DOI: 10.15593/2224-9982/2016.44.05

УДК 629.735.03.063.3

Е.А. Борисов^{1, 2}, И.В. Ардашкин^{1, 2}

¹ ОАО «Авиадвигатель», Пермь, Россия

² Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАСЛЯНОГО ЖИКЛЕРА СИСТЕМЫ СМАЗКИ ОПОРЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ НА ХАРАКТЕР ИСТЕЧЕНИЯ МАСЛЯНОЙ СТРУИ

Вопросы повышения эффективности смазывания и охлаждения подшипников авиационных двигателей всегда были и остаются актуальными. Одним из способов достижения большей эффективности системы смазки является изучение режимов истечения масляной струи, подаваемой на подшипник.

В статье представлены результаты исследования истечения струи из трех различных масляных жиклеров системы смазки подшипника высокоскоростной газовой турбины. Исследовались особенности влияния конфигурации каналов жиклера на распыл масляной струи при изменении температуры и давления масла на входе в жиклер. Проведено моделирование течения масла в каналах жиклеров с последующей организацией экспериментальных проливов при двух разных температурах и двух разных давлениях масла на входе в жиклер. Сравнение результатов моделирования течения масла в каналах жиклера с экспериментом показало их хорошую сходимость.

В результате исследования выяснилось, что во всех жиклерах масло испытывает кавитацию, также происходит деформация струи в каналах жиклера. Данные явления нежелательны, так как приводят к интенсификации распыла масла. Сделаны выводы о влиянии геометрии каналов жиклера на длину нераспыленного участка масляной струи. Сформулированы направления дальнейшего исследования, которые включают замер скорости истечения масляной струи при помощи лазерного доплеровского анемометра.

Ключевые слова: опоры газовых турбин, смазывание подшипников газовых турбин, масляный жиклер, масляная струя, истечение вязкой жидкости, распыл струи, длина нераспыленного участка струи, кавитация.

E.A. Borisov^{1,2}, I.V. Ardashkin^{1,2}

¹ OJSC "Aviadvigatel", Perm, Russian Federation

² Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF OIL NOZZLE OF HIGH SPEED GAS TURBINE OIL SYSTEM GEOMETRY IMPACT ON OIL JET EGRESS

Issues of oil supply efficiency increasing in an aircraft engine bearing are of great interest. One way of increasing oil supply efficiency is to study of oil discharge regimes.

The paper covers the results of study of oil discharge from three different oil jets of the gas turbine lubrication system. Features of oil jet geometry impact on the oil discharge with different pressure and temperature were under investigation. Simulation of the oil flow inside the jets was conducted. Experiments with different oil temperatures and pressure were implemented. Comparison with the experiment revealed good repeatability.

The study showed that in all jets there were cavitation developing process, and also oil streamline deformation took place. This is undesired, because they lead to oil spraying. Conclusions are made about oil jet geometry impact on breakup length of oil jet. Directions for future research were defined; they include stream velocity measurement with laser Doppler anemometer.

Keywords: gas turbine bearing, gas turbine bearing lubrication, oil jet nozzle, oil jet, viscous liquids egress, liquid jet atomization, breakup length, cavitation.

Введение

Изучение струйных течений сводится не только к изучению процессов распыла и их применению [1]. Интерес также представляют струйные течения, при которых необходимо получить длинный нераспыленный участок струи [2–4]. В нашем случае наибольший интерес представляет использование струи для построения системы смазки опоры высокоскоростной газовой турбины способом, описанным в работе [5]. В случае высоких скоростей данный способ смазки и охлаждения подшипника является наиболее предпочтительным ввиду высоких скоростей колец подшипника [6–8].

Целью данного исследования является изучение влияния геометрических параметров масляного жиклера, а именно конфигурации его каналов, на характер истечения струи масла в условиях чисел Рейнольдса $Re = 1030 \dots 10\,008$. Интерес представляет качественный характер истечения масляной струи из жиклера, в том числе наличие нераспыленного участка струи.

