

УДК 533.6.011.72

Экспериментальное исследование влияния ударных волн на эффект безмашинного энергоразделения газовых потоков

Попович С.С.^{1,*}

[*pss1@mail.ru](mailto:pss1@mail.ru)

¹НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

Представлены результаты экспериментального исследования устройства безмашинного энергоразделения (трубы Леонтьева) с поперечным оребрением сверхзвукового канала. Принцип действия устройства основан на взаимодействии через теплопроводную стенку дозвукового и сверхзвукового потоков газа. Эксперимент проводился на воздушном прототипе устройства при числах Маха в сверхзвуковом потоке 1.9 и 2.5, температурах торможения на входе в установку 40°C и 70°C, а также при прямоточной и противоточной схеме движения воздуха в доз-вуковом и сверхзвуковом каналах устройства. Ударные волны генерировались с помощью установки кольцевых ребер в сверхзвуковом канале. Исследования выполнены на экспериментальной базе НИИ механики МГУ.

Ключевые слова: безмашинное энергоразделение, ударная волна, коэффициент теплоотдачи, коэффициент восстановления температуры, адиабатная температура стенки, интенсификация теплообмена, число Маха

Введение

Безмашинное энергоразделение газовых потоков означает перераспределение полной энтальпии в потоке газа без совершения внешней работы и при отсутствии теплообмена с окружающей средой. Поток с температурой T_0^* , пройдя через устройство энергоразделения, разделяется на два потока с температурами $T_1^* > T_0^*$ и $T_2^* < T_0^*$ [1]. На данный момент создано множество разновидностей энергоразделяющих устройств, основанных на различных эффектах [2]. Среди них можно отметить вихревые трубы Ранка-Хилша, резонансные трубы Гартмана-Шпренгера, эжекция с отрицательным коэффициентом эжекции, устройство энергоразделения с фазовым переходом, пульсационные трубы, энергоразделение в потоках газа при обтекании различных преград и в свободно истекающей струе газа.

Отличительной особенностью аппаратов безмашинного энергоразделения является их простота, отсутствие движущихся частей, низкая инерционность, малый вес и надежность конструкций [3]. С другой стороны, им присущ и существенный недостаток, огра-

ничающий их применение в тепловых двигателях и установках – это высокие потери полного давления на выходе по холодному и горячему потокам.

Академиком Леонтьевым А.И. предложен метод безмашинного энергоразделения газового потока с сохранением полного давления одного из потоков на выходе [4]. Принцип действия устройства основан на известном газодинамическом эффекте [5]: температура адиабатной стенки, обтекаемой потоком сжимаемого газа, может существенно отличаться от температуры торможения потока за счет диссипативных процессов в пограничном слое. Актуальным также является поиск новых устройств энергоразделения более высокой эффективности, например, за счет комбинации несколько методов энергоразделения [6].

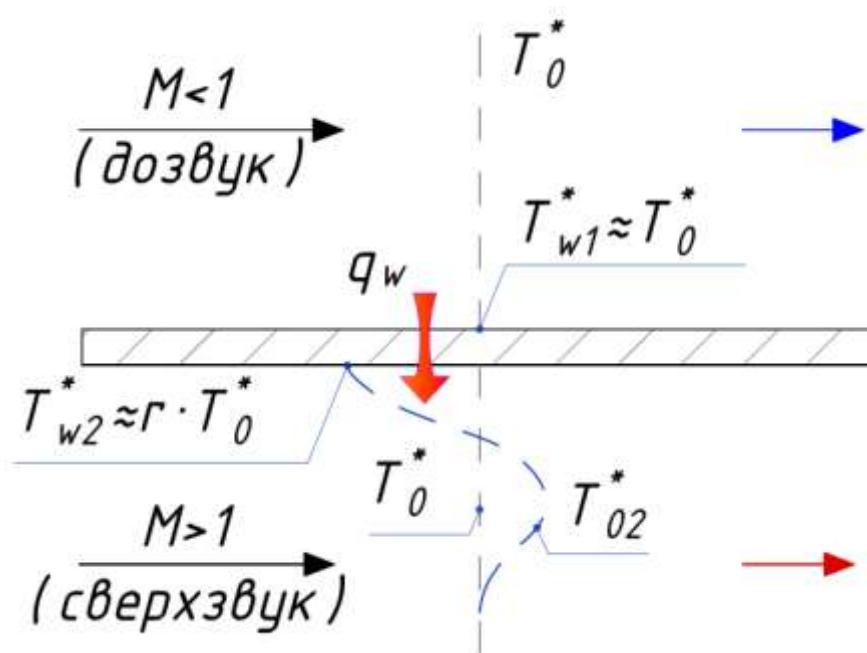


Рис. 1. Профили температуры торможения в пристенной области при до- и сверхзвуковом обтекании стенки потоком сжимаемого газа

Эффективность устройства безмашинного энергоразделения (трубы Леонтьева) определяется прежде всего количеством теплоты, передаваемой через разделяющую потоки стенку [7-9]. Удельный тепловой поток, в свою очередь, зависит от теплоотдачи со стороны сверхзвукового α_1 и дозвукового потоков α_2 (коэффициента теплопередачи K), начальной температуры торможения потока T_0^* и адиабатной температуры стенки T_w^* , обтекаемой сверхзвуковым потоком:

$$q = K(T_w^* - T_0^*) = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2} T_0^* (1 - r). \quad (1)$$

Адиабатная температура стенки в практике инженерных и научных расчётов определяется через коэффициент восстановления температуры r :

$$T_w^* = T_0^* \cdot \left(1 + r \cdot \frac{k-1}{2} \cdot M^2 \right). \quad (2)$$

$$r = \frac{T_w^* - T_0}{T_0^* - T_0}. \quad (3)$$

Как следует из (1) и (2), эффективность энергоразделения существенно образом зависит от коэффициентов восстановления температуры r и теплоотдачи α . Причем режим максимальной эффективности энергоразделения соответствует минимальному значению r и максимальному значению α . Коэффициент восстановления температуры зависит от многих факторов [10-12]: число Прандтля рабочего тела [13-15], вдув/отсос пограничного слоя [16, 17], форма и рельеф обтекаемой поверхности [18-20], воздействие скачков уплотнения [21, 22] и отрывных течений [23, 24].

Для повышения количества передаваемого тепла в устройстве необходимо уменьшить коэффициент восстановления, например, путем формирования поверхностей особой формы с пониженной адиабатной температурой стенки [18, 25]. Теоретические расчеты [26, 27] также показывают перспективность существенного повышения эффективности энергоразделения за счет использования рабочих тел с низким числом Прандтля [13, 14]. Примерами таких рабочих тел являются смеси легких и тяжелых газов: водород-аргон, гелий-аргон, водород-ксенон, гелий-ксенон.

Другим направлением повышения эффективности энергоразделения является увеличение наименьшего из коэффициентов теплоотдачи (1), в данном случае – со стороны сверхзвукового канала устройства. Интенсификация теплоотдачи в сверхзвуковых потоках пока не является объектом пристального внимания исследователей, в отличие от дозвуковых потоков [19, 20]. Объясняется это тем фактом, что любое внесение конструктивных изменений в сверхзвуковой канал с целью интенсификации теплоотдачи сопровождается образованием ударных волн и локальных отрывных зон. Однако, в области отрыва турбулентного пограничного слоя наблюдается значительное увеличение теплового потока через стенку [28]. Этот эффект может способствовать интенсификации теплообмена в устройстве энергоразделения. При этом необходимо также учитывать влияние локального отрыва пограничного слоя в канале на изменение коэффициента восстановления температуры, который наряду с коэффициентом теплоотдачи, в конечном итоге определяет эффективность устройства. Сопутствующие потери полного давления в канале из-за образующейся системы ударных волн нивелируется необходимостью практического получения на выходе из устройства энергоразделения подогретого газа с одновременным редуцированием его давления [29, 30].

