

УДК 621.4360

ВЛИЯНИЕ УГЛА ВЫХОДНОГО СРЕЗА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КАНАЛА НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУЙ НАГРЕТОГО ГАЗА И ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

© 2019 г. Б. П. Жилкин¹, Л. В. Плотников¹*, Н. С. Кочев¹,
А. В. Решетников², Н. А. Мажейко², К. А. Бусов²

¹ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

²Институт теплофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

*E-mail: plotnikovlv@mail.ru

Поступила в редакцию 25.09.2018 г.

После доработки 03.12.2018 г.

Принята к публикации 25.12.2018 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований горизонтального истечения нагретого газа и перегретой воды через насадки с каналами круглого поперечного сечения, имеющие разные углы среза выходного отверстия. Для визуализации процесса истечения жидкостей и газов применена фотосъемка и тепловизионная диагностика. Выполнен сравнительный анализ основных характеристик струй жидкости и газа, истекающих при разных начальных условиях и через каналы разной конфигурации. Установлено, что при истечении нагретого газа через насадки со срезом отсутствует смещение оси струи относительно оси выходного отверстия. Другая закономерность наблюдается при истечении перегретой воды через насадки со срезом. В данном случае имеет место смещение оси струи по направлению среза относительно оси выходного отверстия, которое находится в диапазоне 15° – 18° в зависимости от начальных условий. По результатам исследований предлагаются практические рекомендации по использованию обнаруженных закономерностей в области двигателестроения (при распыле топлива форсунками).

DOI: 10.1134/S0040364419030220

ВВЕДЕНИЕ

В большинстве технических и технологических процессов исходной фазой, во многом определяющей эффективность установок и оборудования, является подача жидких и газовых сред в рабочее пространство установок с распылением форсунками. В частности, мелкодисперсное распыление жидкостей в замкнутом объеме – одно из приоритетных направлений в развитии энергетики. Поэтому управление этим процессом можно считать актуальной задачей для фундаментальной науки и практики при проектировании технологического оборудования.

Рассматриваемой проблематике посвящено довольно большое количество разнонаправленных работ. Так, в [1, 2] описываются экспериментальные установки и приводятся результаты исследований перегретых струй двуокиси углерода для совершенствования технологического процесса водоструйной резки металла. Показано, что использование перегретых струй двуокиси углерода и воды способствует более точной резке металла. В [3] проводились экспериментальные исследования интенсивности испарения воды при

ее распылении при разных начальных температурах и давлениях. Авторами обнаружено, что давление впрыска приводит к лучшему распылению и испарению воды, а увеличение скорости впрыска и начальной температуры воды – к улучшению испарения. При этом следует отметить, что существуют исследования на основе математических моделей, описывающих процессы распыла перегретой жидкости. Так, в [4] развивается метод VOF для моделирования двухфазного и двухжидкостного течений в трехмерной постановке. В [5] представлены пилотные попытки моделирования процесса теплопередачи в жидкости, сопровождающегося испарением капель в результате распыла перегретых струй воды.

Можно выделить несколько работ, связанных с прикладными исследованиями использования распыла перегретой жидкости в тех или иных технологических процессах. В [6] представлены результаты экспериментальных исследований и математического моделирования характеристик испарения перегретых струй воды для повышения эффективности опреснения для малонаселенных островов и отдаленных районов. В [7] предлагаются оригинальные технологии по использова-



Рис. 1. Традиционные многодырчатые распылители поршневых двигателей внутреннего сгорания в разрезе.

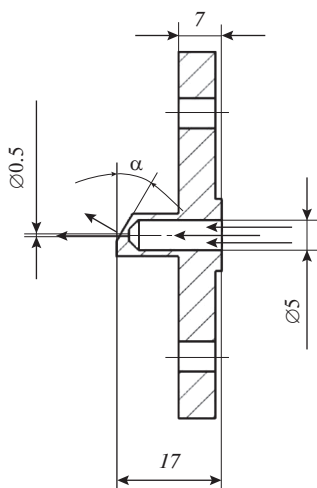


Рис. 2. Общий вид распыляющего насадка.