Исследуемыми геометрическими параметрами жиклера являются: длина выходного канала (по отношению к диаметру), наличие под-

водящего канала под углом 90° к основному каналу и наличие ступенчатого основного канала.

Объект исследования

Объектом исследования является масляный жиклер, используемый в системе смазки подшипника высокоскоростной газовой турбины. Конфигурация каналов исследуемых жиклеров представлена на рис. 1.

Рис. 1. Геометрия каналов жиклеров

Особенности геометрии жиклера № 1:

- наличие подводящего канала, расположенного под углом 90° к основному каналу;

- короткий выходной канал ($1,75d$).

Особенности геометрии жиклера № 2:

- наличие подводящего канала, расположенного под углом 90° к основному каналу;

- ступенчатый основной канал (состоит из двух каналов разного диаметра);

- длинный выходной канал ($5,6d$).

Особенности геометрии жиклера № 3:

- подвод масла осуществляется в основной канал (без поворота 90°);

- ступенчатый основной канал (состоит из двух каналов разного диаметра);
- короткий выходной канал ($1,85d$).

Результаты моделирования течения масла в каналах жиклеров

Для расчетов применяли программный продукт ANSYS CFX 15.0. Использована неоднородная модель многофазного течения дисперсной жидкости с каплями заданного среднего диаметра в сплошной газовой среде с применением однородной k – ω -модели турбулентности. Неоднородная модель многофазного течения имеет дело со случаями, когда для каждой жидкости существуют отдельные поля скоростей и единое поле давлений. Жидкости взаимодействуют через границу раздела фаз. Использована модель частиц (Particle Model)¹. Данная модель применяется, когда одна из фаз сплошная, а другая – дисперсная. Частицы дисперсной фазы принимаются сферическими. В нашем случае сплошная фаза – воздух, а дисперсная – масло.

Перенос импульса, тепла и массы через границу фаз α и β имеет прямую зависимость от площади контакта фаз, которая обозначается как $A_{\alpha\beta}$. Для модели частиц, в которой фаза α принимается сплошной, а фаза β – дисперсной, площадь контакта фаз определяется по формуле

$$A_{\alpha\beta} = \frac{6r_\beta}{d_\beta}. \quad (1)$$

Для повышения устойчивости формула (1) модифицирована:

- r_β ограничивается минимальным значением объемной доли для того, чтобы плотность объема не имела нулевого значения;
- для больших значений r_β (когда предположение о дисперсности β несправедливо) значение плотности объема уменьшается так, что при стремлении r_β к 1 значение плотности стремится к нулю.

С данными модификациями формула площади принимает вид

$$A_{\alpha\beta} = \frac{6\tilde{r}_\beta}{d_\beta},$$

¹ ANSYS CFX-Solver Theory Guide. ANSYS CFX release 14.5.

где

$$\tilde{r}_\beta = \begin{cases} \max(r_\beta, r_{\min}) \text{ if } (r_\beta < r_{\min}), \\ \max\left(\frac{1-r_\beta}{1-r_{\max}} r_{\max}, r_{\min}\right) \text{ if } (r_\beta > r_{\min}). \end{cases}$$

Расчет изотермический, свойства воздуха и масла постоянные при заданной температуре. Расчетная сетка неструктурированная, состоит из тетраэдров ($1,98 \times 10^5$ элементов и $7,5 \times 10^4$ узлов) с 10 слоями призм у стенки. На границе входа в домен задавалось полное давление, средний уровень турбулентности ($Tu = 5 \%$, $\mu_t = 10$), направление течения по нормали к поверхности и массовая доля масла. На выходе из расчетной области задавалось условие свободной границы с указанием статического давления и среднего уровня турбулентности при массовой доле втекающего масла 0. Использовалось условие гидравлически гладких стенок без проскальзывания. Расчет выполнялся с двойной точностью по схеме Upwind второго порядка для уравнений момента и неразрывности и первого порядка для уравнений модели турбулентности.

