

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ



УДК 621.436

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПЫЛА НАГРЕТОГО ГАЗА И ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ КАНАЛЫ СО СРЕЗАМИ

Л.В. Плотников, Ю.М. Бродов, Б.П. Жилкин, Н.С. Кочев

Уральский федеральный университет имени первого Президента России

Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, plotnikovlv@mail.ru

Резюме: В статье представлены результаты экспериментальных исследований распыла нагретого газа и перегретой жидкости через насадки со срезами с целью установления закономерностей влияния конфигурации каналов на характеристики струй. Описываются экспериментальные установки, методика проведения опытов и приборно-измерительная аппаратура. Для визуализации процесса истечения жидкостей и газов использованы фотосъемка и тепловизионная диагностика. Установлено, что при истечении нагретого газа через насадки со срезом отсутствует смещение оси струи относительно оси выходного отверстия. При истечении перегретой воды через насадки со срезом выходного отверстия, имеет место смещение оси струи в направлении нормали к поверхности среза в диапазоне 15–18 градусов относительно оси распыливающего отверстия.

Ключевые слова: распыл жидкостей и газов, щелевые каналы, взрывное вскипание, экспериментальные исследования, характеристики струи.

DOI: 10.30724/1998-9903-2018-20-9–10-60-70

Для цитирования: Плотников Л.В., Бродов Ю.М., Жилкин Б.П., Кочев Н.С. Сравнительный анализ особенностей распыла нагретого газа и перегретой жидкости через цилиндрические каналы со срезами // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 9-10. С. 60-70. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9–10-60-70.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE FEATURES OF SPRAYING A HEATED GAS AND SUPERHEATED LIQUID THROUGH CYLINDRICAL CHANNELS WITH SLICES

L.V. Plotnikov¹, Y.M. Brodov¹, B.P. Zhilkin¹, N.S. Kochev¹

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Ekaterinburg, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4481-3607>, plotnikovlv@mail.ru

Abstract: *The article presents the experimental studies results of a superheated liquid and a heated gas spraying through nozzles with cuts in order to determine the influence of the channel configuration on the characteristics of the jets. Experimental setups, experimental methods and instrumentation are described in the article. Photographing and thermal imaging was used to visualize the flow of liquids and gases. It was determined that there is no displacement of the jet axis relatively to the axis of the outlet opening when the heated gas flows through the nozzles with a cut. It is shown that there is a displacement of the axis of the jet relative to the axis of the outlet in the range of 15-18 degrees when the superheated water flows through the nozzles having a cut of the off outlet.*

Keywords: *spraying of liquids and gases, slit channels, explosive effervescence, experimental studies, jet characteristics.*

For citation: *L.V. Plotnikov, Y.M. Brodov, B.P. Zhilkin, N.S. Kochev Comparative analysis of the features of spraying a heated gas and superheated liquid through cylindrical channels with slices // Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 9-10. pp. 60-70. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-9-10-60-70.*

Введение

В большинстве технологических процессов исходной фазой, во многом определяющей эффективность установок и оборудования, является подача жидких и газовых сред к потребителям. В частности, мелкодисперсное распыление жидкостей в замкнутом объеме является одним из приоритетных направлений в развитии энергетики; известен ряд российских и зарубежных исследований в этой области [1–4]. Естественно, что управление этим процессом представляет чрезвычайный интерес для прикладной науки и инженеров-практиков, проектирующих технологическое оборудование. Так, например, в двигателестроении существует перманентная проблема управления структурой (формой) струи топлива, впрыскиваемой в камеру сгорания для достижения эффективного сжигания [5–9].

Цель настоящего исследования состояла в установлении сравнительных закономерностей влияния геометрии выходного отверстия канала на характеристики истекающей через него струи газа (воздуха) и жидкости. Для этого были проведены экспериментальные исследования процесса горизонтального стационарного истечения нагретого воздуха и перегретой жидкости через насадки с каналами круглого сечения и различными углами среза α выходного отверстия (рис. 1). Таким образом, исследования проводились как для среды с фазовым переходом, так и с отсутствием такового.