нию распыла перегретой жидкости в технологических установках для пищевой промышленности. В свою очередь в [8] представлены результаты физического и численного моделирования распыла перегретого топлива в реактивных двигателях для самолетов. Показано, что давление струи топлива оказывает существенное влияние на газодинамические и тепломеханические характеристики распыла. Возможность применения распыла перегретых жидкостей в топливной системе поршневых двигателей внутреннего сгорания показана в [9]. В [10] экспериментально исследованы особенности теплообмена при распыле перегретых углеводородов с водными следами в струе. Широкий спектр применения распыла перегретой жидкости представлен в [11].

Можно выделить несколько работ, в которых проводится оценка влияния конфигурации распыляющего отверстия на характеристики струи. В [12, 13] представлены экспериментальные данные по распылу перегретой воды через расходящее сопло и традиционное цилиндрическое сопло. Установлено, что такой распыл позволяет получать одномодальное распыление воды с диаметром капель около микрона. В [14] проведен сравнительный анализ распыла перегретой жидкости в атмосферу через цилиндрическую и щелевую насадки. В экспериментальных исследованиях [15–17] взрывного вскипания струй пере-

гретой жидкости в атмосферу показано, что в теплофизических системах при фазовых переходах первого рода происходит скачкообразное изменение свойств распыливаемой жидкости: плотности, энтропии и др. В этих же работах установлено, что поведение интегральных характеристик струи сильно перегретой жидкости определяется кинетикой рождения пузырьков пара в условиях высоких пересыщений.

Анализ литературы показал, что определенные результаты в области мелкодисперсного распыливания жидкостей уже достигнуты, но все же остается много вопросов, связанных с особенностями конструктивных решений и сфер применения распыливающей аппаратуры. Так, например, в области поршневого двигателестроения существует перманентная проблема управления структурой (формой) струи топлива, впрыскиваемой в камеру сгорания переменного объема для достижения эффективного смесеобразования и последующего его сжигания [18, 19].

Анализ конструкций различных многодырчатых распылителей поршневых двигателей показал, что для дизелей широкое применение нашли прямотруйные форсунки с круглыми выходными отверстиями распылителей (рис. 1). Угол между осью распыляющего отверстия и плоскостью, примыкающей к нему, как правило, составляет 90° . Подобная конструкция сохраняется вне зависимости от типа топливной системы дизеля, расхода топлива и давления впрыска [20]. Предположительно изменение геометрии выходного отверстия распылителя может оказывать влияние на конфигурацию струи, поскольку в этом случае произойдет изменение поля давления у основания струи.

Помимо геометрии распыляющего отверстия, эффективным средством, оказывающим влияние на форму и структуру струи, является перегрев жидкости. Известно, что в струе перегретой воды наблюдаются частицы, имеющие размер менее 3 мкм [12, 13]. Уменьшение размеров капель и управление формой струи оказывает положительное влияние на мощность двигателя, расход топлив, токсичности отработавших газов и надежность его основных деталей и узлов.

Цель настоящего исследования состоит в установлении закономерностей влияния величины угла среза выходного отверстия канала на характеристики истекающих через него газа (воздуха) и жидкости. Для этого проведены экспериментальные исследования процесса стационарного горизонтального истечения нагретого воздуха и перегретой воды через насадки с каналами круглого поперечного сечения, имеющими разные углы среза выходного отверстия. Для определения степени влияния угла среза на процесс истечения воздуха использованы насадки с углами скоса α , равными 30° , 45° и 60° (рис. 2).

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ НАГРЕТОГО ГАЗА ЧЕРЕЗ НАСАДКИ СО СРЕЗОМ ВЫХОДНОГО ОТВЕРСТИЯ

Исследования истечения нагретого воздуха проводились в помещении при нормальных условиях с использованием лабораторной установки, схема которой представлена на рис. 3.

Для визуализации процесса истечения использован метод термовизуализирующей съемки. Данный метод [21–23] заключается в размещении в потоке термовизуализирующей сетки 1 из полимерных нитей и основан на анализе полей дисперсии температуры тепловизором 2. Воздух из окружающей среды нагнетался компрессорами 3, 4 и 5 в ресивер 6 под избыточным давлением до 0.0172 МПа. Из ресивера воздух проходил через расходомер 7 и участок нагрева 8. Исходный уровень нагрева воздуха задавался при помощи регулятора напряжения 9. После участка нагрева установлен фланец для крепления насадков. Давление перед выходным отверстием измерялось U-образным манометром 10. Исследования проводились при разных параметрах истечения нагретого воздуха (табл. 1).