Данная работа посвящена экспериментальному исследованию влияния искусственно генерируемых ударных волн на эффект энергоразделения в трубе Леонтьева.

1. Описание экспериментального стенда и методики проведения исследования

Экспериментальные исследования проводились на стенде с прототипом устройства безмашинного энергоразделения, созданном сотрудниками НИИ механики МГУ Здитовцом А.Г., Виноградовым Ю.А. и Стронгиным М.М. [31, 32]. Длина рабочей части уста-

новки – 700 мм. Измеренное число Маха на входе в рабочий участок сверхзвукового канала составляло 1.9 (критический диаметр сопла $D_{кр}=4,6$ мм) и 2.5 ($D_{кр}=3,7$ мм). Сверхзвуковой канал – конический с углом раскрытия 1.2° , начальный диаметр – 6 мм. Температура в форкамере установки и на входе в дозвуковой канал поддерживалась одинаковой (40°C и 70°C). Давление торможения 12 атм при работе с соплом $M=1.9$ и 16.9 атм при $M=2.5$. Расход воздуха через дозвуковой канал варьировался относительно расхода по сверхзвуковому каналу в диапазоне от 0 до 0.9. Материал разделяющей потоки стенки – латунь. Конические ребра (генераторы ударных волн) устанавливались в сверхзвуковом канале на длине 100, 200 и 300 мм от среза сопла. Ширина каждой вставки – 1 мм. Угол полураствора вставки – 22° – соответствовал геометрии предыдущих исследований [21].

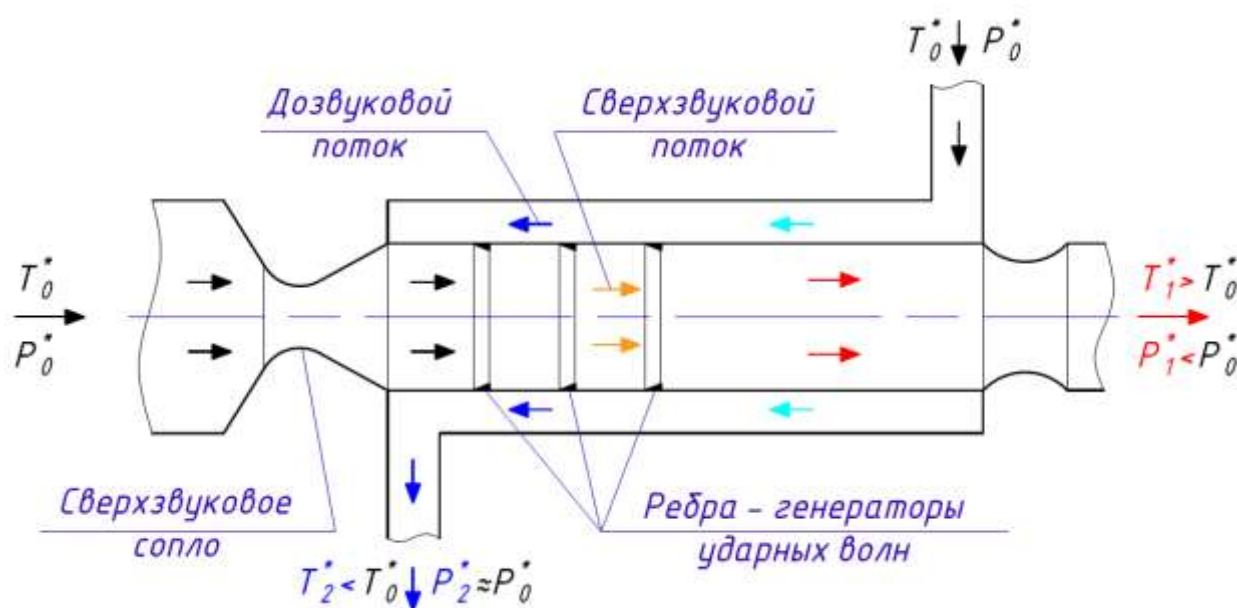


Рис. 2. Схема экспериментального исследования трубы Леонтьева противоточной компоновки с генераторами ударных волн в сверхзвуковом канале

Исследовались две конфигурации устройства: «гладкая стенка» – режим безотрывного течения в сверхзвуковом канале, «ударная волна» – установка ребер в сверхзвуковом канале устройства. Также исследовались режимы одинаково направленного движения дозвукового и сверхзвукового потоков («прямоток») и разнонаправленные движения потоков («противоток»).

На первом этапе исследований измерялось распределение статического давления и температуры стенки (с помощью тепловизора Flir ThermoCam SC3000) сверхзвукового канала устройства при отсутствии дозвукового потока. Сначала проводился эксперимент с гладким каналом, после чего по длине сверхзвукового канала устанавливалось 3 конических ребра (рис. 2) на расстоянии 100, 200 и 300 мм от среза сопла.

На следующем этапе по дозвуковому каналу запускался поток воздуха и измерялся суммарный эффект энергоразделения по показаниям термопар на входе и выходе из соот-

ветствующих каналов устройства. Эффект нагрева сверхзвукового потока (4) определялся по разности между среднemasсовой температурой в выходном ресивере T_1^* и температурой торможения в форкамере установки T_0^* (рис. 2). Охлаждение дозвукового потока (5) определялось также по разности между полной температурой на входе T_0^* и среднemasсовой температурой на выходе из канала T_2^* . Расход воздуха по дозвуковому каналу G_1 при этом варьировался и составлял от 10% до 90% относительно неизменного для данного числа Маха расхода по сверхзвуковому каналу G_2 .

$$\Delta T_{\text{нагрев}}^* = T_1^* - T_0^* . \quad (4)$$

$$\Delta T_{\text{охл}}^* = T_0^* - T_2^* . \quad (5)$$

2. Результаты экспериментального исследования

На графике (рис. 3) отчетливо видно влияние установленных ребер на динамические характеристики сверхзвукового потока. Оно заключается в увеличении статического давления за местом установки ребра, начиная с расстояния 100 мм от среза сопла. Несмотря на установленные ребра за счет расширения сверхзвукового канала компенсируется потеря скорости потока. Таким образом, с помощью геометрического воздействия можно добиться сохранения разности скоростей между сверхзвуковым и дозвуковым потоками.

