

УДК 532.525.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПЫЛЕНИЯ И СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ ФОРСУНКИ

Е. Ю. Шадрин, И. С. Ануфриев, О. В. Шарыпов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: evgen_zavita@mail.ru, anufriev@itp.nsc.ru, sharypov@itp.nsc.ru

Исследуются процессы распыления и сжигания водоугольного топлива с помощью пневматической форсунки, работа которой основана на использовании пристенных и кумулятивных струй и эффекта Коанда. С помощью теневого метода определен дисперсный состав капель водоугольного топлива на выходе из форсунки. В области воспламенения топлива характерный размер капель в потоке составляет 20 мкм, размер частиц угля — 100 мкм. Результаты экспериментов на неохлаждаемом огневом стенде с неохлаждаемой топкой мощностью 5 МВт показали возможность совместного эффективного сжигания водоугольного топлива и измельченного каменного угля с использованием разработанной горелки.

Ключевые слова: водоугольное топливо, пневматическая форсунка, теневой метод, совместное сжигание.

DOI: 10.15372/PMTF20210316

Уголь является одним из наиболее распространенных и недорогих ископаемых топлив. В современном мировом производстве электроэнергии доля угля составляет 38,5 %, а его ежегодное потребление превышает $5 \cdot 10^9$ т н.э. Однако уголь является также одним из наиболее “грязных” топлив, его сжигание сопровождается большими объемами выбросов CO_x , NO_x , SO_x , образованием большого количества золошлаковых отходов, летучей золы с высоким содержанием тяжелых металлов и токсичной воды, загрязненной радионуклидами [1]. Тем не менее согласно прогнозам Международного энергетического агентства даже с учетом ужесточения климатической и экологической политики, роста потребления природного газа и развития возобновляемой энергетики спрос на уголь в перспективе до 2040 г. будет сохраняться на уровне $3 \cdot 10^9$ т н.э. в год. Таким образом, вредное экологическое воздействие угольной энергетики может быть уменьшено только путем улучшения технологий сжигания угля.

Эффективным способом решения данной задачи может оказаться перевод котлов на водоугольное топливо (ВУТ) [2, 3]. Сжигание ВУТ по сравнению с традиционными способами сжигания угля имеет ряд преимуществ: увеличение степени выгорания горючей массы до 95 %; увеличение КПД котлов до 85 %; снижение себестоимости единицы выра-

Исследование процесса совместного сжигания водоугольного топлива и пылеугольной смеси выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 18-29-24007-мк), теневая и цифровая визуализация выполнены в рамках государственного задания Института теплофизики СО РАН.

© Шадрин Е. Ю., Ануфриев И. С., Шарыпов О. В., 2021

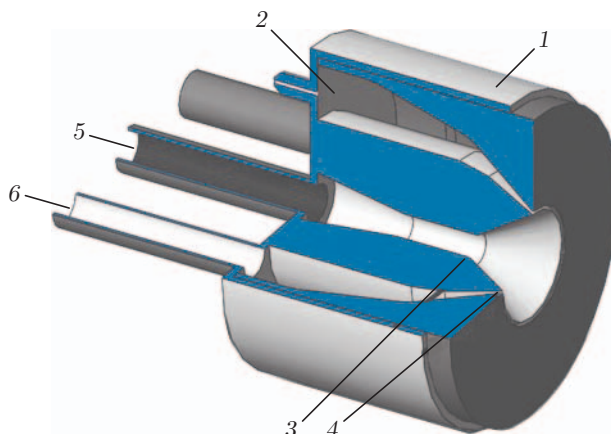


Рис. 1. Схема пневматической форсунки:

1 — корпус, 2 — газовая камера, 3 — диффузор, 4 — кольцевое сопло, 5 — канал подачи ВУТ, 6 — канал подачи воздуха

батываемой тепловой энергии в 1,5–5,0 раз в зависимости от соотношения цен на уголь и другие энергоносители; взрывопожаробезопасность; возможность транспортировки ВУТ по трубопроводам, в том числе на дальние расстояния, и др. [2]. Однако данная технология имеет ряд недостатков: для предотвращения расслоения ВУТ требуется применение пластификаторов, а наличие в составе большого количества воды создает угрозу замерзания такого топлива в соответствующих климатических условиях; высокая обводненность является одной из основных сложностей при зажигании ВУТ; возможны заклинивание и эрозия топливных форсунок [4]; ВУТ имеет меньшую теплоту сгорания. Проблема эффективного распыления ВУТ и долговечности форсунок является основной при сжигании ВУТ. Для ее решения необходимо обеспечить отсутствие в конструкции форсунки узких каналов и контакт поверхности форсунки с высокоскоростным потоком ВУТ.

