

Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 10. С. 466–474
Thermal processes in engineering, 2022, vol. 14, no. 10, pp. 466–474

Научная статья
УДК 532.526.4, 536.244
DOI: 10.34759/tpt-2022-14-10-466-474

Влияние закона расходного воздействия на энергоразделение в канале с проницаемыми стенками

Д.Е. Хазов^{1✉}, А.И. Леонтьев^{1,2}

¹ НИИ механики МГУ, Москва, Россия

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

dkhazov@mail.ru[✉]

Аннотация. Рассмотрено устройство энергоразделения с проницаемой стенкой. На базе разработанной модели исследовано влияние закона расходного воздействия на характеристики энергоразделения. Рассмотрены два закона: уравнение Дарси – Форхгеймера и закон постоянного по длине отсоса. Приведено сравнение как локальных, так и интегральных характеристик течения. Показано, что наилучшие результаты демонстрирует вариант с постоянным по длине отсосом при минимально возможном давлении в форкамере. По аналогии с вихревой трубой проанализирована эффективность рассматриваемого устройства.

Ключевые слова: энергоразделение, сжимаемые течения, коэффициент восстановления температуры, отсос, проницаемая стенка

Благодарность. Работа выполнена по государственному заданию МГУ № гос. рег.: AAAA-A19-119012990115-5.

Для цитирования. Хазов Д.Е., Леонтьев А.И. Влияние закона расходного воздействия на энергоразделение в канале с проницаемыми стенками // Тепловые процессы в технике. 2022. Т. 14. № 10. С. 466–474. DOI: 10.34759/tpt-2022-14-10-466-474

Original article

The injection/suction law effect on the energy separation in a channel with permeable wall

D.E. Khazov^{1✉}, A.I. Leontiev^{1,2}

¹ Institute of Mechanics Moscow State University, Moscow, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

dkhazov@mail.ru[✉]

Abstract. The article represents a numerical analysis of a new energy separation method. By energy separation, the authors imply spontaneous gas flow separation into the two flows with stagnation temperatures higher and lower than the initial one («hot» and «cold»). One of the most famous devices, where the energy separation phenomenon is employed, is the Rank-Hilsch vortex tube. The method under consideration is based on the well-known effect of the stagnation temperature profile curvature over the boundary layer thickness, originated when a high-speed gas flows

around an adiabatic surface. It is well known, that the higher the flow velocity and the more the Prandtl number differs from unity, the higher is the energy separation within the boundary layer. In a channel with a permeable wall, the part of the high-speed flow may be sucked out through the wall due to the natural or forced pressure drop. As the result, the flow stagnation temperatures at the channel outlet and the flow sucked out through the wall are different, namely, one is hotter and the other is colder, compared to the initial stagnation temperature.

The authors studied the injection/suction law impact on the energy separation based on the developed 2D numerical model. The two laws were considered, namely the Darcy-Forchhämmer equation and the law of suction constant along the length.

Comparison of both local and integral energy separation characteristics was made. The article demonstrates that the best results were obtained in the case of constant suction along the channel length at the lowest possible initial stagnation pressure. The authors analyzed the efficiency of the device under consideration the same way as the vortex tube was.

Keywords: energy separation, compressible flows, temperature recovery factor, suction, permeable wall

Acknowledgement. The work was performed according to the state order of Moscow State University State Registration No.: AAAAA19-119012990115-5

For citation. Khazov D.E., Leontiev A.I. The injection/suction law effect on the energy separation in a channel with permeable wall. *Teplovye protsessy v tekhnike = Thermal processes in engineering*, 2022, vol. 14, no. 10, pp. 466–474. (In Russ.). DOI: 10.34759/tpt-2022-14-10-466-474

Введение

Энергоразделением называется самопроизвольный процесс перераспределения полной энергии (температуры) потока газа без совершения им технической работы и теплообмена с окружающей средой. В результате энергоразделения в потоке образуются «холодные» и «горячие» области. Как показано в работе [1], в основе этого процесса лежат два физических механизма: первый – дисбаланс между тепловыми потоками, выделяемыми за счет действующих сил вязкости и рассеиваемыми за счет теплопроводности; второй – нестационарные пульсации давления.

Энергоразделение наблюдается в различных типах течений: в вихревых потоках [2], газовых струях [3], резонансных трубах [4], в следах за плохо обтекаемыми телами [5, 6], в пограничном слое сжимаемого газа [7]. Интерес к подобному рода явлениям обусловлен возможностью нагрева или охлаждения потока без использования обычных теплообменных устройств. Одним из самых известных устройств, использующих явление энергоразделения, является вихревая труба Ранка – Хилша. Процессы в вихревой трубе сопровождаются значительными потерями давления торможения как в «горячем», так и в «холодном» потоке, что

ограничивает ее широкое применение. В связи с этим актуальной проблемой является исследование альтернативных устройств, использующих эффекты энергоразделения. Например, в работе [8] предложено устройство, использующее эффект энергоразделения в пограничном слое сжимаемого газа: температура теплоизолированной стенки (1), обтекаемой потоком сжимаемого газа, может существенно отличаться от температуры торможения потока за счет диссипативных процессов, возникающих в пограничном слое:

$$T_{aw} = T_{\infty}^* \frac{1 + r \frac{k-1}{2} M_{\infty}^2}{1 + \frac{k-1}{2} M_{\infty}^2}. \quad (1)$$

Предложенное устройство демонстрирует меньшую разницу температур, чем труба Ранка – Хилша, при той же разности давлений. Однако давление торможения одного из потоков остается практически постоянным. Теоретические и экспериментальные исследования [9–12], проведенные в последние годы, наметили пути повышения его эффективности, такие как использование в качестве рабочих тел газовых смесей с малым числом Прандтля [13, 14], а также рабочих тел с конденсирующими компонентами [15, 16].

