Машины и Установки
проектирование
разработка и эксплуатация
Сетевое издание
МГТУ им. Н.Э. Баумана
http://aplantsjournal.ru

Ссылка на статью
// Машины и Установки: проектирование, разработка и эксплуатация.
МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Электрон. журн. 2016. № 06. С. 38–54.

DOI: **10.7463/aplts.0616.0852137**

Представлена в редакцию: 12.11.2016
Исправлена: 26.11.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана

УДК 620.97

Численное моделирование влияния вдува газа на эффективность работы устройства безмашинного энергоразделения

Егоров К. С.[1,2,*], **Степанова Л. В.**[1], **Рогожинский К. С.**[1,2]

[*]blackbird05@mail.ru

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
[2]Институт Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

В работе представлены результаты численного моделирования устройства безмашинного энергоразделения (трубы Леонтьева) с внутренней пористой трубой, что позволяет организовать вдув в сверхзвуковую часть канала для уменьшения коэффициента восстановления температуры. Показано влияния величины вдува на эффективность устройства безмашинного энергоразделения. Показано, что при варьировании расхода от 0 до 30 % расхода основного канала эффективность устройства безмашинного энергоразделения уменьшается на 3 - 5 %. Отсюда следует, что потеря тепловой эффективности из-за вдува более холодного воздуха превалирует над увеличением теплового потока за счет уменьшения коэффициента восстановления, когда увеличивается разность температур между сверхзвуковым и дозвуковым потока-ми. Также смоделирован эффект, который раньше был получен экспериментально, когда в устройстве газодинамического безмашинного энергоразделения температура меняет “знак”: сверхзвуковой поток – охлаждается, а дозвуковой – нагревается.

Ключевые слова: устройство безмашинного энергоразделения, труба Леонтьева, коэффициент восста-новления температуры, вдув газа

Введение

Безмашинное устройство энегоразделения – это устройство, которое позволяет из одного потока с одинаковой температурой получать два потока с разной (один выше первоначальной, другой ниже первоначальной). В этом устройстве (труба Леонтьева) возникает разность между сверхзвуковым и дозвуковым потоком, и соответственно, возникает тепловой поток от дозвукового потока к дозвуковому. В настоящее время коллективом автором ведутся исследование такого устройства [1 - 9] с целью увеличение эффективно-

сти устройства. Для изучения влияния различных факторов на эффективность устройства используется математическое моделирование устройства.

Эффективность устройства безмашинного энергоразделения, как было показано авторами работы [3] зависит от интенсивности теплопередачи и температурного напора между дозвуковым и сверхзвуковым потоками.

Температурный напор зависит от коэффициента восстановления температуры r [10], [11] при его уменьшении температурный напор увеличивается. На коэффициент восстановления влияют множество факторов: режим течения газа (турбулентный или ламинарный), геометрии обтекаемого тела, числа Прандтля газа а также наличие вдува.

На рисунке 1 представлены экспериментальные данные [11] по влиянию на коэффициент восстановления температуры вдува через пористую стенку при разных числах Маха (M – число Маха) в зависимости от параметра вдува:

$$b = \frac{j_{cm}}{\rho_0 w_0}\frac{2}{c_f},$$

где j_{cm} – массовая скорость вдува, ρ_0 – плотность воздуха основного потока, w_0 – скорость воздуха основного потока, c_f – коэффициент трения.

Полученные результаты с большим разбросом аппроксимируются формулой:

$$r = 1 - 2\frac{1+b}{b}\frac{2\left(1+b^2\right)}{b^2\left(2-\mathrm{Pr}_T\right)}\left[1-\frac{(1+b)^{\mathrm{Pr}_T-2}}{\left(2-\mathrm{Pr}_T\right)^2}\right], \qquad (1)$$

где Pr_T – турбулентное число Прандтля.

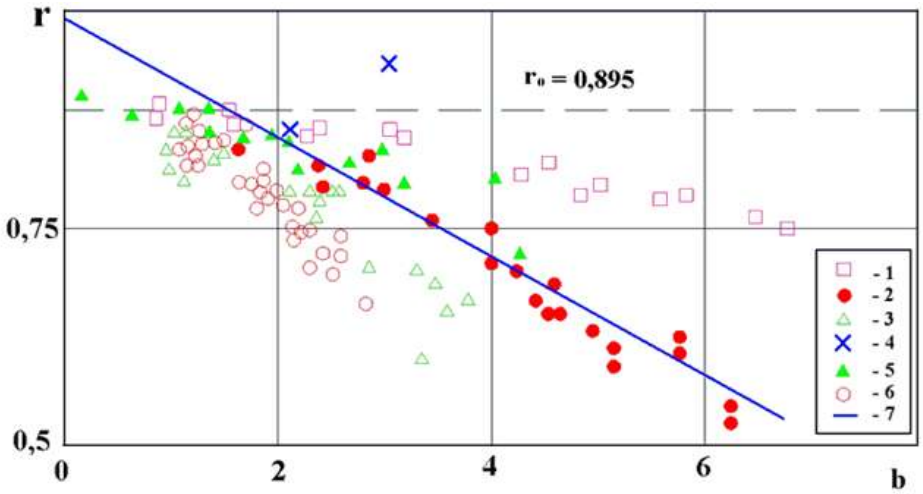

Рис. 1. Влияние вдува на коэффициент восстановления температуры. 1 – $M = 3{,}2$; 2 – $M = 2{,}5$; 3 – $M = 2{,}05$, $M = 3{,}05$, $M = 4{,}0$; 4 – $M = 4{,}7$; 5 – $M = 3{,}0$; 6 – $M = 2{,}7$; 7 – расчет по формуле (1); r_0 – значение коэффициент восстановления на плоской пластине без вдува

Для тестирования математической модели использовалось сравнение с аналитическим решением [12].

1. Тестовая задача

1.1. Аналитическое решение

Аналитическое решение по безмашинному энергоразделению было получено авторами работы [12]. Отметим некоторые особенности полученного решения: решение одномерное (параметры изменяются только вдоль оси трубы (ось X)) (рисунок 2), режим течения ламинарный.