Для термографирования процесса истечения нагретого воздуха через насадки использовался тепловизор NEC Thermo Tracer TH-9100WL. Обработка термограмм производилась в программном комплексе “NEC Image Processor”.

В ходе опытов давление в магистрали находилось в диапазоне от 0.0036 до 0.0172 МПа и температура в интервале 303–313 К. Результаты проведенных исследований представлены на рис. 4. Полученные термограммы истекающего воздушного потока проанализированы по основным характеристикам струи: длина, угол раскрытия и отклонение от оси отверстия. Предполагается, что струя при истечении через цилиндрический канал имеет осесимметричную форму поперечного сечения и, соответственно, осью струи считается

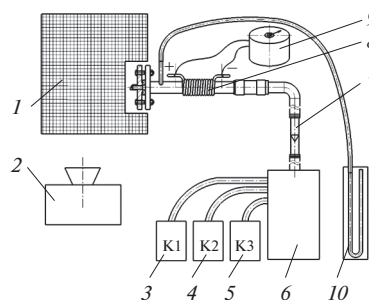


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для исследования истечения нагретого воздуха.

ее ось симметрии. В ходе обработки полученных данных угол раскрытия струи определялся по ее внешним видимым границам. Длина струи измерялась длиной видимой части двухфазной области, а в случае истечения невискипающей жидкости – длиной не распавшейся на капли струи.

На основе полученных данных установлено, что во всем диапазоне изменения Q и при всех значениях α ось струи совпадает с осью отверстия, т.е. деформация поля давления в устье струи на выходе из насадки фактически не оказывает влияния на отклонение оси истекающей струи нагретого воздуха относительно оси канала. Также проведены эксперименты по истечению холодной воды с начальными параметрами в рабочей камере: $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $p_0 = 0.4$ МПа, которые показали тот же самый результат, что и истечение горячего воздуха – отсутствие отклонения струи от оси канала.

Установлено, что при истечении воздуха (идеальный газ, фазовый переход отсутствует) величина угла среза выходного отверстия насадки оказывает существенное влияние на угол раскрытия струи: наибольшие его значения относятся к насадке с $\alpha = 30^\circ$, наименьшие – к насадке с $\alpha = 60^\circ$. Отличия могут достигать 35%. Следует отметить, что с увеличением расхода воздуха через насадки

Таблица 1. Результаты анализа термограмм истечения нагретого воздуха из насадков с отверстиями $\varnothing 0.5$ мм

α , град	Давление в магистрали, МПа	Расход воздуха через насадок Q , м ³ /ч	Длина струи, мм	Угол раскрытия струи, град
30	0.0036	0.0015	62	21
	0.013	0.014	77	24
	0.017	0.019	85	28
45	0.0036	0.0025	31	19
	0.0128	0.015	62	21
	0.0168	0.02	67	20
60	0.0036	0.0012	41	17
	0.013	0.013	80	22
	0.0172	0.018	86	23