Для определения степени влияния угла среза на процесс истечения воздуха и жидкости были использованы насадки с выходными отверстиями с углами среза $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ и 60° . В опытах срез выходного отверстия был направлен строго вверх относительно горизонтали (см. рис. 1).

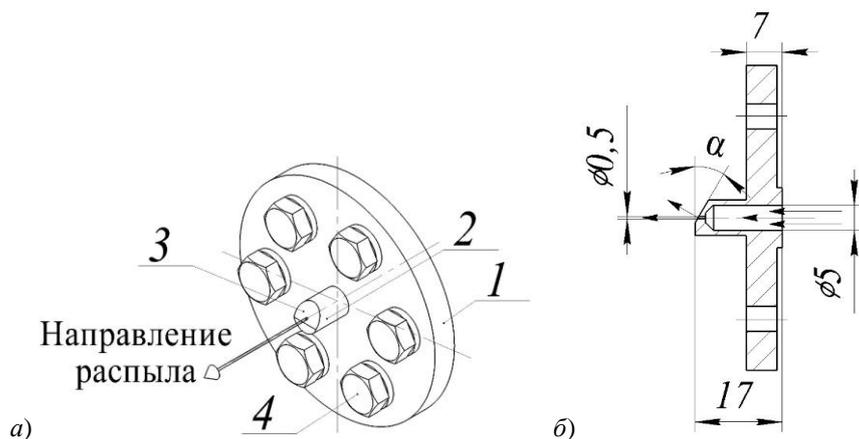


Рис. 1. Общий вид насадка (а) и его геометрические характеристики (б):
 1 – фланец; 2 – распыливающий канал с выходным отверстием; 3 – срез выходного отверстия;
 4 – крепежные элементы

Исследование распыла нагретого воздуха

Исследования истечения нагретого воздуха проводились на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. 2.

Для визуализации процесса истечения была применена тепловизионная фотосъемка сетчатого экрана (поз. 1) с помощью тепловизора (поз. 2). Данный метод, который основан на анализе полей дисперсии температуры, заключается в размещении в потоке тепловизирующей сетки из нитей. Воздух из окружающей среды нагнетался компрессорами поз. 3, 4 и 5 в ресивер (поз. 6) под избыточным давлением до 0,17 бар. Из ресивера воздух проходил через расходомер (поз. 7) и участок нагрева, где был установлен нагреватель (поз. 8). Исходный уровень нагрева воздуха задавался при помощи регулятора напряжения (поз. 9). После участка нагрева был установлен фланец для крепления насадков. Давление перед выходным отверстием измерялось *U*-образным водяным манометром (поз. 10). Исследования проводились при разных параметрах истечения нагретого воздуха, которые определялись количеством задействованных компрессоров (см. ниже).