В настоящей работе для устранения указанных недостатков используется пневматическая форсунка [5] для распыления суспензионного топлива, разработанная в Институте теплофизики СО РАН (рис. 1). Форсунка, изготовленная из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т, состоит из цилиндрического корпуса, внутри которого расположены газовая камера с кольцевым коническим отверстием и канал для подачи суспензии с диффузорным соплом, и присоединительных штуцеров. Диаметр корпуса форсунки равен 80 мм, длина корпуса 50 мм, диаметр канала для подачи жидкости 8 мм, ширина кольцевого зазора 1 мм, диаметр выходного отверстия диффузора 23 мм, угол раскрытия диффузора 60°.

Пневматическая форсунка работает следующим образом. Высокоскоростная струя газа (воздуха) при истечении из конического кольцевого сопла образует на выходе из форсунки сходящийся газовый поток. В результате течение разбивается на два потока: прямой и обратный. Возвратный поток формирует внутри диффузора тороидальный вихрь [6], в прямом направлении формируется течение газа вдоль оси форсунки. При подаче через центральный канал суспензии происходит ее взаимодействие с возвратной кольцевой струей газа. Вследствие этого суспензия прижимается к стенкам диффузора, и на выходе из диффузора при взаимодействии с первичной струей газа происходит дробление суспензии. В итоге формируется мелкодисперсный газокapельный поток в направлении вдоль оси форсунки. Часть мелких капелек поступает обратно с возвратной газовой струей. Конструкция форсунки удовлетворяет требованиям, предъявляемым к устройствам для распыления ВУТ: отсутствие узких каналов (для устранения возможного заклинивания) и контакта высокоскоростного потока суспензии с поверхностями форсунки (для предотвращения эрозии)

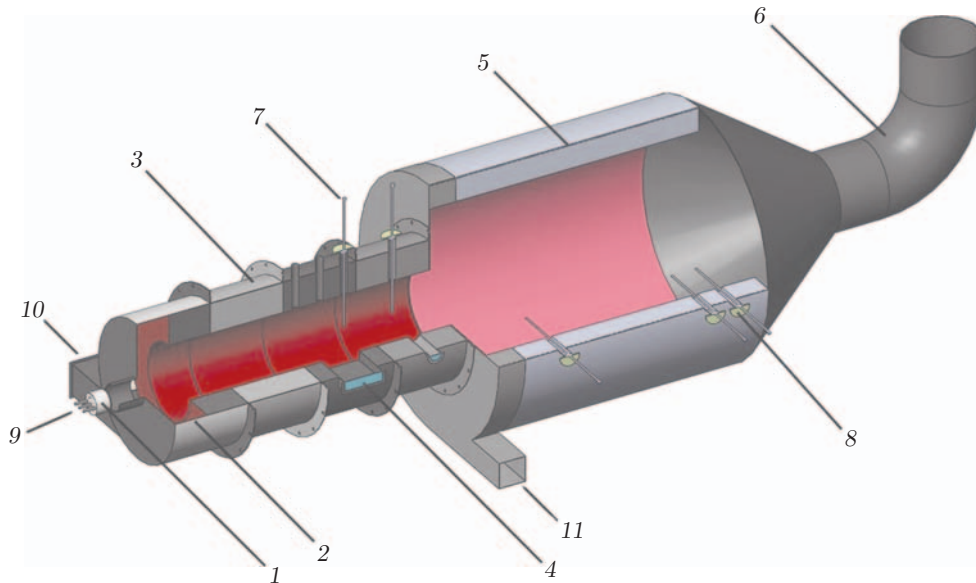


Рис. 2. Схема экспериментальной топки для совместного сжигания измельченного угля и ВУТ:

1 — форсунка, 2 — завихритель, 3 — камера сгорания, 4 — окно для визуального наблюдения, 5 — дожигатель, 6 — дымосос, 7 — термопара, 8 — зонд газоанализатора, 9 — канал подачи ВУТ, 10 — канал подачи пылеугольной смеси, 11 — канал подачи вторичного воздуха

за счет отдельной подачи жидкого топлива и распыляющего газа; обеспечение эффективного диспергирования жидкости за счет взаимодействия с высокоскоростной возвратной струей и др.