В рамках исследований упомянутых выше был разработан новый метод энергоразделения, также основанный на эффекте энергоразделения в сжимаемом пограничном слое, но с использованием проницаемых поверхностей. В работах [17, 18] предложено устройство для реализации этого метода и представлены первые экспериментальные результаты. В работе [19] проведено численное моделирование отсоса газа из сверхзвукового турбулентного пограничного слоя на плоской пластине. В работе [20] проведено экспериментальное и численное исследование подобного устройства в широком диапазоне изменения параметров. Разработаны математические модели устройства, проведена их валидация на основе полученных экспериментальных данных. Исследовано влияние чисел Маха, Прандтля, а также длины проницаемой трубки на величину энергоразделения.

Настоящая работа направлена на численное исследование влияния закона расходного воздействия на энергоразделение в таком устройстве.

Рассмотрим более подробно энергоразделение в сжимаемом пограничном слое. В работе [7] был впервые описан процесс энергоразделения в высокоскоростном пограничном слое. На основе автомодельных решений уравнений ламинарного пограничного слоя было показано, что температура торможения потока может изменяться по толщине пограничного слоя (для числа Прандтля $Pr \neq 1$) при обтекании теплоизолированной плоской пластины (рис. 1), то есть происходит энергоразделение.

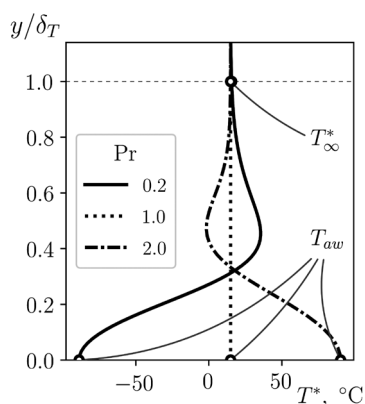


Рис. 1. Распределение температуры торможения T^* по толщине ламинарного пограничного слоя y/δ_T при тчении над теплоизолированной плоской пластиной с различными молекулярными числами Прандтля. Пример расчета для $k=1.4$, $M_\infty=3.0$, $T_\infty=15^\circ\text{C}$

Если теперь представить, что течение происходит над проницаемой поверхностью и пристеночные слои газа с температурой T_{aw} отсасываются из потока, то оставшаяся часть газа будет иметь температуру торможения, отличающуюся от начальной. Схема такого устройства показана на рис. 2. Основными элементами рассматриваемого устройства являются сопло и канал с пористыми (проницаемыми) стенками. Газ, поступающий из форкамеры, разгоняется до высоких скоростей в сопле. Далее поступает в канал с проницаемыми стенками, где в зависимости от перепада давления происходит либо вдув, либо отсос газа. Газ, прошедший через проницаемую стенку, собирается в коллектор, а оставшаяся часть газа поступает в диффузор.

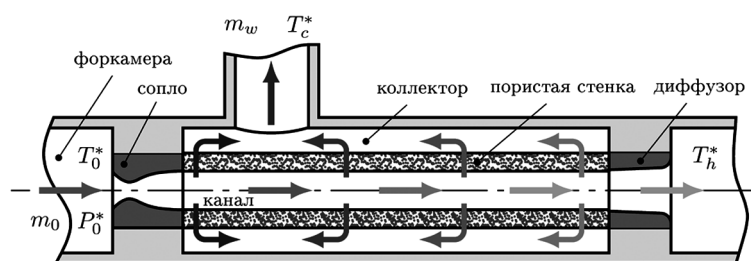


Рис. 2. Схема устройства энергоразделения с проницаемой стенкой

При числе Прандтля $Pr < 1$ и должном запасе давления в форкамере (для реализации отсоса по всей длине пористой трубки), температура газа на выходе из коллектора $T_c^* < T_0^*$, а на выходе из диффузора $T_h^* > T_0^*$.

Количественными характеристиками процесса энергоразделения принято считать разности между среднemasсовыми температурами торможения газового потока на «горячем» T_h^* и «холодном» T_c^* выходах и на входе устройства T_0^* :

$$\Delta T_h^* = T_h^* - T_0^*; \quad \Delta T_c^* = T_c^* - T_0^*. \quad (2)$$

1. Постановка задачи

Рассмотрим устройство энергоразделения с проницаемой стенкой. Математическая модель, описывающая процессы, происходящие в подобном устройстве разработана в [20]. Там же проведена валидация модели на доступных экспериментальных данных. Ниже приведем кратное описание модели.

