

УДК 66.069.83

ОСОБЕННОСТИ НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЫ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПЛЕНОЧНОЙ ФОРСУНКИ С ГАЗИФИКАЦИЕЙ ПЛЕНКИ ЖИДКОСТИ

А.В. Кузнецов¹, В.В. Зеленцов¹, А.И. Ивашов¹, А.В. Бездомников²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: avk-51@mail.ru; dean@sm.bmstu.ru; ivashovai@mail.ru

²Новомосковский институт (филиал) РХТУ им. Д.И. Менделеева,
г. Новомосковск, Тульская обл., Российская Федерация
e-mail: antonvb65@mail.ru

Разработана математическая модель процесса формирования и газификации пленки жидкости и выполнено численное моделирование процесса распада струи жидкости как непосредственно при ударе о жесткую стенку в щелевом канале, так и при последующем воздействии струи воздуха на образовавшуюся пленку жидкости. Выполненные экспериментальные исследования этого процесса показали достоверность разработанной математической модели. В отличие от известных разработанная математическая модель позволила рассчитать влажность газожидкостной среды и распределение капель непосредственно в полости форсунки. Анализ полученных результатов показал, что в процессе установления течения в пленочных форсунках происходит соударение струи жидкости со стенкой щелевого канала форсунки, а затем ее разворот к стенке щелевого канала, прилегающей к соплу, что приводит к разрушению струи жидкости и реализации механизма высокочастотного разрушения струи жидкости на начальной стадии. Расчетным путем выявлено, что при газификации пленки жидкости механизм каплеобразования существенно меняется. В этом случае происходит радиальное взаимодействие струй жидкости и газа, что приводит к образованию в этой зоне области повышенного давления и, как следствие, возникновению кавитации, которая существенно усиливает механизм дробления жидкости.

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

FEATURES OF INITIAL OPERATION PHASE FOR FILM NOZZLE WITH GASIFYING OF THE LIQUID FILM

A.V. Kuznetsov¹, V.V. Zelentsov¹, A.I. Ivashov¹, A.V. Bezdornikov²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: avk-51@mail.ru; dean@sm.bmstu.ru; ivashovai@mail.ru

²Novomoskovskiy Institute (branch) of the Mendeleev Russian Chemical-Technological University, Novomoskovsk, Tula region, Russian Federation
e-mail: antonvb65@mail.ru

A mathematical model process of the forming and gasifying of the liquid film has been developed. The numerical simulation process of the disintegration of the liquid jet both directly on the rigid wall impact in a slot channel and at the subsequent exposure of air stream upon the forming liquid film is carried out. Performed experimental

researches of this process have shown the accuracy of the developed mathematical model. In contrast to the known ones, the developed mathematical model allows to calculate the gas-liquid medium humidity and droplet distribution immediately within the nozzle cavity. Analysis of the results showed that during the establishment process of liquid flow within the film nozzles there is a collision of a liquid jet with the wall of the slotted channel. Then there is liquid flow's turn to the wall of the slotted channel contiguous to the slit nozzle, which leads to the destruction of the liquid jet and to the mechanism implementation of the high-frequency disintegration for the liquid jet in the initial stage. Calculation revealed that the dropping mechanism varies significantly at the gasifying of the liquid film. In this case the radial interference of liquid and gas jets occurs, which leads to the pressure space forming in this zone and, as a result, to incipient cavitation which significantly reinforces crushing mechanism of fluid.

Keywords: gasifying of the liquid film, gas-liquid medium humidity, nozzle, liquid jet.

Распыляющие устройства (форсунки) широко применяются в промышленности, в частности для впрыска топлива в газотурбинных двигателях [1], в энергетике [2], а также в аэрокосмической промышленности для впрыска топлива в жидкостных ракетных двигателях [3]. Основными показателями, характеризующими качество распыливания, являются мелкодисперсность и однородность по размерам капель (монодисперсность). Наиболее перспективными, как указано в работе [4], являются следующие способы распыливания: ультразвуковое, электростатическое, пульсационное, с предварительным газонасыщением и электрогидравлическое. Это обусловлено тем, что такие способы распыливания жидкостей позволяют существенно увеличивать долю энергии, затрачиваемой непосредственно на диспергирование.

В форсунках с предварительным газонасыщением для увеличения поверхностной энергии газ в жидкость вводят под давлением. Пузырьки газа вызывают значительное увеличение поверхностной энергии, т.е. разрывают жидкость на капли еще до ее истечения из форсунки и уменьшают ее эффективную вязкость [4]. Кроме того, газ частично растворяется в жидкости, что существенно уменьшает ее энтропию. При истечении из распылителя пузырьки газа резко расширяются до давления окружающей среды, тем самым разрывая жидкость на мелкодисперсные капли. Растворенный в жидкости газ начинает десорбироваться и при определенных условиях жидкость вскипает.

