

УДК 536.24: 552.578

DOI 10.18698/0536-1044-2016-8-19-28

Анализ путей повышения эффективности трубы Леонтьева*

С.А. Бурцев

МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1;
Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, 119192, Москва, Российская Федерация, Мичуринский пр-кт, д. 1

Analyzing Ways to Improve the Efficiency of the Leontiev Tube

S.A. Burtsev

BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1;
Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, 119192, Moscow, Russian Federation, Michurinsky ave., Bldg. 1



e-mail: burtsev@bmstu.ru

i Приведены принципы работы устройства газодинамического энергоразделения газа (трубы Леонтьева). Выполнен анализ возможных путей повышения эффективности его работы. Показано, что для газов с числом Прандтля порядка 0,7 увеличение количества переданной теплоты возможно за счет использования: вихревых механизмов интенсификации теплообмена и влияния сконденсированной фазы на интенсификацию теплообмена. Модернизирована методика расчета данного класса устройств, позволившая учесть влияние сконденсированной фазы на интенсификацию теплообмена. При этом учитывается не только теплота фазовых переходов в процессе конденсации, но и дополнительное влияние на коэффициент восстановления температуры на стенке сверхзвукового канала слабых скачков уплотнения, вызванных течением сконденсированной фазы. По данным экспериментальных исследований на природном газе выполнена верификация модернизированной методики расчета. В результате численных исследований установлено, что при наличии конденсирующихся компонентов в сверхзвуковом потоке рабочего тела эффективность устройства газодинамического энергоразделения может быть повышена в 1,3–1,7 раза без значительного роста потерь полного давления в сверхзвуковом канале устройства энергоразделения.

Ключевые слова: энергоразделение, число Прандтля, коэффициент восстановления температуры, труба Леонтьева, интенсификация теплообмена, природный газ, конденсация.

i The working principles of a gas-dynamic energy separation device known as the Leontiev tube are examined. Possible ways to improve the efficiency of the device are analyzed. It is shown that for gases with the values of the Prandtl number of around 0.7, it is possible to increase the amount of transferred heat by utilizing vortex heat transfer enhancement mechanisms and by using the influence of the condensed phase on the heat-transfer intensification. The existing methods for calculating this class of devices were refined to account for the condensed phase influence on the heat-transfer intensification. The refined methods take into account not only the heat of the phase change during condensation but also the effect of Mach shocks generated by the condensed phase flow on the temperature recovery factor on the wall of the supersonic flow channel. The calculation methods were verified against the experimental results obtained with natural gas. The results of numerical

* Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант РНФ 14-19-00699).

calculations show that in the presence of condensable components in the working gas supersonic flow, it is possible to increase the efficiency of the gas-dynamic energy separation device by 1.3–1.7 times without a significant rise of total pressure losses in the supersonic flow channel of the energy separation device.

Keywords: energy separation, Prandtl number, temperature recovery factor, Leontiev tube, heat transfer intensification, natural gas, condensation.

В работе [1] А.И. Леонтьевым предложен способ энергоразделения и устройство для его реализации, получившее название «труба Леонтьева» (далее ТЛ). В работах [2, 3] выполнена предельная оценка эффективности данного способа энергоразделения. В основе энергоразделения лежит известный факт, что температура восстановления на стенке, обтекаемой потоком сжимаемого газа, в общем случае отличается от температуры торможения потока [4] и для газа с постоянной теплоемкостью определяется выражением

$$T_W^* = T + r \frac{v_0^2}{2c_p} = T^* \left[1 - (1-r) \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right],$$

где T — статическая (газодинамическая) температура; v_0 — скорость потока газа; c_p — теплоемкость газа при постоянном давлении; T^* — температура заторможенного потока (полная температура); k — показатель адиабаты газа; λ — приведенная скорость, $\lambda = v_0/a_{кр}$ ($a_{кр}$ — критическая скорость); r — коэффициент восстановления температуры [5], показывающий долю кинетической энергии, которая при торможении перешла в теплоту на стенке. Его значение определяется различными факторами [6] и для большинства газов лежит в диапазоне 0,7...0,92, но в некоторых случаях может значительно отличаться от этих значений [7–9].

Цель работы — анализ возможных путей повышения эффективности газодинамического энергоразделения, корректировка расчетной методики для учета влияния конденсации части рабочего тела, текущего по сверхзвуковому каналу ТЛ, и выполнение предельных оценок эффективности при работе на магистральном природном газе.

В работе [10] предложена методика расчета устройства энергоразделения на базе одномерных уравнений газовой динамики. Верификация данной методики проведена по экспериментальным исследованиям на природном газе [11], воздухе [12], смесях инертных газов [13] и по результатам численных исследований других авторов [14–16]. В дальнейшем эта методика была модифицирована [17].

Анализ, выполненный в работе [18], показал, что одним из путей повышения эффективности энергоразделения является использование пористой проницаемой стенки между потоками газа в ТЛ. Численные расчеты, выполненные в работах [19–21], подтвердили эффективность данного способа. Однако проведенные на воздухе [22] и инертных газах [23] экспериментальные исследования, принципиально подтвердив этот вывод, показали, что организация вдува по требуемому закону распределения сильно усложняет конструкцию, снижая эффективность энергоразделения.