Задача моделировалась в осесимметричной постановке с помощью ANSYS Fluent (рис. 3). Размер структурированной расчетной сетки (рис. 4)

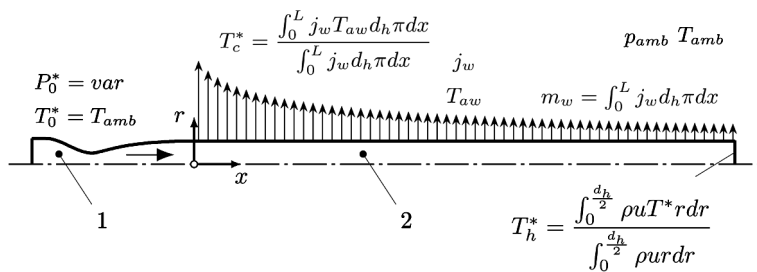


Рис. 3. Расчетная область и схема определения параметров: 1 – сверхзвуковое сопло, 2 – пористая трубка

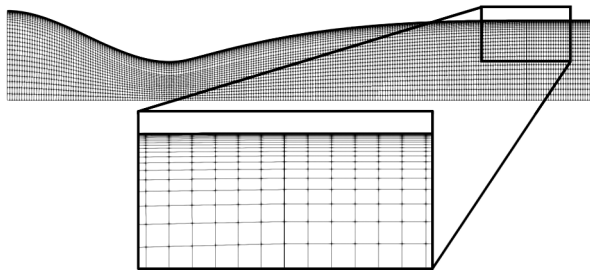


Рис. 4. Расчетная сетка

составлял $N = 126846$ ячеек. Для участка пористой трубки число узлов составило 1982×59 со сгущением при приближении к стенке (см. рис. 4). Дискретизация осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS), уравнения энергии и уравнений стандартной $k - \omega$ модели турбулентности выполнена на основе метода контрольного объема. Для пространственной дискретизации использовалась противопоточная схема второго порядка. Кроме того, для уравнения энергии турбулентное число Прандтля определялось на основе аналитической модели Кейса – Кроуфорда [21]. В качестве рабочего тела использовался вязкий, теплопроводный, совершенный газ (воздух) с переменными теплофизическими свойствами.

Взаимодействие между основным потоком и пористой стенкой при наличии вдува/отсоса учитывалось при помощи модели источников (см. [20]): в первой пристеночной ячейке пористой трубки задавались источниковые члены для уравнений неразрывности, движения и энергии. В зависимости от рассматриваемого случая, массовый поток через пористую стенку определялся либо при помощи уравнения Дарси – Форхгеймера [22]:

$$\frac{p_{amb}^2 - p_{inn}^2}{\Delta d RT} = \alpha \mu \frac{d_{inn}}{\Delta d} \ln \frac{d_{out}}{d_{inn}} j_w + \beta \frac{d_{inn}}{d_{out}} j_w^2, \quad (3)$$

либо исходя из закона:

$$\bar{j}_w^0 = \frac{j_w}{(\rho u)_{\infty} |_{x=0}}, \quad (4)$$

где $j_w = (\rho u)_w$.

На входе в сопло задавались параметры торможения P_0^* и T_0^* , на выходе – атмосферное давление p_{amb} .

2. Результаты

При использовании разработанной выше модели были проведены две серии расчетов течения в канале с пористой стенкой ($d_h = 6.6$ мм, $L/d_h = 30$) для сопла $M_{is} = 3$ ($d_{cr} = 3.2$ мм) и температурой торможения в форкамере $T_0^* = 15$ °С.

Для первой серии расчетов массовый поток через стенку определялся перепадом давления $j_w = f(\Delta p)$, где $\Delta p = p_{inn} - p_{amb}$ при использовании соотношения (3). Вязкостный и инерционный коэффициенты рассчитывались на базе модели шаровой засыпки [23] при значениях пористости $\epsilon \approx 34\%$ и диаметра сферических частиц $d_p = 70$ мкм.

Давление и температура окружающей среды были приняты $p_{amb} = 1$ атм и $T_{amb} = 15$ °С соответственно. Давление в форкамере варьировалось в диапазоне $P_0^* = 20 \dots 100$ атм.

Для второй серии отсос производился по закону (4). Уровень отсоса варьировался в диапазоне $\bar{j}_w^0 = -0.05 \dots -5.00 \times 10^{-3}$. Расчеты выполнены для трех случаев давления торможения в форкамере $P_0^* = 9, 30$ и 50 атм. Минимальное давление торможения в форкамере $P_0^* = 9$ атм определялось исходя из того, что сверхзвуковое истечение будет происходить в атмосферу и в выходном сечении трубки реализуется прямой скачок уплотнения, после которого давление достигает уровня атмосферного (p_{amb}).

Поскольку экспериментальные данные для рассматриваемых условий отсутствуют, предварительно было проведено исследование модели на сеточную сходимость. Результаты в виде зависимостей (2) от количества ячеек сетки N показаны на рис. 5. Резкое изменение параметров при $N \approx 1.26 \times 10^5$ объясняется влиянием размера первой пристеночной ячейки, что является определяющим при выбранном методе моделирования вдува/отсоса (см. [20]). Закрашенными символами показана «основная» сетка.