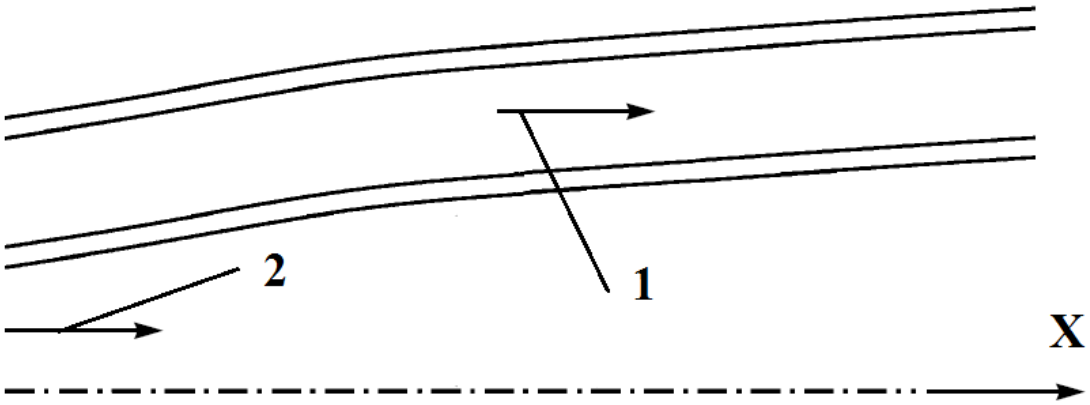

Рис. 2. Схема устройства энергоразделения. 1 – дозвуковой поток газа, 2 – сверхзвуковой поток газа

Для сравнения выбран интегральный результат, полученный для прямоточной схемы течения (рисунок 3) при бесконечной поверхности теплообмена. При представлении результатов используются следующие обозначения:

r – коэффициент восстановления температуры [9];

$m = \dfrac{G_{сверх}}{G_{дозвук}}$ – отношение массовых расходов по сверхзвуковой стороне $G_{сверх}$ и по дозвуковой стороне $G_{сверх}$;

k – показатель адиабаты;

H^* – полная энтальпия;

H_0^* – полная энтальпия на входе в устройство (в ресивере);

λ – приведенная скорость (отношение скорости газа к критической скорости течения в трубе), в соответствии с работой [12], авторы использовали для ее вычисления следующую формулу:

$$\lambda^2 = \frac{(k+1)M^2}{2+(k-1)M^2},$$

где M – число Маха.

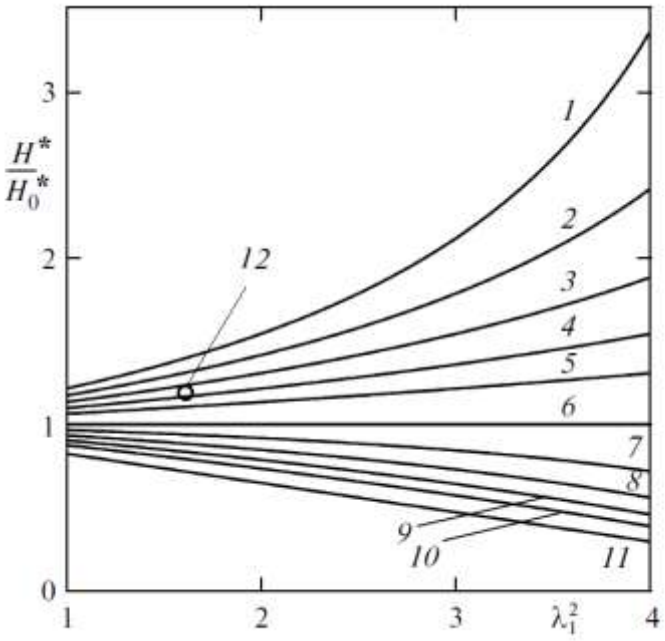

Рис. 3. Полная энтальпия на выходе из сверхзвукового (1-6) и дозвукового (6-11) каналов в прямоточном случае в зависимости от скорости на выходе из сверхзвукового канала, $r = 0{,}3$; $k = 1{,}67$. 1 – $m = 0$; 2 – $m = 0{,}2$; 3 – $m = 0{,}5$; 4 – $m = 1$; 5 – $m = 2$; 6 – $m = 0, \infty$; 7 – $m = 0{,}2$; 8 – $m = 0{,}5$; 9 – $m = 1$; 10 – $m = 1$; 11 – $m = 0, \infty$; 12 – полученное численное решение ($\frac{H^*}{H_0^*} \approx 1{,}15$, $M_1 \approx 2{,}0$, $\lambda_1^2 \approx 1{,}6$)

Исходя из предположения, что режим течения ламинарный, оценим число Прандтля. При ламинарном течении для продольно обтекаемой плоской пластины справедливо соотношение [10]:

$$r = \sqrt[2]{Pr},$$

где Pr – число Прандтля.

Тогда, исходя из значения $r = 0{,}3$, имеем:

$$Pr = r^2 = 0{,}3^2 = 0{,}09.$$

Исходя из показателя адиабаты $k = 1{,}67$, в качестве рабочего тела будем использовать смеси одноатомных инертных газов, такие как He-Xe, He-Ar [13]. Для сравнения с численным расчетом выбраны кривые на рисунке 2 при $m = 1$ (4, 9).

1.2. Математическая модель

Решение строится на основе математической модели, состоящей из дифференциальных уравнений неразрывности, системы уравнений Навье-Стокса, состояния и энергии [14]. Указанная выше система дифференциальных уравнений дополняется геометрическими, граничными условиями однозначности, а также физическими условиями однозначности, которые определяют теплофизические свойства газа и стенки, уравнением Менделеева-Клайперона.

Принятые допущения:

- задача стационарная;
- рабочее вещество – газ, считается ньютоновской жидкостью, вязкой и сжимаемой средой (в аэродинамическом смысле);
- задача решается в трехмерной постановке, течение ламинарное.

Геометрические размеры и граничные условия модели устройства газодинамического разделения приведено на рисунке 4. Принято, что в дозвуковом канале площадь поперечного сечения постоянна. В сверхзвуковом канале труба выполнена с углом раскрытия 0,5°, что позволило увеличить критическую длину трубы. Теплофизические свойства: динамическая вязкость $\mu = 3{,}31 \cdot 10^{-5}$ Па·с, теплоемкость при постоянном давлении $C_p = 520$ $\frac{Дж}{кг \cdot К}$, теплопроводность $\lambda = 0{,}19$ $\frac{Вт}{м \cdot К}$. Стенка для минимизации теплового сопротивления моделировалась как выполненная из меди с величиной теплопроводности, равной $\lambda_{ст} = 395 \frac{Вт}{м \cdot К}$.

Соответственно, число Прандтля:

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{\lambda}.$$

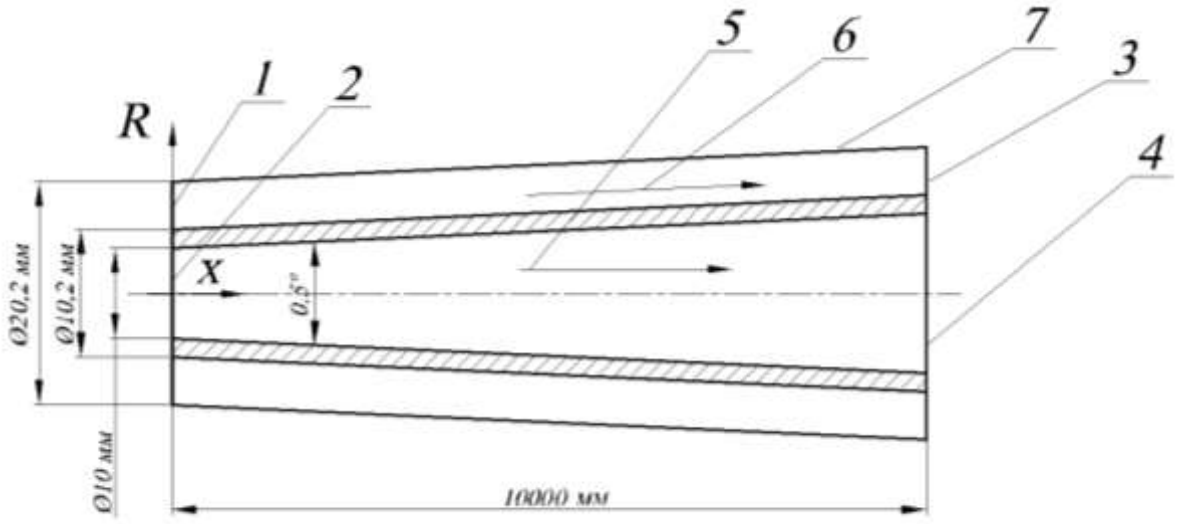

Рис. 4. Геометрические размеры и граничные условия устройства газодинамического энергоразделения. 1– граничное условие Inlet для довзукового потока, 2 – граничное условие вход (Inlet) для сверхзукового потока, 3 – граничное условие выход (Outlet) для дозвукового потока, 4 – граничное условие выход (Outlet) для сверхзукового потока, 5 – сверхзвуковой поток газа, 6 – дозвуковой поток газа, 7 – адиабатная стенка (Wall)

На входе в сверхзвуковой поток область задаются постоянная скорость величиной 645,5 м/с (это значение приблизительно соответствует числу Маха, равному 2,0); плот-

ность величиной 2,33 кг/м^3 (что соответствует входному статическому давлению в канале $P = 2 \cdot 10^5$ Па) и термодинамическая температура величиной 299,4 К. Это соответствует полной температуре в ресивере $T_0^* = 700$ К.

На входе в дозвуковой поток область задаются постоянная скорость величиной 80,0 м/с; плотность величиной 6,26 кг/м^3 (что соответствует входному статическому давлению в канале $P = 1{,}25 \cdot 10^6$ Па) и термодинамическая температура величиной 698,2 К. На выходе из сверхзвукового и дозвукового канала задаются “мягкие” граничные условия (Outlet). Расход по сверхзвуковому и дозвуковому потоку идентичны и равны 0,12 кг/с.

На границе сопряжения твердого тела и газа задается условие прилипания и равенство потоков теплоты. На внешней границе дозвукового канала задается условие адиабатной стенки (Wall). Моделирование задачи выполняется в программе OPENFOAM.

1.3. Результаты расчетов тестовой задачи

На рисунке 5 представлены профиль температур для устройства газодинамического безмашинного энергоразделения в сечении $X = 0{,}9$ м, а также число Маха (рис. 6) вдоль канала.

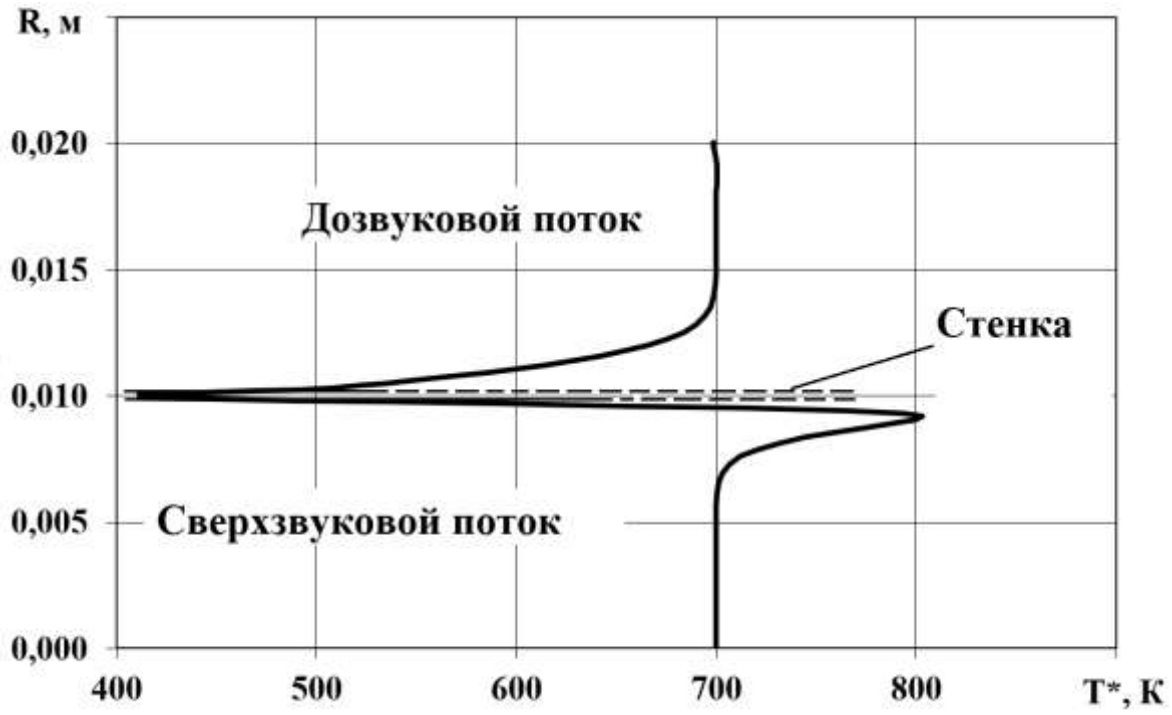

Рис. 5. Профиль температуры в устройстве газодинамического безмашинного энергоразделения в сечении $X = 0{,}9$ м

