

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ ФОРСУНОК С ГАЗИФИКАЦИЕЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

**А.В. Кузнецов, С.В. Медвецкий, А.И. Ивашов,
В.В. Зеленцов, Н.В. Быков**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: avk-51@mail.ru; sergey-medvetskiy@yandex.ru; ivashovai@mail.ru;
dean@sm.bmstu.ru; bykovnv@bk.ru

Разработано стендовое оборудование и выполнены экспериментальные исследования процесса функционирования пленочных форсунок с газификацией пленки жидкости. Экспериментальным путем установлены зависимости медианного диаметра капель от давлений жидкости и воздуха на входе в форсунку, давления в полости форсунки, расхода жидкости и отношения расходов воздуха и жидкости от скорости воздушного потока. В результате обработки экспериментальных данных выявлены качественные и количественные зависимости значений гидро- и газодинамических параметров газифицированной пленки от режимов подачи жидкости и воздуха в полость газожидкостной форсунки. Использование полученных результатов при проектировании пленочных форсунок с газификацией пленки жидкости позволит существенно повысить их эффективность.

Ключевые слова: газификация пленки жидкости, влажность газожидкостной среды, форсунка, струя жидкости.

EXPERIMENTAL STUDIES OF FILM NOZZLES FUNCTIONING PROCESS WITH THE LIQUID FILM GASIFICATION

**A.V. Kuznetsov, S.V. Medvetskiy, A.I. Ivashov,
V.V. Zelentsov, N.V. Bykov**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: avk-51@mail.ru; sergey-medvetskiy@yandex.ru; ivashovai@mail.ru;
dean@sm.bmstu.ru; bykovnv@bk.ru

The aim of this work is to develop bench equipment and perform experimental studies of film nozzles functioning process with the liquid film gasification. The findings of the research illustrate the following parameters: the relation between the median droplet diameter and the fluid pressure at the nozzle inlet, the air pressure at the nozzle inlet, nozzle cavity pressure, fluid flow rate, air and liquid flow rate. As a result of experimental data processing, we revealed qualitative and quantitative relation between the hydro- and gasodynamic values of the gas-saturated film and modes of liquid and air supply in the cavity of a gas-liquid injector. The results obtained in designing the film nozzles with liquid film gasification will give an opportunity to significantly improve their performance.

Keywords: liquid film gasification, moisture of gas-liquid medium, nozzle, liquid jet.

В ряде теплообменных аппаратов энергетики и химической промышленности [1, 2] происходит взаимодействие газа и сплошной жидкой пленки, вытекающей из кольцевой щели. Проблема распыливания (или диспергирования) жидкости имеет также важное значение

для обеспечения надежного сгорания топливных смесей в двигателях внутреннего сгорания и в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей [3, 4]. В порошковой металлургии является актуальной задача получения определенного размера частиц конечного порошкового продукта [5].

В таких аппаратах газ взаимодействует со сплошной жидкостной пленкой каплями, на которые распадается струя. Существуют методики расчета подобных процессов [6–8]. Механизм создания пленки жидкости и ее последующего дробления обусловлен рядом параметров, определяющих качество дробления [6, 7, 9]. К ним относятся: толщина пленки, скорость ее движения по поверхности, форма поверхности, соотношение массовых расходов воздуха и распыляемой жидкости. Получение пленки жидкости обеспечивается путем равномерной подачи жидкости на профилированную поверхность с последующим воздействием на эту пленку струи газа. Под действием набегающего потока газа скорость движения жидкости увеличивается, а толщина ее уменьшается. При экспериментальных исследованиях ставилась задача по выявлению закономерности влияния различных факторов (давления воздуха, плотности жидкости, расходов воздуха и жидкости, увеличения скорости воздушного потока) на процесс газификации пленки жидкости при функционировании пленочной форсунки.