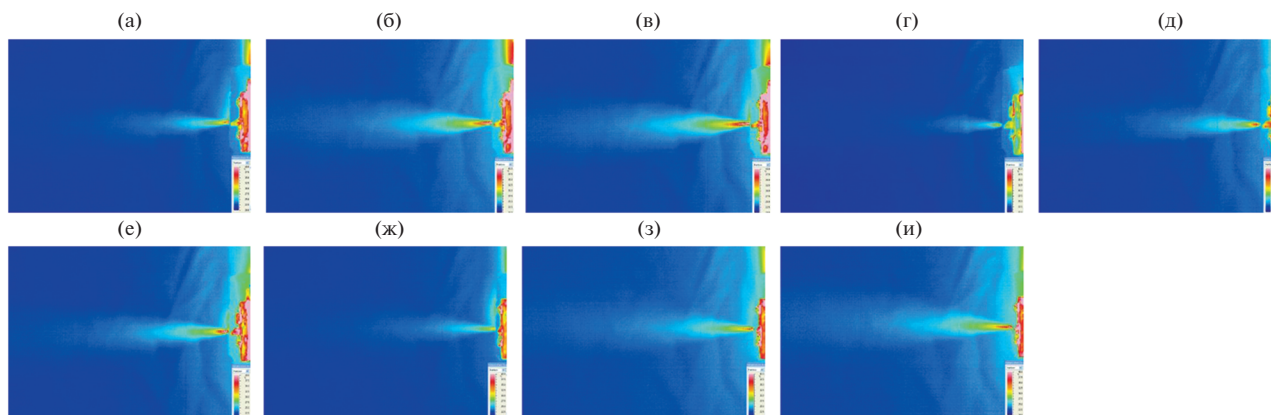


Рис. 4. Термограммы истечения воздуха из насадка с выходным отверстием со срезом при $\alpha = 30^\circ$: (а) – $Q = 0.0015 \text{ м}^3/\text{ч}$, (б) – 0.014, (в) – 0.019; $\alpha = 45^\circ$: (г) – 0.0025, (д) – 0.015, (е) – 0.02; $\alpha = 60^\circ$: (ж) – 0.0012, (з) – 0.013, (и) – 0.018.

происходит рост угла раскрытия струи, что характерно для всех геометрических конфигураций насадков. Данный факт объясняется нарастанием слоя смещения затопления струи [24].

Как и следовало ожидать, с ростом расхода воздуха происходит увеличение длины распространения струи через все насадки. Так, для насадка $\alpha = 30^\circ$ длина струи l составляла от 62 до 85 мм при увеличении Q от 0.0013 до 0.019 $\text{м}^3/\text{ч}$. В то время как для насадка с $\alpha = 45^\circ$ находилась в диапазоне от 41 до 67 мм при тех же расходах воздуха. При этом максимальная длина струи во всех режимах зарегистрирована у насадка с $\alpha = 30^\circ$. Измерения длин и углов проводились путем проецирования термограммы на масштабированную размерную сетку.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ ПЕРЕГРЕТОЙ ВОДЫ ЧЕРЕЗ НАСАДКИ СО СРЕЗОМ ВЫХОДНОГО ОТВЕРСТИЯ

Полученные результаты сопоставлены с результатами экспериментальных исследований динамики истечения в горизонтальном направлении вскипающей воды через эти же насадки в атмосферу. Схема экспериментальной установки для изучения истечения перегретой воды через насадки представлена на рис. 5. Корпус рабочей камеры представлял собой цилиндрический стакан объемом 0.01 м^3 , выполненный из нержавеющей стали. Лабораторная установка обеспечивала стационарное истечение жидкости в течение нескольких десятков секунд из сосуда высокого давления. Методика проведения данных исследований подробно представлена в [16, 25].

В ходе эксперимента температура воды варьировалась от 423 до 573 К, давление – от 0.5 до 10.5 МПа. Для визуализации процесса истечения использовалась фотосъемка с применением фотоаппарата Nikon D70.

В качестве примера на рис. 6 представлены результаты исследования истечения двухфазной струи через насадку с выходным отверстием с $\alpha = 45^\circ$.

Установлено, что при истечении перегретой воды через насадки со срезом выходного отверстия наблюдается отклонение оси струи относительно оси отверстия на величину от 15° до 18° , что характерно для всех условий истечения. Примечательно, что тенденции изменения угла между осью паровой струи и осью выходного отверстия по мере роста температуры и давления не выявлено. Также обнаружено, что по мере роста давления и температуры воды угол раскрытия струи увеличивался от 23° до 30° .

По мнению авторов, отклонение оси парожидкостной струи от оси канала со скосом обусловлено образованием и ростом паровых пузырей в потоке. Поскольку одна сторона канала – в данном случае нижняя – длиннее, чем верхняя, то она препятствует расширению двухфазной струи в нижнем направлении. В силу этого асимметрия

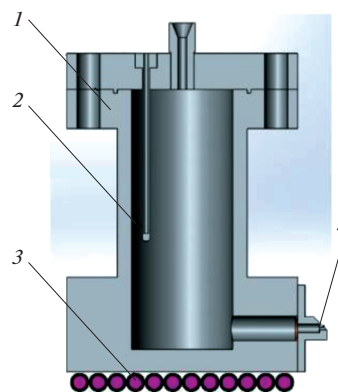


Рис. 5. Разрез рабочей камеры высокого давления для истечения перегретой воды через каналы со срезами: 1 – корпус камеры, 2 – кожух для термопары, 3 – нагревательный элемент, 4 – короткий канал со срезом.