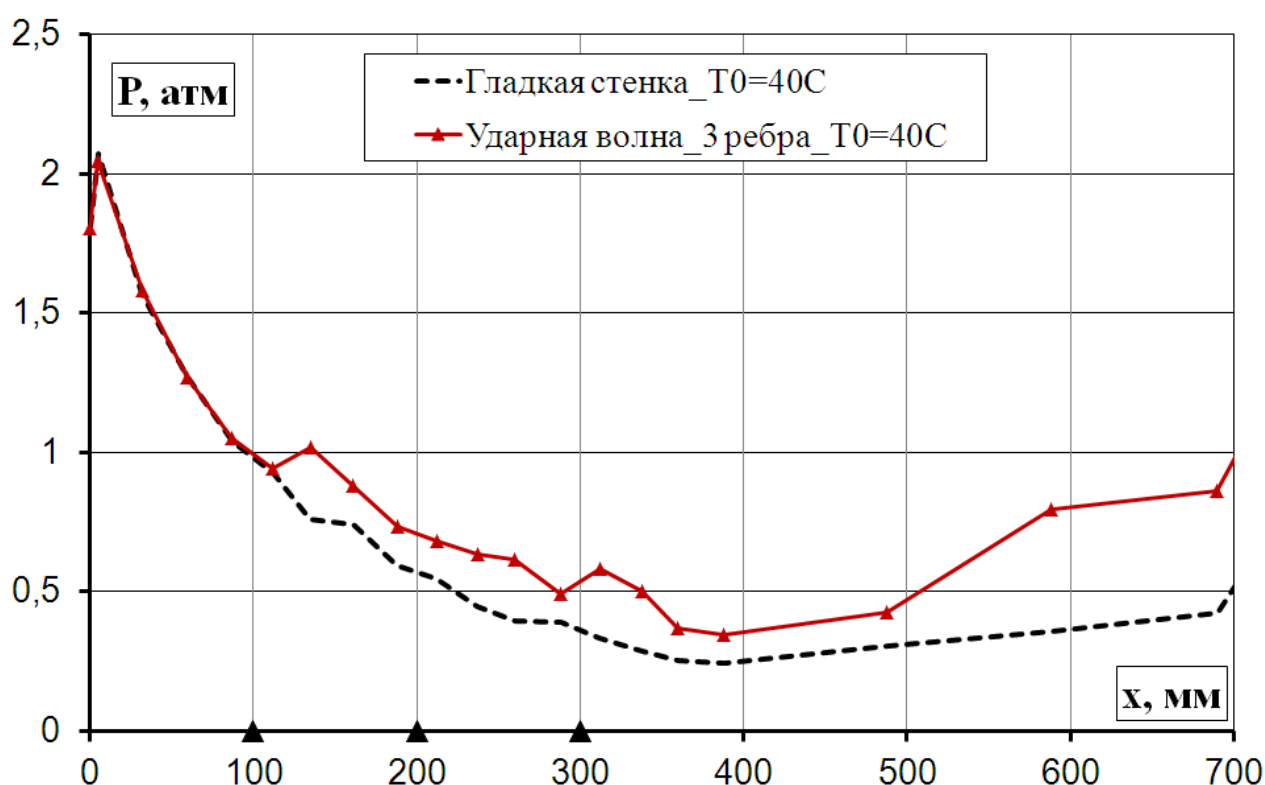


Рис. 3. Распределение статического давления по длине сверхзвукового канала устройства энергоразделения для двух конфигураций: «гладкая стенка» (безотрывное обтекание) и «ударная волна» (канал с тремя ребрами по длине)

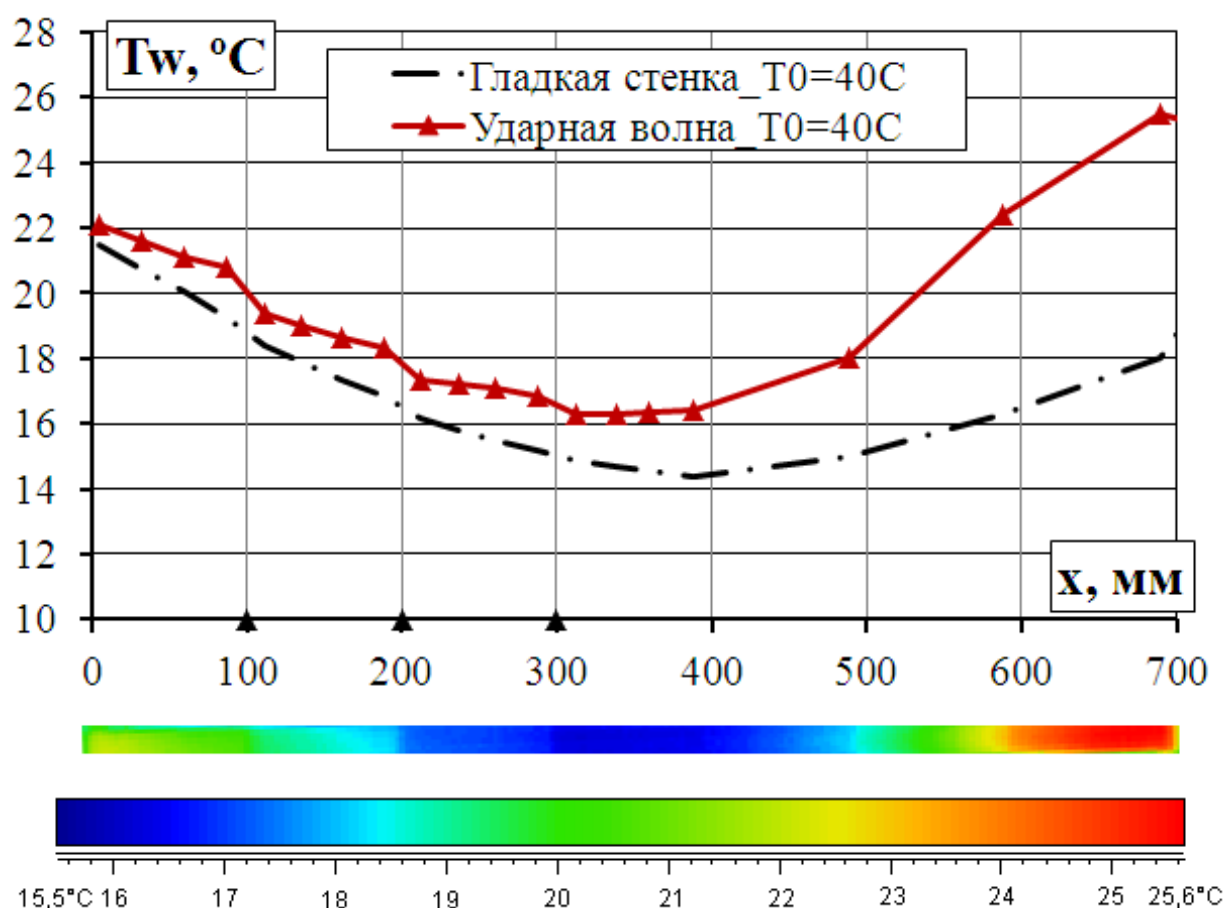


Рис. 4. Распределение температуры наружной стенки (получено с помощью тепловизора) сверхзвукового канала устройства энергоразделения для двух конфигураций устройства: «гладкая стенка» (безотрывное обтекание) и «ударная волна» (канал с тремя ребрами по длине)

С помощью тепловизора фиксировалось температурное поле наружной стенки сверхзвукового канала. Ее можно принять равной температуре адиабатной стенки при обтекании сверхзвуковым потоком внутренней стенки канала. Это допущение правомерно, поскольку теплопроводность латуни достаточно велика, а с наружной стороны канала температура стенки изменяется только за счет естественной конвекции. Коэффициент теплоотдачи, соответственно, с наружной стороны канала достаточно мал. Как видно из графика (рис. 4), установка ребер по длине канала увеличивает адиабатную температуру стенки, уменьшая, таким образом, потенциал охлаждения дозвукового потока в устройстве энергоразделения. Однако суммарный эффект безмашинного энергоразделения зависит также от интенсивности теплопередачи через разделяющую потоки стенку.

Основной гипотезой исследования было то, что в области взаимодействия ударной волны с пограничным слоем коэффициент теплоотдачи возрастет многократно при незначительном увеличении адиабатной температуры стенки (коэффициента восстановления температуры). Об этом свидетельствовали данные предыдущих исследований по влиянию

скачков уплотнения и отрывного течения за ребром на коэффициент восстановления температуры в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа [22-24].