Экспериментальные исследования пленочной форсунки с газификацией пленки жидкости. Экспериментальные исследования процесса функционирования пленочных форсунок с газификацией пленки жидкости проводились на специальном стенде, схема которого представлена на рис. 1. Введены следующие обозначения: 1 — датчики давления; 2 — система подачи рабочей жидкости; 3 — компрессор; 4 —

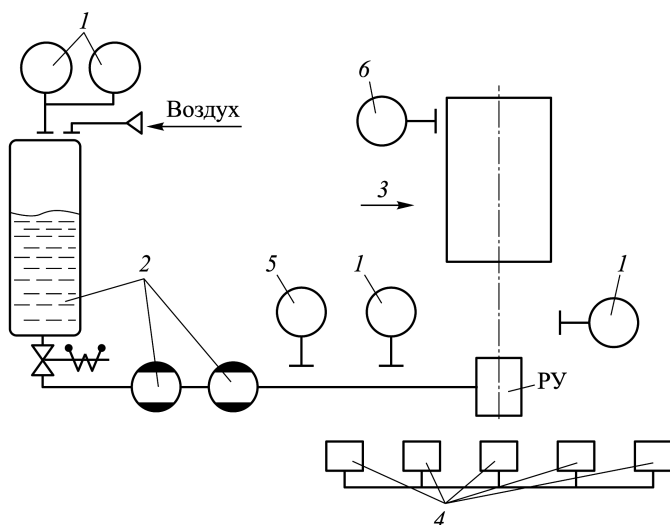


Рис. 1. Стенд для продувок моделей распыляющих устройств

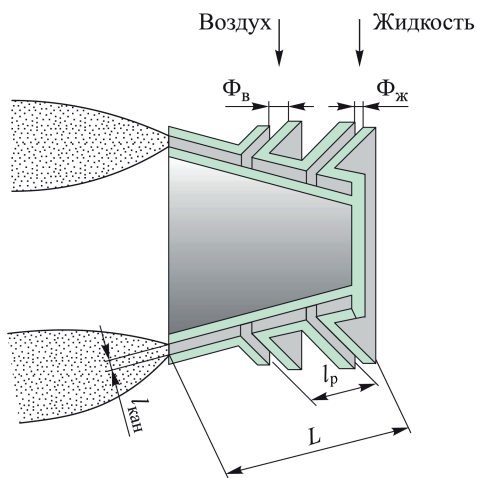


Рис. 2. Схема форсунки

капель в высокоскоростном потоке газа использовалась система проб с изокинетичным входом [9]. Пробы отбирали в пяти точках поперечного сечения потока. В систему отбора проб входило пять пробоотборников с кольцевыми газодинамическими затворами, установленными на одной линии на общем коллекторе, причем в каждом пробоотборнике устанавливалось две подложки. При измерении мелкой фракции использовались четырехступенчатые импакторы, предварительно откалиброванные на рабочей жидкости.

В процессе испытаний использовалась форсунка с постоянной шириной канала длиной $L = 200$ мм с предварительным созданием пленки. Схема форсунки представлена на рис. 2, где $l_{кан}$ — ширина канала; $\Phi_{ж}$ — диаметр канала жидкости; $\Phi_{в}$ — диаметр канала воздуха; l_p — расстояние между каналами жидкости и воздуха. Конусный вариант выполнения конструкции форсунки обусловлен целесообразностью увеличения поверхности смешивания жидкости и воздуха.

Анализ результатов (таблица), полученных при испытаниях, показывает, что повышение давления воздуха и снижение давления жидкости приводит к повышению эффективности процесса дробления (см., например, эксперимент № 12).

В таблице введены обозначения: $P_{вх.ж}$ и $P_{вх.в}$ — давление жидкости и воздуха на входе в форсунку; $P_{пол}$ — давление в полости форсунки; $G_{ж}$ — расход жидкости; $G_{в}/G_{ж}$ — отношение расходов воздуха и жидкости; d_m — медианный диаметр капель; Σ_{10} — процентное содержание капель диаметром до 10 мкм.

В целях выявления особенностей процесса дробления была выполнена математическая обработка результатов испытания пленочной форсунки с газификацией пленки жидкости, представленных в таблице. Исследовалась зависимость медианного диаметра капель d_m от давления жидкости на входе в форсунку, давления воздуха на входе в форсунку, давления в полости форсунки, расхода жидкости и отношения

система отбора проб; 5 — расходомер GE Sensing DF868 для измерения расхода жидкости; 6 — расходомер ЭМИС-РС 245 для измерения расхода воздуха; РУ — система измерения параметров стэнда и рабочего устройства. В качестве рабочей жидкости использовалась вода [10].