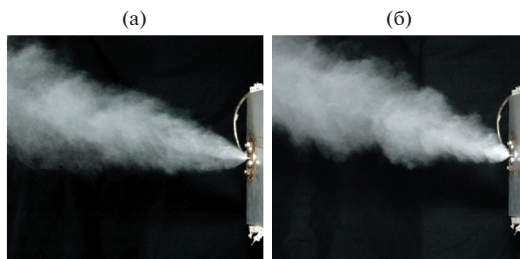


Рис. 6. Фотограммы истечения перегретой струи через насадок с $\alpha = 45^\circ$: (а) – температура воды – 423 К, давление – 0.4 МПа; (б) – 463 К, 1 МПа.

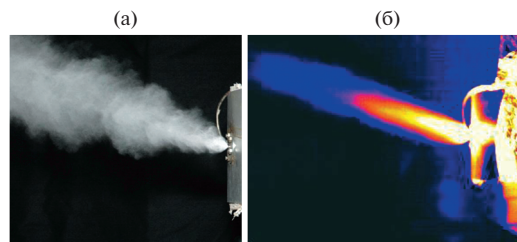


Рис. 7. Сравнение форм истечения струи перегретой жидкости через насадок с $\alpha = 45^\circ$ (температура воды – 463 К, давление – 1 МПа), полученных с помощью фотосъемки (а) и тепловизионной съемки (б).

канала со скосом приводит к отклонению оси струи в вертикальном направлении, как и показано на рис. 6. Эксперименты с однофазными средами (нагретый газ (рис. 4) и холодная (не вскипающая) вода [9]) показали, что внешний срез канала не влияет на отклонение струи от оси канала.

Поскольку в опытах с воздухом и с водой использовались разные принципы формирования изображения, то для согласования методов исследований истечения с фазовым переходом и без него выполнены исследования с фиксацией истечения паровой струи с помощью вышеуказанного тепловизора. В качестве примера на рис. 7 представлены фотограмма и термограмма, выполненные при одних и тех же условиях истечения.

Тепловизионная съемка показала высокую степень согласованности и соответствия эксперимента с данными 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 без фазового перехода через насадки, имеющие разную геометрическую форму выходного отверстия, отсутствует смещение оси струи относительно оси выходного отверстия;

- выявлено, что величина угла среза выходного отверстия насадка оказывает существенное влияние на угол раскрытия воздушной струи;

- установлено, что при истечении перегретой воды через те же насадки имеет место смещение оси струи относительно оси выходного отверстия в диапазоне от 15° до 18° ;

- обнаружено, что с ростом давления воздуха и воды происходит увеличение угла раскрытия струи, что характерно для всех геометрических конфигураций насадков;

- выявленные физические эффекты и закономерности могут быть применены в процессах

топливоподачи в двигателях внутреннего сгорания для формирования направленного объемного, комбинированного или пристеночного смешения с целью повышения полноты и эффективности сгорания топлива;

- использование процесса взрывного вскипания для подачи топлива в двигателях внутреннего сгорания требует пересмотра конструкции распылителей в сторону снижения длины распыляющего отверстия относительно его диаметра для резкого уменьшения давления;

- требуется проведение дальнейших исследований распыла перегретых жидкостей с использованием многодырчатых распылителей с измененным углом среза для достижения оптимальной геометрии и термодинамических условий.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-08-00742).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Engelmeier L., Pollak S., Weidner E. Investigation of Superheated Liquid Carbon Dioxide Jets for Cutting Applications // *J. Supercrit. Fluids*. 2018. V. 132. P. 33.
2. Engelmeier L., Pollak S., Peters F., Weidner E. Superheated Liquid Carbon Dioxide Jets: Setting up and Phenomena // *Exp. Fluids*. 2018. V. 59. № 1. P. 5.
3. Cai B., Zhang Q., Jiang Y., Gu H., Wang H. Experimental Study on Spray Flash Evaporation under High Temperature and Pressure // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2018. V. 113. P. 1106.
4. Tsui Y.-Y., Lin S.-W. Three-dimensional Modeling of Fluid Dynamics and Heat Transfer for Two-fluid or Phase Change Flows // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2016. V. 93. P. 337.
5. Mutair S., Ikegami Y. On the Evaporation of Superheated Water Drops Formed by Flashing of Liquid Jets // *Int. J. Thermal Sci.* 2012. V. 57. P. 37.
6. Mutair S., Ikegami Y. Experimental Investigation on the Characteristics of Flash Evaporation from Superheated Water Jets for Desalination // *Desalination*. 2010. V. 251. № 1–3. P. 103.
7. Sotome I., Ogasawara Y., Nadachi Y., Takenaka M., Okadome H., Isobe S. Measurement of Steam/Water Ratio in the Nozzle Jet of an Oven System Using Super-