Расчетные модели каналов испытываемых жиклеров представлены на рис. 2. Расчетные модели состояли из двух доменов: домена каналов жиклера и домена области истечения с интерфейсом между ними. Границы входа и выхода обозначены также на рис. 2.

Рис. 2. Расчетные модели каналов жиклеров

Расчет показал, что:

1. В выходном канале жиклера при повороте масло испытывает деформацию. Происходит прижатие струи масла к одной из сторон выходного канала, в результате которого наблюдается появление парного вихря, вносящего возмущение в истекающую струю и интенсифицирующего распыл.

При повышении температуры масла происходит утонение пограничного слоя на стенках выходного канала, что приводит к увеличению интенсивности деформации струи и, соответственно, парного вихря в выходных каналах жиклеров.

2. В выходном канале жиклера образуется область с пониженным статическим давлением, которая является причиной кавитации масла [9–13]. Причем рост температуры масла существенно усиливает градиент статического давления в данной области, в то время как рост давления не оказывает существенного влияния. Влияние температуры обуславливается изменением вязкости масла в семь раз при повышении температуры с 20 до 80 °С.

Стоит также отметить, что наличие ступенчатого канала в жиклере № 2 не оказывает заметного влияния на характер течения масла.

Поскольку конфигурация каналов всех жиклеров одинакова в части построения основного и выходного каналов, то описанные выше явления согласно расчету наблюдались у всех жиклеров.

Экспериментальное исследование жиклеров

Испытания проводились на участке проливки трубопроводов и жиклеров в условиях ОАО «Авиадвигатель» при двух разных температурах масла – 20 и 80 °С и давлениях на входе в жиклер 3 и 5 кгс/см². Схема установки представлена на рис. 3. При проливке использовалось трансформаторное масло селективной очистки (кинематическая вязкость $\nu = 28$ мм²/с при 20 °С; $\nu = 9$ мм²/с при 50 °С) по ГОСТ 10121–76 «Масло трансформаторное селективной очистки. Технические условия». Выбор масла обусловлен, во-первых, его доступностью, а во-вторых, близостью вязкостных характеристик к маслу, применяемому для смазывания опоры газовой турбины.

Рис. 3. Схема установки проливки: 1 – корпус установки со столом и камерой; 2 – расходный масляный бак со змеевиком для подогрева; 3 – электродвигатель; 4 – насос; 5 – фильтр грубой очистки; 6 – фильтр тонкой очистки; 7 – манометр МТП-100/1-10×2,5 ГОСТ 8625–69; 8 – милливольтметр 0–400 °С МПШПР-54 с пневмоэлектрическим преобразователем ТСВ гр. ХК; 9 – вентиль подачи пара; 10 – вентиль подачи масла в изделие при проливке без контроля по расходу масла; 11 – шланг подачи масла в изделие при проливке без контроля по расходу масла; 12 – электропульт; 13 – контрольный фильтр; 14 – вентиль подачи масла в изделие при проливке с контролем расхода масла; 15 – предохранительный клапан Г52-15 ($5 \pm 0,2$) кгс/см²; 16 – манометр технический МТИ 160×6×0,6 ГОСТ 6521–72; 17 – шланг подачи масла в изделие при проливке с контролем расхода масла; 18 – переходник для подсоединения приемника замера температуры; 19 – приемник замера температуры Л84-138-Ш; 20 – потенциометр КВП-1-503-И, класс точности 0,5, диапазон измерения 0–300 °С, группа ХК, сопротивление 15 Ом; 21 – гидроаккумулятор; 22 – обратный клапан; 23 – вентиль подачи воздуха; 24 – вентиль стравливания воздуха; 25 – контрольный образец гидравлического сопротивления

Основные технические данные установки:

– размеры (ширина × длина × высота)	1200 × 2000 × 2500 мм;
– производительность насоса	16 л/мин;
– давление	20 кгс/см ² ;
– емкость расходного бака	350 л;
– мощность электродвигателя	1,8 кВт;
– частота вращения электродвигателя	940 об/мин;
– контрольный фильтр с тонкостью фильтрации	30–40 мкм.