В работе [24] предложены (позже подтвердившиеся экспериментально и численно) способы повышения эффективности энергоразделения за счет влияния на коэффициенты восстановления температуры и теплоотдачи рельефа поверхности в виде различных лунок [25, 26], двухфазности рабочего тела [27] и их совместного влияния [28].

В работе [29] для интенсификации теплообмена в ТЛ предложено использовать тепловые трубы. Однако если выполненные численные расчеты показали эффективность этого подхода [30, 31], то экспериментального подтверждения данный подход не получил. Аналогично пока экспериментально не подтверждена эффективность комбинации вихревой трубы и ТЛ [32].

Постановка задачи и расчетная модель. Рассмотрим принципиальную схему ТЛ, аналогичную представленной в работе [17] (рис. 1). Изначально будем предполагать, что в общем случае на входы сверхзвукового (центрального) 1 и дозвукового (кольцевого) 2 каналов могут поступать различные рабочие тела, имеющие разные составы, теплофизические свойства, давление и температуру торможения.

Для проведения анализа примем следующие допущения:

- устройство газодинамического энергоразделения имеет внешнюю теплоизоляцию;
- на участках сверхзвукового сопла Лаваля 3 и сверхзвукового диффузора 7 отсутствует теплообмен;

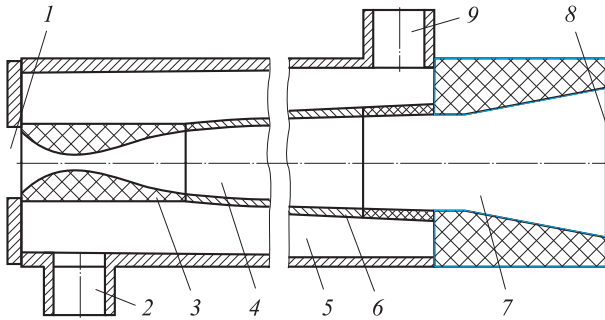


Рис. 1. Принципиальная схема устройства газодинамического энергоразделения газа (ТЛ): 1, 2 — вход в СК и ДК соответственно; 3 — сверхзвуковое сопло Лавалю; 4, 5 — СК и ДК соответственно; 6 — рабочий участок; 7 — сверхзвуковой диффузор; 8, 9 — выход из СК и ДК соответственно

- скачок конденсации находится в пределах участка 3;
- толщина стенки h , разделяющей сверхзвуковой (СК) и дозвуковой каналы (ДК), постоянна;
- теплообмен на всей длине рабочего участка 6 и рассматривается в осесимметричной постановке задачи;
- скорость потока газа вдоль ДК постоянна.

По оценке работы [18] в устройстве газодинамического энергоразделения при давлении торможения более 3 МПа значение коэффициента теплопередачи в основном определяется значением коэффициента теплоотдачи со стороны сверхзвукового потока газа (СПГ). Для интенсификации процессов теплообмена со стороны СПГ проанализируем влияние наличия второй (сконденсированной) фазы на процесс теплоотдачи со стороны СПГ. Для анализа примем, что по устройству газодинамического энергоразделения (ТЛ) течет смесь предельных углеводородов и азота (состав природного газа соответствует данным таблицы, а теплофизические свойства — данным работы [33]). Для корреляции с реальным составом природного газа будем считать, что изопентан и высшие углеводороды

Состав природного газа, принятый для расчета

Компонент	Объемная доля, %	Примечание
CH ₄	95,00	-
C ₂ H ₆	2,30	-
C ₃ H ₈	1,18	-
<i>i</i> -C ₄ H ₁₀	0,25	Изобутан
<i>n</i> -C ₄ H ₁₀	0,17	Нормальный бутан
<i>n</i> -C ₅ H ₁₂	0,10	Нормальный пентан
N ₂	1,00	-

приведены к нормальному пентану, а все неконденсирующиеся примеси — условно к N₂.

Для обозначения параметров сверхзвукового и дозвукового потоков газа (ДПГ) используем индексы «1» и «2» соответственно. Нижний индекс «н» относится к начальному сечению (параметры на входе в рабочий участок ТЛ). Продольную координату x_1 СК будем отсчитывать от начала рабочего участка 6.

По аналогии с [10] примем, что работа сил трения в СК конической формы может быть рассчитана по формуле

$$dL_{тр1} = \xi_{10} \sqrt{1 - \frac{k_1 - 1}{k_1 + 1} \lambda_1^2} \frac{v_1^2}{2} dx_1,$$

где ξ_{10} — коэффициент сопротивления для СК при стандартных условиях; k_1 — текущее значение показателя адиабаты рабочего тела для СПГ; v_1 — скорость СПГ; $\lambda_1 = v_1/a_{кр1}$ — приведенная скорость СПГ ($a_{кр1}$ — текущее значение критической скорости в СПГ); $x_1 = x_1/D_{1н}$ — относительная продольная координата СК, $D_{1н}$ — начальный диаметр СК).