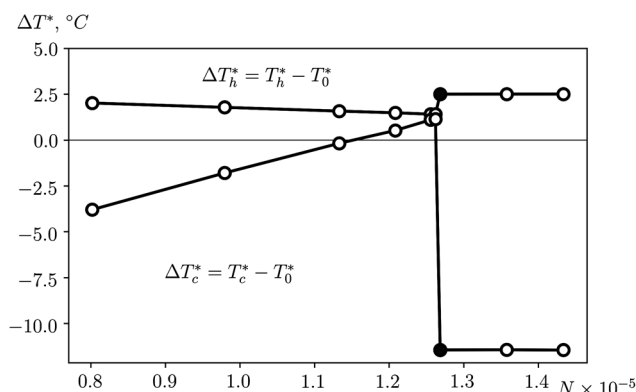


Рис. 5. Сеточная сходимость. $\bar{j}_w^0 = -1.5 \cdot 10^{-3}$, $P_0^* = 9$ атм, $T_0^* = 15^\circ\text{C}$

2.1. Локальные характеристики течения

Рассмотрим, как изменяются основные параметры течения вдоль оси канала. Для случая $j_w = f(\Delta p)$ при различных давлениях в форкамере на рис. 6 показано изменение относительного массового потока через стенку $\bar{j}_w = (\rho u)_w / (\rho u)_\infty$ (а), среднемассовой температуры торможения (б), среднемассового числа Маха (в) и температуры теплоизолированной стенки (г), то есть по сути, температуры отсасываемого газа. Из рисунка видно, что существуют значения P_0^* , достаточные для достижения расчетного числа Маха на выходе из сопла, но недостаточные для реализации отсоса по всей длине канала. На рис. 6, а для варианта $P_0^* = 30$ атм на начальном участке канала $x/d_h < 3.5$ наблюдается участок вдува $\bar{j}_w > 0$.

Как известно [24], отсос газа от сверхзвукового потока с одной стороны приводит к росту

числа Маха, а с другой – к росту коэффициента трения [25], т.е. к торможению потока. Как видно из рис. 6, в, при малых давлениях в форкамере, т.е. при малых значениях массового потока через стенку (см. рис. 6, а) трение преобладает и число Маха уменьшается по длине канала. По мере увеличения давления торможения в форкамере, а следовательно, массового потока через стенку, число Маха становится почти постоянным по длине канала, а далее наблюдается разгон потока.

При высоких давлениях в форкамере массовый поток через стенку \bar{j}_w становится настолько значительным, что наступает так называемый режим асимптотического отсоса [25]. Этот режим характеризуется автономностью основных параметров потока вдоль канала, а также тем, что коэффициент восстановления температуры стремится к единице $r \rightarrow 1$. Таким образом, в случае асимптотического отсоса, согласно (1), $T_{aw} \rightarrow T_0^*$, то есть энергоразделение стремится к нулю. На рис. 6, г показано, что при высоких давлениях в форкамере ($P_0^* = 80$ атм) на начальном участке канала $4 \leq x/d_h \leq 10$ наблюдается режим асимптотического отсоса ($T_{aw} \approx T_0^*$).

При смене закона расходного воздействия с (3) на (4) характеристики потока ведут себя схожим образом (рис. 7). Основное отличие наблюдается в изменении массового потока через стенку \bar{j}_w по длине канала (см. рис. 7, а) и, как следствие, изменении температуры теплоизолированной стенки (см. рис. 7, г). Стоит

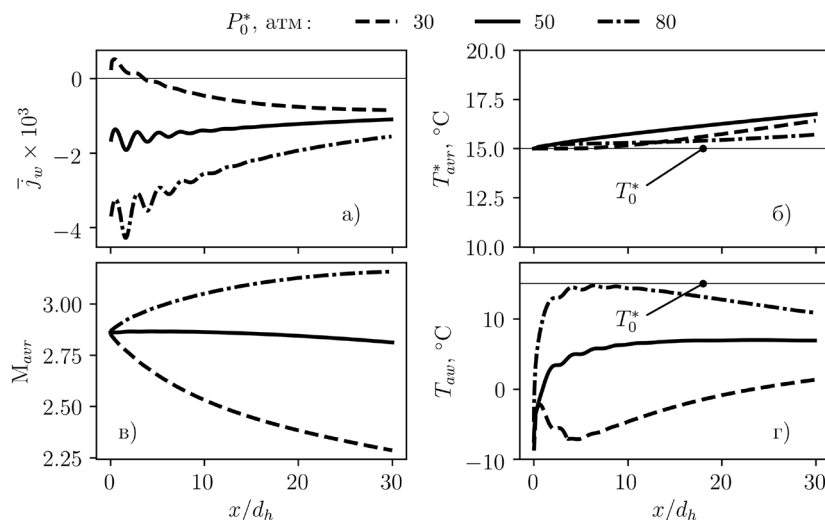


Рис. 6. Влияние давления торможения в форкамере P_0^* на основные параметры при течении воздуха в канале с проницаемыми стенками. $j_w = f(\Delta p)$, $T_0^* = 15^\circ\text{C}$

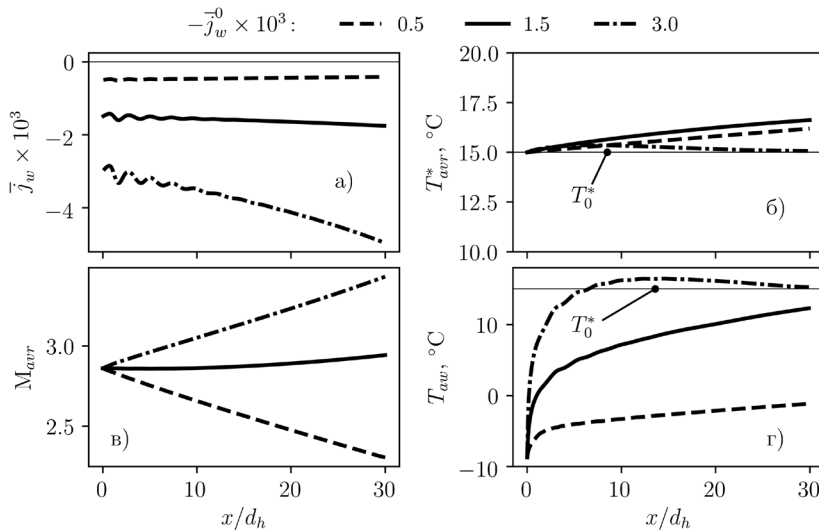


Рис. 7. Влияние уровня отсоса \bar{j}_w^0 на основные параметры при течении воздуха в канале с проницаемыми стенками. $\bar{j}_w^0 = \text{const}$, $P_0^* = 50$ атм, $T_0^* = 15^\circ\text{C}$