Целью настоящей работы является исследование возможности оптимизации режимных параметров при распылении ВУТ и первичные испытания форсунки в экспериментальной топке.

Испытания пневматической форсунки (горелки) при сжигании ВУТ проводились в экспериментальной топке мощностью до 5 МВт в Институте теплофизики СО РАН (рис. 2). Топка, имеющая цилиндрическую форму и длину 5 м, расположена горизонтально и разделена на отсеки различной длины и диаметра. Первый отсек (внутренний диаметр камеры равен 0,3 м, длина 2 м) предназначен для воспламенения и первичного сжигания топлива, а также для проведения визуальных наблюдений; во втором отсеке (внутренний диаметр камеры равен 1 м, длина 3 м) происходит догорание топлива. Корпус топки выполнен из стали толщиной 5 мм, внутри топка теплоизолирована слоем шамота толщиной 125 мм. Измерение температуры проводилось вблизи стенок камеры сгорания с использованием платинородиевой термопары. На выходе из камеры догорания с использованием газоанализатора ТЕСТ 203 исследуется газовый состав продуктов сгорания (для всех компонентов погрешность определения не превышает 5 %). Более подробное описание экспериментальной топки представлено в работе [7].

Эффективность сжигания жидкого топлива, в том числе ВУТ, зависит от качества диспергирования. Поэтому при разработке новых горелочных устройств необходимо изучить механизмы дробления топлива для управления характеристиками горения. В настоящей работе впервые проведены экспериментальные исследования дисперсного состава ВУТ при распылении предложенной форсункой. Для этого была создана экспериментальная установка (рис. 3), которая работает следующим образом. Поток сжатого воздуха

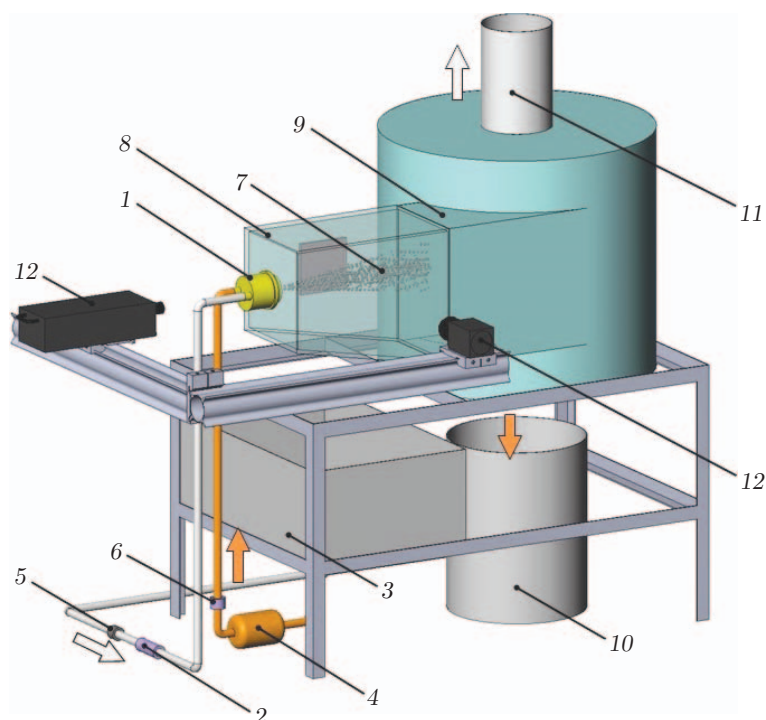


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для распыления ВУТ:

1 — пневматическая форсунка, 2 — измеритель расхода воздуха, 3 — емкость для хранения ВУТ, 4 — дозирующий насос ВУТ, 5 — игольчатый кран для регулирования подачи воздуха, 6 — шаровый кран для регулирования подачи ВУТ, 7 — газокпельный поток, 8 — измерительная камера; 9 — система улавливания ВУТ, 10 — емкость для сбора использованного ВУТ, 11 — вентиляционная труба, 12 — измерительная система; светлые стрелки — направление потока воздуха, темные — направление потока ВУТ

подается в форсунку 1 через измеритель расхода 2. Избыточное давление p воздуха в форсунке контролируется с помощью манометра. Жидкость подается в центральный канал форсунки из хранилища 3 с помощью насоса 4, расход измеряется расходомером. Расходы воздуха Q_a и жидкости Q_l регулируются с помощью игольчатого крана 5 и шарового крана 6. Газокпельный поток 7, формируемый в форсунке, подается через измерительную камеру 8 в систему улавливания ВУТ 9, в которой фильтруется с помощью специальных сеток: ВУТ стекает в емкость для сбора 10, а воздух поступает в систему вентиляции 11. Измерения проводятся с помощью измерительной системы 12.

Исследования дисперсного состава проводились с помощью метода теневой фотографии [8], для реализации которого использовалась цифровая CCD-камера ImpeX B-6620 (пространственное разрешение 6600×4400 пикселей) с установленным на ней макрообъективом Tamron SP AF 180mm (оптическое увеличение до 1 : 1). Таким образом, размер регистрируемой области составлял 35×23 мм. В каждом режиме выполнялась серия из 100 фотографий. Погрешность определения диаметра капель приблизительно равна 0,5 пикселя (3,6 мкм). На рис. 4 представлена теневая фотография распыляемого потока, обработанная с помощью алгоритма для определения положения и диаметра капель, взвешенных в исследуемом потоке [8]. На рис. 5 показано распределение капель по размерам при постоянном расходе жидкости и различных значениях избыточного давления воздуха в форсунке. Характерный размер частиц ВУТ равен $d = 20$ мкм. Следует отметить, что в потоке также присутствуют крупные (размером приблизительно 100 мкм) угольные частицы несферической формы, вследствие чего их идентификация с помощью используемого

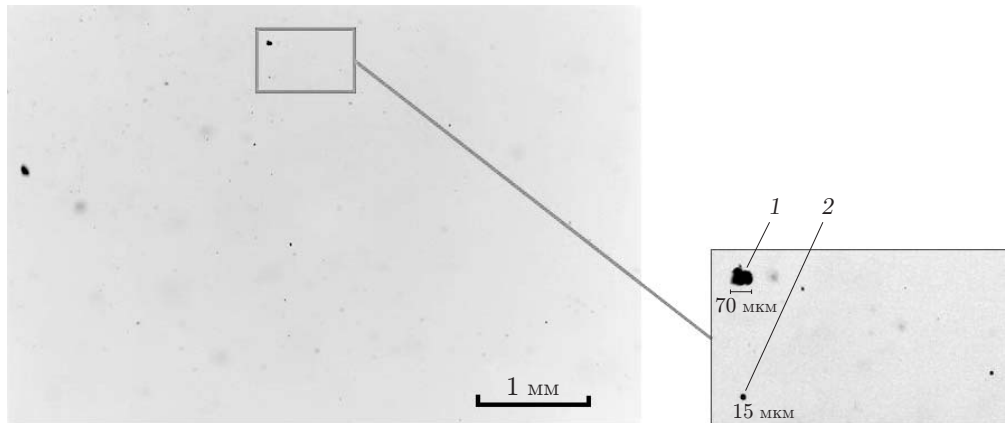


Рис. 4. Теневая фотография потока ВУТ, распыляемого пневматической форсункой:

1 — частица угля, 2 — капля ВУТ

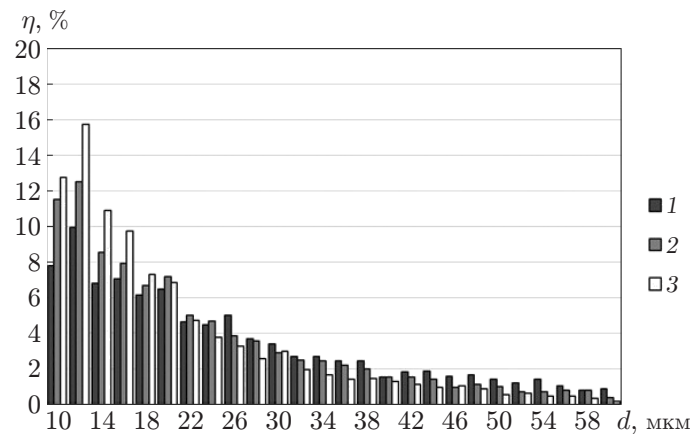


Рис. 5. Дисперсный состав ВУТ при постоянном расходе жидкости $Q_l = 90$ кг/ч и различных значениях давления:

1 — $p = 2 \cdot 10^5$ Па, 2 — $p = 3 \cdot 10^5$ Па, 3 — $p = 4 \cdot 10^5$ Па

алгоритма невозможна. Тем не менее такие параметры ВУТ характеризуют однородную газокапельную струю, сконцентрированную в пределах угла раскрытия газового потока, что обеспечивает эффективное воспламенение и сгорание ВУТ.

Опытно-промышленные испытания пневматической форсунки проведены при сжигании в экспериментальной топке распыленного ВУТ (массовая доля угля составляет 55 %, суспензия подготавливается с помощью кавитационного способа без применения пластификатора) и факельном сжигании пылеугольной смеси. На рис. 6, а, б представлены фотографии пламени в камере сгорания при сжигании измельченного угля и совместном сжигании угля и ВУТ. При горении угля во всем объеме камеры сгорания наблюдается однородное ярко-желтое свечение. При подаче ВУТ пламя становится менее ярким, заметны отдельно горящие частицы оранжевого цвета. Это может свидетельствовать о том, что при разбавлении горючей смеси ВУТ температура уменьшается. На рис. 6, в приведены зависимости от времени температуры в камере сгорания и газового состава на выходе из камеры дожигания. Запуск котла на угле происходит в течение 5 мин. При достижении температуры 1200 °С подается ВУТ. Совместная подача ВУТ и угля приводит к снижению температуры на 50 °С, выход на стационарный режим происходит через 1,5 мин. При совместном сжи-

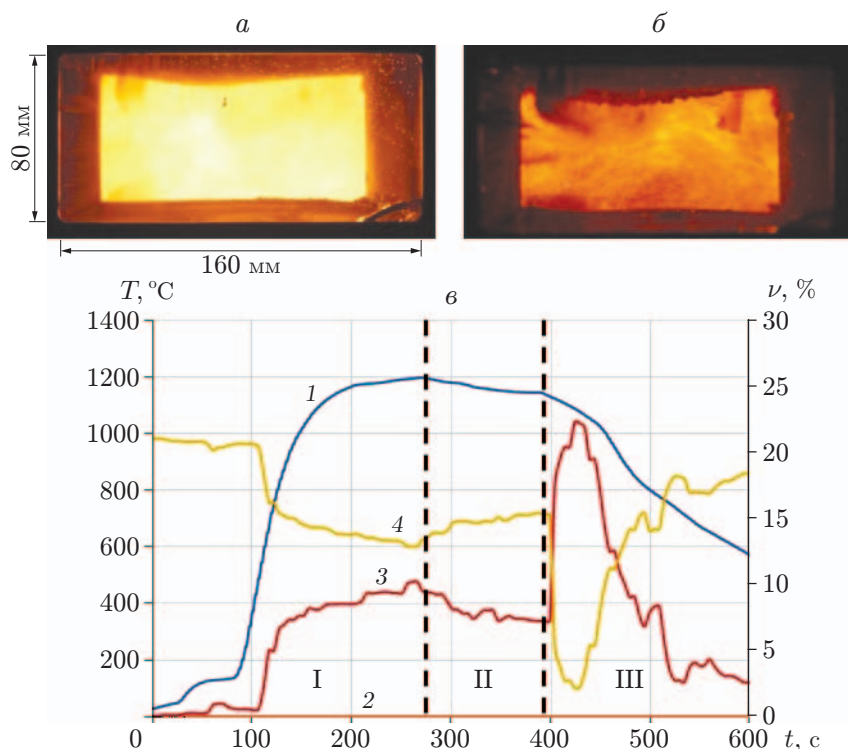


Рис. 6. Фотографии пламени при горении угля (а) и совместном сжигании угля и ВУТ (б) в экспериментальной топке мощностью 5 МВт, а также зависимости температуры среды вблизи стенок в камере сгорания топки (1) и газового состава продуктов сгорания на выходе из камеры дожига (2–4) от времени (в): 2 — NO_x , 3 — CO_2 , 4 — O_2 ; направление потока — слева направо; I — сжигание угля, II — совместное сжигание угля и ВУТ, III — сжигание ВУТ