Данные по нагреву сверхзвукового и охлаждению дозвукового потоков в трубе Леонтьева в зависимости от соотношения расходов представлены на рис. 5-6. Режим протекания работы устройства энергоразделения с ребрами в сверхзвуковом канале оказывается эффективнее, чем прямотек. В то же время генерация ударных волн за счет оребрения канала практически не привела к изменению уровня охлаждения дозвукового потока (рис. 6), при этом несколько уменьшив нагрев сверхзвукового потока (рис. 5). Этот эффект можно объяснить уменьшением теплового потока через стенку в конце рабочего участка. Как следует из рис. 4, температура стенки сверхзвукового канала на длине от 400 до 700 мм значительно увеличивается из-за уменьшения скорости потока (рис. 3). Предпочтительной является конструкция полностью расширяющегося канала, однако из-за технических ограничений на стенде пока не удастся реализовать данную конфигурацию. Если исключить неэффективно работающую выходную часть устройства, то с помощью оребрения в сверхзвуковом канале можно добиться уменьшения длины устройства энергоразделения при сохранении того же температурного перепада на выходе.

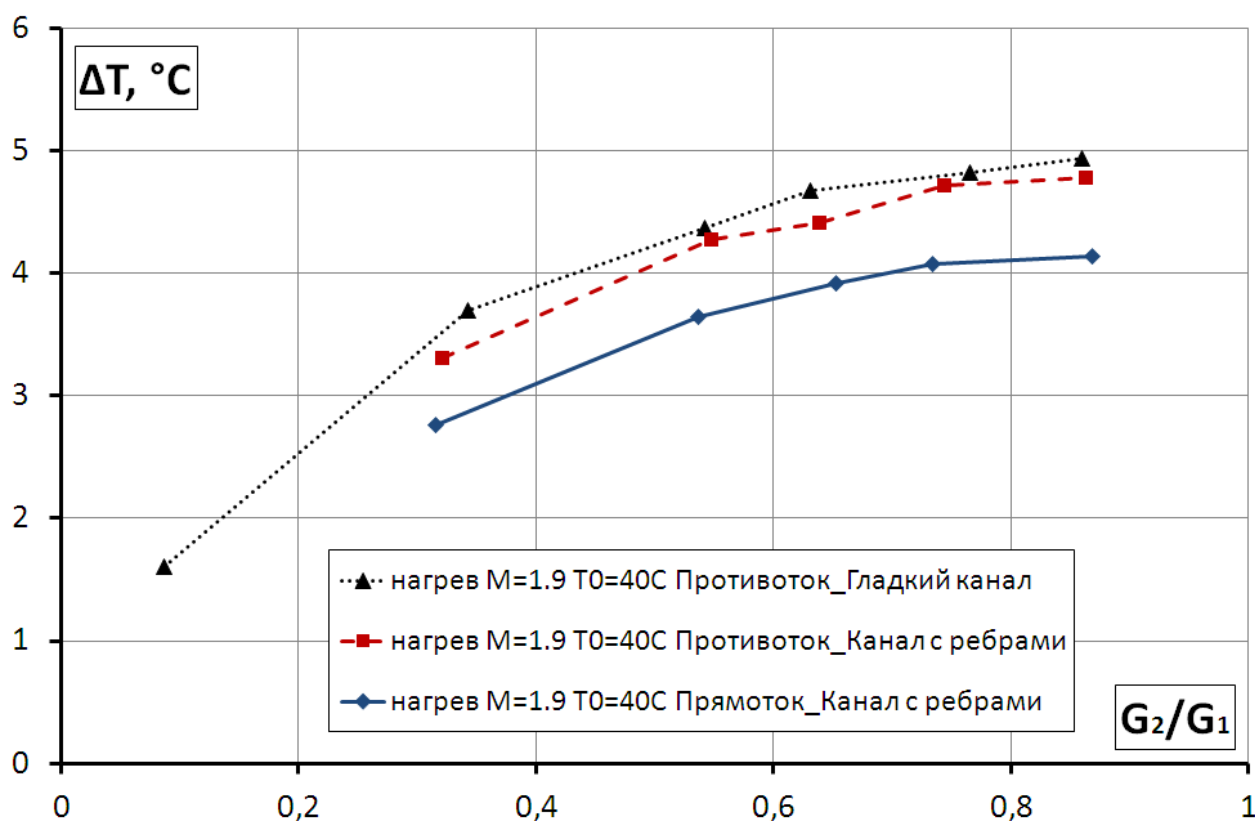


Рис. 5. Нагрев сверхзвукового потока на выходе из устройства энергоразделения в зависимости от относительного расхода по сверхзвуковому каналу при числе Маха на срезе сопла 1.9 для трех конфигураций устройства: «протекоток_гладкий канал», «протекоток_канал с ребрами», «прямотек_канал с ребрами»

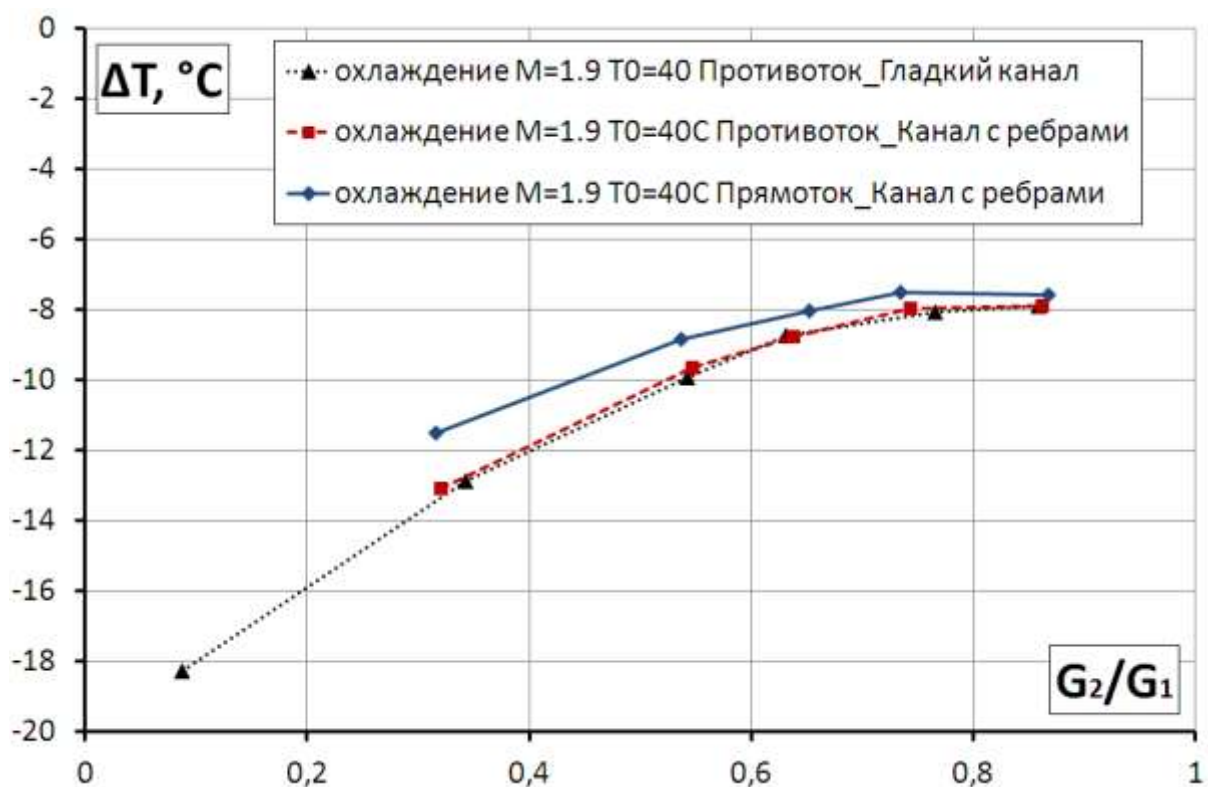


Рис. 6. Охлаждение дозвукового потока на выходе из устройства энергоразделения в зависимости от относительного расхода по сверхзвуковому каналу при числе Маха на срезе сопла 1.9 для трех конфигураций устройства: «противоток_гладкий канал», «противоток_канал с ребрами», «прямоток_канал с ребрами»