На рис. 4–6 представлены фотографии полученной струи испытуемых жиклеров при различных температурах масла и давлении на входе в жиклеры. Фотографирование производили на фотоаппарат Panasonic DMC-FZ50 с выдержкой 1/10–1/15 с.

Рис. 4. Вид струи жиклера № 1

Для всех вариантов жиклеров наблюдали распыл масляной струи. При низком давлении масла на входе в жиклер (3 кгс/см^2) и низкой температуре масла (20°C) у жиклеров № 1 и 2 наблюдался нераспыленный участок струи на выходе из жиклера. Значительную длину нераспыленной части струи показал жиклер № 2. При повышении давления масла на входе в жиклер и температуры масла наблюдалось значительное сокращение длины нераспыленного участка струи, вплоть до полного исчезновения. Наибольшее влияние на длину нераспыленного участка струи оказала температура масла.

Рис. 5. Вид струи жиклера № 2

Рис. 6. Вид струи жиклера № 3

В жиклере № 3 наблюдали полное отсутствие нераспыленного участка струи, также наблюдалась явно выраженная деформация струи в плоскости поворота выходного канала. На рис. 7 видно, что струя со стороны прижатия выходит нераспыленной из выходного канала, а с другой стороны – распыленной.

Рис. 7. Фотография струи жиклера № 3

Анализ устойчивости струи с использованием безразмерных величин

Режим истечения свободной струи характеризуют обычно безразмерными величинами – числом Вебера (We), числом Рейнольдса (Re) и числом Онезорге (Oh), которые равны:

$$We = \frac{\rho v^2 d}{\sigma},$$

где ρ – плотность масла; v – скорость струи; d – диаметр выходного отверстия жиклера; σ – коэффициент поверхностного натяжения;

$$Re = \frac{vd}{\nu},$$

где v – скорость струи; ν – кинематическая вязкость масла;

$$Oh = \frac{Re}{\sqrt{We}}.$$

Для определения действительных значений скорости струи был измерен расход масла. Измерение расхода выполнено весовым способом.

Для сравнения с экспериментом был выполнен расчет теоретического расхода с применением коэффициентов А.Д. Альтшуля [14]. Для определения расхода была использована следующая формула:

$$G = \mu F \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}}, \quad (2)$$

где μ – коэффициент расхода жиклера; F – площадь сечения выходного канала; Δp – перепад давления масла на жиклере.

Коэффициент расхода μ определяется отношением длины канала к его диаметру и, согласно рекомендациям [14], был принят для жиклеров № 1 и 3 – 0,81, для жиклера № 2 – 0,799. Следует отметить, что данный коэффициент принят без учета геометрии каналов (поворот выходного канала может влиять на величину коэффициента).

На рис. 8 показана диаграмма, в которой отображена степень соответствия вычисленных значений расхода по формуле (2) измеренным значениям расхода. Также для сравнения приведена степень соответствия значений расхода, полученного в расчетах ANSYS, измеренному значению.

В результате сравнения выяснилось, что значения расхода, полученные в расчетах ANSYS, имеют достаточную сходимость со значениями расхода, полученными измерениями, для оценки картины течения масла в каналах жиклера.

Расчет, выполненный по формуле (2), показал хорошую сходимость с результатами измерений.

Для расчета чисел Вебера и Рейнольдса были использованы значения скорости, полученные из уравнения неразрывности:

$$G = \rho v F. \quad (3)$$

Для расхода были использованы значения, измеренные при испытании. Результаты нахождения чисел Рейнольдса, Вебера и Онезорге представлены в табл. 1, 2 и 3 соответственно.