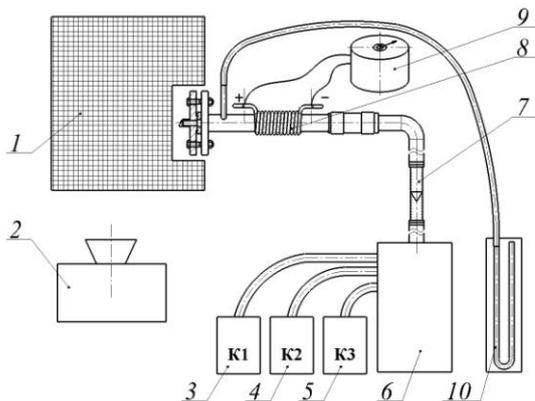


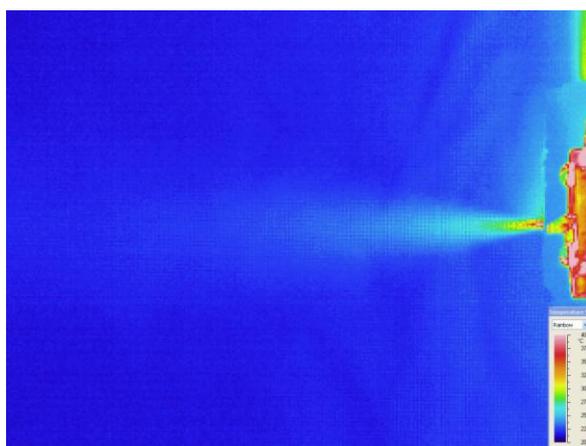
Рис. 2. Схема экспериментальной установки для истечения нагретого воздуха:
 1 – сетчатый экран; 2 – тепловизор; 3, 4, 5 – компрессоры; 6 – ресивер; 7 – расходомер;
 8 – нагреватель; 9 – регулятор напряжения; 10 – *U*-образный манометр

Для термографирования процесса истечения нагретого воздуха через насадки использовался матричный тепловизор *NEC Thermo Tracer TH-9100WL*. Погрешность измерения температуры составляла ± 2 °С.

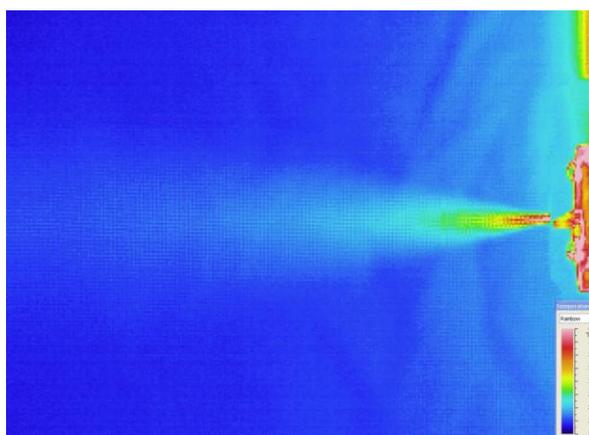
Температурный диапазон чувствительности тепловизора был выбран эмпирически, исходя из наглядности термограмм, и составлял 20–40 °С. Обработка термограмм производилась в программном комплексе «*NEC Image Processor*». Подробней используемый метод термографирования структуры газовых потоков описан в работах [10–12].

В ходе проведения опытов давление в магистрали регулировалось в диапазоне от 0,036 до 0,172 бар, а температура – на уровне 30–40 °С. В качестве примера отдельные результаты исследований показаны на рис. 3 и 4.

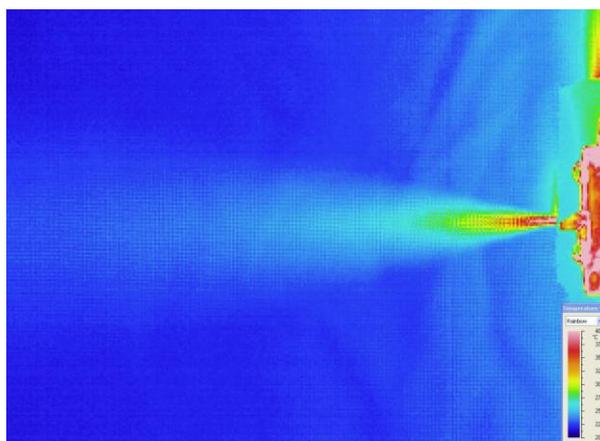
Полученные термограммы истекающего воздушного потока были проанализированы по основным характеристикам струи: длина, углы раскрытия и отклонения от оси отверстия.