Наиболее широкое распространение вследствие своей конструктивной простоты получили форсунки с предварительным созданием пленки жидкости. Механизм распада пленки определяется как скоростью движения потока воздуха по отношению к прилегающему слою жидкости и его параметрами, так и свойствами самой жидкости [4]. В частности, под действием сил трения на первоначально гладкой поверхности пленки образуются неровности, а затем неустойчивые нити жидкости. С увеличением относительной скорости воздуха диаметр нитей и время их существования уменьшаются, а в результате распада нитей образуется большое число капель. При увеличении скорости

воздуха распад пелены жидкости происходит раньше, вследствие чего нити возникают ближе к распыляющей кромке форсунки. При этом диаметр и длина нитей уменьшаются, а образующиеся капли становятся мельче. В случае высоковязких жидкостей механизм разрыва пелены вследствие образования волн не действует, и жидкость сразу с распыляющей кромки растекается в виде длинных нитей. Распад нитей происходит на большом расстоянии от распыляющей кромки, где относительная скорость воздуха мала, поэтому размеры образующихся капель довольно велики. Одним из наиболее интересных вариантов таких устройств, является форсунка, в которой используется комбинация способа создания пленки жидкости с последующим ее газонасыщением. Однако процесс формирования и газификации пленки жидкости в настоящее время остается недостаточно изученным.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является выявление особенностей процесса функционирования пленочной форсунки на начальном этапе (этапе ее запуска). Возможность качественной и количественной оценки газодинамических параметров при формировании и газификации пленки жидкости позволит учитывать эти особенности на этапе проектирования форсунок с более высокой моно- и мелкодисперсностью распыла. Из анализа методов расчетов неравновесных многофазных газожидкостных струй следует, что ни чисто термодинамический, ни чисто газодинамический подходы к решению задач динамики формирования и распространения газожидкостной струи не могут обеспечивать достоверность и необходимый объем информации. Поэтому при разработке математических моделей процесса движения струи жидкости и ее взаимодействия с потоком газа был использован критерий состояния энтропии аэрозольной среды [5]. Параметры состояния струи жидкости и ее взаимодействие с потоком газа описываются уравнениями сохранения [5–8]:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) &= -\frac{\rho u}{r}; \\
 \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + u \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0; \\
 \frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} &= 0; \\
 \frac{\partial k}{\partial t} + v \frac{\partial k}{\partial x} + u \frac{\partial k}{\partial r} &= \frac{f(k)}{T} \frac{dQ}{dt}; \\
 \frac{p + A}{p_0 + A} &= \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^k.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Здесь p , ρ , v , u , r , x , t , T , k , Q — давление, плотность, массовые скорости, координаты, время, температура, показатель изоэнтропии и теплота соответственно, p_0 — давление стандартной атмосферы. Правая

часть четвертого уравнения системы (1) учитывает влияние подогрева жидкости и газа на значения параметров потока, причем $f(k)$ — функционал от местного значения показателя изоэнтропы, определяемый для зоны смешения жидкость–воздух с помощью уравнения Дальтона [6], $\frac{dQ}{dt}$ — скорость подвода и выделения теплоты в расчетной зоне. Система уравнений сохранения замыкается уравнением состояния в виде эмпирической адиабаты Тейда, где $c = 3200 \cdot 10^5$ Па, $k = 7,15$.

В качестве граничных условий на жестких стенках полостей форсунки использовалось условие равенства нулю нормальной к поверхности составляющей массовой скорости потока $w = 0$, а начальных условий газодинамических параметров — параметры невозмущенной стандартной атмосферы при показателе изоэнтропы воздуха $k_{\text{в}} = 1,4$. В струе жидкости значение показателя изоэнтропы жидкости составляет $k_{\text{ж}} = 7,15$ и давление в ней $P_{\text{ж}} = 250$ Па.

Систему уравнений (1) решали конечно-разностным методом второго порядка точности типа “предиктор-корректор” с использованием трехточечного сглаживания [9]. В процессе расчетов контролировали точность решения по энтропии. Достоверность разработанной методики проверяли путем сравнения полученных результатов расчетов зависимости давления $p(t)$ с аналогичными зависимостями $p(t)$, полученными экспериментально.

Экспериментальные исследования процесса функционирования пленочных форсунок проводились на специальном стенде, схема которого показана на рис. 1, а схема конструкции форсунки — на рис. 2. Канал форсунки имеет постоянные линейные размеры и является щелевым.