По аналогии с работой [10] примем, что количество теплоты, подведенной к СПГ в ТЛ, определяется по формуле

$$dq_1 = \frac{k_1 + 1}{k_1 - 1} \frac{a_{кр1}^2}{2} \frac{d\theta_1^*}{\theta_1^*},$$

где θ_1^* — безразмерная температура газа, текущего в СК, $\theta_1^* = T_1^*/T_{1н}^*$ (T_1^* — температура торможения газа, текущего в СК; $T_{1н}^*$ — температура торможения газа на входе в СК).

По аналогии с работой [17] запишем через приведенную скорость и безразмерную температуру уравнение, связывающее изменение скорости СПГ при воздействиях — геометрическом, тепловом и трением:

$$\left(\frac{\lambda_1^2 - 1}{\lambda_1^2} \right) \frac{d\lambda_1}{\lambda_1} + \left(\frac{\lambda_1^2 + 1}{\lambda_1^2} \right) \frac{d\theta_1^*}{2\theta_1^*} = \left(\frac{1}{\lambda_1^2} - \frac{k_1 - 1}{k_1 + 1} \right) \frac{dF_1}{F_1} - \xi_{10} \sqrt{1 - \frac{k_1 - 1}{k_1 + 1} \lambda_1^2} \frac{k_1}{k_1 + 1} \frac{D_{1н}}{D_1} d\bar{x}_1, \quad (1)$$

где $F_1 = \pi D_1^2/4$ — текущая площадь поперечного сечения СК (D_1 — текущий диаметр СК).

Приняв, что толщина стенки, разделяющей СК и ДК, постоянна и равна h , запишем уравнение, связывающее изменение скорости ДПГ

при воздействиях — геометрическом, тепловом и трением:

$$\left(\frac{\lambda_2^2 - 1}{\lambda_2^2}\right) \frac{d\lambda_2}{\lambda_2} + \left(\frac{\lambda_2^2 + 1}{\lambda_2^2}\right) \frac{d\theta_2^*}{2\theta_2^*} = \left(\frac{1}{\lambda_2^2} - \frac{k_2 - 1}{k_2 + 1}\right) \frac{dF_2}{F_2} - \xi_{20} \sqrt{1 - \frac{k_2 - 1}{k_2 + 1} \lambda_2^2} \frac{k_2}{k_2 + 1} \frac{D_{1н}(D_1 + 2h)}{D_2^2 - (D_1 + 2h)^2} dx_1, \quad (2)$$

где параметры с индексом «2» аналогичны параметрам, входящим в состав формул для СПГ, но записаны для ДПГ.

По аналогии с работой [10] уравнение теплового баланса для СПГ запишем в виде

$$\frac{dh_1}{\frac{K}{\alpha_1} h_{1н} \left\{ (W + 1) - \theta_1^* \left[W + 1 - (1 - r) \frac{k_1 - 1}{k_1 + 1} \lambda_1^2 \right] \right\}} = \frac{D_{1н} \xi_{10}}{D_1} \sqrt{1 - \frac{k_1 - 1}{k_1 + 1} \lambda_1^2} f(\text{Pr}, \lambda) dx_1, \quad (3)$$

где h_1 , $h_{1н}$ — текущая и начальная энтальпии газа, проходящего по СК; W — отношение водяных эквивалентов СПГ и ДПГ, $W = (c_{p1}G_1)/(c_{p2}G_2)$ (G_1 , G_2 — массовые расходы теплоносителя в СПГ и ДПГ); $f(\text{Pr}, \lambda)$ — поправка на число Прандтля и наличие слабых скачков уплотнения [34]; K/α_1 — отношение коэффициента теплопередачи от ДПГ к СПГ к коэффициенту теплоотдачи со стороны СПГ. По аналогии с работой [24] это отношение можно представить в виде

$$\frac{K}{\alpha_1} = \left\{ 1 + W^{0,8} c_p^{-0,2} \frac{D_2^2 - (D_1 + 2h)^2}{D_1^{1,8} (D_1 + 2h)^{0,2}} \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{0,15} \times \left[\frac{D_1}{b(D_1 + h)} + \frac{D_1}{D_1 + 2h} \right] \right\}^{-1},$$

где $\bar{c}_p = c_{p1}/c_{p2}$ — отношение теплоемкостей теплоносителей, текущих по СПГ и ДПГ; T_1 , T_2 — текущие значения термодинамических температур СПГ и ДПГ в ТЛ; b — поправочный коэффициент, учитывающий теплопроводность стенки [24].

Верификация модифицированной методики.

Из баланса энтальпий (по параметрам заторможенного потока), пренебрегая продольной теплопроводностью в газе вдоль стенки, можно записать следующее уравнение, связывающее изменение энтальпий СПГ и ДПГ в ТЛ:

$$dh_2 = \frac{W}{c_p} dh_1. \quad (4)$$

По данным работы [33] создадим процедуру для определения энтальпии по известным значениям температуры, давления и состава рабочих тел, текущих по каналам ТЛ:

$$h = f(T, p, \text{состав}). \quad (5)$$

На основе анализа данных работы [35] влиянием нагрева от стенки на структуру пограничного слоя можно пренебречь.

Влияние второй фазы на параметры потока оценим по данным работы [36], а испарение второй (сконденсированной) фазы по длине рабочего участка — по данным [37]. Известно, что такой подход может быть корректен, если происходит конденсация не более 5...7 % объемного расхода рабочего тела.