а)

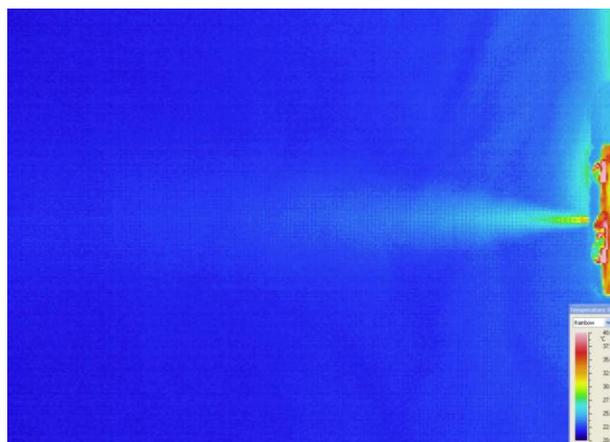


б)

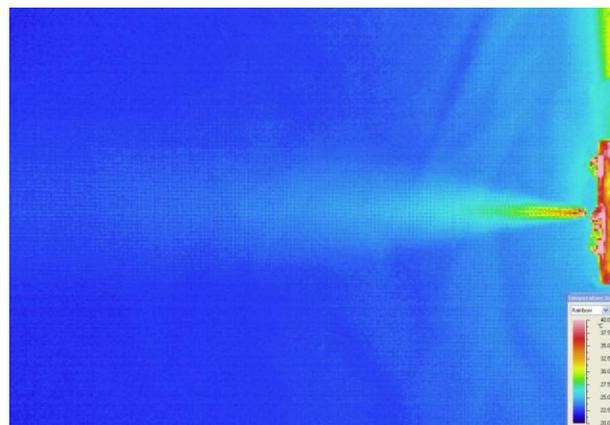


в)

Рис. 3. Термограммы истечения воздуха через насадок с выходным отверстием со срезом $\alpha = 30^\circ$:
а – расход $0,0015 \text{ м}^3/\text{ч}$; б – расход $0,014 \text{ м}^3/\text{ч}$; в – расход $0,019 \text{ м}^3/\text{ч}$



а)



б)

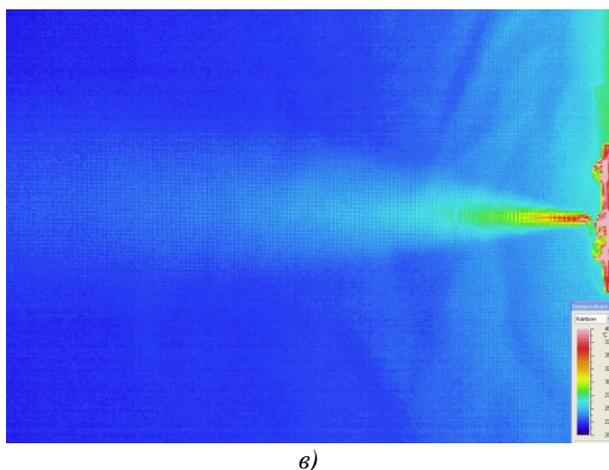


Рис. 4. Термограммы истечения воздуха через насадку с выходным отверстием со срезом $\alpha = 60^\circ$:
 a – расход $0,0013 \text{ м}^3/\text{ч}$; b – расход $0,014 \text{ м}^3/\text{ч}$; $в$ – расход $0,019 \text{ м}^3/\text{ч}$

Установлено, что при распыле нагретого воздуха при всех значениях угла среза выходного отверстия ось струи совпадает с осью отверстия насадка в изменяющихся по расходу и давлению условиях истечения. Наличие среза у насадка фактически не оказывает влияния на смещение оси распространения струи относительно оси отверстия при истечении воздуха через насадки разной конфигурации.

Выявлено, что величина угла среза выходного отверстия насадка оказывает существенное влияние на угол раскрытия струи: наибольшие его значения относятся к насадку с $\alpha = 30^\circ$, наименьшие – к насадку с $\alpha = 60^\circ$. Эти отличия достигали 35 %. Необходимо отметить, что с увеличением расхода воздуха через насадки происходит рост угла раскрытия струи: это характерно для всех геометрических конфигураций насадков (разных α).