- heated Steam and Hot Water Spray // Jap. J. Food Eng. 2009. V. 10. № 3. P. 163.
8. Lee J., Madabhushi R., Fotache C., Gopalakrishnan S., Schmidt D. Flashing Flow of Superheated Jet Fuel // Proc. Combustion Institute. 2009. V. 32 (II), P. 3215.
 9. Плотников Л.В., Мажейко Н.А., Бусов К.А. Совершенствование процесса распыливания топлива в поршневых ДВС // Двигателестроение. 2014. № 3. С. 8.
 10. Lukynov K.V., Starostin A.A., Skripov P.V. Heat Transfer under High-power Heating of Liquids. 4. The Effect of Water Admixtures on the Heat Transfer in Superheated Hydrocarbons // Int. J. Heat Mass Transfer. 2017. V. 106. P. 657.
 11. Авдеев А.А. Устойчивость скачков вскипания // ТВТ. 2017. Т. 55. № 5. С. 769.
 12. Zalkind V.I., Zeigarnik Y.A., Nizovskiy V.L., Nizovskiy L.V., Schigel S.S. Superheated Water Atomization: Some New Aspects of Control and Determining Disperse Characteristics of Atomization Plume in Micron and Submicron Ranges of Droplet Size // J. Phys: Conf. Ser. 2017. V. 891. № 1. 012011.
 13. Алексеев В.Б., Залкинд В.И., Зейгарник Ю.А., Мариничев Д.В., Низовский В.Л., Низовский Л.В. О природе бимодального распределения капель по размерам при распыле перегретой воды // ТВТ. 2015. Т. 53. № 2. С. 221.
 14. Мажейко Н.А., Решетников А.В., Бусов К.А. и др. Влияние термических и геометрических факторов на распыл жидкости при взрывном вскипании // Тяжелое машиностроение. 2014. № 6. С. 35.
 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 // Int. J. Heat Mass Transfer. 2015. V. 85. P. 965.
 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. V. 19. № 2. P. 329.
 17. Reshetnikov A.V., Mazheiko N.A., Busov K.A. Recoil Force and Spray Angle of a Plane Jet of Superheated Water // Int. Phenomena Heat Transfer. 2017. V. 5. № 3. P. 201.
 18. Merker G.P., Schwarz C., Stiesch G., Otto F. Simulating Combustion. Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 401 p.
 19. Gimeno J., Martí-Aldaraví P., Carreres M., Peraza J.E. Effect of the Nozzle Holder on Injected Fuel Temperature for Experimental Test Rigs and its Influence on Diesel Sprays // Int. J. Eng. Research. 2018. V. 19. № 3. P. 374.
 20. Грехов Л.В. Аккумуляторные топливные системы двигателей внутреннего сгорания типа Common Rail. М.: МГТУ, 2000. 64 с.
 21. 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 // Instr. Exp. Tech. 2006. V. 53. № 1. P. 143.
 22. Жилкин Б.П., Ларионов И.Д., Шуба А.Н. Устройство для измерения температурного поля газового потока. Патент РФ на изобретение № 2230300. 2002.
 23. Zhilkin B.P., Larionov I.D., Shuba A.N. Applications of an Infrared Imager for Determining Temperature Fields in Gas Flows // Instr. Exp. Tech. 2004. V. 47. № 4. P. 545.
 24. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969. 824 с.
 25. Бусов К.А. Динамические характеристики струй перегретой воды при истечении через короткие каналы // Тепловые процессы в технике. 2011. Т. 3. № 7. С. 308.