Используя выражения (1)–(5) для модернизации системы уравнений, представленных в работе [10], получим модифицированную методику для расчета ТЛ. Для ее верификации используем экспериментальные данные, представленные в работе [11].

Отношение водяных эквивалентов в СК и ДК примем равным $W = 0,95$, а состав природного газа, геометрию экспериментальной уста-

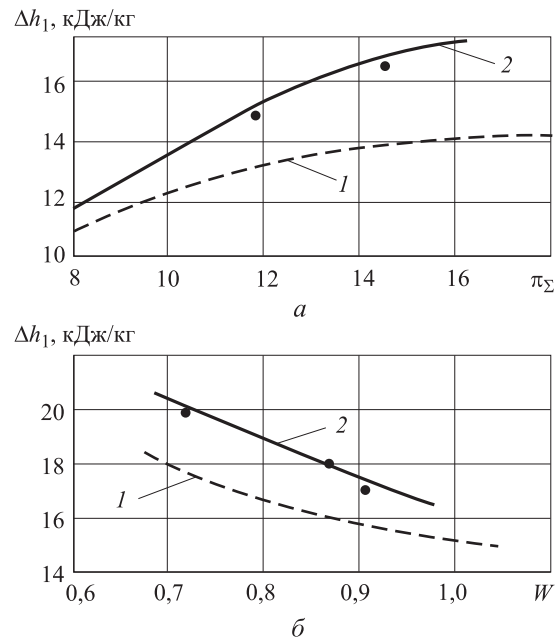


Рис. 2. Зависимости энтальпии СПГ Δh_1 от суммарной степени понижения давления π_Σ (а) и относительного водяного эквивалента W (б): 1 — расчет по методике, приведенной в работе [10]; 2 — расчет по модифицированной методике, ● — экспериментальные точки по данным работы [11]

новки и исходные параметры на входе в установку — по данным работы [11]. На рис. 2, а приведена зависимость энтальпии СПГ от суммарной степени понижения давления в СК π_{Σ} при данных условиях, а на рис. 2, б — от относительного водяного эквивалента (отношения водяных эквивалентов в СК и ДК) при суммарной степени понижения давления в СК $\pi_{\Sigma} = 14,4$.

Анализ данных, представленных на рис. 2, показал, что модифицированная методика, учитывающая влияние конденсации высших углеводородов (которое при данном составе составляло менее 0,3 кДж/кг) и слабых скачков уплотнения, значительно точнее описывает результаты экспериментальных исследований.

Анализ влияния конденсации на эффективность энергоразделения. Проведем две серии расчетов для устройства, аналогичного представленному в работе [11]. При этом примем, что стенка, разделяющая ДПГ и СПГ, имеет толщину 3 мм и выполнена из стали 30ХГСА (коэффициент теплопроводности составляет 38 Вт/(м °С)).

Примем, что для первой серии расчетов газ представляет собой 100%-ный CH_4 (отсутствие конденсации при условиях эксперимента), а для второй серии — смесь предельных углеводородов и азота (по данным таблицы).

Поскольку перепад давлений в реальном устройстве определяется в соответствии с условиями дросселирования, для проведения расчетов примем перепад давлений, соответствующий снижению давления от 5,0 до 0,6 МПа и позволяющий реализовать бесподогревное редуцирование магистрального природного газа на газораспределительных станциях [38].

В устройствах, аналогичных описанному в работе [38], интерес представляет охлаждаемый поток природного газа, так как в дальнейшем он поступает в систему сжижения, и важно правильно оценить его предварительное охлаждение.

Приняв неоговоренные выше геометрические размеры устройства и параметры потока по данным работы [11], выполним исследования влияния относительного водяного эквивалента на уменьшение энтальпии ДПГ.

На рис. 3 представлена зависимость энтальпии природного газа, проходящего по ДК, от относительного водяного эквивалента. Для получения сжиженного природного газа, отвечающего требованиям, предъявляемым к газомо-

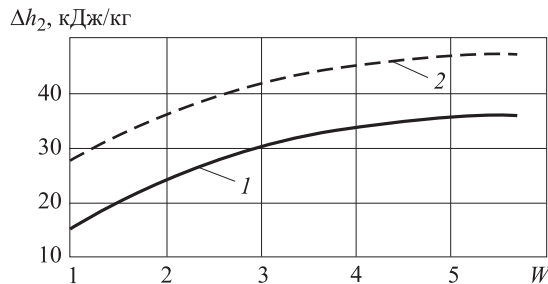


Рис. 3. Зависимость энтальпии ДПГ Δh_2 от относительного водяного эквивалента W : 1 — расчет по модифицированной методике для метана (без конденсации); 2 — расчет по модифицированной методике для природного газа (см. таблицу)

торному топливу, при предварительном охлаждении необходимо обеспечить снижение энтальпии на 40 кДж/кг [39].

Из анализа представленных результатов расчета следует, что при принятых исходных данных указанное снижение энтальпии реализуется только при учете сжижения высших углеводородов и относительном водяном эквиваленте $W \geq 3$. При этом из рис. 3 видно, что в области малых значений относительного водяного эквивалента учет влияния конденсации приводит к росту охлаждения ДПГ в 1,7 раза (при $W = 1$), а в области больших значений — до 1,3 раза (при $W = 5$).