Как и следовало ожидать, с ростом расхода воздуха происходит увеличение длины распространения струи через все насадки. Так, для насадка с углом среза выходного отверстия $\alpha = 30^\circ$ длина струи l составляла от 62 до 85 мм при увеличении расхода воздуха от $0,0013$ до $0,019 \text{ м}^3/\text{ч}$, в то время как для насадка с $\alpha = 45^\circ$ величина l находилась в диапазоне от 41 до 67 мм при тех же расходах воздуха. При этом максимальная длина струи на всех режимах зарегистрирована у насадка с $\alpha = 30^\circ$.

Исследование распыла перегретой жидкости

Для уточнения закономерностей влияния угла среза на особенности распыла технологических жидкостей разного агрегатного состояния полученные результаты были сопоставлены с результатами экспериментальных исследований динамики истечения также в горизонтальном направлении перегретой жидкости, через эти же насадки с выходными отверстиями со срезами под разными углами в воздушную среду, находящуюся при барометрическом давлении. В качестве жидкости использовалась дистиллированная вода согласно ГОСТ 6709-72. Схема экспериментальной установки для истечения перегретой воды через насадки показана на рис. 5.

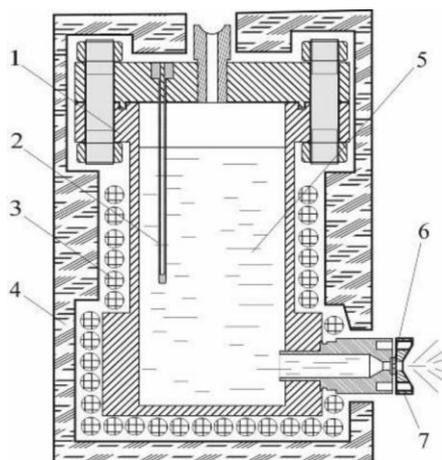


Рис. 5. Схема установки для истечения перегретой воды через насадки:

1 – корпус камеры; 2 – кожух для термопары; 3 – нагревательный элемент; 4 – теплоизолятор;
5 – жидкость; 6 – канал; 7 – прижимной фланец

Корпус рабочей камеры (поз. 1) представлял собой цилиндрический стакан объемом 1 литр, выполненный из нержавеющей стали. Камера была покрыта слоем теплоизоляции (поз. 4) и имела сообщение с окружающей средой посредством канала (поз. 6) и отверстия в прижимном фланце (поз. 7). Регулировка начала и окончания подачи осуществлялась с помощью запирающего клапана (на рисунке не показан). Нагрев жидкости (поз. 5), находящейся внутри камеры, обеспечивался электрическим нагревательным элементом (поз. 3). Опыты проводились в дискретном режиме, по мере израсходования жидкости в рабочей камере. Таким образом лабораторная установка обеспечивала стационарное истечение в течение 10–20 секунд из сосуда высокого давления. Методика проведения данных исследований более подробно описана в работах [13, 14].

В ходе эксперимента температура воды варьировалась от 150 до 300 °С, давление – от 5 до 10 бар. Для визуализации процесса истечения использовалась фотосъемка с применением фотоаппарата *Nikon D70*.

В качестве примера на рис. 6 показаны результаты исследования истечения перегретой воды через насадок со срезом выходного отверстия $\alpha = 45^\circ$.