С одной стороны, такой результат свидетельствует о том, что ударные волны, возникающие в сверхзвуковом канале, не оказывают негативного воздействия на эффект безмашинного энергоразделения. Этот факт может способствовать более активному внедрению устройства в промышленности, поскольку существенно снижается риск потери работоспособности устройства в случае непредвиденного возникновения ударных волн в сверхзвуковом потоке. С другой стороны, отсутствие положительного эффекта можно объяснить недостаточным уровнем интенсификации теплоотдачи: искусственно генерируемые ударные волны при пересечении в центральной части канала ослабевают и при достижении пограничного слоя не вызывают его отрыва. Возможным направлением дальнейших исследований является установка конических генераторов ударных волн в центральной части канала. Такая конфигурация позволит избежать их пересечения и добиться более существенной интенсификации теплоотдачи в области взаимодействия волны сжатия с пограничным слоем.

В рамках эксперимента также проведено сравнение режима работы оребренного устройства энергоразделения с разными соплами, обеспечивающими числа Маха на срезе

сопла 1.9 и 2.5 (рис. 7). В работах [33, 34] отмечается существование оптимальной приведенной скорости сверхзвукового потока рабочего тела с точки зрения увеличения количества теплоты, которое возможно передать от дозвукового потока к сверхзвуковому. С одной стороны, с увеличением скорости повышается температурный напор, с другой стороны – начинает уменьшаться коэффициент теплоотдачи со стороны сверхзвукового потока. Как следует из рис. 7, с увеличением числа Маха в сверхзвуковом потоке наблюдается тенденция к повышению энергоразделения на выходе из устройства.

Согласно формуле (1), с увеличением температуры торможения потока эффект энергоразделения также должен повышаться. В рамках исследования оребренного устройства было выполнено сравнение двух режимов работы с начальными температурами 40°C и 70°C. Из графика (рис. 8) видно, что повышение температуры прежде всего влияет на степень охлаждения дозвукового потока. Во всем исследованном диапазоне относительного расхода сверхзвукового потока (0,3-0,87), увеличение эффекта энергоразделения составило до 20%.

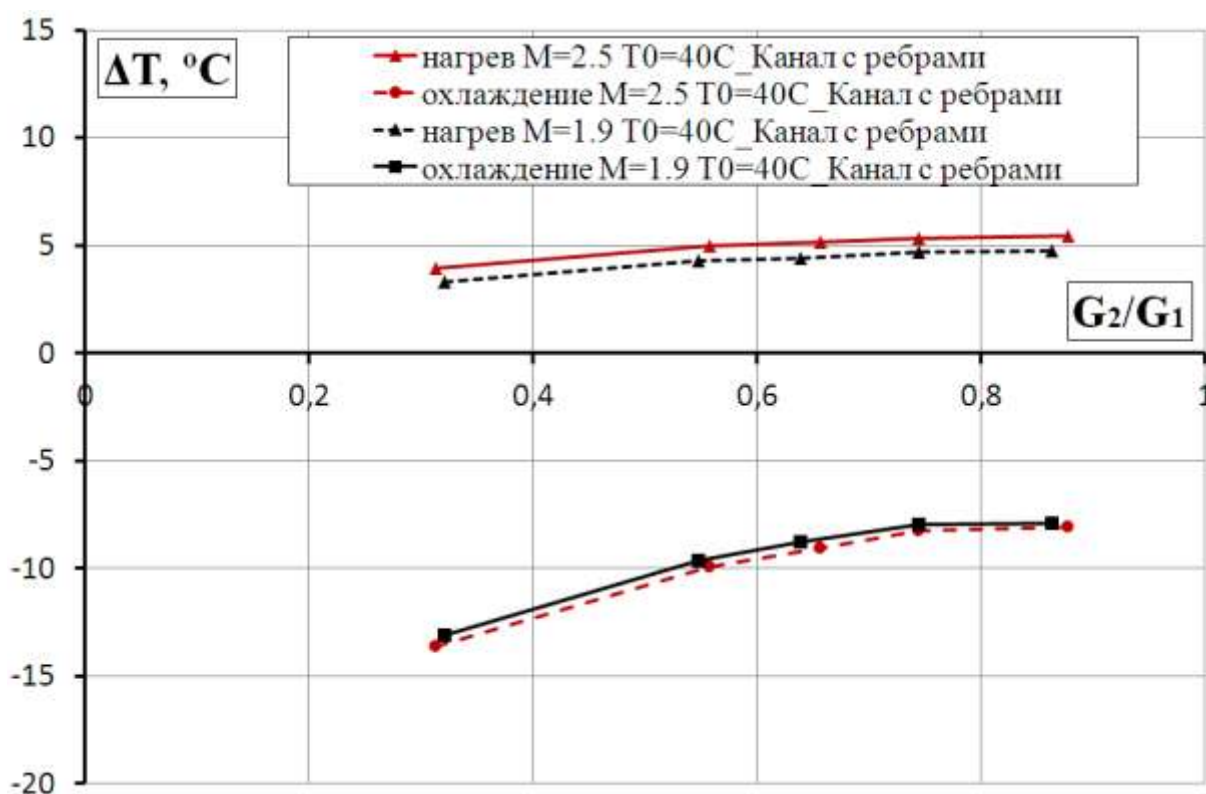


Рис. 7. Нагрев сверхзвукового потока и охлаждение дозвукового потока в устройстве энергоразделения с ребрами в сверхзвуковом канале в зависимости от относительного расхода сверхзвукового потока при числах Маха на срезе сопла 1.9 и 2.5