При увеличении доли конденсирующихся компонентов происходит дополнительное увеличение охлаждения природного газа, текущего по ДК. Однако при повышении доли конденсирующихся компонентов до 7% и более резко возрастает погрешность расчета, так как это было одним из допущений при создании модифицированной методики.

Выводы

1. Выполнен анализ возможных путей повышения эффективности устройства газодинамического энергоразделения газа (ТЛ).

2. Показано, что для большинства газов и их смесей увеличения энергоразделения можно достигнуть за счет снижения коэффициента восстановления температуры со стороны сверхзвукового потока. Этого можно добиться путем организации вихревых структур на поверхности стенки (нанесение поверхностного рельефа в виде лунок) или за счет конденсации части протекающего газа.

3. Модернизирована существующая методика расчета данного класса устройств, позво-

лившая учесть влияние сконденсированной фазы на интенсификацию теплообмена, и выполнена ее верификация по результатам экспериментальных исследований.

4. Показано, что при наличии конденсирующихся компонентов в СПГ эффективность устройства газодинамического энергоразделения может быть повышена в 1,3–1,7 раза.

Литература

- [1] Леонтьев А.И. *Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (Труба Леонтьева)*. Пат. 2106581 РФ. МПК F25B9/02, заявл. 23.05.1996, опубл. 10.03.1998, бюл. № 7. 5 с.
- [2] Леонтьев А.И. Газодинамический метод энергоразделения газовых потоков. *ТВТ*, 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. Исследование влияния диссипативных эффектов на температурную стратификацию в потоках газа (обзор). *ТВТ*, 2014, т. 52, № 2, с. 310–322. doi: 10.7868/S0040364413060069.
- [5] Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. *Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое*. Москва, Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
- [6] Бурцев С.А. Анализ влияния различных факторов на значение коэффициента восстановления температуры на поверхности тел при обтекании потоком воздуха. Обзор. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2004, № 11, 28 с. URL:<http://technomag.bmstu.ru/doc/551021.html>.
- [7] Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Якубенко А.Е. Коэффициент восстановления в сверхзвуковом потоке газа с малым числом Прандтля. *ТВТ*, 2006, т. 44, № 2, с. 238–245.
- [8] Здитовец А.Г., Титов А.А. Влияние формы поверхности теплоизолированного стержня, омываемого сверхзвуковым потоком, на коэффициент восстановления температуры. *Известия РАН. Энергетика*, 2007, № 2, с. 111–117.
- [9] Бурцев С.А., Киселёв Н.А., Васильев В.К., Титов А.А. Экспериментальное исследование характеристик поверхностей, покрытых регулярным рельефом. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2013, № 1, с. 263–290. doi: 10.7463/0113.0532996.
- [10] Бурцев С.А. Исследование температурной стратификации газа. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 1998, № 2, с. 65–72.
- [11] 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.
- [12] Здитовец А.Г., Титов А.А. Экспериментальное исследование газодинамического метода безмашинного энергоразделения воздушных потоков. *Тепловые процессы в технике*, 2013, № 9, с. 391–397.
- [13] Виноградов Ю.А., Ермолаев И.К., Здитовец А.Г., Леонтьев А.И. Измерение равновесной температуры стенки сверхзвукового сопла при течении смеси газов с низким значением числа Прандтля. *Известия РАН. Энергетика*, 2005, № 4, с. 128–133.
- [14] Волчков Э.П., Макаров М.С. Газодинамическая температурная стратификация в сверхзвуковом потоке. *Известия РАН. Энергетика*, 2006, № 2, с. 19–31.
- [15] Ковальногов Н.Н., Федоров Р.В. Численный анализ коэффициентов восстановления и теплоотдачи в высокоскоростном потоке. *Известия вузов. Авиационная техника*, 2007, № 3, с. 54–58.
- [16] Макаров М.С., Макарова С.Н. Эффективность энергоразделения при течении сжимаемого газа в плоском канале. *Теплофизика и аэромеханика*, 2013, т. 20, № 6, с. 777–787.
- [17] Бурцев С.А. Исследование путей повышения эффективности газодинамического энергоразделения. *ТВТ*, 2014, т. 52, № 1, с. 14–21. doi: 10.7868/S0040364414010062.
- [18] Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Температурная стратификация в сверхзвуковом потоке газа. *Известия РАН. Энергетика*, 2000, № 5, с. 101–113.
- [19] Leontiev A.I., Lushchik V.G., Yakubenko A.E. A heat-insulated permeable wall with suction in a compressible gas flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 52, is. 17–18, pp. 4001–4007.