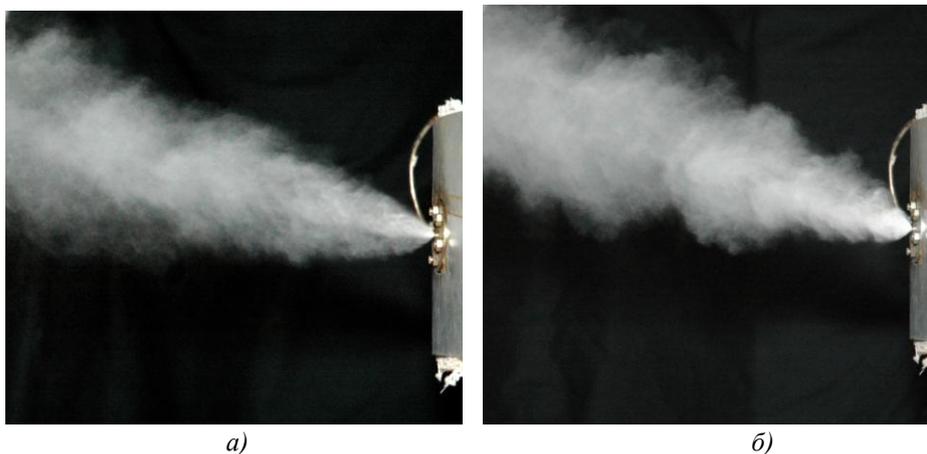


Рис. 6. Фотоснимки истечения воды через насадок со срезом выходного отверстия $\alpha = 45^\circ$:
а – температура воды 150°С, давление 5 бар; б – температура воды 190°С, давление 10 бар

Опытами установлено, что при горизонтальном истечении перегретой воды через насадки со срезом выходного отверстия наблюдается смещение оси струи относительно оси отверстия на величину от 15 до 18 градусов в направлении нормали к поверхности среза, что характерно для всех условий истечения. При этом примечательно, что тенденции изменения угла между осью струи и осью выходного отверстия по мере роста температуры и давления не выявлено.

Визуально обнаружено, что по мере роста значений давления и температуры воды угол раскрытия струи увеличивался от 23 до 30 градусов. Измерение длины струи перегретой воды не производилось.

В современных экспериментальных исследованиях взрывного вскипания струй перегретой жидкости показано [15, 16], что в теплофизических системах при фазовых переходах первого рода происходит скачкообразное изменение свойств распыливаемой жидкости: плотности, энтропии и др. При этом в этих же работах установлено, что поведение интегральных характеристик струи сильно перегретой жидкости (расход, реактивная сила, угол раскрытия) определяется кинетикой рождения пузырьков пара в условиях высоких пересыщений. Более того, в работе [14] выявлено влияние конфигурации распыливающего отверстия на характеристики струи. Таким образом, можно предположить, что в нашем случае причинами отклонения оси струи воды, истекающей при сверхкритических параметрах, относительно оси выходного отверстия насадков являются не только изменение теплофизических свойств распыливаемой среды, а наличие фазового перехода, особенности кинетики рождения пузырьков пара, начиная от кипения на отдельных единичных центрах и до объемного вскипания, а также изменение геометрии выходного отверстия (наличие среза у насадка).

Для сопоставления результатов истечения жидкости и воздуха были произведены исследования истечения перегретой воды с фиксацией истечения с помощью тепловизора. В качестве примера на рис. 7 показана одна из термограмм.



Рис. 7. Термограмма истечения воды через насадок с выходным отверстием со срезом $\alpha = 45^\circ$, температура воды 150°C , давление 5 бар

Тепловизионная съемка показала высокую степень согласованности и соответствия результата с результатами фотосъемки, что подтверждает достоверность полученных результатов.

Заключение

Таким образом, на основании рассмотренных данных и проведенных экспериментальных исследований можно сформулировать следующие основные выводы:

- установлено, что при истечении нагретого воздуха (без фазового перехода) через насадки, имеющие разный угол среза выходного отверстия, смещение оси струи относительно оси выходного отверстия отсутствует;

- выявлено, что величина угла среза выходного отверстия насадка оказывает существенное влияние на угол раскрытия воздушной струи;
- установлено, что при истечении перегретой воды через насадки, имеющие разный угол среза выходного отверстия, имеет место смещение оси струи относительно оси выходного отверстия в диапазоне от 15 до 18 градусов в направлении нормали к поверхности среза;
- обнаруженные физические эффекты и закономерности могут быть использованы для совершенствования процессов впрыска и смесеобразования в топливных системах поршневых и комбинированных двигателей внутреннего сгорания для формирования либо направленного объемного, либо комбинированного, либо пристеночного смесеобразования – это позволит улучшить полноту и эффективность сгорания топлива;
- полученные результаты являются основополагающими для проведения дальнейших исследований процессов истечения технических газов и жидкостей через каналы, в том числе с проведением их динамического анализа, с целью практического применения в энергетических машинах и установках, в частности в топливных системах газовых турбин и поршневых двигателей внутреннего сгорания.