Экспериментальное определение фракционно-дисперсных характеристик проводилось методом улавливания капель на первичные подложки с последующей их обработкой. Для улавливания

Значения фракционно-дисперсных характеристик

Номер эксперимента	$P_{\text{вх.ж}} \cdot 10^5$, Па	$P_{\text{вх.в}} \cdot 10^5$, Па	$P_{\text{пол}} \cdot 10^5$, Па	$G_{\text{ж}} \cdot 10^{-6}$, м ³ /с	$G_{\text{в}}/G_{\text{ж}}$	$d_{\text{м}}$, мкм	Σ_{10} , %
1	2,3	2,2	0,34	42,7	0,7	15,3	27,4
2	2,3	4,4	1,16	34,5	1,4	10,0	50,0
3	2,5	3,6	0,85	40,1	1,0	10,0	50,0
4	1,4	1,3	0,24	35,0	0,7	13,3	30,0
5	2,8	4,1	1,16	42,0	1,1	9,97	50,3
6	8,0	4,2	1,17	83,0	0,6	12,0	34,7
7	4,6	4,2	1,41	60,0	0,8	10,6	45,0
8	6,5	4,4	0,85	71,4	0,8	11,0	40,4
9	2,8	3,5	1,50	43,7	0,96	10,7	40,0
10	2,9	5,0	1,50	48,3	1,2	9,2	57,0
11	16,0	5,0	1,78	112,5	0,5	10,8	44,0
12	14,7	5,7	1,79	57,5	1,1	8,2	65,0
13	15,6	5,7	1,79	116,67	0,5	10,4	46,0
14	15,1	5,7	2,00	116,6	0,5	10,6	45,0
15	11,8	6,3	2,30	103,0	0,7	10,2	48,0
16	13,0	7,0	2,00	105,0	0,7	10,8	42,0
17	12,9	6,4	2,05	103,0	0,7	10,2	48,0

расходов воздуха и жидкости. Результаты обработки представлены на рис. 3–6.

В результате анализа выявлено, что в процессе проведения эксперимента наблюдался существенный стохастический разброс значений медианного диаметра капель $d_{\text{м}}$ при фиксированных значениях

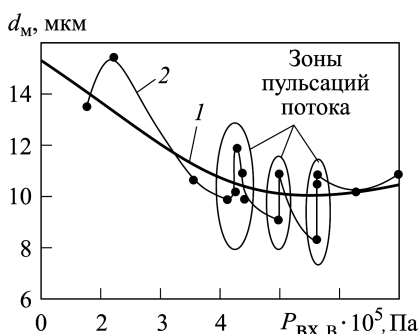


Рис. 3. Экспериментальная зависимость медианного диаметра капель от давления воздуха в полости форсунки:

1 — квадратичная аппроксимация экспериментальных данных; 2 — линейная аппроксимация экспериментальных данных

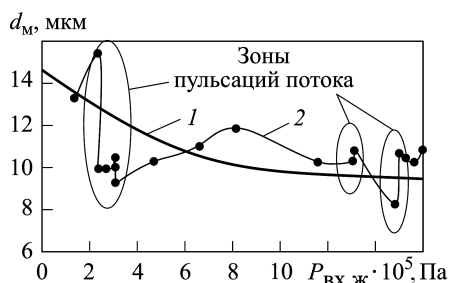


Рис. 4. Экспериментальная зависимость медианного диаметра капель от давления жидкости в полости форсунки (кривые 1, 2 — см. рис. 3)

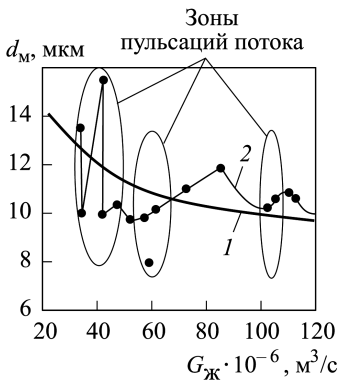


Рис. 5. Экспериментальная зависимость медианного диаметра капель от расхода жидкости в полости форсунки (кривые 1, 2 — см. рис. 3)