Рис. 8. Сравнение степени соответствия вычисленных значений расхода измеренным

Таблица 1

Значения чисел Вебера

Темпера- тура, °C	Жиклер № 1		Жиклер № 2		Жиклер № 3	
	3 кгс/см ²	5 кгс/см ²	3 кгс/см ²	5 кгс/см ²	3 кгс/см ²	5 кгс/см ²
20	17 540	23 381	15 982	27 208	14 496	24 310
80	19 355	31 171	25 248	41 944	20 350	31 171

Таблица 2

Значения чисел Рейнольдса

Темпера- тура, °C	Жиклер № 1		Жиклер № 2		Жиклер № 3	
	3 кгс/см ²	5 кгс/см ²	3 кгс/см ²	5 кгс/см ²	3 кгс/см ²	5 кгс/см ²
20	1132	1307	1081	1410	1030	1333
80	6798	8627	7765	10 008	6971	8627

Таблица 3

Значения чисел Онезорге

Темпера- тура, °C	Жиклер № 1		Жиклер № 2		Жиклер № 3	
	3 кгс/см ²	5 кгс/см ²	3 кгс/см ²	5 кгс/см ²	3 кгс/см ²	5 кгс/см ²
20	0,1169					
80	0,0205					

Вычисленные значения безразмерных чисел показывают, что для всех случаев имеет место режим истечения, называемый распыливанием (по классификации Лина и Рейтца [15]), т.е. режим, при котором происходит быстрое дробление струи на капли.

Сравнение экспериментальных и расчетных данных

Сравнение экспериментальных и расчетных данных показывает их корреляцию по характеру течения в выходном канале.

Расчет течения масла в каналах жиклеров выявил, что во всех вариантах жиклеров при повороте канала на выходе из жиклера наблюдается значительное местное понижение статического давления, это вызывает кавитацию масла в выходных каналах жиклеров. Из проведенных экспериментов видно, что струя действительно испытывает кавитацию. Расчет хорошо соотносится с данным фактом.

Зона пониженного давления при повороте струи становится более отчетливой с ростом температуры ввиду значительного снижения вязкости жидкости (при росте температуры масла с 20 до 80 °С вязкость уменьшается в 7 раз). Это явление подтверждается экспериментом, на котором получен значительный распыл струи при повышении температуры масла (рис. 4–6).

Анализ режима истечения по числам Вебера, Рейнольдса и Онезорге показал, что имеет место режим истечения – распыление. На представленных фотографиях струй видно, что имеет место распыление струи для всех комбинаций температуры и давления масла на входе в жиклер.

Из представленных данных можно заключить, что:

- наличие поворота выходного канала под углом 25° к основному интенсифицирует распыл струи;
- длинный выходной канал (5,6*d*) способствует удлинению нераспыленной части струи;
- наличие ступенчатого основного канала не оказывает видимого влияния на струю.

Направление дальнейших экспериментальных исследований предусматривает:

- выявление поведения струи масла при различных формах выходного канала жиклера;

- экспериментальный замер скорости истечения масла при помощи лазерного доплеровского анемометра и высокоскоростной камерой типа Photron FASTCAM SA5 (видеорегистрация до 775 000 кадров в секунду);
- проверка жиклеров на установке, моделирующей опору авиационного двигателя;
- проведение натурных испытаний системы смазывания задней опоры турбины авиационного двигателя.

Заключение

В результате проведенного исследования выявлено, что при истечении моторных масел их жиклера значительное влияние на характер истечения имеет температура, так как при повышении температуры масла с 20 до 80 °С значительно снижается вязкость, что ведет к изменениям в характере истечения струи из жиклера. Изменение давления масла на входе в жиклер с 3 до 5 кгс/см² видимого влияния на характер истечения не оказало.