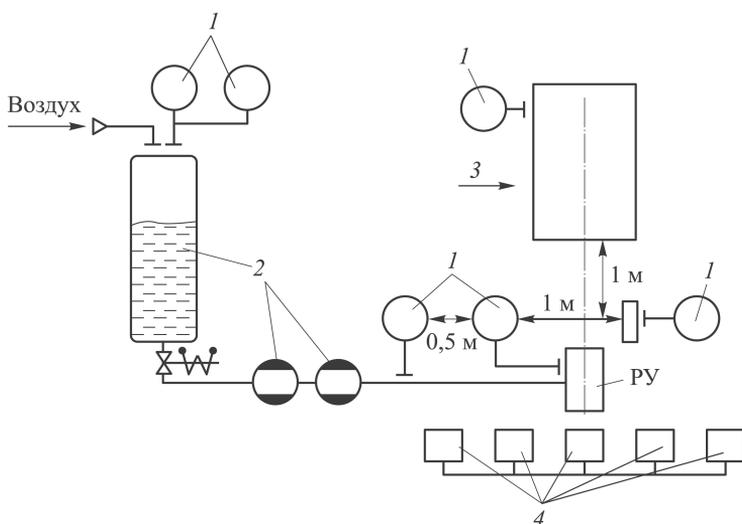
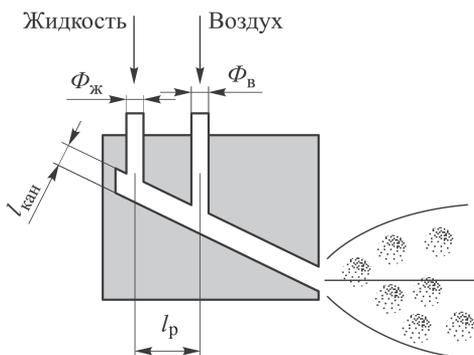


Рис. 1. Стенд для продувок моделей распыляющих устройств

Рис. 2. Схема конструкции форсунки:

$\Phi_{\text{ж}}$ — диаметр выходного отверстия жидкостного канала; $\Phi_{\text{в}}$ — диаметр выходного отверстия воздушного канала; $l_{\text{кан}}$ — ширина канала смешивания; $l_{\text{р}}$ — расстояние между жидкостным и воздушным каналами



Стенд включал в себя датчики давления 1, систему подачи рабочей жидкости 2, компрессор 3, систему 4 отбора проб, систему измерения параметров стенда и рабочего устройства (РУ), систему автоматизации. Давление внутри канала форсунки измерялось тензOMETрическим датчиком ЛХ 412. Экспериментальные исследования проводились на форсунке со следующими геометрическими параметрами: $\Phi_{\text{ж}} = 2$ мм; $\Phi_{\text{в}} = 2$ мм; $l_{\text{кан}} = 3$ мм, $l_{\text{р}} = 4$ мм.

Экспериментальное определение фракционно-дисперсных характеристик проводили методом улавливания капель на первичные подложки с последующей их обработкой. Для улавливания капель в высокоскоростном потоке газа использовалась система проб с изокINETичным входом [4]. 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 по две подложки. При измерении мелкой фракции использовались четырехступенчатые импакторы, предварительно откалиброванные на рабочей жидкости.

Результаты испытаний следующие: $P_{\text{вх. ж}} = 250$ Па — давление жидкости на входе в форсунку; $P_{\text{вх. в}} = 360$ Па — давление воздуха на входе в форсунку; $P_{\text{пол}} = 85$ Па — давление в полости форсунки; $G_{\text{ж}} \cdot 10^{-6} = 40,1$ м³/с — расход жидкости; $G_{\text{в}}/G_{\text{ж}} = 1$ — отношение расходов воздуха и жидкости; $d_{\text{м}} = 10$ мкм — медианный диаметр капель; $\Sigma_{10} = 50$ % — процентное содержание капель до 10 мкм.

Анализ представленных результатов показывает, что форсунка в которой используется комбинация способа создания пленки жидкости с последующим ее газонасыщением позволяет получать до 50 % капель со средним диаметром около 10 мкм.

Результаты численного моделирования. Результаты численного моделирования процесса функционирования пленочной форсунки представлены на рис. 3–6. На рис. 3 показана динамика процесса формирования пленки жидкости при подаче струи воды под углом