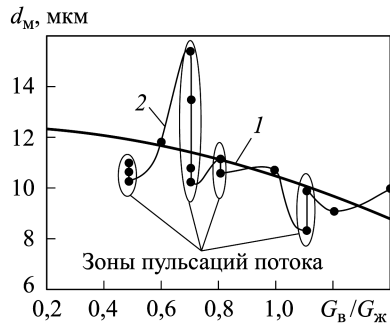


Рис. 6. Экспериментальная зависимость медианного диаметра капель от отношения расходов воздуха и жидкости в полости форсунки (кривые 1, 2 — см. рис. 3)

гидро- и газодинамических параметров потока — давления жидкости на входе в форсунку, давления воздуха на входе в форсунку, давления в полости форсунки, расхода жидкости и отношения расходов воздуха и жидкости. Настоящая особенность процесса дробления пленок жидкости в пленочных форсунках с газификацией обусловлена наличием высокочастотных колебаний как струи жидкости, так и газожидкостной среды в канале форсунки, а также локальных процессов кавитации, в результате которых происходит разрушение струи жидкости. Кроме того, разброс значений этих параметров обусловлен и погрешностью результатов измерений. Теоретическое обоснование этого процесса разработано в [7] путем численного моделирования. Характерные зоны пульсаций, полученные экспериментальным путем, приведены на рис. 3–6. Здесь же показаны результаты линейной и квадратичной аппроксимаций экспериментальных данных, выполненных с использованием стандартной программы MathCAD.

С целью выявить интегральные зависимости медианного диаметра капель от значений гидро- и газодинамических параметров (давления воздуха в полости форсунки, плотности жидкости, соотношения расходов воздуха и жидкости) для различных значений скорости воздушного потока были выполнены расчеты этих параметров по известным формулам [4].

Средний (медианный) диаметр капель d_m рассчитывался по формуле

$$d_m = 3,33 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\sigma \rho_{ж} D_{\phi}}{\rho_{в} v_{в}^2} \right)^{0,5} \left(1 + \frac{m_{ж}}{m_2} \right) + 13,0 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\mu_{ж}^2}{\sigma \rho_{ж}} \right)^{0,425} D_{\phi} \left(1 + \frac{m_{ж}}{m_{в}} \right),$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости; $D_{\text{ф}}$ — характерный диаметр форсунки; $\mu_{\text{ж}}$ — вязкость жидкости; $v_{\text{в}}$ — скорость воздушного потока; $\frac{m_{\text{ж}}}{m_{\text{в}}}$ — отношение массовых расходов жидкости и воздуха.

Формула (1) справедлива для маловязкой жидкости. Результаты расчетов медианного диаметра капель в зависимости от давления воздуха в полости форсунки для разных значений скорости воздушного потока, от плотности жидкости, от соотношения расходов воздуха и жидкости, а также от скорости воздушного потока приведены на рис. 7–9.

Закключение. Анализ представленных результатов экспериментальных исследований пленочных форсунок с газификацией пленки жидкости показывает, что динамика процесса их функционирования носит нестационарный, пульсирующий характер. Экспериментальным путем показано, что медианный диаметр капель существенно уменьшается при увеличении давления воздуха, уменьшении плотности жидкости, увеличении расходов воздуха и жидкости и увеличении скорости воздушного потока. Результаты линейной и квадратичной аппроксимации полученных экспериментальных данных позволили выявить качественную и количественную зависимость значений гидро- и газодинамических параметров капельной среды от режимов подачи жидкости и воздуха в полость газожидкостной форсунки.