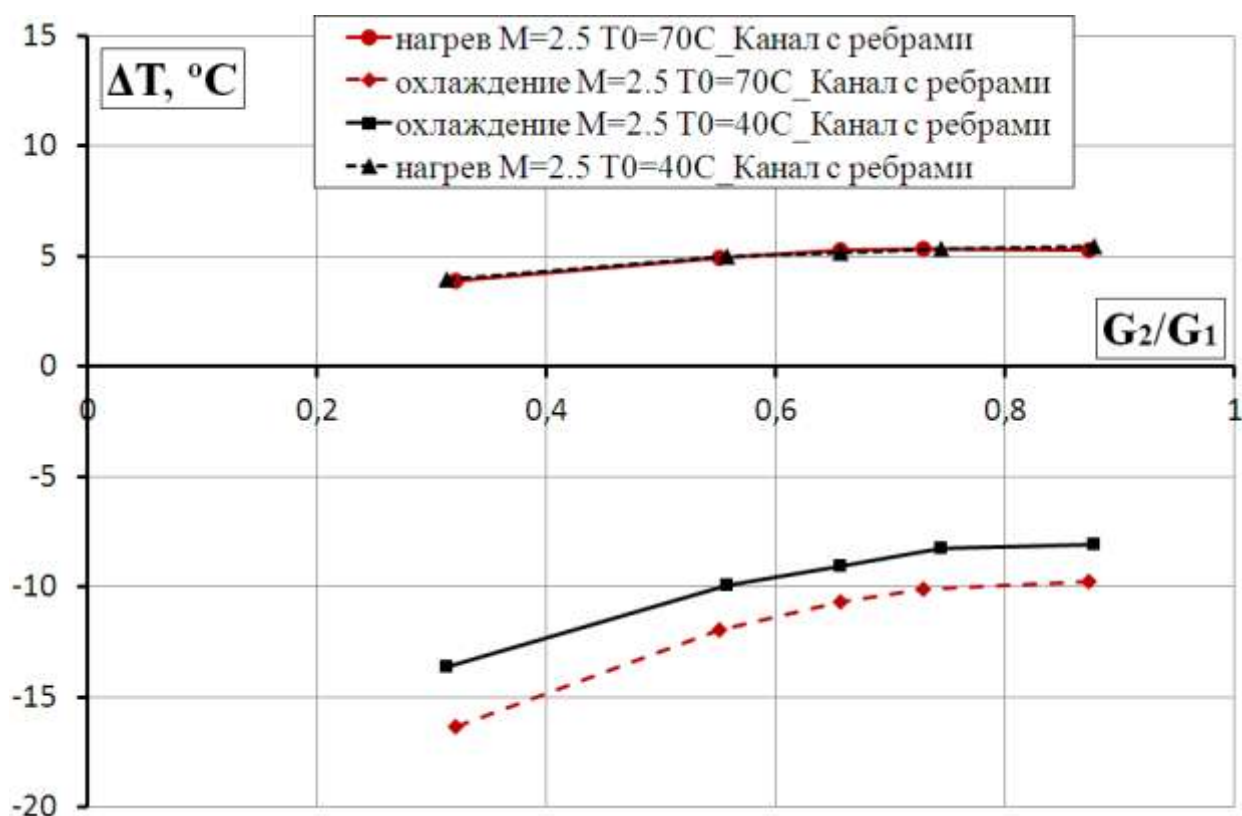


Рис. 8. Нагрев сверхзвукового потока и охлаждение дозвукового потока в устройстве энергоразделения с ребрами в сверхзвуковом канале в зависимости относительного расхода сверхзвукового потока при числе Маха на срезе сопла 2.5 и начальных температурах торможения 40°C и 70°C

Заключение

Представлены результаты экспериментального исследования влияния искусственно генерируемых ударных волн на эффективность процесса безмашинного энергоразделения в трубе Леонтьева. Ударные волны генерировались с помощью кольцевых ребер, установленных в сверхзвуковом канале устройства. Эффекты энергоразделения на выходе из устройства сравнивались с данными, полученными при работе установки без генераторов при одинаковых начальных параметрах газового потока. Результаты свидетельствуют о том, что ударные волны, возникающие в сверхзвуковом канале, не оказывают негативного воздействия на эффект безмашинного энергоразделения. Этот факт может способствовать более активному внедрению устройства в промышленности, поскольку существенно снижается риск потери работоспособности устройства в случае непредвиденного возникновения ударных волн в сверхзвуковом потоке. В рамках эксперимента получено, что режим противотока работы исследуемого устройства оказывается эффективнее, чем при прямом токе. Эффект энергоразделения также оказывается выше при изменении числа Маха в сверхзвуковом потоке с 1.9 на 2.5 и при увеличении температуры торможения от 40°C до 70°C. Предложено объяснение результатов и обосновано направление дальнейших исследований.

Работа выполняется за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-19-00699).

Список литературы

1. Eckert E.R.G. Energy separation in fluid streams // International Communications in Heat and Mass Transfer. 1986. Vol. 13, iss. 2. P. 127-143. DOI: [10.1016/0735-1933\(86\)90053-9](https://doi.org/10.1016/0735-1933(86)90053-9)
2. Леонтьев А.И. Газодинамические методы температурной стратификации (обзор) // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2002. № 4. С. 6-26.
3. Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Исследование влияния диссипативных эффектов на температурную стратификацию в потоках газа (обзор) // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, вып. 2. С. 310-322. DOI: [10.7868/S0040364413060069](https://doi.org/10.7868/S0040364413060069)
4. Леонтьев А.И. Способ температурной стратификации газа и устройство для его осуществления (труба Леонтьева): пат. 2106581 Российская Федерация. 1998. Бюл. № 7. 5 с.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя: пер. с англ. М.: Наука, 1974. 711 с.
6. Леонтьев А.И., Бурцев С.А. Устройство вихревого газодинамического энергоразделения // Доклады академии наук. 2015. Т. 464, № 6. С. 679-681. DOI: [10.7868/S0869565215300106](https://doi.org/10.7868/S0869565215300106)
7. Макаров М.С., Макарова С.Н. Эффективность энергоразделения при течении сжимаемого газа в плоском канале // Теплофизика и аэромеханика. 2013. № 6. С. 777-787.
8. Бурцев С.А. Исследование путей повышения эффективности газодинамического энергоразделения // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, вып. 1. С. 14-21. DOI: [10.7868/S0040364414010062](https://doi.org/10.7868/S0040364414010062)
9. Волчков Э.П., Макаров М.С. Газодинамическая температурная стратификация в сверхзвуковом потоке // Известия РАН. Энергетика. 2006. № 2. С. 19-31.
10. 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. Электрон. журн. 2004. № 11. DOI: [10.7463/1104.0551021](https://doi.org/10.7463/1104.0551021)
11. Здитовец А.Г. Изучение влияния формы поверхности и критерия Прандтля на температуру теплоизолированного тела, обтекаемого сверхзвуковым потоком газа: дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 108 с.
12. Макаров М.С. Газодинамическая температурная стратификация в сверхзвуковых потоках: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 2007. 154 с.
13. Вигдорович И.И., Леонтьев А.И. Энергоразделение газов с малыми и большими числами Прандтля // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2013. № 6. С. 117-134.
14. 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. DOI: [10.7463/1015.0814490](https://doi.org/10.7463/1015.0814490)
15. 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. DOI: [10.7463/0514.0710811](https://doi.org/10.7463/0514.0710811)
16. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Якубенко А.Е. Влияние вдува (отсоса) на энергоразделение потоков сжимаемого газа // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2011. № 6. С. 110-117.
17. Леонтьев А.И., Лущик В.Г., Макарова М.С. Температурная стратификация при отсосе пограничного слоя из сверхзвукового потока // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, вып. 6. С. 793-798.
18. 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. Режим доступа: http://istina.msu.ru/media/publications/article/401/bd9/7485545/2007_-Izvestiya_AN_Energetika_-_Sterzhni.pdf (дата обращения 01.02.2016).
19. Бурцев С.А., Виноградов Ю.А., Киселев Н.А., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик поверхностей с коридорным расположением лунок // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 5. С. 348-369. DOI: [10.7463/0515.0776160](https://doi.org/10.7463/0515.0776160)
20. Бурцев С.А., Васильев В.К., Виноградов Ю.А., Киселев Н.А., Титов А.А. Экспериментальное исследование характеристик поверхностей, покрытых регулярным рельефом // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. № 1. С. 263-290. DOI: [10.7463/0113.0532996](https://doi.org/10.7463/0113.0532996)
21. Попович С.С. Экспериментальное исследование влияния падающего скачка уплотнения на адиабатную температуру стенки в сверхзвуковом потоке сжимаемого газа // Тепловые процессы в технике. 2014. № 3. С. 98-104.
22. Попович С.С., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование влияния отрывного сверхзвукового течения на температуру теплоизолированной стенки // Труды шестой российской национальной конференции по теплообмену. М.: Из-во МЭИ, 2014. С. 262-265.
23. Попович С.С., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование возможности интенсификации теплообмена в устройстве безмашинного энергоразделения потоков // Вестник СГАУ. 2015. Т. 14, № 2. С. 159-169. DOI: [10.18287/2412-7329-2015-14-2-159-169](https://doi.org/10.18287/2412-7329-2015-14-2-159-169)
24. Попович С.С., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование возможностей интенсификации теплообмена в устройстве газодинамической температурной стратификации // XI Всероссийский съезд по фундаментальным