Литература

1. Витман Л.А., Кацнельсон Б.Д., Палеев И.И. Распыливание жидкости форсунками /Под ред. С.С. Кутателадзе. М.: Государственное энергетическое издательство, 1962. 258 с.
2. Дитякин Ю.Ф., Клячко Л.А. Распыливание жидкостей. М.: Машиностроение, 1977. 206 с.
3. Liu H. Science and Engineering of Droplets Fundamentals and Applications. William Andrew Publishing: Noyes, 2000. 508 p.
4. Experimental researches regarding the dispersion angle of the nozzle jet from spraying machines / Roşu M., Căşandroi T., Matache M.G., Vlăduţ V., Pruteanu A. // UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering. 2018. Vol. 80, No 1. P. 207–218.
5. Влияние альтернативного процесса впрыскивания топлива на локальные образования оксидов азота и сажи в камере сгорания дизеля / Р. З. Кавтарадзе, Д. О. Онищенко, И. А. Зиновьев, А. С. Голосов // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2016. № 5. С. 152–159.
6. G. P. Merker, C. Schwarz, G. Stiesch, F. Otto. Simulating Combustion, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 401 p.
7. Грехов Л.В. Впрыскивание дизельного топлива под давлением до 400 МПа / Л.В. Грехов, А.А. Денисов, Е.Е. Старков // Национальная ассоциация ученых, 2015. № 8. С. 24–28.
8. Грехов Л.В. Аккумуляторные топливные системы двигателей внутреннего сгорания типа Common Rail / Л.В. Грехов. М.: МГТУ, 2000. 64 с.
9. Effect of the nozzle holder on injected fuel temperature for experimental test rigs and its influence on diesel sprays / J. Gimeno, P. Martí-Aldaraví, M. Carreres, J.E. Peraza // International Journal of Engine Research. 2018. Vol. 19, No 3. P. 374–389.
10. Zhilkin B.P., Zaikov N.S., Kisel'nikov A.Yu., Mirenskii V.Yu., Khudyakov P.Yu. Thermal imaging identification of turbulent structures in gas flows // Instruments and experimental techniques. 2006. Vol. 53, No 1. P. 143–146.
11. Жилкин Б.П., Ларионов И.Д., Шуба А.Н. Устройство для измерения температурного поля газового потока. Патент на изобретение № 2230300 RU от 10.04.2002.
12. Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows // Instruments and experimental techniques. 2004. Vol. 47, No 4. P. 545–546.
13. Бусов К.А. Динамические характеристики струй перегретой воды при истечении через короткие каналы / К.А. Бусов // Тепловые процессы в технике. 2011. Т. 3, № 7. С.308–313.
14. Влияние термических и геометрических факторов на распыл жидкости при взрывном вскипании / Н.А. Мажейко, А.В. Решетников, К.А. Бусов, В.П. Коверда, А.А. Старостин, Л.В. Плотников, Б.П. Жилкин, Ю.М. Бродов // Тяжелое машиностроение. 2014. № 6. С. 35–40.
15. Reshetnikov A.V., Mazheiko N.A., Skokov V.N., Koverda V.P. Hydrodynamic response to explosive boiling-up in a jet of superheated water // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015.

Vol. 85. P. 965–970.

16. Reshetnikov A.V., Busov K.A., Mazheiko N.A., Skokov V.N., Koverda V.P. Transient behavior of superheated water jets boiling // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2012. Vol. 19, No 2. P. 329–336.

Авторы публикации

Плотников Леонид Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). E-mail: plotnikovlv@mail.ru.

Бродов Юрий Миронович – д-р техн. наук, зав. «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). E-mail: turbine66@mail.ru.

Жилкин Борис Прокопьевич – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). E-mail: tot@ustu.ru.

Кочев Николай Сергеевич – аспирант кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). E-mail: kochev91@list.ru.