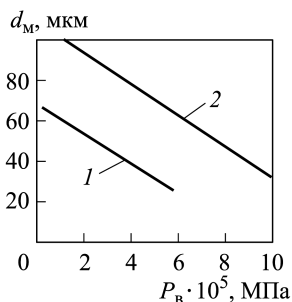


Рис. 7. Зависимость медианного диаметра капель от давления воздуха в полости форсунки для разных значений скорости воздушного потока $v_{\text{в}}$:

1 — $v_{\text{в}} = 79,25 \text{ м/с}$; 2 — $v_{\text{в}} = 67,1 \text{ м/с}$

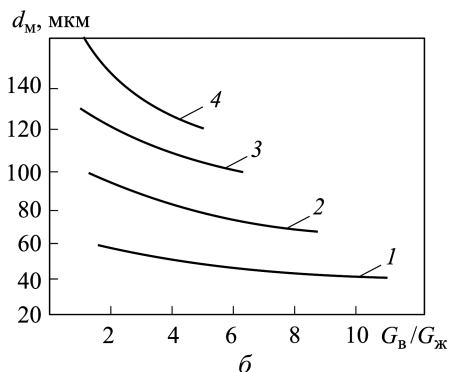
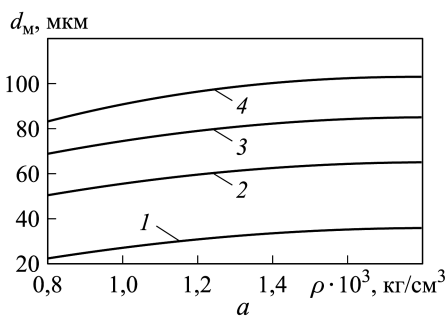


Рис. 8. Зависимость медианного диаметра капель от плотности жидкости (а) и соотношения расходов воздуха и жидкости (б):

1 — $v_{\text{в}} = 121,92 \text{ м/с}$; 2 — $v_{\text{в}} = 79,25 \text{ м/с}$; 3 — $v_{\text{в}} = 67,1 \text{ м/с}$; 4 — $v_{\text{в}} = 54,9 \text{ м/с}$

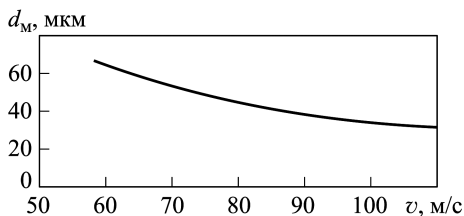


Рис. 9. Зависимость медианного диаметра капель от скорости воздушного потока

Использование полученных результатов в практике проектирования пленочных форсунок с газификацией пленки жидкости позволит существенно повысить их эффективность.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (госзадание № 1224 “Обеспечение проведения научных исследований 2014–2016 гг.”).

ЛИТЕРАТУРА

1. Семенов В.П., Платонов Н.И. Исследование теплообмена в контактном аппарате с пленочными форсунками // Вестник Южно-Уральского гос. ун-та. Сер. Энергетика. 2008. № 26 (126). С. 10–13.
2. Ходырев А.И., Куликов С.А. Процесс распыливания и оборудование для его реализации при добыче нефти и газа // Территория “Нефтегаз”. 2011. № 3. С. 42–45.
3. Евстигнеев В.В., Еськов А.В., Клочков А.В. Комплекс контроля дисперсного состава капель струи распыленного топлива // Ползуновский вестник. 2006. № 4. С. 58–63.
4. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей / Б.В. Раушенбах, С.А. Белый, И.Б. Беспалый, В.Я. Бородачев, М.С. Вольнский, А.Г. Прудников. М.: Машиностроение, 1964. 525 с.
5. Экспериментальное исследование диспергирования жидкости эжекционными форсунками / В.А. Архипов, С.С. Бондарчук, М.Я. Евсевлев, И.К. Жарова, А.С. Жуков, С.В. Змановский, Е.А. Козлов, А.И. Коноваленко, В.Ф. Трофимов // Инженерно-физический журнал. 2013. Т. 86. № 6. С. 1229–1236.
6. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В., Такаяма К. Разрушение капель жидкости. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 307 с.
7. Кузнецов А.В., Зеленцов В.В., Ивашов А.И., Бездомников А.В. Особенности начальной фазы процесса функционирования пленочной форсунки с газификацией пленки жидкости // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 5. С. 33–45.
8. Кузнецов А.В. Математическая модель процесса взаимодействия одиночной нестационарной сверхзвуковой струи с подвижной преградой конечных размеров // Авиационная техника. 1986. № 1. С. 27–29.
9. Пажу Д.Г., Галустов В.С. Основы техники распыливания жидкостей. М.: Химия, 1984. 256 с.
10. Красилов В.Ф. Справочник по гидрогазодинамике. М.: Изд-во МЭИ, 1992. 99 с.