отметить, что в отличие от предыдущего случая при определенных значениях \bar{j}_w^0 асимптотический отсос реализуется в выходном сечении канала и распространяет вверх по потоку при увеличении уровня отсоса $|\bar{j}_w^0|$ (см. рис. 7, з).

2.2. Интегральные характеристики энергоразделения

Как уже отмечалось выше, энергоразделение принято характеризовать разницей температур торможения на выходах и входе устройства (2). Для сравнения различных вариантов расчетов рассмотрим изменение ΔT^* на выходах из устройства (см. рис. 2) в зависимости от соотношения расходов m_w/m_0 , где m_w – массовый расход через проницаемую стенку, m_0 – массовый расход в начальном сечении канала.

На рис. 8 показаны нагрев (ΔT_h^*) и охлаждение (ΔT_c^*) потока при различных законах рас-

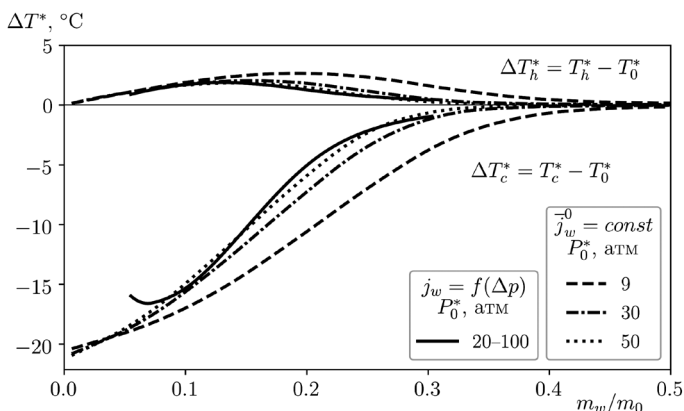


Рис. 8. Нагрев и охлаждение потока при течении в канале с проницаемыми стенками при различных законах расходного воздействия

ходного воздействия. Сплошная линия соответствует случаю, при котором массовая скорость через проницаемую стенку определяется из (3). Остальные кривые соответствуют закону расходного воздействия (4), но при различных начальных давлениях в форкамере P_0^* . Как видно, кривые имеют схожее поведение: максимум охлаждения при минимальном расходе через стенку m_w и минимальное охлаждение ($\Delta T_c^* \rightarrow 0$) при максимальном расходе через стенку. Такое изменение температуры торможения объясняется изменением коэффициента восстановления температуры при наличии отсоса газа.

Уменьшение охлаждения (ΔT_c^*) при малых значениях m_w/m_0 для случая $j_w = f(\Delta P)$ объясняется тем, что при малых давлениях в форкамере (малые значения m_w/m_0) не на всей длине канала реализуется отсос газа (см. рис. 6, а).

Как уже отмечалось, ближайшим аналогом рассматриваемого устройства энергоразделения является вихревая труба Ранка – Хилша. В работе [26] Хилш предложил оценивать эффективность вихревой трубы коэффициентом температурной эффективности η_T , который представляет собой отношение степени охлаждения ΔT_c^* , полученной в устройстве, к степени охлаждения при изэнтропийном расширении газа ΔT_{is}^* с исходными параметрами газа P_0^* и T_0^* до давления охлажденного потока P_c^* .

$$\eta_T = \frac{\Delta T_c^*}{\Delta T_{is}^*} = \frac{T_c^* - T_0^*}{T_0^* \left[1 - \left(\frac{P_c^*}{P_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (13)$$

Наряду с этим параметром эффективность устройств энергоразделения оценивается также с помощью адиабатного КПД η , характеризующего отношение фактической холодопроизводительности устройства к максимально возможному значению, достигаемому при идеальном расширении с потерей работы:

$$\eta = \mu_c \frac{\Delta T_c^*}{\Delta T_{is}^*} = \frac{\mu_c (T_c^* - T_0^*)}{T_0^* \left[1 - \left(\frac{P_c^*}{P_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (14)$$

$$\mu_c = \frac{m_w}{m_0}.$$

Воспользуемся соотношениями (13) и (14) для оценки эффективности устройства энерго-разделения с проницаемой стенкой. На рис. 9 показано изменение коэффициента температур-ной эффективности η_T и адиабатного КПД η в зависимости от отношения расходов μ_c при различных законах расходного воздействия. Как видно из рисунка, наибольшую эффективность демонстрирует вариант $\bar{j}_w^0 = \text{const}$ при мини-мальном давлении в форкамере $P_0^* = 9$ атм.