При повышенных температурах наблюдается кавитация масла в каналах жиклеров. Данное явление возникает при наличии поворота в геометрии масляных жиклеров. В связи с этим при проектировании масляных жиклеров рекомендуется избегать поворотов каналов жиклера на выходных участках, так как это приводит к распылу масляной струи. Также подтверждено, что бóльшая длина выходного канала позволяет получить бóльшую длину нераспыленного участка струи, однако значительного удлинения нераспыленной части струи на примере представленных здесь жиклеров отмечено не было.

Для исключения распыления масляной струи необходимо уменьшать числа Вебера и Рейнольдса. Возможные пути для этого – уменьшение скорости струи или диаметра жиклера, а также применение масла с увеличенной вязкостью при больших температурах, с увеличенным коэффициентом поверхностного натяжения и с меньшей плотностью.

Библиографический список

1. Sirignano W.A., Mehring C. Review of theory of distortion and disintegration of liquid streams // Progress in Energy and Combustion Science. – 2000. – Vol. 26. – P. 609–655.

2. Birouk M., Lekic N. Liquid jet breakup in quiescent atmosphere: a review // *Atomization and Sprays*. – 2009. – Vol. 19, iss. 6. – P. 501–528.
3. Birouk M., Stabler T., Azzopardi B.J. An experimental study of liquid jets interacting with cross airflow // *Particle & Particle Systems Characterization*. – 2003. – Vol. 20. – P. 39–46.
4. Birouk M., Azzopardi B.J., Stabler T. Primary break-up of a viscous liquid jet in a cross airflow // *Particle & Particle Systems Characterization*. – 2003. – Vol. 20. – P. 283–289.
5. Боев А.А., Петрухин А.Г., Шкловец А.О. О перспективном подводе масла к подшипниковому узлу ГТД // *Известия Самар. науч. центра РАН*. – 2013. – Т. 15, № 6(4). – С. 1022–1026.
6. Демидович В.М. Исследование теплового режима подшипников ГТД. – М.: Машиностроение, 1978. – 172 с.
7. Холщевников К.В., Емин О.Н., Митрохин В.Т. Теория и расчет авиационных лопаточных машин. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.
8. Новиков Д.К., Фалеев С.В. Опоры и уплотнения авиационных двигателей и энергетических установок: Электронный образовательный контент. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 124 с.
9. Пильгунов В.Н., Ефремова К.Д. Истечение вязкой жидкости через круглые отверстия при малых числах Рейнольдса // *Инженерный вестник*. – 2015. – № 5. – С. 13–37.
10. Hiroyasu H., Arai V., Shimizu M. Break-up length of a liquid jet and internal flow in a nozzle // *Proc. ICLAS-91*. – 1991. – P. 275–282.
11. Experimental study of cavitation in the nozzle hole of diesel injectors using transparent nozzles / H. Chaves, M. Knapp, A. Kubitzek, F. Obermeier, T. Shnieder // *SAE Paper*. – 1991. – Paper no. 950290. – P. 645–657.
12. Tamaki N., Shimizu M., Hiroyasu H. Enhancement of the atomization of a liquid jet by cavitation in a nozzle hole // *Atomization and sprays*. – 2001. – Vol. 11, iss. 2. – P. 125–137.
13. Sou A., Hosokawa S., Tomiyama A. Effects of cavitation in a nozzle on liquid jet atomization // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2007. – Vol. 50, iss. 17–18. – P. 3575–3582.
14. Альтшуль А.Д., Кисилев П.Г. Гидравлика и аэродинамика: учебник. – М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1965. – 270 с.
15. Agrawal K.S. Breakup of liquid jets // *International Journal of Emerging Technologies In Computational and Applied Sciences (IJETCAS)*. – 2013. – Vol. 5(5). – P. 487–496.

