20]) подтверждаются результатами численных исследований.

Список литературы

1. 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.
2. Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35, № 1. С. 157-159.
3. Леонтьев А.И. Температурная стратификация сверхзвукового газового потока // Доклады Академии Наук. 1997. Т. 354, № 4. С. 475-477.
4. Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Температурная стратификация в сверхзвуковом потоке газа // Известия АН. Энергетика. 2000. № 5. С. 101-113.
5. Бурцев С.А. Исследование температурной стратификации газа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1998. № 2. С. 65-72.
6. Бурцев С.А. Оптимизация геометрии сверхзвукового канала в устройстве для энергоразделения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1999. № 2. С. 48-54.
7. 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.
8. Бурцев С.А. Исследование температурного разделения в потоках сжимаемого газа : дис. ... канд. техн. наук. М., 2001. 124 с.
9. 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.

10. Бурцев С. А. Исследование устройства температурной стратификации при работе на природном газе // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2004. № 9. DOI: [10.7463/0904.0516097](https://doi.org/10.7463/0904.0516097)
11. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 642 с.
12. 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.
13. 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.
14. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
15. 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.
16. 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.
17. Бурцев С.А., Визель Я.М., Леонтьев А.И., Чижиков Ю.В. Способ низкотемпературной сепарации промыслового газа : пат. 2156271 РФ. 2000. Бюл. № 26.
18. Бурцев С.А., Визель Я.М., Леонтьев А.И., Чижиков Ю.В. Холодильная установка : пат. 2156413 РФ. 2000. Бюл. № 26.
19. 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.
20. 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 water and natural gas

5, May 2005

DOI: 10.7463/0505.0529473

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 water and 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 are presented in the article; it was shown that the replacement of heat-transfer material in the external (infrasonic) channel (substitution of natural gas for water – heat-transfer material with greater heat transition coefficient) doesn't change the efficiency of heat passage from the heat transfer agent flowing through the internal supersonic channel to the heat transfer agent flowing through the external infrasonic channel. Updated method of calculating this class of devices was proposed; 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. 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.

2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Leont'ev A.I., Burtsev S.A., Vizel' 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.
10. Burtsev S. A. Issledovanie ustroistva temperaturnoi stratifikatsii pri rabote na prirodnom gaze [Investigation of the operation of temperature lamination device working on the natural gas]. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU], 2004, no. 9. DOI: [10.7463/0904.0516097](https://doi.org/10.7463/0904.0516097)
11. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkosti* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka, 1972. 642 p.
12. 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.

13. Leont'ev A.I., Mironov B.P., Fafurin A.V. Dlina nachal'nogo uchastka pri turbulentnom techenii gaza v tsilindricheskoi trube v usloviakh 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.

14. Kutateladze S.S., Leont'ev A.I. *Teplomassoobmen i trenie v turbulentnom pogranichnom sloe* [Heat-mass-exchange and friction in a turbulent boundary layer]. Moscow, Energoatomizdat, 1985. 320 p.

15. 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.

16. Burtsev S.A., Vizeľ 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.

17. Burtsev S.A., Vizeľ 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.

18. Burtsev S.A., Vizeľ Ia.M., Leont'ev A.I., Chizhikov Iu.V. *Kholodil'naia ustanovka* [Refrigeration unit]. Patent RF, no. 2156413. 2000.

19. Burtsev S.A., Vizeľ 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.

20. 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 21 century]. Moscow, UNPTs "Energomash" Publ., 2000. 136 p.