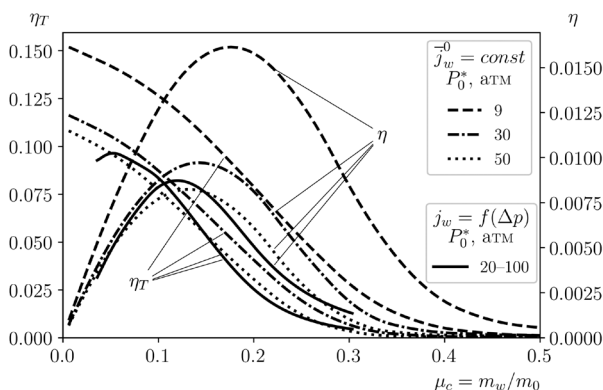


Рис. 9. Эффективность устройства энерго-разделения с проницаемыми стенками при различных законах расходного воздействия. $T_0^* = 15$ °С

Стоит отметить, что для лучших вихревых труб, согласно данным [27], $\eta_T \approx 0.7$ и $\eta \approx 0.32$.

Заключение

Рассмотрено устройство энерго-разделения с проницаемой стенкой при различных законах расходного воздействия. Проведено сравнение как локальных, так и интегральных характери-стик устройства.

Показано, что в случае использования урав-нения Дарси – Форхеймера для определения массового потока через стенку при высоком уровне давления в форкамере ($P_0^* > 80$ атм) асимптотический отсос реализуется в началь-ном сечении и смещается вниз по потоку, по мере увеличения давления в форкамере P_0^* .

При использовании же закона $\bar{j}_w^0 = \text{const}$, асимптотический отсос (при $\bar{j}_w^0 < -1.5 \times 10^{-3}$) реализуется в окрестности выходного сечения и смещается вверх по потоку, по мере увеличения интенсивности отсоса $|\bar{j}_w^0|$.

Показано, что наибольшие значения нагрева ($\Delta T_h^* \approx 3$ °С при $m_w / m_0 \approx 0.2$) и охлажде-ния ($\Delta T_c^* \approx -20$ °С при $m_w / m_0 \approx 0.005$) потока наблюдаются в случае использования закона $\bar{j}_w^0 = \text{const}$ при минимальном давлении в фор-камере $P_0^* = 9$ атм.

По аналогии с вихревой трубой Ранка – Хилша проанализирована эффективность рабо-ты устройства энерго-разделения с проницаемой стенкой. Наибольшую эффективность демон-стрирует вариант $\bar{j}_w^0 = \text{const}$ при минимальном давлении в форкамере $P_0^* = 9$ атм.

Список обозначений

- d – диаметр, м;
- j – плотность тока, кг/м²с;
- k – показатель адиабаты;
- L – длина, м;
- m – массовый расход, кг/с;
- N – количество элементов сетки;
- p – давление, атм;
- r – коэффициент восстановления температуры;
- R – газовая постоянная, Дж/кг К;
- T – температура, °С;
- u – скорость, м/с;
- x – продольная координата, м;
- y – поперечная координата, м;
- α – вязкостный коэффициент, м⁻²;
- β – инерционный коэффициент, м⁻¹;
- δ – толщина пограничного слоя, м;
- Δ – разница параметров;
- ε – пористость, %;
- η – коэффициент полезного действия;
- ρ – плотность, кг/м³;
- M – число Маха;
- P_r – число Прандтля.