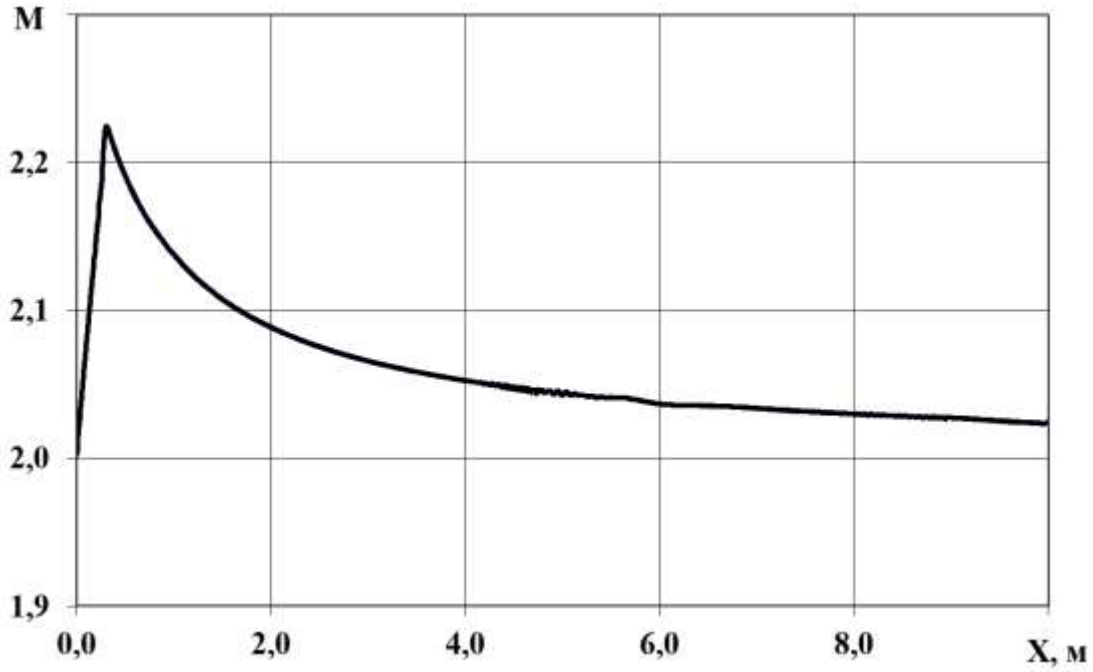

Рис. 6. Число Маха вдоль коаксиального канала

Полученные результаты показывают, что эффективность устройства газодинамического безмашинного энергоразделения в случае ламинарного режима течения может составлять значительную величину, в отличии от турбулентного режима течения. Если для турбулентного режима течения (при одинаковом значении числа Маха и числа Прандтля) разность температур между максимальным значением полной температуры в сверхзвуковом канале $T^*_{\max}$ и полной температурой в ресивере составила [15] приблизительно 10 °С, то в этом случае газ нагреется приблизительно на 100 °С (рисунок 4). Следовательно, в этом случае можно ожидать, что эффективность устройства можно увеличить приблизительно в 10 раз.

Однако реализовать это достаточно сложно, так как необходимо не допускать турбулизации течения, а также выполнять устройство с очень большой длиной (десятки и сотни метров).

Проведем оценку величины $\frac{H^*}{H^*_0}$ для сравнения с аналитическим решением. Исходя из предположения, что теплоемкость не зависит от температуры, отношение $\frac{H^*}{H^*_0}$ можно заменить на отношение полных температур $\frac{T^*}{T^*_0}$. При получении аналитического решение принято, что площадь теплообмена бесконечна, следовательно можно считать, что температура T^* приблизительно равна максимальной полной температуре $T^*_{\max}$ в каком либо сечении до бесконечности, так как при нагреве всего потока до температуры $T^*_{\max}$ теплообмен между потоками прекратится.

Тогда, отношение температур равно:

$$\frac{T^*}{T_0^*} = \frac{803}{700} = 1{,}15 .$$

Величину λ_1^2 на выходе оценим исходя из данных рисунка 6, так как число Маха в конце канала практически не изменяется, таким образом примем, что число Маха на выходе $M_1 = 2$.

Тогда:

$$\lambda_1^2 = \frac{(k+1)M_1^2}{2+(k-1)M_1^2} = \frac{(1{,}67+1)\cdot 2^2}{2+(1{,}67-1)\cdot 2^2} = 1{,}6 .$$

На рисунке 2 представлены интегральные результаты из работы [12] с полученными результатами численного моделирования. Как видно из представленных данных совпадение достаточно хорошее.

2. Математическая модель

Для математической модели приняты следующие допущения:

- задача стационарная;
- рабочее вещество – газ, считается ньютоновской жидкостью, вязкой и сжимаемой средой (в аэродинамическом смысле);
- задача решается в трехмерной постановке, течение турбулентное.

Геометрические размеры и граничные условия модели устройства газодинамического энергоразделения приведено на рисунке 7. Принято, что в дозвуковом канале площадь поперечного сечения постоянна. В сверхзвуковом канале труба выполнена с углом раскрытия 0,7°. В качестве рабочего тела, также как и для тестовой задачи, будем использовать смеси одноатомных инертных газов, такие как He-Xe, He-Ar [13]. Теплофизические свойства рабочего тела: показатель адиабаты $k = 1{,}67$, молекулярная масса принята равной $M_r = 39{,}94 \ \frac{кг}{кмоль}$, динамическая вязкость $\mu = 3{,}31\cdot 10^{-5}$ Па·с, теплоемкость при постоянном давлении $C_p = 520 \ \frac{Дж}{кг\cdot К}$, теплопроводность $\lambda = 0{,}086 \ \frac{Вт}{м\cdot К}$.

Соответственно, число Прандтля:

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{\lambda} = \frac{520\cdot 3{,}31\cdot 10^{-5}}{0{,}086} = 0{,}2 .$$

Число Прандтля при моделировании принято как можно ниже (но в пределах реально существующих значений смеси He и Xe) для большего увеличения теплового эффекта газодинамического разделения [15], [16].

Пористая стенка для минимизации теплового сопротивления моделировалась с эквивалентной величиной теплопроводности, равной $\lambda_{ст} = 200 \ \frac{Вт}{м\cdot К}$. Пористость принята рав-

ной 0,1. Гидравлическое сопротивление пористой стенки моделировалось по уравнению Дарси [17], коэффициенты подбирались для обеспечения перепуска от 0 до 30 % от расхода по дозвуковому каналу. При отсутствии вдува расходы по дозвуковой и сверхзвуковой части устройства газодинамического энергоразделения равны между собой.

Для моделирования процессов турбулентного переноса выбрана двухпараметрическая модель – $k-\varepsilon$ модель [18]. Для учета влияния числа Прандтля для газов ниже 0,6 турбулентное число Прандтля для модели турбулентности принято равным $Pr_t = 1{,}1$ в соответствии с рекомендациями работы [19].

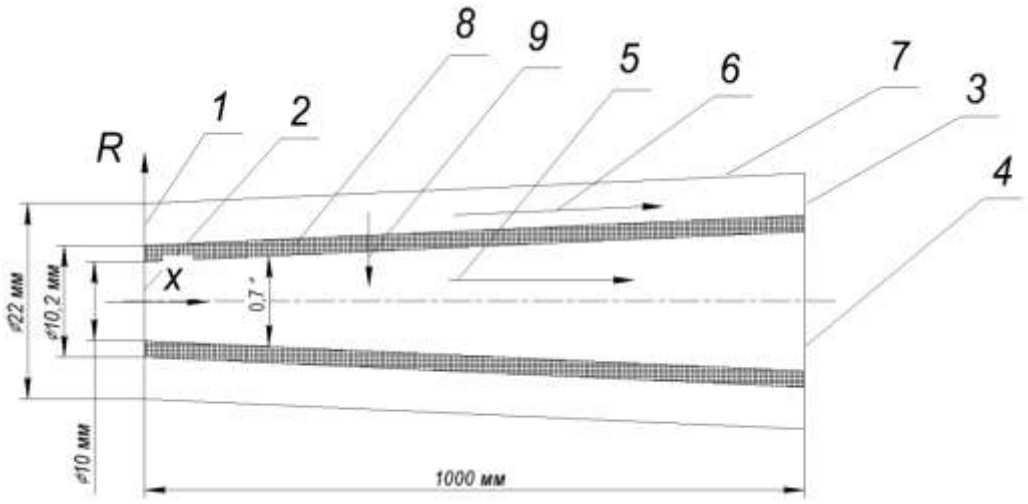

Рис. 7. Геометрические размеры и граничные условия устройства газодинамического энергоразделения. 1– граничное условие Inlet для довзукового потока, 2 – граничное условие вход (Inlet) для сверхзукового потока, 3 – граничное условие выход (Outlet) для довзукового потока, 4 – граничное условие выход (Outlet) для сверхзукового потока, 5 – сверхзвуковой поток газа, 6 – дозвуковой поток газа, 7 – адиабатная стенка (Wall), 8 – пористая стенка, 9 – направление массобмена между каналами.