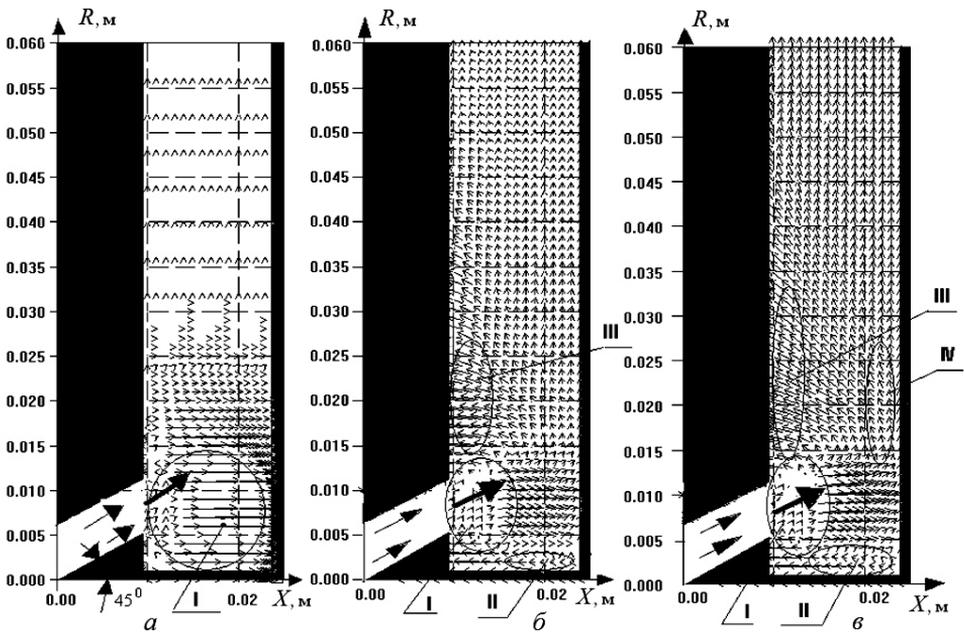


Рис. 3. Динамика процесса формирования пленки жидкости при подаче струи жидкости (воды) в канал пленочной форсунки под углом 45° для трех моментов времени:

a – t_1 ; *б* – t_2 ; *в* – t_3

45° с параметрами: $P_{\text{вх. ж}} = 250$ Па, $G_{\text{ж}} = 0,4 \cdot 10^{-6}$ м³/с, $k_{\text{в}} = 1,4$, $k_{\text{ж}} = 7,15$ в виде поля массовых скоростей.

Анализ представленных на рис. 3 результатов показывает, что в процессе установления течения в пленочных форсунках происходят высокочастотные колебания струи жидкости. В результате этих колебаний струя жидкости разрушается, происходит ее соударение с противоположной стенкой форсунки и разворот к стенке, прилегающей к соплу. В процессе установления течения в пленочной форсунке образуются четыре характерные зоны (см. рис. 3): зона струи жидкости I, которая в процессе установления постоянно пульсирует с высокой частотой; зона возвратного течения II, располагающаяся под струей и также пульсирующая с высокой частотой; зона отраженного течения III, расположенная над струей и образующаяся в результате удара отраженной от противоположной стенки форсунки струи жидкости о стенку форсунки, примыкающей к соплу, и зона IV, возникающая в конце режима установления. Средняя скорость циркуляции жидкости в данном случае составляла около $1 \cdot 10^{-3}$ м/с. Необходимо отметить, что высокочастотные колебания, возникающие при истечении струи жидкости в канал смешения, распространяются по всей среде, находящейся в этом канале вследствие сплошности этой среды. Наличие этих зон приводит к реализации механизма высокочастотного разрушения струи жидкости в пленочных форсунках на начальной стадии и непосредственно вблизи отверстия подвода жидкости. Необходимо

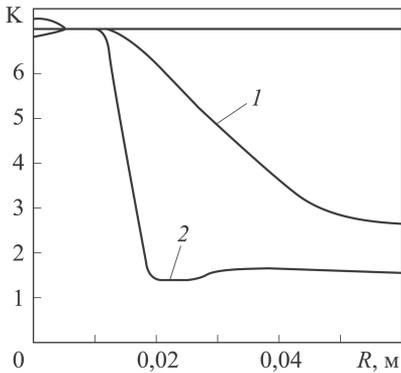


Рис. 4. Распределение энтропии вдоль канала форсунки:

1 — без газификации пленки; 2 — с газификацией пленки

отметить, что влияние высокочастотных колебаний распространяется на весь канал смешения вследствие нежимаемости воды.

Результаты численного моделирования распределения изоэнтропии по длине канала смешения пленочной форсунки приведены на рис. 4. Анализ представленной зависимости показывает, что, если в струе наблюдается сплошность жидкости, что соответствует $k_{ж} = 7,15$, то по длине форсунки наблюдается разрушение струи жидкости, ее смешивание с воздухом и дробление на отдельные капли. Разрушение струи жидкости начинается на расстоянии $l = 0,012$ м от среза сопла, что соответствует $\Phi_{ж}/l_{кан} = 0,58$.

Распределение давления вдоль канала пленочной форсунки показано на рис. 5, из которого следует, что в случае газификации пленки (кривая 2) наибольшее давление реализуется в струе жидкости, а затем давление падает по закону, близкому к экспоненциальному.

Предполагая линейную зависимость диаметра капли от ее энтропии [9], можно получить зависимость влажности среды по длине пленочной форсунки (рис. 6).

Распределение влажности газожидкостной среды вдоль канала форсунки (см. рис. 6) показывает, что реализуются два принципиально разных механизма распада струи жидкости. В пленочной форсунке без газификации пленки (кривая 1) реализуется механизм равномерного убывания влажности вдоль канала. В пленочной форсунке с

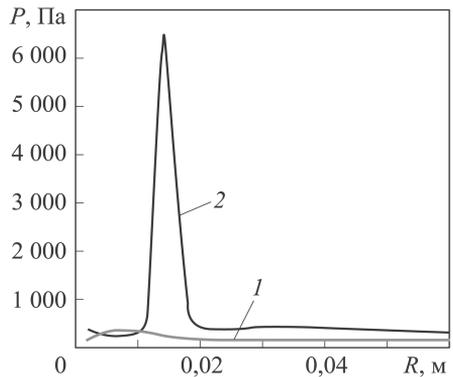


Рис. 5. Распределение давления вдоль канала форсунки (кривые 1 и 2 — см. рис. 4)