- проблемам теоретической и прикладной механики: сб. докл. Казань, 2015. С. 3089-3091.
25. 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. Механика жидкости и газа. 2013. № 5. С. 134-145.
26. Бурцев С.А. Методика расчета устройств газодинамической температурной стратификации при течении реального газа // Тепловые процессы в технике. 2013. № 9. С. 386-390.
27. Вигдорович И.И., Леонтьев А.И. К теории энергоразделения потока сжимаемого газа // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2010. № 3. С. 103-109.
28. Боровой В.Я. Течение газа и теплообмен в зонах взаимодействия ударных волн с пограничным слоем. М.: Машиностроение, 1983. 144 с.
29. Бурцев С.А. Исследование устройства температурной стратификации при работе на природном газе // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2004. № 9. DOI: [10.7463/0904.0516097](https://doi.org/10.7463/0904.0516097)
30. 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. DOI: [10.7463/0505.0529473](https://doi.org/10.7463/0505.0529473)
31. Здитовец А.Г., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М. Экспериментальное исследование безмашинного энергоразделения воздушных потоков в трубе Леонтьева // Тепловые процессы в технике. 2015. № 9. С. 397-404.
32. Здитовец А.Г., Виноградов Ю.А., Стронгин М.М. Газодинамический метод энергоразделения воздушного потока (экспериментальные результаты) // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сб. докл. Казань, 2015. С. 1476-1478.
33. Бурцев С.А. Оптимизация геометрии сверхзвукового канала в устройстве для энергоразделения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 1999. № 2 (35). С. 48-54.
34. Бурцев С.А., Леонтьев А.И. Температурная стратификация в сверхзвуковом потоке газа // Известия РАН. Энергетика. 2000. № 5. С. 101-113. Режим доступа: http://istina.msu.ru/media/publications/article/e41/112/8687914/2000_Izvestiya_AN_Energetika_N_5_-_Temperaturnaya_statifikatsiya.pdf (дата обращения 01.02.2016).

Experimental Research of Machineless Energy Separation Effect Influenced by Shock Waves

S.S. Popovich^{1,*}

[*pss1@mail.ru](mailto:pss1@mail.ru)

¹Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia

Keywords: energy separation, shock wave, heat transfer coefficient, temperature recovery factor, adiabatic wall temperature, heat transfer augmentation, Mach number

The paper presents experimental research results of machineless energy separation effect with transversal ribs in supersonic channel. The energy separation effect assumes a physical division of the inlet flow into two or more flows, each having different stagnation temperature. Among well-known energy separation effects noted there are Ranque-Hilsch vortex tubes, Hartmann-Sprenger resonance tubes, pulsating tubes and some others.

A working principle of device under study is based on thermal interaction between subsonic and supersonic gas flows through a heat-conducting division wall. This energy separation method was proposed by academician Leontiev and was patented in 1998. A number of references for PhD theses, articles, and conference proceedings devoted to the research of “Leontiev tube” have been mentioned in the paper. Efficiency factors for energy separation device performability have been analyzed in detail. The main attention was focused on the phenomenon of shock waves generation in supersonic channel of Leontiev tube.

Experiment was carried out in the air prototype of energy separation device with supersonic flow Mach numbers 1.9 and 2.5, stagnation temperatures 40°C and 70°C, and for uni-flow and counter-flow air moving direction in subsonic and supersonic channels. Shock waves have been generated by means of circular ribs in supersonic channel of energy separation device. The research was carried out by means of infrared thermal imaging, thermocouples, total and static pressure probes, and modern National Instruments automation equipment. The work shows that shock waves have no negative influence on energy separation effect. A conclusion is made that unexpected shock wave generation in supersonic channel will not cause operability loss. It was gained that counter-flow regime is more efficient than uni-flow. Energy separation effect also appears to be higher with the rise of Mach number and flow initial stagnation temperature. The explanation of the results has been suggested and future research directions have been grounded.

References

1. Eckert E.R.G. Energy separation in fluid streams. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1986, vol. 13, iss. 2, pp. 127-143. DOI: [10.1016/0735-1933\(86\)90053-9](https://doi.org/10.1016/0735-1933(86)90053-9)

2. Leont'ev A.I. Gas-Dynamic Methods Of Temperature Stratification (a Review). *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2002, no. 4, pp. 6-26. (English version of journal: *Fluid Dynamics*, 2002, vol. 37, iss. 4, pp. 512-529. DOI: [10.1023/A:1020629000437](https://doi.org/10.1023/A:1020629000437)).
3. Burtsev S.A., Leont'ev A.I. Study of the influence of dissipative effects on the temperature stratification in gas flows (Review). *Teplofizika Vysokikh Temperatur*, 2014, vol. 52, iss. 2, pp. 310-322. (English version of journal: *High Temperature*, 2014, vol. 52, iss. 2, pp. 297-307. DOI: [10.1134/S0018151X13060060](https://doi.org/10.1134/S0018151X13060060)).
4. Leont'ev A.I. *Sposob temperaturnoi stratifikatsii gaza i ustroistvo dlya ego osushchestvleniya (truba Leont'eva)* [Method of temperature stratification of gas and device for its implementation (Leontiev tube)]. Patent RF, no. 2106581, 1998. (in Russian).
5. Schlichting H. *Boundary Layer Theory*. 6th ed. New York, McGraw-Hill, 1968. 747 p. (Russ. ed.: Schlichting H. *Teoriya pogrannichnogo sloya*. Moscow, Nauka Publ., 1974. 711 p.).
6. Leont'ev A.I., Burtsev S.A. Device for separation of vortex gas-dynamic energy. *Doklady akademii nauk*, 2015, vol. 464, no. 6, pp. 679-681. (English version of journal: *Doklady Physics*, 2015, vol. 60, iss. 10, pp. 476-478. DOI: [10.1134/S1028335815100092](https://doi.org/10.1134/S1028335815100092)).
7. Makarov M.S., Makarova S.N. Efficiency of energy separation at compressible gas flow in a planar duct. *Teplofizika i aeromekhanika*, 2013, no. 6, pp. 777-787. (English version of journal: *Thermophysics and Aeromechanics*, 2013, vol. 20, iss. 6, pp. 757-767. DOI: [10.1134/S0869864313060139](https://doi.org/10.1134/S0869864313060139)).
8. Burtsev S.A. Exploring ways to improve efficiency of gasdynamic energy separation. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2014, vol. 52, no. 1, pp. 14-21. (English version of journal: *High Temperature*, 2014, vol. 52, iss. 1, pp. 12-18. DOI: [10.1134/S0018151X14010064](https://doi.org/10.1134/S0018151X14010064)).
9. Volchkov E.P., Makarov M.S. Gas-dynamic temperature stratification in a supersonic flow. *Izvestiya RAN. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2006, no. 2, pp. 19-31. (in Russian).
10. Burtsev S.A. 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 of the Bauman MSTU*, 2004, no. 11. DOI: [10.7463/1104.0551021](https://doi.org/10.7463/1104.0551021) (in Russian).
11. Zditovets A.G. *Izuchenie vliyaniya formy poverkhnosti i kriteriya Prandtlya na temperaturu teploizolirovannogo tela, obtekaemogo sverkhzvukovym potokom gaza. Kand. diss.* [Research of influence shape of surface and Prandtl number on temperature insulated body, streamlined a supersonic flow of gas. Cand. diss.]. Moscow, 2005. 108 p. (in Russian).
12. Makarov M.S. *Gazodinamicheskaya temperaturnaya stratifikatsiya v sverkhzvukovykh potokakh. Kand. diss.* [Gas-dynamic temperature stratification in supersonic flows. Cand. diss.]. Novosibirsk, 2007. 154 p. (in Russian).
13. Vigdorovich I.I., Leont'ev A.I. Energy separation of gases with low and high Prandtl numbers. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2013, vol. 48, no. 6, pp. 117-134. (English version of journal: *Fluid Dynamics*, 2013, vol. 48, iss. 6, pp. 811-826. DOI: [10.1134/S0015462813060124](https://doi.org/10.1134/S0015462813060124)).