На входе в сверхзвуковой поток область задаются постоянная скорость величиной 645,5 м/с (это значение приблизительно соответствует числу Маха, равному 2,0) и термодинамическая температура величиной 299,2 К. Это соответствует полной температуре в ресивере $T_0^* = 700$ К.

На входе в дозвуковой поток область задаются постоянная скорость величиной 60,0 м/с и термодинамическая температура величиной 698,2 К. На выходе из сверхзвукового и дозвукового канала задаются “мягкие” граничные условия (Outlet).

На границе сопряжения пористого тела и газа задается условие прилипания и равенство потоков теплоты. На внешней границе дозвукового канала задается условие адиабатной стенки (Wall).

3. Результаты расчетов

На рисунках 8, 9 представлены профили температур и радиальной составляющей скорости для устройства газодинамического безмашинного энергоразделения в сечении $X = 0{,}03$ м.

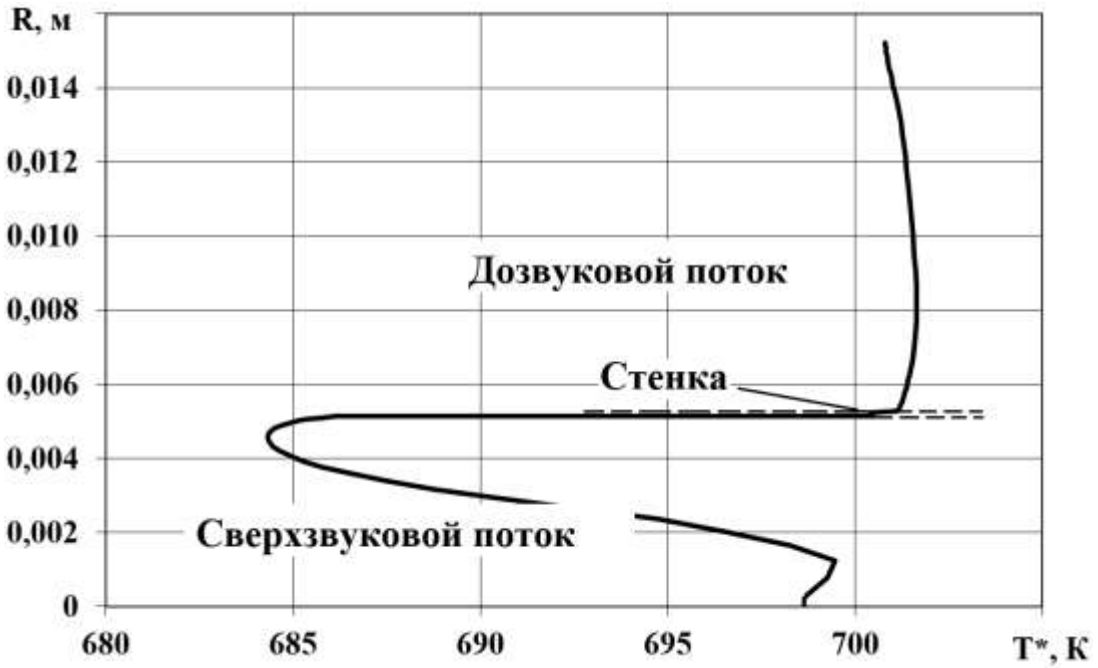

Рис. 8. Профиль полной температуры в устройстве газодинамического безмашинного энергоразделения в сечении $X = 0{,}03$ м

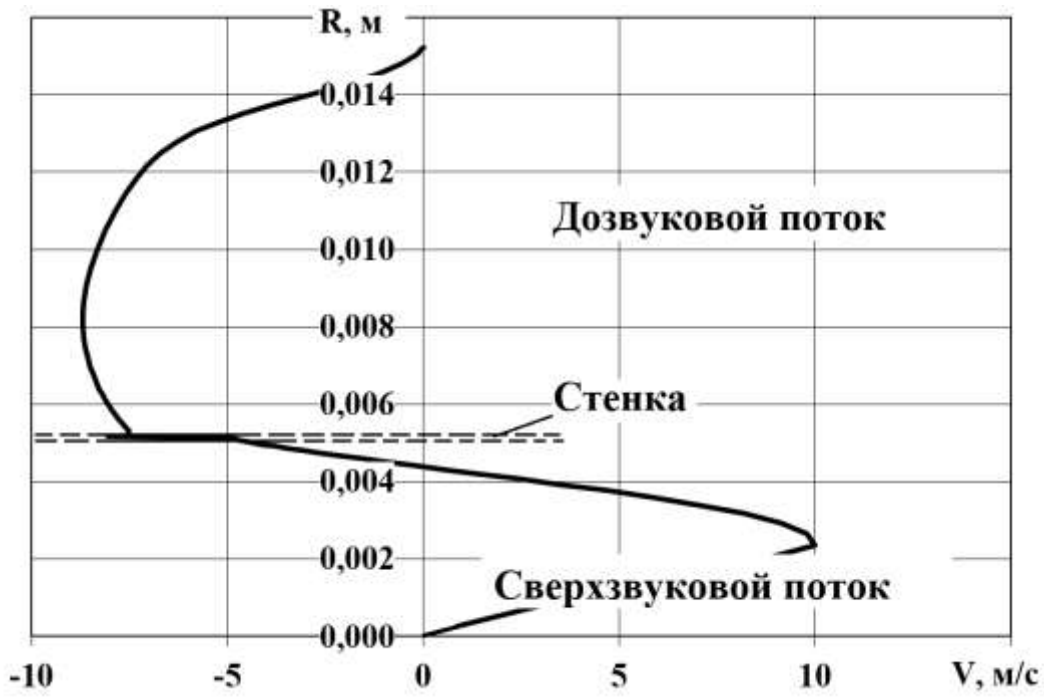

Рис. 9. Профиль радиальной составляющей скорости в сечении $X = 0{,}03$ м. V – радиальная составляющая скорости, м/с

На рисунке 10 представлен график зависимости относительного теплового потока $\frac{Q}{Q_0}$ (где Q – тепловой поток при наличии перепуска газа между каналами, Вт, Q_0 – тепловой поток при отсутствии перепуска газа, Вт) от количества перепускаемого газа $\overline{G}$ выраженного в процентах от расхода газа без перепуска газа ($\overline{G} = \frac{G_{пер}}{G_{сверх}}$, где $G_{пер}$ – расход перепуска газа в устройстве газодинамического безмашинного энергоразделения, кг/с).