- [20] Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Якубенко А.Е. Особенности теплообмена в области газовой завесы при вдуве инородного газа. *Известия РАН. МЖГ*, 2010, № 4, с. 52–59.
- [21] Макарова М.С. Оптимизация температуры проницаемой стенки при вдуве инородного газа. *Тепловые процессы в технике*, 2012, № 7, с. 291–297.
- [22] Виноградов Ю.А., Здитовец А.Г., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование температурной стратификации воздушного потока, протекающего через сверхзвуковой канал, с центральным телом в виде пористой проницаемой трубки. *Известия РАН. МЖГ*, 2013, № 5, с. 134–145.
- [23] Здитовец А.Г., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М., Титов А.А., Медвецкая Н.В. Экспериментальное исследование особенностей теплообмена при вдуве гелия через проницаемую поверхность в сверхзвуковой поток аргона. *Тепловые процессы в технике*, 2012, № 6, с. 253–260.
- [24] Бурцев С.А. *Исследование температурного разделения в потоках сжимаемого газа*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2001. 124 с.
- [25] Бурцев С.А., Киселёв Н.А., Леонтьев А.И. Особенности исследования теплогидравлических характеристик рельефных поверхностей. *ТВТ*, 2014, т. 52, № 6, с. 895–898. doi: 10.7868/S0040364414060052.
- [26] Киселев Н.А., Бурцев С.А., Стронгин М.М. Методика определения коэффициентов теплоотдачи поверхностей с регулярным рельефом. *Метрология*, 2015, № 3, с. 34–45.
- [27] Ковальногов Н.Н., Магазинник Л.М. Численный анализ коэффициентов восстановления температуры и теплоотдачи в турбулентном дисперсном потоке. *Известия вузов. Авиационная техника*, 2008, № 2, с. 32–36.
- [28] Вараксин А.Ю., Протасов М.В., Иванов Т.Ф., Поляков А.Ф. Экспериментальное исследование поведения твердых частиц при их движении в гладкой и формованной лунками трубах. *ТВТ*, 2007, т. 45, № 2, с. 254–260.
- [29] Цынаева А.А., Цынаева Е.А., Ковальногов Н.Н. О возможностях повышения эффективности работы сверхзвуковой трубы температурной стратификации при использовании тепловых труб. *Тепловые процессы в технике*, 2011, № 8, с. 380–384.
- [30] Цынаева А.А., Цынаева Е.А., Школин Е.В. Исследование методов интенсификации теплообмена в трубе температурной стратификации. *Известия вузов. Авиационная техника*, 2013, № 4, с. 44–46.
- [31] Цынаева А.А., Цынаева Е.А., Никитин М.Н. Интенсификация теплообмена в энергетических устройствах на основе газодинамической температурной стратификации с помощью тепловых труб. *Промышленная энергетика*, 2014, № 12, с. 36–39.
- [32] Леонтьев А.И., Бурцев С.А. Устройство вихревого газодинамического энергоразделения. *Доклады Академии наук*, 2015, т. 464, № 6, с. 679–681. doi: 10.7868/S0869565215300106.
- [33] Варгафтик Н.Б. *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*. Москва, Наука, 1972. 720 с.
- [34] Попович С.С., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование возможности интенсификации теплообмена в устройстве безмашинного энергоразделения потоков. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королева*, 2015, т. 14, № 2, с. 159–169.
- [35] Вараксин А.Ю., Ромаш М.Э., Копейцев В.Н., Горбачев М.А. Метод воздействия на свободные нестационарные воздушные вихри. *ТВТ*, 2012, т. 50, № 4, с. 533–537. doi: 10.1134/S0018151X12040219.
- [36] Вараксин А.Ю. Кластеризация частиц в турбулентных и вихревых двухфазных потоках. *ТВТ*, 2014, т. 52, № 5, с. 777–796. doi: 10.7868/S0040364414050214.
- [37] Терехов В.И., Пахомов М.А., Чичиндаев А.В. Влияние испарения жидких капель на распределение параметров в двухкомпонентном ламинарном потоке. *Прикладная механика и техническая физика*, 2000, т. 41, № 6, с. 68–77.
- [38] 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. МПК F17D1/04, F25B9/02, заявл. 18.06.1999, опубл. 20.01.2001, бюл. № 2. 6 с.
- [39] Леонтьев А.И., Пилюгин Н.Н., Полежаев Ю.В., Поляев В.М., ред. *Научные основы технологий XXI века*. Москва, УНПЦ «Энергомаш», 2000. 135 с.