References

1. Vitman L.A., Kacnel'son B.D., Paleev I.I. *Spraying liquid nozzles*. Ed. S.S. Kutateladze. Moscow: State Energy Publishing House, 1962. 258 p.
2. Ditjakin Ju.F., Kljachko L.A. *Spraying of liquids*. Moscow: Mechanical Engineering, 1977. 206 p.
3. Liu H. *Science and Engineering of Droplets Fundamentals and Applications*. William Andrew Publishing: Noyes, 2000. 508 p.
4. Experimental researches regarding the dispersion angle of the nozzle jet from spraying machines / Roşu M., Căşândroi T., Matache M.G., Vlăduţ V., Pruteanu A. // *UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 80, No 1. P. 207–218.
5. Influence of the alternative process of fuel injection on local formations of nitrogen oxides and soot in the combustion chamber of a diesel engine / R.Z. Kavtaradze, D.O. Onishhenko, I.A. Zinov'ev, A.S. Golosov // *Izvestiya of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2016. No 5. P. 152–159.
6. G.P. Merker, C. Schwarz, G. Stiesch, F. Otto. *Simulating Combustion*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 401 p.
7. Grehov L.V. Injection of diesel fuel under pressure up to 400 MPa / L.V. Grehov, A.A. Denisov, E.E. Starkov // *National Association of Scientists*, 2015. No 8. P. 24–28.
8. Grehov L.V. *Accumulator fuel systems of internal combustion engines of the Common Rail type* / L.V. Grehov. Moscow: MSTU, 2000. 64 p.
9. Effect of the nozzle holder on injected fuel temperature for experimental test rigs and its influence on diesel sprays / J. Gimeno, P. Martí-Aldaraví, M. Carreres, J.E. Peraza // *International Journal of Engine Research*. 2018. Vol. 19, No 3. P. 374–389.
10. Zhilkin B.P., Zaikov N.S., Kisel'nikov A.Yu., Mirenskii V.Yu., Khudyakov P.Yu. Thermal imaging identification of turbulent structures in gas flows // *Instruments and experimental techniques*. 2006. Vol. 53, No 1. P. 143–146.
11. Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N. Device for measuring the temperature field of a gas stream. Patent for invention № 2230300 RU of 10.04.2002.
12. Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N. Applications of an infrared imager for determining temperature fields in gas flows // *Instruments and experimental techniques*. 2004. Vol. 47, No 4. P. 545–546.

13. Busov K.A. Dynamic characteristics of jets of superheated water when flowing through short channels / K.A. Busov // Thermal processes in engineering. 2011. Vol. 3. No 7. P.308–313.

14. The influence of thermal and geometric factors on the spraying of liquids during explosive boiling / N.A. Mazhejko, A.V. Reshetnikov, K.A. Busov, V.P. Koverda, A.A. Starostin, L.V. Plotnikov, B.P. Zhilkin, Yu.M. Brodov // Heavy machine building. 2014. No 6. P. 35–40.

15. Reshetnikov A.V., Mazheiko N.A., Skokov V.N., Koverda V.P. Hydrodynamic response to explosive boiling-up in a jet of superheated water // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 85. P. 965–970.

16. Reshetnikov A.V., Busov K.A., Mazheiko N.A., Skokov V.N., Koverda V.P. Transient behavior of superheated water jets boiling // Thermophysics and Aeromechanics. 2012. Vol. 19, No 2. P. 329–336.

Authors of the publication

Leonid V. Plotnikov – PhD (tech) Sci, associate Professor, Department of turbines and engines, «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin» (UrFU).

Boris P. Zhilkin – Doc. Sci (physical&mathematical), Professor, Department «Heat power and heat engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Yurii M. Brodov – Doc. Sci (tech), head Department of turbines and engines, «Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin» (UrFU).

Nikolaj S. Kochev – postgraduate student, Department «Heat power and heat engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (UrFU).

Поступила в редакцию

22 мая 2018 г.