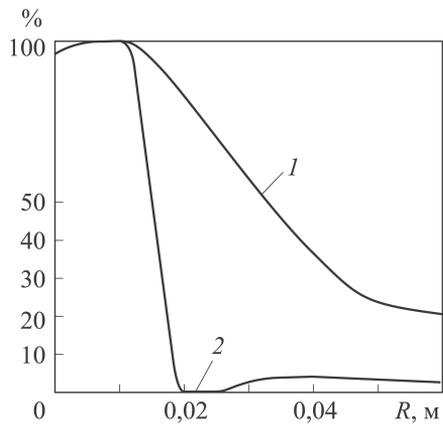


Рис. 6. Распределение влажности вдоль канала форсунки (кривые 1 и 2 — см. рис. 4)

газификацией пленки (кривая 2) происходит дискретное изменение влажности газожидкостной среды вдоль канала, причем в области подачи струи воздуха в канал форсунки существует зона пониженной влажности и, соответственно, зона образования капель минимального диаметра.

Средний диаметр капель для форсунок без газификации пленки жидкости рассчитывался по эмпирической формуле [10]. Для определения среднего диаметра капель d_c форсунок без газификации пленки целесообразно использовать уравнение, полученное в работе [11]:

$$\frac{d_M}{d_c} = 0,817\omega_{\text{см}}^{-0,586}, \quad (2)$$

где $\omega_{\text{см}} = \frac{\omega_{\text{ж}} + \beta\omega_{\text{г}}}{1 + \beta}$, $\beta = \frac{\omega_{\text{г}}}{\omega_{\text{ж}}}$ — отношение расходов распыляющего газа и жидкости. Уравнение (2) справедливо как для пневматического, так и для гидравлического распыливания. При гидравлическом распыливании ($\beta = 0$ и $\omega_{\text{г}} = 0$) оно принимает вид

$$\frac{d_M}{d_c} = 0,817\omega_{\text{ж}}^{-0,586}, \quad (3)$$

где $\frac{d_M}{d_c}$ — медианный диаметр капель.

Обобщения, представленные в виде зависимостей (2) и (3), справедливы для распылителей с различными геометрическими характеристиками, работающих с подводом и без подвода распыляющего газа.

Средний диаметр капель для форсунок с газификацией пленки жидкости рассчитывался по эмпирической формуле [4]:

$$d_c = 3,33 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\sigma \rho_{\text{ж}} D_{\text{ф}}}{\rho_{\text{в}} \nu_{\text{в}}^{\text{в}}} \right)^{0,5} \left(1 + \frac{\omega_{\text{ж}}}{\omega_{\text{в}}} \right) + 13 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\mu_{\text{ж}}^{\text{в}}}{\sigma \rho_{\text{ж}}} \right)^{0,425} D_{\text{ф}} \left(1 + \frac{\omega_{\text{ж}}}{\omega_{\text{в}}} \right), \quad (4)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; $\sigma = 72,25 \cdot 10 \text{ Н/м}$ [12]; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости; $D_{\text{ф}}$ — характерный диаметр форсунки; $\mu_{\text{ж}} = 1,002 \text{ Н} \cdot \text{с/м}^2$ — вязкость жидкости [13]; $\nu_{\text{в}}$ — скорость воздушного потока; $\left(\frac{\omega_{\text{ж}}}{\omega_{\text{в}}} \right)$ — отношение массовых расходов жидкости и воздуха. Формула (4) справедлива для маловязкой жидкости.

Результаты расчетов среднего диаметра капель в пленочной форсунке представлены на рис. 7.

Анализ полученных результатов показывает, что в пленочной форсунке без газификации пленки жидкости происходит образование

лишь крупных капель диаметром около 200 мкм, причем распределение этих капель относительно равномерно по всей длине щели. В пленочной форсунке с газификацией пленки жидкости (кривая *б*, см. рис. 7) происходит образование капель диаметром около 40...50 мкм, что существенно повышает эффективность процесса распыливания.

Численно моделировался процесс функционирования пленочной форсунки с газификацией пленки жидкости и конструктивными параметрами: $\Phi_{\text{ж}} = 0,007$ м, $l_{\text{кан}} = 0,007$ м, $\Phi_{\text{в}} = 0,007$ м, $l_{\text{ф}} = 0,015$ м. На рис. 8 показана динамика процесса функционирования пленочной форсунки с газификацией пленки жидкости при подаче струи жидкости (воды) и воздуха под углом 45° с параметрами $P_{\text{вх. ж}} = 250$ Па, $G = 40,1 \cdot 10^{-6}$ м³/с, $k_{\text{ж}} = 7,15$ и параллельной подаче струи воздуха с параметрами $P_{\text{вх. в}} = 360$ Па, $k_{\text{в}} = 1,4$, в виде поля массовых скоростей.