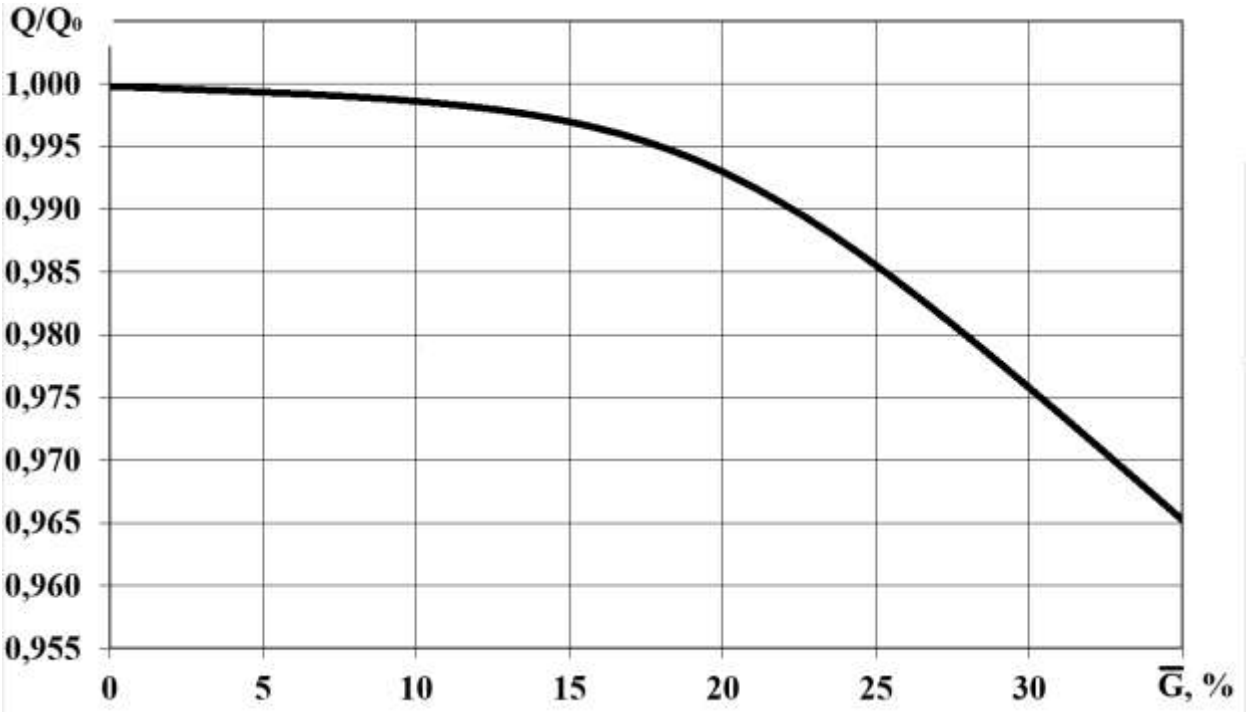

Рис. 10. Зависимость относительного теплового потока $\frac{Q}{Q_0}$ от количества перепускаемого газа $\overline{G}$

Полученные результаты показывают, что эффективность устройства газодинамического безмашинного энергоразделения в случае перепуска газа падает (на 3-5 %) при перепуске до 30 %. Отсюда следует, что потеря тепловой эффективности из-за вдува более холодного воздуха превалирует над увеличением теплового потока за счет уменьшения коэффициента восстановления (рис. 1), когда увеличивается разность температур между сверхзвуковым и дозвуковым потоками. Таким образом, использование перепуска (пористой стенки) для улучшения работы устройства нецесообразно.

Также получен очень интересный эффект при определенном подборе параметров гидравлического сопротивления стенки, когда направление перетока газа меняется (рис. 11) и эффект в устройстве газодинамического безмашинного энергоразделения меняет “знак”: сверхзвуковой поток – охлаждается, а дозвуковой – нагревается (рис. 12). Этот эффект при проведении физического эксперимента ранее был получен в работе [7].

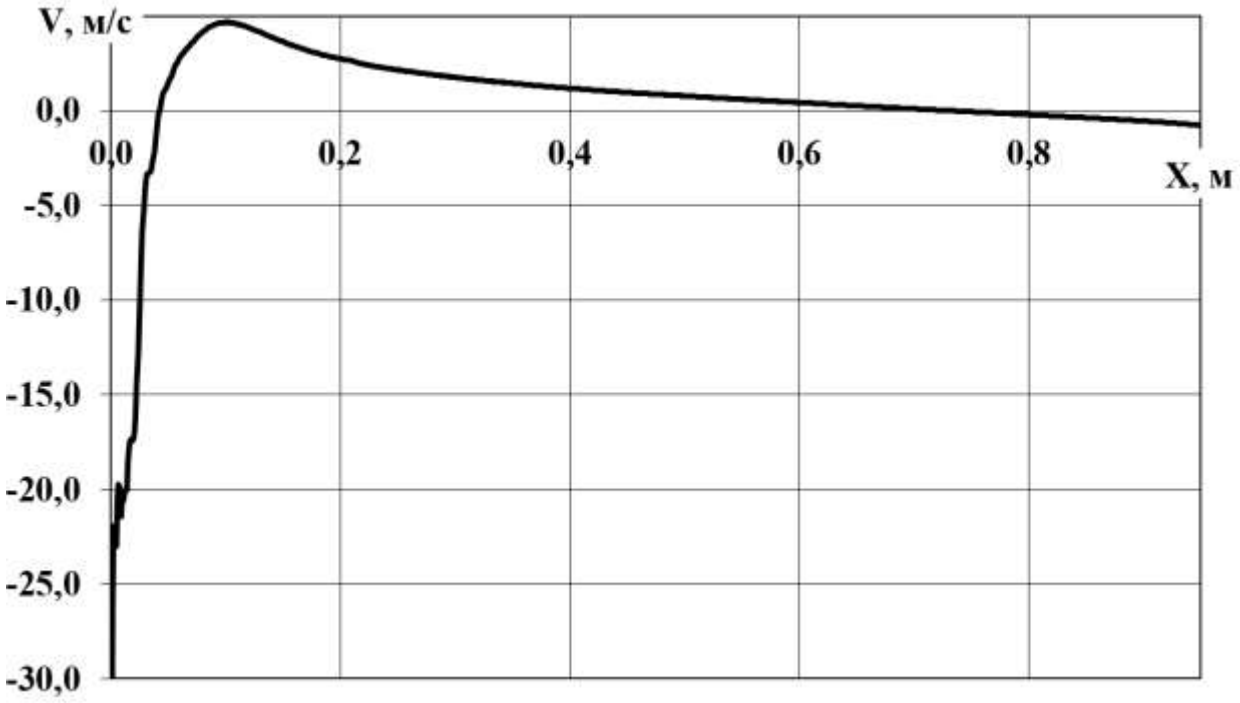

Рис. 11. Радиальная составляющая скорости в вдоль коаксиального канала устройства газодинамического безмашинного энергоразделения при наличии эффекта смены “знака” температуры