гания ВУТ и угля объемная доля νNO_x в камере сгорания составляет 0,03 %, CO_2 — 7 %, O_2 — 15 %. Коэффициент избытка воздуха в камере сгорания (с учетом воздуха в форсунке) составляет $\alpha = 0,5$. Объемная доля CO , CH_4 , H_2 в камере сгорания близка к нулю. При сжигании ВУТ в отсутствие угля (с подачей первичного воздуха через завихритель) факел потухает. Таким образом, показана возможность совместного эффективного сжигания ВУТ (45 %) и распыленного угольного топлива с использованием разработанной форсунки в экспериментальной топке при мощности 1 МВт и массовой доле воды в ВУТ 45 %.

Проведены экспериментальная оптимизация режимных параметров при распылении ВУТ и первичные испытания сжигания ВУТ в предложенной пневматической форсунке, работа которой основана на использовании пристенных и кумулятивных струй и эффекта Коанда. В конструкции форсунки отсутствуют узкие каналы, в которых возможно запыление суспензионного топлива, и контакт высокоскоростного потока суспензии с поверхностями форсунки, предотвращающий эрозию элементов форсунки за счет раздельной подачи жидкого топлива и распыляющего воздуха. Форсунка обеспечивает равномерное и однородное диспергирование ВУТ, от которого зависит качество сжигания топлива; характерный размер капель воды в составе ВУТ на выходе из форсунки равен 20 мкм. Предложенная форсунка использована для сжигания ВУТ в опытно-промышленном котле. Показана возможность совместного эффективного сжигания ВУТ и распыленного угольного топлива в топке мощностью 1 МВт с хорошими экологическими показателями.

Полученные результаты могут быть использованы при численном моделировании процессов диспергирования и сжигания ВУТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Guttikunda S. K., Jawahar P.** Atmospheric emissions and pollution from the coal-fired thermal power plants in India // Atmospher. Environment. 2014. V. 92. P. 449–460. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.04.057.
2. **Мальцев Л. И., Кравченко И. В., Лазарев С. И., Лапин Д. А.** Сжигание каменного угля в виде водоугольной суспензии в котлах малой мощности // Теплоэнергетика. 2014. № 7. С. 25–29.
3. **Kurgankina M. A., Nyashina G. S., Strizhak P. A.** Prospects of thermal power plants switching from traditional fuels to coal-water slurries containing petrochemicals // Sci. Total Environment. 2019. V. 671. P. 568–577. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.349.
4. **Ходаков Г. С.** Водоугольные суспензии в энергетике // Теплоэнергетика. 2007. Т. 54, № 1. С. 35–45.
5. **Пат. 2346756 РФ, В 05 В 7/08.** Пневматическая форсунка / Л. И. Мальцев. Оpubл. 20.02.2009.
6. **Alekseenko S. V., Anufriev I. S., Dekterev A. A., et al.** Experimental and numerical investigation of aerodynamics of a pneumatic nozzle for suspension // Intern. J. Heat Fluid Flow. 2019. V. 77. P. 288–298. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2019.04.013.
7. **Abaimov N. A., Butakov E. B., Burdukov A. P., et al.** Investigation of air-blown two-stage entrained-flow gasification of micronized coal // Fuel. 2020. V. 271. 117487. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117487.
8. **Anufriev I. S., Shadrin E. Y., Kopyev E. P., et al.** Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet // Appl. Thermal Engng. 2019. V. 163. 114400. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114400.

*Поступила в редакцию 12/III 2021 г.,
после доработки — 17/III 2021 г.
Принята к публикации 29/III 2021 г.*