В процессе установления течения в пленочных форсунках с газификацией пленки жидкости в начале процесса функционирования происходит запираение центрального канала струей воздуха, что обусловлено более высоким значением давления в струе воздуха (зона I, см. рис. 8). Эта особенность процесса функционирования пленочных форсунок с газификацией пленки жидкости включает механизмы “затопленных струй” [5], характеризующихся взаимным проникновением струй с различным химическим составом. Распределение давления и чисел Маха в пленочных форсунках представлено на рис. 9 и 10.

В результате анализа распределения давления в пленочных форсунках с газификацией пленки жидкости выявили (рис. 9), что вследствие касательного взаимодействия струи жидкости со струей воздуха в канале смешивания образуется пульсирующая зона повышенного давления и температуры. Расчетным путем было установлено, что давление в этой зоне (при указанных исходных данных) может достигать значений более 6500 Па. Это приводит [5, 14] к образованию в канале смешивания процессов кавитации, которые разрушают струю жидкости на капли и, при определенных условиях, могут привести к “вскипанию” воды в периферийной части струи жидкости, соприкасающейся со струей воздуха. Существенные отличия в распределении

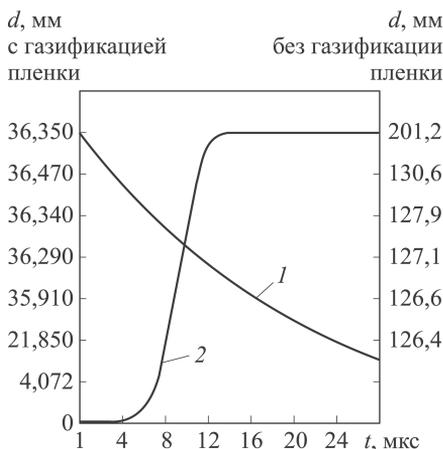


Рис. 7. Динамика процесса формирования диаметра капель вдоль канала форсунок (кривые 1 и 2 — см. рис. 4)

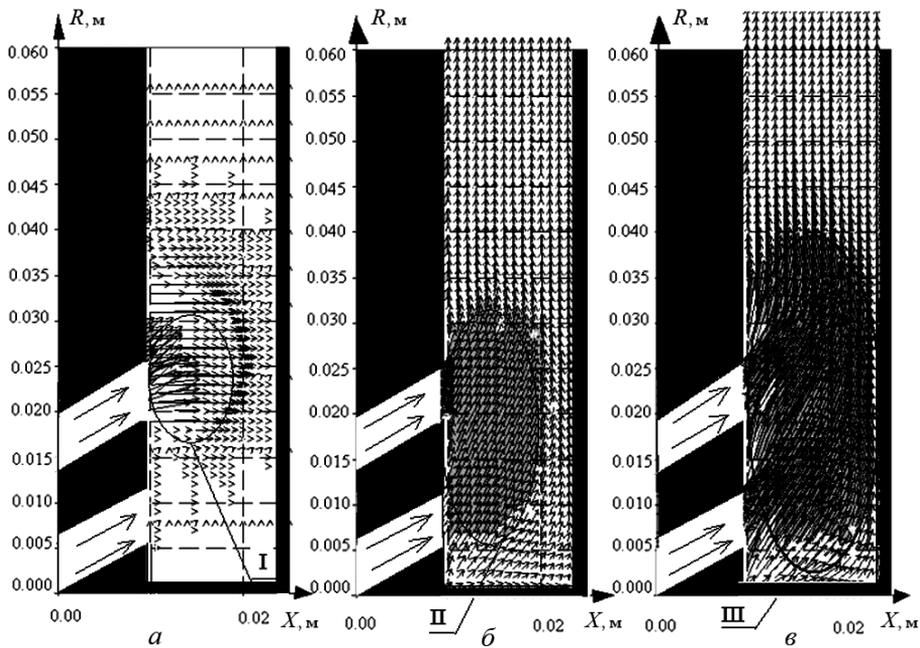


Рис. 8. Распределение массовых скоростей в пленочных форсунках с газификацией пленки жидкости для трех моментов времени:

$a - t_1$; $б - t_2$; $в - t_3$

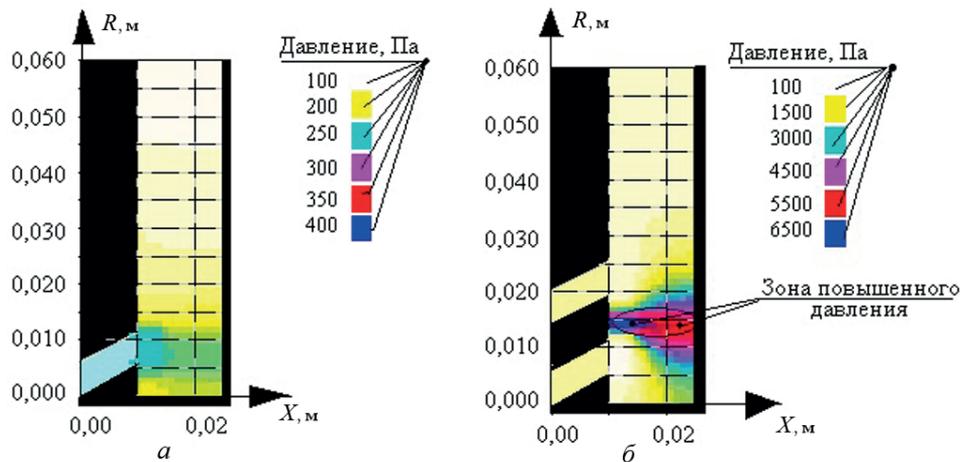


Рис. 9. Распределение давления в пленочных форсунках:

$a -$ без газификации пленки; $б -$ с газификацией пленки

скорости газожидкостного потока в форсунках с газификацией пленки жидкости и без нее представлены на рис. 10. В форсунках с газификацией пленки жидкости происходит более медленное распространение газожидкостной среды, что обусловлено наличием струи воздуха, тормозящей расширение струи жидкости. Это приводит к более длительному нахождению жидкости в канале форсунки и, как следствие, более эффективному ее дроблению.

Заключение. Для выявления особенностей начальной фазы процесса формирования и газификации пленки жидкости была разработана математическая модель и выполнено численное моделирование процесса распада струи жидкости как непосредственно при ударе о жесткую стенку в щелевом канале, так и при последующем воздействии струи воздуха на образовавшуюся пленку. Выполненные экспериментальные исследования этого процесса показали достоверность разработанной математической модели. В отличие от известных, разработанная математическая модель позволила рассчитать влажность газожидкостной среды и распределение энтропии и диаметра капель непосредственно в полости форсунки. Полученные результаты показали, что в процессе установления течения в пленочных форсунках с предварительной газификацией происходит многократное колебательное движение струи жидкости, что приводит к реализации механизма ее высокочастотного широкополосного разрушения на начальной стадии. Расчетным путем было выявлено, что при газификации пленки жидкости механизм каплеобразования существенно меняется. В этом случае происходит радиальное взаимодействие струй жидкости и газа, что приводит к образованию в этой зоне области повышенного давления и, как следствие, возникновению кавитации, которая существенно усиливает механизм дробления жидкости. Анализ изменения влажности по длине канала форсунок показал наличие зоны пониженной влажности (следовательно, и пониженного диаметра капель) в форсунках с газификацией пленки жидкости.

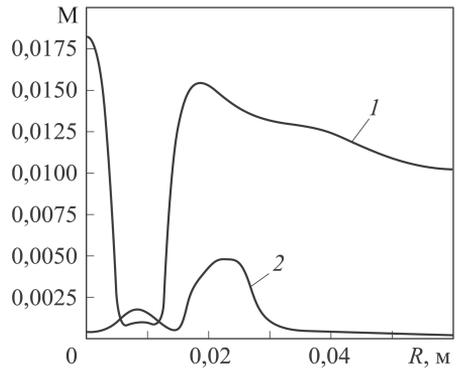


Рис. 10. Распределение чисел Маха в пленочных форсунках (кривые 1 и 2 — см. рис. 4)

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лефевр А.* Процессы в камерах сгорания ГТД. М.: Мир, 1986. 556 с.
2. *Афанасьев В.В.* Диагностика и управление устойчивостью горения в камерах сгорания энергетических установок. М.: Физматлит, 2008. 436 с.
3. *Добровольский М.В.* Жидкостные ракетные двигатели. М.: Машиностроение, 1968. С. 60–98.
4. *Пажи Д.Г., Галустов В.С.* Основы техники распыливания жидкостей. Сер. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. М.: Химик, 1984. 256 с.
5. *Дейч М.Е., Филиппов Г.А.* Газодинамика двухфазных сред. М.: Энергия, 1968. 423 с.
6. *Физика взрыва* / под ред. К.П. Станюковича. М.: Наука, 1975. 704 с.

7. Кузнецов А.В. Математическая модель процесса взаимодействия одиночной нестационарной сверхзвуковой струи с подвижной преградой конечных размеров // *Авиационная техника*. 1986. № 1. С. 27–29.
8. Платонов Н.И., Семенов В.П., Долгушина О.В. Гидродинамика полидисперсного потока капель в контактном теплообменнике с пленочными форсунками // *Изв. вузов. Проблемы энергетики*. 2010. № 1/2. С. 27–32.
9. Кестенбойм Х.С., Чудов Л.А. Точечный взрыв. Методы расчета. Таблицы. М.: Машиностроение, 1974. 190 с.
10. Андрияшкин А.Ю. Формирование дисперсных систем сверхзвуковым газодинамическим распылением. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2012. 400 с.
11. Дятлов И.Н. Обобщение результатов измерений мелкости распыливания топлива механической и воздушно-механической форсунками центробежного типа: Труды КАИ им. А.Н. Туполева. Казань, 1969. Вып. 2. С. 76–78.
12. Коэффициенты поверхностного натяжения воды и анилина при различных температурах: Справочник. Физика. Режим доступа: www.calc.ru/614.html (Дата обращения 02.11.2013).
13. Коэффициенты динамической и кинематической вязкости воды в зависимости от температуры и давления. Справочник химика / под ред. Б.П. Никольского. М.–Л. Химия, 1982. Т. 1. 987 с.
14. Александров А.А., Ривкин С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1984. 79 с.