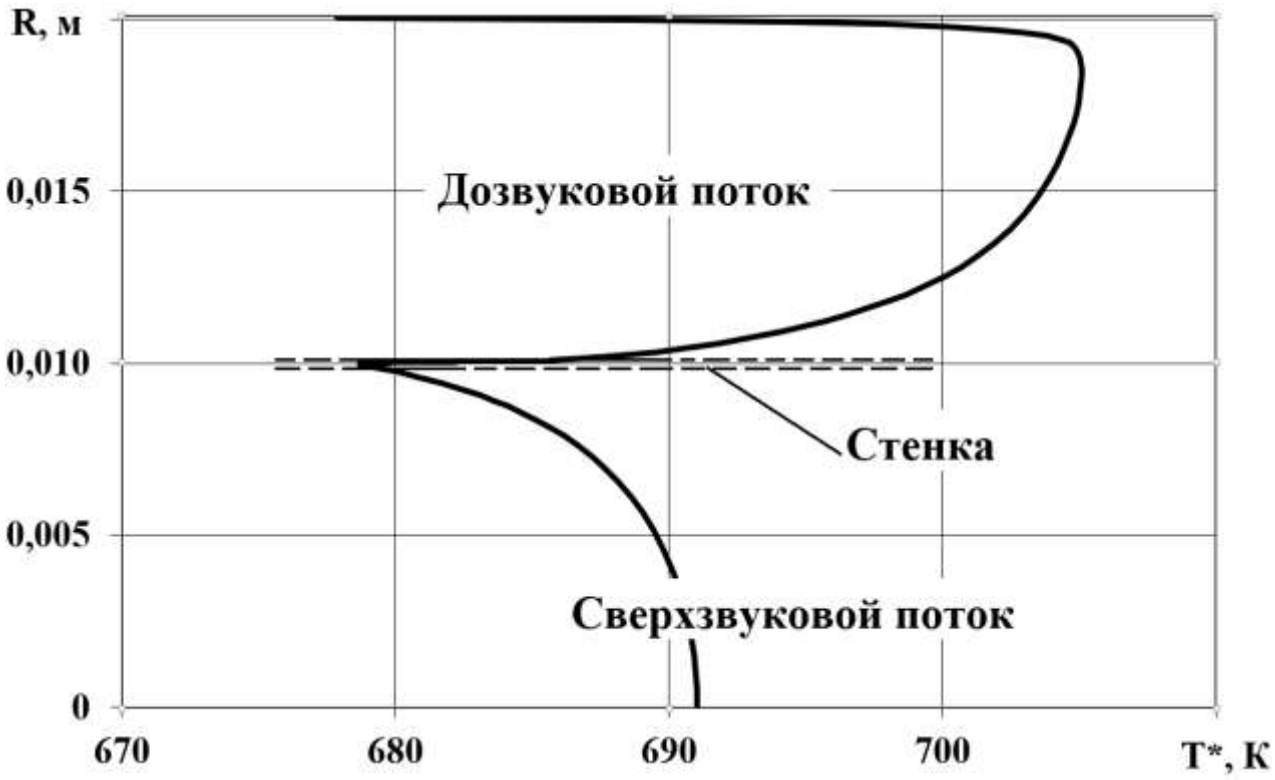

Рис. 12. Профиль полной температуры в устройстве газодинамического безмашинного энергоразделения в сечении $X = 0{,}9$ м, при наличии эффекта смены “знака” температуры

Заключение

Проведенные исследование показали, что использование внутренней пористой трубы для увеличения эффективности устройства нецелесообразно, причина состоит в том, что потеря тепловой эффективности из-за вдува более холодного воздуха превалирует над увеличением теплового потока за счет уменьшения коэффициента восстановления, когда увеличивается разность температур между сверхзвуковым и дозвуковым потоками. Также получен очень интересный эффект, когда эффект в устройстве газодинамического безмашинного энергоразделения меняет “знак”: сверхзвуковой поток –охлаждается, а дозвуковой – нагревается. Решение тестовой задачи показало хорошее совпадение с аналитическим решением, что подтверждает корректность полученных результатов, в том числе полученных ранее [15].

Эффективность устройства газодинамического безмашинного энергоразделения при ламинарном режиме течения может быть значительно выше, но реализация такого устройства практически невозможна.

Работа выполнена при поддержке РНФ. Грант № 14-19-00699.

Список литературы

1. Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Исследование влияния диссипативных эффектов на температурную стратификацию в потоках газа (обзор) // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52. № 2. С. 310-322. DOI: 10.7868/S0040364413060069
2. 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.
3. Бурцев С.А. Исследование температурного разделения в потоках сжимаемого газа: дис. ... канд. техн. наук. М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2001. 124 с.
4. Бурцев С.А. Исследование устройства температурной стратификации при работе на природном газе // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2004. № 9. С.1-21. Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/516097.html (дата обращения 01.09.2016). DOI: 10.7463/0904.0516097
5. Бурцев С.А. Исследование работы устройства температурной стратификации на воде и природном газе // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2005. № 5. С.1-20. Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/529473.html (дата обращения 01.09.2016). DOI: 10.7463/0505.0529473
6. Здитовец А.Г., Титов А.А. Экспериментальное исследование газодинамического метода безмашинного энергоразделения воздушных потоков // Тепловые процессы в технике. 2013. № 9. С. 391-397.
7. Здитовец А.Г., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование температурной стратификации воздушного потока, протекающего через сверхзвуко-

вой канал, с центральным телом в виде пористой проницаемой трубки // Известия Российской Академии наук. Механика жидкости и газа. 2013. № 5. С. 134-145.

8. Виноградов Ю.А., Егоров К.С., Попович С.С., Стронгин М.М. Исследование тепломассообмена на проницаемой поверхности в сверхзвуковом пограничном слое // Тепловые процессы в технике. 2010. № 1. С. 7-9.
9. Клюквин А.Д. Анализ физической адекватности численного расчета коэффициента восстановления температуры при различных вариантах постановки задачи // Аэрокосмический научный журнал. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 2. С. 16 - 29. Режим доступа: http:// http://aerospjournal.ru/doc/837915.html (дата обращения 01.09.2016). DOI: 10.7463/aersp.0216.0837915
10. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: Учебник для вузов. 3-е изд. М.: Энергия, 1975. 488 с.
11. Кутателеладзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассобмен и трение в турбулентном пограничном слое. М.: Энегоатомиздат, 1985. 318 с.
12. Леонтьев А.И., Вигдорович И. И. Энергоразделение газов с малыми и большими числами Прандтля // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2013. № 6. С. 117 - 134.
13. Tournier J.-M., El-Genk M.S. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Brayton cycle applications // Energy Conversion and Management. 2008. Vol. 49. Iss.3. Pp. 469–492. DOI: 10.1016/j.enconman.2007.06.050
14. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 150 с. [Patankar S.V.Numerical heat transfer and fluid flow. Wash.: Hemisphere Publ. Corp.; N.Y.: McGraw-Hill, 1980. 197 p.].
15. Егоров К.С., Рогожинский К.С. Численное моделирование влияния числа Прандтля газа и схемы течения на эффективность работы устройства безмашинного энергоразделения // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 10. С. 21-35. Режим доступа: http://technomag.edu.ru/doc/814490.html (дата обращения 01.09.2016). DOI: 10.7463/1015.0814490
16. Бурцев С.А., Кочуров Д.С., Щеголев Н.Л. Исследование влияния доли гелия на значение критерия Прандтля газовых смесей // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 5. С.314-329. Режим доступа: http://technomag.edu.ru/doc/710811.html (дата обращения 01.09.2016). DOI: 10.7463/0514.0710811
17. Поляев В.М., Майоров В.А., Васильев Л.Л. Гидродинамика и теплообмен в пористых элементах конструкций летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1988. 168 с.
18. Белов И.А., Исаев С.А. Моделирование турбулентных течений: Учебное пособие. СПб.: Изд-во Балт. гос. техн. ун-та, 2001. 108 с.
19. McEligot D.M.,Taylor M.F. The turbulent Prandtl number in the near-wall region for low-Prandl-number gas mixtures // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1996. Vol. 39. No.6. Pp. 1287–1295. DOI: 10.1016/0017-9310(9500146-8)

Machines & Plants Design & Exploiting
Electronic journal of the Bauman MSTU
http://aplantsjournal.ru

Machines andPlants:Design and Exploiting, 2016, no. 06, pp. 38–54.