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. 5 p.
- [2] Leont'ev A.I. Gas-dynamic method of energy separation of gas flows. *High Temperature*, 1997, vol. 35, is. 1, pp. 155–157.
- [3] Leont'ev A.I. Temperature stratification of supersonic gas flow. *Doklady Physics*, 1997, vol. 42, is. 6, pp. 309–311.
- [4] Burtsev S.A., Leontiev A.I. Study of the influence of dissipative effects on the temperature stratification in gas flows (Review). *High Temperature*, 2014, vol. 52, is. 2, pp. 297–307. doi: 10.1134/S0018151X13060060.
- [5] Kutateladze S.S., Leont'ev A.I. *Teplomassoobmen i trenie v turbulentnom pograničnom sloe* [Heat-mass-exchange and friction in a turbulent boundary layer]. Moscow, Energoatomizdat publ., 1985. 320 p.
- [6] Burtsev S.A. Analiz vliianiia razlichnykh faktorov na znachenie koeffitsienta vostanovleniia temperatury na poverkhnosti tel pri obtekanii potokom vozdukha. Obzor [Analysis of influence of different factors on the value of the temperature recovery factor at object surfaces in case of an airflow. Review]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2004, no. 11. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/551021.html>.
- [7] Leontiev A.I., Lushchik V.G., Yakubenko A.E. The recovery factor in a supersonic flow of gas with a low Prandtl number. *High Temperature*, 2006, vol. 44, is. 2, pp. 234–242. doi: 10.1007/s10740-006-0029-8.
- [8] Zditovets A.G., Titov A.A. Vliianie formy poverkhnosti teploizolirovannogo sterzhnia, omyvaemogo sverkhzvukovym potokom, na koeffitsient vosstanovleniia temperatury [The influence of heat insulated rod surface shape in the supersonic flow on the temperature recovery factor]. *Izvestiia RAN. Energetika* [Izvestiya RAN. Energetics]. 2007, no. 2, pp. 111–117.
- [9] Burtsev S. A., Vasil'ev V. K., Vinogradov Iu. A., Kiselev N. A., Titov A. A. Eksperimental'noe issledovanie kharakteristik poverkhnostei, pokrytykh reguliarnym rel'efom [Experimental study of parameters of surfaces coated with regular relief]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman MSTU]. 2013, no. 1, pp. 263–290. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/532996.html>. doi: 10.7463/0113.0532996.
- [10] Burtsev S.A. Issledovanie temperaturnoi stratifikatsii gaza [Investigation of the temperature stratification of gas]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering]. 1998, no. 2, pp. 65–72.
- [11] Leont'ev A.I., Burtsev S.A., Vizel' Ia.M., Chizhikov Iu.V. Eksperimental'noe issledovanie gazodinamicheskoi temperaturnoi stratifikatsii prirodnogo gaza [Experimental study of gas-dynamic temperature stratification of natural gas]. *Gazovaia promyshlennost'* [GAS Industry of Russia]. 2002, is. 11, pp. 72–76.
- [12] Zditovets A.G., Titov A.A. Eksperimental'noe issledovanie gazodinamicheskogo metoda bezmashinnogo energorazdeleniia vozdukhnykh potokov [Experimental Study of a Gas-Dynamic Method for an Air Stream Energy Separation]. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering]. 2013, no. 9, pp. 391–397.
- [13] Vinogradov Iu.A., Ermolaev I.K., Zditovets A.G., Leont'ev A.I. Izmerenie ravnovesnoi temperatury stenki sverkhzvukovogo sopla pri techenii smesi gazov s nizkim znacheniem chisla Prandtlia [Measurement of an equilibrium temperature of a supersonic nozzle wall at current of a gases mixture with low Prandtl number]. *Izvestiia RAN. Energetika* [Izvestiya RAN. Energetics]. 2005, no. 4, pp. 128–133.
- [14] Volchkov E.P., Makarov M.S. Gazodinamicheskaiia temperaturnaia stratifikatsiia v sverkhzvukovom potoke [Gas dynamic temperature stratification in a supersonic flow]. *Izvestiia RAN. Energetika* [Izvestiya RAN. Energetics]. 2006, no. 2, pp. 19–31.
- [15] Koval'nogov N.N., Fedorov R.V. Numerical analysis of the coefficients of temperature restitution and heat transfer in high-speed flows. *Russian Aeronautics*, 2007, vol. 50, no. 3, pp. 309–316.