REFERENCES

- [1] Lefebvre A.H. Gas Turbine Combustion. New York, McGraw Hill, 1983. 531 p. (Russ. Ed.: Lefevr A. Protsessy v kamerakh sgoraniya GTD. Moscow, Mir Publ., 1986. 556 p.).
- [2] Afanas'ev V.V. Diagnostika i upravlenie ustoychivost'yu goreniya v kamerakh sgoraniya energeticheskikh ustanovok [Diagnosis and control of stability combustion in the combustion chambers of power-producing unit]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 436 p.
- [3] Dobrovolskiy M.V. Zhidkostnye raketnye dvigateli [Liquid-propellant rocket engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 396 p.
- [4] Pazhi D.G., Galustov V.S. Osnovy tekhniki raspylivaniya zhidkostey. Ser. Protsessy i apparaty khimicheskoy i neftekhimicheskoy tekhnologii [Basic techniques of spraying liquids. Ser. Processes and devices of chemical and petrochemical technology]. Moscow, "Khimik" Publ., 1984. 256 p.
- [5] Deitch M.E., Filipov G.A. Gazodinamika dvukhfaznykh sred [Gas dynamics of two-phase media]. Moscow, Energiya Publ., 1968. 423 p.
- [6] Stanyukovich K. P. Fizika vzryva [Explosion physics]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 793 p.
- [7] 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., Aviats. Tekh.* [Russ. Aeronaut.], 1986, no. 1, pp. 27–29 (in Russ.).
- [8] Platonov N.I., Semenov V.P., Dolgushina O.V. Hydrodynamics of polydisperse droplet flow in contact heat exchanger with film nozzles. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved., Probl. Energy.* [Proc. Univ., Probl. Power Eng.], 2010, no. 1–2, pp. 27–32 (in Russ.).
- [9] Kestenboym Kh.S., Chudov L.A. Tochechnyy vzryv. Metody rascheta. Tablitsy [Point explosion. Methods of calculation. Tables]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 256 p.
- [10] Andryushkin A.Yu. Formirovanie dispersnykh sistem sverkhzvukovym gazodinamicheskim raspyleniem [The formation of disperse systems by supersonic gas-dynamic spray]. SPb., Baltiyskiy Gos. Tekhnicheskiiy Un., 2012. 400 p.

- [11] Dyatlov I. N. Generalization of the results of fineness measurements of fuel atomization by mechanical and air-mechanical nozzles of centrifugal type. *Tr. Kazan. Aviats. Inst. im. A.N. Tupoleva* [Proc. Tupolev Kazan Aeron. Inst.], 1969, iss. 2, pp. 76–78 (in Russ.).
- [12] Koeffitsienty poverkhnostnogo natyazheniya vody i anilina pri razlichnykh temperaturakh. Spravochnik. Fizika [Surface tension coef. of water and aniline at different temperatures. Handbook. Physics] (in Russ.). Available at: www.calc.ru/614.html (accessed 02.11.13).
- [13] Nikol'skiy B.P., eds. Koeffitsienty dinamicheskoy i kinematicheskoy vyazkosti vody v zavisimosti ot temperatury i davleniya. Spravochnik khimika. T. 1 [The coef. of dynamic and kinematic viscosity of the water depending on temperature and pressure. Handbook of chemist. Vol. 1]. Moscow–Leningrad, “Khimiya” Publ., 1982. 987 p.
- [14] Aleksandrov A.A., Rivkin S.L. Termodinamicheskie svoystva vody i vodyanogo para. Spravochnik [Thermodynamic properties of water and steam. Handbook]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 79 p.

Статья поступила в редакцию 24.12.2013

Кузнецов Александр Владимирович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Kuznetsov A.V. — Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of the Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Зеленцов Валентин Викторович — канд. техн. наук, советник Ректора МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Zelentsov V.V. — Cand. Sci. (Eng.), rector's council in the Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Ивашов Александр Иванович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ivashov A.I. — Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of the Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Бездомников Антон Викторович — канд. техн. наук, заведующий кафедрой “Высшая математика” Новомосковского института (филиала) РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Новомосковский институт (филиал) РХТУ им. Д.И. Менделеева, Российская Федерация, 301665, Тульская обл., г. Новомосковск, ул. Дружбы, д. 8.

Bezdomnikov A.V. — Cand. Sci. (Eng.), chief of “Higher Mathematics” department of the Novomoskovskiy Institute (branch) of the Mendeleev Russian Chemical-Technological University.

Novomoskovskiy Institute (branch) of the Mendeleev Russian Chemical-Technological University, ul. Druzhby 5, Novomoskovsk, Tula region, 301665 Russian Federation.