References

1. Sirignano W.A., Mehring C. Review of theory of distortion and disintegration of liquid streams. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2000, vol. 26, pp. 609-655.
2. Birouk M., Lekic N. Liquid jet breakup in quiescent atmosphere: a review. *Atomization and Sprays*, 2009, vol. 19, iss. 6, pp. 501-528.
3. Birouk M., Stabler T., Azzopardi B.J. An experimental study of liquid jets interacting with cross airflow. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2003, vol. 20, pp. 39-46.
4. Birouk M., Azzopardi B.J., Stabler T. Primary break-up of a viscous liquid jet in a cross airflow. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2003, vol. 20, pp. 283-289.
5. Boev A.A., Petrukhin A.G., Shklovets A.O. O perspektivnom podvode masla k podshipnikovomu uzlu GTD [On promising oil feeding for gas-turbine engine bearings]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2013, vol. 15, no. 6(4), pp. 1022-1026.
6. Demidovich V.M. Issledovanie teplovogo rezhima podshipnikov GTD [Research of the thermal behavior of gas-turbine engine bearings]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. 172 p.
7. Kholshchevnikov K.V., Emin O.N., Mitrokhin V.T. Teoriya i raschet aviatsionnykh lopatochnykh mashin [Theory and calculations of aircraft impeller machines]. Moscow: Mashinostroenie, 1986. 432 p.
8. Novikov D.K., Faleev S.V. Opory i uplotneniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok: Elektronnyy obrazovatelnyy content [Bearings and seals of the aircraft engines and power units]. Samarskiy gosudarstvennyy aerokosmicheskiy universitet, 2011. 124 p.
9. Pilgunov V.N., Efremova K.D. Istechenie vyazkoy zhidkosti cherez kruglye otverstiya pri malykh chislakh Reynoldsa [Outflow of viscous fluid through the circular orifices at low Reynolds numbers]. *Inzhenernyy vestnik*, 2015, no. 5, pp. 13-37.
10. Hiroyasu H., Arai V., Shimizu M. Break-up length of a liquid jet and internal flow in a nozzle. *Proc. ICLAS-91*, 1991, pp. 275-282.
11. Chaves H., Knapp M., Kubitzek A., Obermeier F., Shnieder T. Experimental study of cavitation in the nozzle hole of diesel injectors using transparent nozzles. *SAE Paper*, 1991, paper no. 950290, pp. 645-657.

12. Tamaki N., Shimizu M., Hiroyasu H. Enhancement of the atomization of a liquid jet by cavitation in a nozzle hole. *Atomization and Sprays*, 2001, vol. 11, iss. 2, pp. 125-137.

13. Sou A., Hosokawa S., Tomiyama A. Effects of cavitation in a nozzle on liquid jet atomization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, vol. 50, iss. 17-18, pp. 3575-3582.

14. Altshul A.D., Kisilev P.G. *Gidravlika i aerodinamika* [Hydraulics and aerodynamics]. Moscow: Izdatelstvo literatury po stroitelstvu, 1965. 270 p.

15. Agrawal K.S. Breakup of liquid jets. *International Journal of Emerging Technologies in Computational and Applied Sciences (IJETCAS)*, 2013, vol. 5(5), pp. 487-496.

Об авторах

Борисов Евгений Алексеевич (Пермь, Россия) – инженер-конструктор отдела турбин ОАО «Авиадвигатель» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93, e-mail: borisov-ea@avid.ru), аспирант кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29).

Ардашкин Илья Викторович (Пермь, Россия) – инженер-конструктор отдела турбин ОАО «Авиадвигатель» (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 93, e-mail: ardaskin-iv@avid.ru), аспирант кафедры «Авиационные двигатели» ФГБОУ ВПО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29).

About the authors

Evgeniy A. Borisov (Perm, Russian Federation) – Design Engineer, Turbine Department, OJSC “Aviadvigatel” (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: borisov-ea@avid.ru), Postgraduate Student, Aircraft Engines Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Ilya V. Ardaskin (Perm, Russian Federation) – Design Engineer, Turbine Department, OJSC “Aviadvigatel” (93, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: ardaskin-iv@avid.ru), Postgraduate Student, Aircraft Engines Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation).

Получено 16.12.2015