14. Egorov K.S., Rogozhinskii K.S. Numerically Simulated Impact of Gas Prandtl Number and Flow Model on Efficiency of the Machine-less Energetic Separation Device. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 10, pp. 21-35. DOI: [10.7463/1015.0814490](https://doi.org/10.7463/1015.0814490) (in Russian).
15. Burtsev S.A., Kochurov D.S., Shchegolev 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*, 2014, no. 5, pp. 314-329. DOI: [10.7463/0514.0710811](https://doi.org/10.7463/0514.0710811) (in Russian).
16. Leont'ev A.I., Lushchik V.G., Yakubenko A.E. Injection / suction effect on energy separation of compressible flows. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2011, vol. 46, no. 6, pp. 110-117. (English version of journal: *Fluid Dynamics*, 2011, vol. 46, iss. 6, pp. 935-941. DOI: [10.1134/S001546281106010X](https://doi.org/10.1134/S001546281106010X)).
17. Leont'ev A.I., Lushchik V.G., Makarova M.S. Temperature stratification under suction of the boundary layer from a supersonic flow. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2012, vol. 50, no. 6, pp. 793-798. (English version of journal: *High Temperature*, 2012, vol. 50, iss. 6, pp. 739-743. DOI: [10.1134/S0018151X12060065](https://doi.org/10.1134/S0018151X12060065)).
18. Zditovets A.G., Titov A.A. Influence of the shape of surface of heat-insulated rod, washed by supersonic flow on the temperature recovery factor. *Izvestiya RAN. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2007, no. 2, pp. 111-117. Available at: http://istina.msu.ru/media/publications/article/401/bd9/7485545/2007_-Izvestiya_AN_Energetika_-_Sterzhni.pdf , accessed 01.02.2016. (in Russian).
19. Burtsev S.A., Vinogradov Yu.A., Kiselev N.A., Strongin M.M. Experimental Study of Thermo-hydraulic Characteristics of Surfaces with In-line Dimple Arrangement. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 5, pp. 348-369. DOI: [10.7463/0515.0776160](https://doi.org/10.7463/0515.0776160) (in Russian).
20. Burtsev S.A., Vasil'ev V.K., Vinogradov Yu.A., Kiselev N.A., Titov A.A. Experimental study of parameters of surfaces coated with regular relief. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2013, no. 1, pp. 263-290. DOI: [10.7463/0113.0532996](https://doi.org/10.7463/0113.0532996) (in Russian).
21. Popovich S.S. Experimental research of influence of incident shock on adiabatic wall temperature in a supersonic flow of compressible gas. *Teplovye protsessy v tekhnike = Thermal Processes in Engineering*, 2014, no. 3, pp. 98-104. (in Russian).
22. Popovich S.S., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M. Experimental research of influence of detachable supersonic course on temperature of heat-insulated wall. *Trudy shestoi rossiiskoi natsional'noi konferentsii po teploobmenu* [Proc. of the 6th russian national conference on heat transfer]. Moscow, MEI Publ., 2014, pp. 262-265. (in Russian).
23. Popovich S.S., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M. Experimental research of the possibility of heat transfer enhancement in gas dynamic energy separation process. *Vestnik SGAU = Vestnik SSAU*, 2015, vol. 14, no. 2, pp. 159-169. DOI: [10.18287/2412-7329-2015-14-2-159-169](https://doi.org/10.18287/2412-7329-2015-14-2-159-169) (in Russian).
24. Popovich S.S., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M. Experimental research of possibilities of intensification of heat transfer in the device of gas-dynamic temperature stratification. *11*

- Vserossiiskii s"ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki: sb. dokl.* [11th All-Russian Congress on fundamental problems of theoretical and applied mechanics: collection of papers]. Kazan, 2015, pp. 3089-3091. (in Russian, unpublished).
25. Vinogradov Yu.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. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2013, vol. 48, no. 5, pp. 134-145. (English version of journal: *Fluid Dynamics*, 2013, vol. 48, iss. 5, pp. 687-696. DOI: [10.1134/S0015462813050128](https://doi.org/10.1134/S0015462813050128)).
26. Burtsev S.A. Analysis Technique for Devices for Gas-Dynamic Temperature Stratification in Real Gas Flow. *Teplovye protsessy v tekhnike = Thermal Processes in Engineering*, 2013, no. 9, pp. 386-390. (in Russian).
27. Vigdorovich I.I., Leont'ev A.I. Theory of the energy separation of a compressible gas flow. *Izvestiya RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*, 2010, vol. 45, no. 3, pp. 103-109. (English version of journal: *Fluid Dynamics*, 2010, vol. 45, iss. 3, pp. 434-440. DOI: [10.1134/S0015462810030105](https://doi.org/10.1134/S0015462810030105)).
28. Borovoi V.Ya. *Techenie gaza i teploobmen v zonakh vzaimodeistviya udarnykh voln s pogranichnym sloem* [Gas flow and heat transfer in zones of interaction of shock waves with the boundary layer]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 144 p. (in Russian).
29. 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*, 2004, no. 9. DOI: [10.7463/0904.0516097](https://doi.org/10.7463/0904.0516097) (in Russian).
30. 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*, 2005, no. 5. DOI: [10.7463/0505.0529473](https://doi.org/10.7463/0505.0529473) (in Russian).
31. Zditovets A.G., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M. Experimental Investigation of machineless energy separation of air flows in Leontiev's tube. *Teplovye protsessy v tekhnike = Thermal Processes in Engineering*, 2015, no. 9, pp. 397-404. (in Russian).
32. Zditovets A.G., Vinogradov Yu.A., Strongin M.M. Gas-dynamic method of energy separation of air flow (experimental results). *11 Vserossiiskii s"ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoi i prikladnoi mekhaniki: sb. dokl.* [11th All-Russian Congress on fundamental problems of theoretical and applied mechanics: collection of papers]. Kazan, 2015, pp. 1476-1478. (in Russian).
33. Burtsev S.A. Optimisation of geometry of a supersonic channel in the energy separation device. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*, 1999, no. 2, pp. 48-54. (in Russian).
34. Burtsev S.A., Leont'ev A.I. Temperature stratification in a supersonic gas flow. *Izvestiya RAN. Energetika = Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*, 2000, no. 5, pp. 101-113. Available at: http://istina.msu.ru/media/publications/article/e41/112/8687914/2000_Izvestiya_AN_Energetika_N_5_-_Temperaturnaya_statifikatsiya.pdf , accessed 01.02.2016. (in Russian).