REFERENCES

- [1] Semenov V.P., Platonov N.I. The Analysis of Heat Transform in a Contact Film Jet Apparatus. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gos. univ. Ser. Energetika [Bulletin of South Ural State University. Ser. Power Engineering], 2008, no. 26 (126), pp. 10–13 (in Russ.).

- [2] Khodyrev A.I., Kulikov S.A. Spray Atomization and Equipment for its Implementation in Oil and Gas Recovery. *Territoriya Neftegaz* (Oil and Gas Territory), 2011, no. 3, pp. 42–45 (in Russ.).
- [3] Evstigneev V.V., Es'kov A.V., Klochkov A.V. The System for Control of the Size-Consist of the Atomized Fuel Stream Drops. *Polzunovskiy vestnik*, 2006, no. 4, pp. 58–63 (in Russ.).
- [4] Raushenbakh B.V., Belyy S.A., Bespalyy I.B., Borodachev V.Ya., Volynskiy M.S., Prudnikov A.G. Fizicheskie osnovy rabocheho protsessa v kamerakh sgoraniya vozduшно-reaktivnykh dvigateley [Principal Physics of the Working Process in the Jet Engine Combustion Chambers]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1964. 525 p.
- [5] Arkhipov V.A., Bondarchuk S.S., Evsevlev M.Ya., Zharova I.K., Zhukov A.S., Zmanovskiy S.V., Kozlov E.A., Konovalenko A.I., Trofimov V.F. Experimental Investigation of the Dispersion of Liquids by Ejection Atomizers. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, iss. 6, pp. 1306–1314.
- [6] Gelfand B.E., Silnikov M.V., Takayama K. Razrushenie kapel' zhidkosti [Liquid Droplet Breakup]. St. Petersburg, Politekh. Univ. Publ., 2008. 307 p.
- [7] Kuznetsov A.V., Zelentsov V.V., Ivashov A.I., Bezdomnikov A.V. Features of Initial Operation Phase for Film Nozzle with Gasifying of the Liquid Film. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinotr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2014, no. 5, pp. 33–45 (in Russ.).
- [8] Kuznetsov A.V. Mathematical model of the interaction process of a single unsteady supersonic jet with moving obstacle of finite dimensions. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Aviat. Tekh.* [Russ. Aeronaut.], 1986, no. 1, pp. 27–29 (in Russ.).
- [9] Pazhi D.G., Galustov V.S. Osnovy tekhniki raspylivaniya zhidkostey [Basic Techniques of Liquid Atomization]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 256 p.
- [10] Krasilov V.F. Spravochnik po gidrogazodinamike [Handbook of Fluid Dynamics]. Moscow, MEI Publ., 1992. 99 p.

Статья поступила в редакцию 8.04.2015

Кузнецов Александр Владимирович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Kuznetsov A.V. — Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Scientist of Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Медвецкий Сергей Владимирович — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Medvetskiy S.V. — Dr. Sci. (Eng.), Professor of Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Ивашов Александр Иванович — канд. техн. наук, ведущий инженер лаборатории дистанционного зондирования МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Ivashov A.I. — Cand. Sci. (Eng.), Leading Engineer of Remote Sensing Laboratory, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Зеленцов Валентин Викторович — канд. техн. наук, советник ректора МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Zelentsov V.V. — Cand. Sci. (Eng.), the Rector's Council, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Быков Никита Валерьевич — старший преподаватель кафедры “Ракетные и импульсные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5).

Bykov N.V. — Senior Teacher of Rocket and Pulse Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кузнецов А.В., Медвецкий С.В., Ивашов А.И., Зеленцов В.В., Быков Н.В. Экспериментальные исследования процесса функционирования пленочных форсунок с газификацией пленки жидкости // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 2. С. 72–80. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-2-72-80

Please cite this article in English as:

Kuznetsov A.V., Medvetkiy S.V., Ivashov A.I., Zelentsov V.V., Bykov N.V. Experimental studies of film nozzles functioning process with the liquid film gasification. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 2, pp. 72–80. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-2-72-80