- [16] Makarov M.S., Makarova S.N. Efficiency of energy separation at compressible gas flow in a planar duct. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2013, vol. 20, no. 6, pp. 757–767.
- [17] Burtsev S.A. Exploring ways to improve efficiency of gasdynamic energy separation. *High Temperature*, 2014, vol. 52, is. 1, pp. 12–18. doi: 10.1134/S0018151X14010064.
- [18] Burtsev S.A., Leont'ev A.I. Temperaturnaia stratifikatsiia v sverkhzvukovom potoke gaza [Temperature stratification in supersonic gas flow]. *Izvestiia RAN. Energetika* [Izvestiya RAN. Energetics]. 2000, no. 5, pp. 101–113.
- [19] Leontiev A.I., Lushchik V.G., Yakubenko A.E. A heat-insulated permeable wall with suction in a compressible gas flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, vol. 52, is. 17–18, pp. 4001–4007.
- [20] Leont'yev A.I., Lushchik V.G., Yakubenko A.E. Distinctive Features of Heat Transfer in the Region of a Gas Curtain Formed on Injection of Extraneous Gas. *Fluid Dynamics*, 2010, vol. 45, no. 4, pp. 559–565.
- [21] Makarova M.S. Optimizatsiia temperatury pronitsaemoi stenki pri vduve inorodnogo gaza [Optimisation of Permeable Wall Temperature under Injection of Foreign Gas]. *Teplovyte protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering]. 2012, no. 7, pp. 291–297.
- [22] Vinogradov Y.A., Zditovets A.G., Strongin M.M. Experimental investigation of the temperature stratification of an air flow through a supersonic channel with a central body in the form of a porous permeable tube. *Fluid Dynamics*, 2013, vol. 48, no. 5, pp. 687–696.
- [23] Zditovets A.G., Vinogradov Iu.A., Strongin M.M., Titov A.A., Medvetskaia N.V. Eksperimental'noe issledovanie osobennosti teploobmena pri vduve geliia cherez pronitsaemuiu poverkhnost' v sverkhzvukovoi potok argona [Experimental Study of Heat Transfer Features at Helium Injection through a Permeable Surface in Supersonic Argon Flow]. *Teplovyte protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering]. 2012, no. 6, pp. 253–260.
- [24] Burtsev S.A. *Issledovanie temperaturnogo razdeleniia v potokakh szhimaemogo gaza*. Diss. kand. tekhn. nauk [Investigation of temperature separation in the flows of compressible gas. Cand. techn. sci. diss.] Moscow, Bauman Press, 2001. 124 p.
- [25] Burtsev S.A., Kiselev N.A., Leont'ev A.I. Peculiarities of Studying Thermohydraulic Characteristics of Relief Surfaces. *High Temperature*, 2014, vol. 52, is. 6, pp. 869–872. doi: 10.1134/S0018151X14060054.
- [26] Kiselev N.A., Burtsev S.A., Strongin M.M. A Procedure for Determining the Heat Transfer Coefficients of Surfaces with Regular Relief. *Measurement Techniques*, 2015, vol. 58, is. 9, pp. 1016–1022. doi: 10.1007/s11018-015-0835-7.
- [27] Koval'nogov N.N., Magazinnik L.M. Numerical analysis of the coefficients of temperature restitution and heat transfer in a turbulent dispersed flow. *Russian Aeronautics*, 2008, vol. 51, no. 2, pp. 152–159.
- [28] Varaksin A.Yu., Protasov M.V., Ivanov T.F., Polyakov A.F. An experimental investigation of the behavior of solid particles during their motion in smooth and dimpled pipes. *High Temperature*, 2007, vol. 45, is. 2, pp. 221–226. doi: 10.1134/S0018151X07020125.
- [29] Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A., Koval'nogov N.N. O vozmozhnostiakh povysheniia effektivnosti raboty sverkhzvukovoi trubyy temperaturnoi stratifikatsii pri ispol'zovanii teplovykh trub [On the Possibilities of Improving the Efficiency of a Temperature Stratification Supersonic Pipe Using Heat Pipes]. *Teplovyte protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering]. 2011, no. 8, pp. 380–384.
- [30] Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A., Shkolin E.V. Methods of heat transfer intensification in the thermal stratification pipe. *Russian Aeronautics*, 2013, vol. 56, no. 4, pp. 379–383.
- [31] Tsynaeva A.A., Tsynaeva E.A., Nikitin M.N. Intensifikatsiia teploobmena v energeticheskikh ustroistvakh na osnove gazodinamicheskoi temperaturnoi stratifikatsii s pomoshch'iu teplovykh trub [Intensification of heat exchange in power devices based on gas-dynamic temperature stratification using heat pipes]. *Promyshlennaia energetika* [Industrial power]. 2014, no. 12, pp. 36–39.
- [32] Leontiev A.I., Burtsev S.A. Device for Separation of Vortex Gas-Dynamic Energy. *Doklady Physics*, 2015, vol. 60, no. 10, pp. 476–478. doi: 10.1134/S1028335815100092.
- [33] Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkosti* [Handbook of thermophysical properties of gases and liquids]. Moscow, Nauka publ., 1972. 720 p.

- [34] Popovich S.S., Vinogradov Iu.A., Strongin M.M. Eksperimental'noe issledovanie vozmozhnosti intensivatsii teploobmena v ustroistve bezmashinnogo energorazdeleniia potokov [Experimental research of the possibility of heat transfer enhancement in gas dynamic energy separation process]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S.P. Koroleva* [Vestnik of the Samara State Aerospace University]. 2015, vol. 14, no. 2, pp. 159–169.
- [35] Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N., Gorbachev M.A. Method of impact on free nonstationary air vortices. *High Temperature*, 2012, vol. 50, is. 4, pp. 496–500. doi: 10.1134/S0018151X12040219.
- [36] Varaksin A.Y. Clusterization of particles in turbulent and vortex two-phase flows. *High Temperature*, 2014, vol. 52, is. 5, pp. 752–769. doi: 10.1134/S0018151X14050204.
- [37] Terekhov V.I., Pakhomov M.A., Chichindaev V.V. Effect of Evaporation of Liquid Droplets on the Distribution of Parameters in a Two-Species Laminar Flow. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2000, vol. 41, is. 6, pp. 1020–1028.
- [38] 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* [A method of reducing the regulated bespodogrevnogo main natural gas and device for its realization]. Patent RF, no. 2162190, 2001. 6 p.
- [39] *Nauchnye osnovy tekhnologii 21 veka* [Scientific bases of technology of the 21 century]. Ed. Leont'ev A.I., Piliugin N.N., Polezhaev Iu.V., Poliaev V.M. Moscow, UNPTs «Energomash» publ., 2000. 135 p.

Статья поступила в редакцию 08.04.2016

Информация об авторе

БУРЦЕВ Сергей Алексеевич (Москва) — старший научный сотрудник лаборатории 108. Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова; кандидат технических наук, доцент кафедры «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: burtsev@bmstu.ru).

Information about the author

BURTSEV Sergey Alekseevich (Moscow) — Senior Researcher, Laboratory 108. Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University; Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Gas-Turbine and Unconventional Power System. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: burtsev@bmstu.ru).