DOI: **10.7463/aplts.0616.0852137**

Received: 12.11.2016
Revised: 26.11.2016

© Bauman Moscow State Technical Unversity

Numerical Simulation of Gas Injection Impact on the Non-Machine Energy Separation Device

K.S. Egorov[1,2,*], L.V. Stepanova[1], K.S. Rogozhinsky[1,2]

[*]blackbird05@mail.ru

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
[2]Institute of Mechanics MSU n.a. M. V. Lomonosov, Moscow, Russia

Keywords: non-machine device for energy separation, Leontiev tube, recovery temperature factor, gas injection

The paper considers numerical simulation of a non-machine energy separation device with a porous inner tube. The results obtained show that with a flow rate variation up to 30% of general rate the channel efficiency of gas-dynamic non-machine device for energy separation falls by 3-5%. Hence, a heat efficiency loss due to the colder air injection prevails over the increase of heat flow resulting from a recovery factor decrease when the temperature difference between supersonic and subsonic flows rises. So, the use of gas injection (porous inner tube) to improve the efficiency of the non-machine device for energy separation is beside the purpose.

The effect when the temperature changes its sign in the non-machine device for energy separation and supersonic flow becomes cooler while a subsonic one is heated has been also simulated. This effect was previously obtained experimentally.

The numerical simulation has shown good coincidence with analytical solution in case of the laminar flow regime. The research has shown that with the laminar flow the efficiency of the non-machine device for energy separation can be significantly higher than with the turbulent flow, but its implementation is quite difficult.

References

1. 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, no.2, pp. 297-307. DOI: 10.1134/S0018151X13060060
2. Leontiev A.I., Burtsev S.A., Vizel' Ya.M., Chizhikov Yu.V. The experimental research of gasodynamic temperature stratification of natural gas. *Gazovaya promyshlennost'* [Gas industry], 2002, no.11, pp. 72-75 (in Russ.).

3. Burtsev S.A. *Issledovanie temperaturnogo razdeleniia v potokakh szhimaemogo gaza* [The research of temperature separation in coercible gas flows. Cand. diss.]. Moscow: BMSTU, 2001. 124 p. (in Russ.).
4. Burtsev S.A. 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. Electronic journal], 2004, no.9. Available at: http://technomag.bmstu.ru/doc/516097.html, accessed 01.09.2016. DOI: 10.7463/0904.0516097 (in Russ.)
5. Burtsev S.A. Investigation of the operation of temperature lamination device working on the water and natural gas. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E.Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU. Electronic journal]. 2005, no.5. Available at: http://technomag.bmstu.ru/doc/529473.html, accessed 01.09.2016. DOI: 10.7463/0505.0529473 (in Russ.)
6. Zditovets A.G., Titov A.A. 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 (in Russ.).
7. Zditovets A.G., Vinogradov Yu.A., 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. *Izvestiia RAS. Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid Mechanics], 2013, vol. 48, no.5, pp. 687-696. DOI: 10.1134/S0015462813050128
8. Vinogradov Yu.A., Egorov K.S., Popovich S.S., Strongin M.M. Heat and mass transfer research on permeable surface in supersonic boundary layer. *Teplovye protsessy v tekhnike* [Thermal Processes in Engineering], 2010, no.1, pp. 7-9 (in Russ.).
9. Kliukvin A.D. Analysing a numerical calculation adequacy of the recovery factor for various problem statement options. *Aerokosmicheskij nauchnyj zhurnal. MGTU im. N.E. Baumana.* [Aerospace Scientific Journal Bauman MSTU], 2016, no. 2, pp. 16-29. Available at: http://aerospjournal.ru/doc/837915.html, accessed 01.09.2016. DOI: 10.7463/aersp.0216.0837915 (in Russ.)
10. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat Transfer] 3rd ed. Moscow: Energia Publ., 1975. 488 p. (in Russ.).
11. Kutateladze S.S., Leontiev A.I. *Teplomassoobmen i trenie v turbulentnom pogranichnom sloe* [Heat and Mass Exchange and Friction in Turbulent Boundary Layer]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1985. 496 p. (in Russ.).
12. Leontiev A.I., Vigdorovich I.I. Energy separation of gases with low and high Prandtl numbers. *Izvestiia RAS. Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid Mechanics], 2013, vol. 48, no.6, pp. 811-826. DOI: 10.1134/S0015462813060124
13. Tournier J.-M., El-Genk M. S. Properties of noble gases and binary mixtures for closed Brayton cycle applications. *Energy Conversion and Management*, 2008, vol. 49, iss. 3, pp. 469–492. DOI: 10.1016/j.enconman.200706.050

14. Patankar S.V. *Chislennye metody resheniia zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti* [Numerical heat transfer and fluid flow]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1984. 150 p. (in Russ.).
15. Egorov K. S., Rogozhinsky K.S. Numerically simulated impact of gas Prandtl number and flow model on efficiency of the machine-less energetic separation. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E.Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU. Electronic journal], 2015, no.10, pp. 21-35. Available at: http://technomag.edu.ru/doc/814490.html, accessed 01.09.2016. DOI: 10.7463/1015.0814490 (in Russ.)
16. Burtsev S.A., Kochurov D.S., Shegolev N.L. Investigation of the helium proportion influence on the Prandtl number value of gas mixtures. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E.Baumana* [Science and Education of the Bauman MSTU. Electronic journal], 2014, no.5, pp. 314-329. Available at: http://technomag.edu.ru/doc/710811.html, accessed 01.09.2016. DOI: 10.7463/0514.0710811 (in Russ.)
17. Poliaev V.M., Majorov V.A., Vasil'ev L.L. *Gidromekhanika i teploobmen v poristykh elementakh konstruktsij letatel'nykh apparatov* [Hydrodynamics and heat exchange in porous elements of flying machine constructions]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988. 168 p. (in Russ.).
18. Belov I.A., Isaev S.A. *Modelirovanie turbulentnykh techenij* [Modeling of turbulent flows]. St. Petersburg.: Baltic State Tech. Univ. Publ., 2001. 108 p. (in Russ.).
19. McEligot D.M.,Taylor M.F. The turbulent Prandtl number in the near-wall region for low-Prandl-number gas mixtures. *Int. J. Heat and Mass Transfer,* 1996, vol. 39, no.6, pp. 1287–1295. DOI: 10.1016/0017-9310(95)00146-8