Индексы

- 0 – параметры в начальном сечении;
- * – параметры торможения;
- ∞ – параметры, относящиеся к ядру потока;
- amb* – (*ambient*) параметры окружающей среды;
- avr* – (*average*) осредненные параметры;
- aw* – (*adiabatic wall*) теплоизолированная стенка;
- c* – (*cooling*) охлаждение;
- cr* – (*critical*) критический;
- h* – (*heating*) нагревание;
- inn* – (*inner*) внутренний;
- is* – (*isentropic*) изэнтропический;
- out* – (*outer*) наружный;
- T* – (*temperature*) температурный;
- w* – (*wall*) параметры на стенке.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Eckert E.R.G. Cross transport of energy in fluid streams. *Wärme- und Stoffübertragung*, 1987, vol. 21, no. 2–3, pp. 73–81. DOI: 10.1007/bf01377562
2. Ranque G.J. Experiences sur la detente giratoire avec productions simultanees d'un echappement d'air chaud et d'un echappement d'air froid. *Journal de physique et le radium*, 1933, no. 4(7), pp. 112–114.
3. Han B., Goldstein R.J. Instantaneous energy separation in a free jet – part II. Total temperature measurement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, vol. 46, no. 21, pp. 3983–3990. DOI: 10.1016/S0017-9310(03)00244-8
4. Sprenger H.S. Über thermische effekte bei resonanzrohren. *Mitteilungen aus dem Institut für Aerodynamik ETH*, 1954, vol. 21, pp. 18–35.
5. Eckert E., Weise W. Messungen der temperaturverteilung auf der oberfläche schnell angeströmter unbeheizter körper. *Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A*, 1942, vol. 13, no. 6, pp. 246–254. DOI: 10.1007/BF02585343
6. Алексюк А.И. Области пониженной полной энтальпии в ближнем следе за телом в потоке вязкого газа. *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2022. № 1. С. 69–80. DOI: 10.31857/s0568528122010017
7. Pohlhausen E. Der wärmeaustausch zwischen festen körpern und flüssigkeiten mit kleiner reibung und kleiner wärmeleitung. *ZAMM – Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1921, vol. 1, no. 2, pp. 115–121. DOI: 10.1002/zamm.19210010205
8. Леонтьев А.И. Температурная стратификация сверхзвукового газового потока // Доклады Академии наук. 1997. Т. 354. № 4. С. 475–477.
9. Вигдорович И.И., Леонтьев А.И. К теории энергоразделения потока сжимаемого газа. *Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа*. 2010. № 3. С. 103–109.
10. Leontiev A.I., Zditovets A.G., Vinogradov Y.A., Strongin M.M., Kiselev N.A. Experimental investigation of the machine-free method of temperature separation of air flows based on the energy separation effect in a compressible boundary layer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, vol. 88, pp. 202–219. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.05.021
11. Хазов Д.Е. Численное исследование безмашинного энергоразделения воздушного потока // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10. № 1–2. С. 25–36.
12. Makarov M.S., Makarova S.N. The influence of the supersonic nozzle length on the efficiency of energy separation of low-Prandtl gas flowing in the finned single Leontiev tube. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1675. 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/1675/1/012011
13. Вигдорович И.И., Леонтьев А.И. Энергоразделение газов с малыми и большими числами Прандтля // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2013. № 6. С. 117–134.
14. 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, no. 2, pp. 234–242. DOI: 10.1007/s10740-006-0029-8
15. Леонтьев А.И., Осипцов А.Н., Рыбдылова О.Д. Пограничный слой на плоской пластине в сверхзвуковом газ-капельном потоке. Влияние испаряющихся капель на температуру адиабатической стенки // Теплофизика высоких температур. 2015. № 6. С. 910–917. DOI: 10.7868/S0040364415060162
16. Голубкина И.В., Осипцов А.Н. Влияние примеси неиспаряющихся капель на структуру течения и температуру адиабатической стенки в сжимаемом двухфазном пограничном слое // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. 2019. № 3. С. 58–69. DOI: 10.1134/S0568528119030046
17. Здитовец А.Г. Экспериментальное исследование явления температурного разделения воздушного потока, истекающего через сверхзвуковое сопло, с центральным телом в виде пористой проницаемой трубки // Конкурс молодых ученых НИИ механики МГУ (13–15 октября 2010 г.): сборник трудов конференции. Москва, 2011. С. 128–136.
18. Leontiev A.I., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Y.A., Strongin M.M. Experimental investigation of energy (temperature) separation of a high-velocity air flow in a cylindrical channel with a permeable wall. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, vol. 105, pp. 206–215. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2019.04.002
19. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Макарова М.С. Температурная стратификация при отсосе пограничного слоя из сверхзвукового потока // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50. № 6. С. 793–798.
20. Khazov D.E., Leontiev A.I., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Yu.A. Energy separation in a channel with permeable wall. *Energy*. 2022. vol. 239, p. 122427. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122427
21. Kays W.M., Crawford M.E. Convective heat and mass transfer. McGraw-Hill Ryerson, Limited, 1980, 420 p.
22. Леонтьев А.И., Волчков Э.П., Лебедев В.П. Тепловая защита стенок плазмотронов. Низкотемпературная плазма. Т. 15. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 1995. 336 с.
23. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. Москва: Машиностроение, 1981. 247 с.
24. Вулис Л.А. Термодинамика газовых потоков. Москва: Ленинград: Госэнергоиздат, 1950. 304 с.
25. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 320 с.
26. Hilsch R. The use of the expansion of gases in a centrifugal field as cooling process. *Review of Scientific Instruments*, 1947, vol. 18, no. 2, pp. 108–113. DOI: 10.1063/1.1740893
27. Сулов А.Д., Иванов С.В., Мурашкин А.В., Чижиков Ю.В. Вихревые аппараты. Москва: Машиностроение, 1985. 256 с.

References

1. Eckert E.R.G. Cross transport of energy in fluid streams. *Wärme- und Stoffübertragung*, 1987, vol. 21, no. 2–3, pp. 73–81. DOI: 10.1007/bf01377562
2. Ranque G.J. Experiences sur la detente giratoire avec productions simultanees d'un echappement d'air chaud et d'un echappement d'air froid. *Journal de physique et le radium*, 1933, no. 4(7), pp. 112–114.
3. Han B., Goldstein R.J. Instantaneous energy separation in a free jet – part II. Total temperature measurement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2003, vol. 46, no. 21, pp. 3983–3990. DOI: 10.1016/S0017-9310(03)00244-8
4. Sprenger H.S. Über thermische effekte bei resonanzrohren. *Mitteilungen aus dem Institut für Aerodynamik ETH*, 1954, vol. 21, pp. 18–35.
5. Eckert E., Weise W. Messungen der temperaturverteilung auf der oberfläche schnell angeströmter unbeheizter körper.

- Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A*, 1942, vol. 13, no. 6, pp. 246–254. DOI: 10.1007/BF02585343
6. **Aleksyuk A.I.** Oblasti ponizhennoj polnoj ental'pii v blizhnem slede za telom v potoke vjazkogo gaza [Regions of reduced total enthalpy in the near wake of a body in a viscous gas flow]. *Izvestija Rossijskoj akademii nauk. Mehanika zhidkosti i gaza*, 2022, no 1, pp. 69–80. DOI: 10.31857/s0568528122010017
 7. **Pohlhausen E.** Der wärmeaustausch zwischen festen körpern und flüssigkeiten mit kleiner reibung und kleiner wärmeleitung. *ZAMM — Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, 1921, vol. 1, no. 2, pp. 115–121. (In Russ.). DOI: 10.1002/zamm.19210010205
 8. **Leont'ev A.I.** Temperature stratification of supersonic gas flow. *Doklady Akademii nauk*, 1997, vol. 42, no. 6, pp. 30–311.
 9. **Vigdorovich I.I., Leont'ev A.I.** Theory of the energy separation of a compressible gas flow. *Fluid Dynamics*, 2010, vol. 45, no. 3, pp. 434–440. DOI: 10.1134/S0015462810030105
 10. **Leontiev A.I., Zditovets A.G., Vinogradov Y.A., Strongin M.M., Kiselev N.A.** Experimental investigation of the machine-free method of temperature separation of air flows based on the energy separation effect in a compressible boundary layer. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, vol. 88, pp. 202–219. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.05.021
 11. **Khazov D.E.** Chislennoe issledovanie bezmashinnogo energorazdelenija vozdušnogo potoka [Numerical investigation of the nonmachine air stream energy separation]. *Thermal Processes in Engineering*, 2018, vol. 10, no. 1–2, pp. 25–36.
 12. **Makarov M.S., Makarova S.N.** The influence of the supersonic nozzle length on the efficiency of energy separation of low-Prandtl gas flowing in the finned single Leontiev tube. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1675. 012011. DOI: 10.1088/1742-6596/1675/1/012011
 13. **Vigdorovich I.I., Leont'ev A.I.** Energy separation of gases with low and high Prandtl numbers. *Fluid Dynamics*, 2013, vol. 48, no. 6, pp. 811–826. DOI: 10.1134/S0015462813060124
 14. **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, no. 2, pp. 234–242. DOI: 10.1007/s10740-006-0029-8
 15. **Leont'ev A.I., Osiptsov A.N., Rybdylova O.D.** The boundary layer on a flat plate in a supersonic-gas-droplet flow: Influence of evaporating droplets on the temperature of the adiabatic wall. *High Temperature*, 2015, vol. 53, no. 6, pp. 866–873. DOI: 10.1134/S0018151X15060164
 16. **Golubkina I.V., Osiptsov A.N.** The effect of admixture of non-evaporating droplets on the flow structure and adiabatic wall temperature in a compressible two-phase boundary layer. *Fluid Dynamics*, 2019, vol. 54, no. 3, pp. 349–360. DOI: 10.1134/S0015462819030042
 17. **Zditovets A.G.** Eksperimental'noe issledovanie javlenija temperaturnogo razdelenija vozdušnogo potoka, istekajushhego cherez sverhzvukovoe soplo, s central'nym telom v vide poristoj pronicaemoj trubki [Experimental study of the temperature separation of an air flow flowing through a supersonic nozzle with a central body in the form of a porous permeable tube]. *Konkurs molodykh uchenykh Nauchno-issledovatel'skogo instituta mekhaniki MGU (13–15 oktyabrya 2010): sbornik trudov konferentsii*. Moscow, 2011, pp. 128–136. (In Russ.)
 18. **Leontiev A.I., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Y.A., Strongin M.M.** Experimental investigation of energy (temperature) separation of a high-velocity air flow in a cylindrical channel with a permeable wall. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, vol. 105, pp. 206–215. (In Russ.). DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2019.04.002
 19. **Leont'ev A.I., Lushchik V.G., Makarova M.S.** Temperature Stratification under Suction of a Boundary Layer from a Supersonic Flow. *High Temperature*, 2012, vol. 50, no. 6, pp. 739–743. DOI: 10.1134/S0018151X12060065
 20. **Khazov D.E., Leontiev A.I., Zditovets A.G., Kiselev N.A., Vinogradov Yu.A.** Energy separation in a channel with permeable wall. *Energy*, 2022, vol. 239. 122427. DOI: 10.1016/j.energy.2021.122427.
 21. **Kays W.M., Crawford M.E.** Convective heat and mass transfer. McGraw-Hill Ryerson, Limited, 1980, 420 p.
 22. **Leontiev A.I., Volchkov E.P. and Lebedev V.P.** Teplovaja zashhita stenok plazmotronov. Nizkotemperaturnaja plazma [Thermal protection of plasmatron walls. Low-Temperature Plasma]. Vol. 15. Novosibirsk, Institute of Thermal Physics SO RAN, 1995, 336 p.
 23. **Belov S.V.** Poristye metally v mashinostroenii [Porous metals in mechanical engineering]. Moscow, Mashinostroenie, 1981, 247 p.
 24. **Vulis L.A.** Termodinamika gazovyh potokov [Thermodynamics of gas flows]. Moscow, Leningrad, Gosjenergoizdat, 1950, 304 p.
 25. **Kutateladze S.S., Leontiev A.I.** Heat transfer, mass transfer, and friction in turbulent boundary layers. New York, Hemisphere Publishing Corporation, 1990, 302 p.
 26. **Hilsch R.** The use of the expansion of gases in a centrifugal field as cooling process. *Review of Scientific Instruments*, 1947, vol. 18, no. 2, pp. 108–113, DOI: 10.1063/1.1740893
 27. **Suslov A.D., Ivanov S.V., Murashkin A.V., Chizhikov Ju.V.** Vihreavye apparaty [Vortex devices]. Moscow, Mashinostroenie, 1985, 256 p.

Статья поступила в редакцию 14.09.2022; одобрена после рецензирования 27.09.2022; принята к публикации 27.09.2022.

The article was submitted on 14.09.2022; approved after reviewing on 27.09.2022; accepted for publication on 27.09.2022.