

УДК: 621.452.322

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТЬ/ГАЗ НА ОСНОВЕ УПРОЩЁННОЙ МОДЕЛИ МАСЛЯНОГО КАРТЕРА

© 2014 А.Н. Лисицин, А.В. Бадерников, Е.В. Печеник

Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск

Представлены результаты численного моделирования двухфазного течения жидкость/газ на модельной задаче – полости с вращающимся валом. Работа проводилась в рамках создания методики моделирования многофазных течений в масляных полостях опор газотурбинных двигателей (ГТД), поскольку на данный момент отсутствует инструмент анализа, позволяющий моделировать течения масляной среды в маслосистемах. Ужесточающиеся требования к массогабаритным и эксплуатационным характеристикам двигателя диктуют направление уменьшения размеров масляной системы и количества масла, используемого для смазки и охлаждения подшипников при увеличении их ресурса. В настоящее время проектирование масляных картеров осуществляется на основании успешного предыдущего опыта аналогичных работ, а функционирование спроектированной масляной системы проверяется только в процессе испытаний двигателя. Решение возникающих проблем в этом случае приводит к серьёзным временным и финансовым затратам. Данный инструмент позволит одновременно увеличить ресурс подшипника, снизить массу и габариты масляной системы. Произведён выбор наиболее рациональной модели многофазного течения и проведён анализ влияния размерности расчётной сетки на результаты расчётов в стационарной постановке.

*Многофазный поток, подшипник, опора подшипника.*

### Введение

При разработке современных авиационных двигателей особое внимание уделяется увеличению ресурса, снижению массы и габаритов двигателя. Ресурс двигателя в значительной степени зависит от ресурса подшипников опор. В свою очередь, ресурс подшипников напрямую зависит от качества смазывания и степени охлаждения элементов подшипника. Поэтому для обеспечения благоприятных условий работы подшипника необходимо подавать достаточное количество масла для смазки и охлаждения. С другой стороны, ужесточающиеся требования к массогабаритным и эксплуатационным характеристикам двигателя диктуют направление уменьшения размеров масляной системы и количества масла, используемого для смазки и охлаждения подшипников при увеличении их ресурса. В настоящее время проектирование масляных картеров осуществляется на основании успешного предыдущего опыта аналогичных работ, а функционирование спроектированной масляной системы

проверяется только в процессе испытаний двигателя. Решение возникающих проблем в этом случае приводит к серьёзным временным и финансовым затратам. При этом ситуацию осложняет отсутствие современных инструментов анализа процессов в масляных полостях. Для того, чтобы одновременно увеличить ресурс подшипника, снизить массу и габариты масляной системы требуется современный инструмент анализа, позволяющий моделировать течение двухфазной среды масло/воздух в масляной системе двигателя.

В идеальной опоре подаваемое масло выполняет функцию смазки и охлаждения, после чего сразу попадает в зону откачки (в дальнейшем полость откачки будем обозначать термином маслосборник) и откачивается из полости маслокартера. Кроме того, количество масла, находящегося в идеальной опоре подшипника должно быть минимальным. Плёнка масла на стенке будет настолько тонкой, насколько это необходимо, и при этом будет отсутствовать задержка масла в основном потоке в виде тумана или капель. Течение

в зоне откачки (маслосборнике) достаточно сложное. В маслосборнике на жидкость воздействует множество сил: аэродинамический сдвиг, центробежная сила, сила тяжести. Масло в опоре находится в форме капель (и/или тумана) при поступлении к подшипникам и от них, а также когда капли отрываются от поверхности плёнки. На стенках камеры находится плёнка (толстая или тонкая, в зависимости от расположения и количества масла), а в маслосборнике обычно бывает толстая плёнка, слой масла или пена.

В реальной же конструкции всё обстоит не так идеально. Не весь объём жидкости, подающийся в полость маслокартера, немедленно удаляется из полости. Причиной этому может стать несколько факторов: недостаточная производительность откачивающих систем, нерациональный выбор геометрии маслокартера или неправильно подобранный объём полости. Для изучения вышеупомянутых явлений путём численного моделирования необходим критерий сравнения эксперимента с расчётом. Таким критерием может стать объём масла, стационарно присутствующий во время работы установки (гарантированный объём  $V_R$ ). Несмотря на то, что объём масла  $V_R$  является косвенным измерением, он показывает, насколько плохо или хорошо работает маслосборник [1]. Большой объём масла  $V_R$  говорит о том, что производительность откачивающих систем понижена из-за того, что откачивается преимущественно воздух, а не жидкость. Поэтому его целесообразно использовать в качестве критерия сравнения эксперимента и расчёта.

В качестве объекта исследования была взята упрощённая модель масляного картера – полость с вращающимся валом [1], отмеченная на рис. 1 как «маслокартер». Выбор данной задачи обусловлен:

- возможностью моделирования основных физических процессов, протекающих в масляном картере;

- относительно простой геометрией модели;

- наличием экспериментальных данных.

### Описание стенда

Испытательный стенд состоит из испытательной камеры и маслосборника, смонтированных на стенде и расположенных в испытательном боксе. Управление установкой осуществляется из соседней комнаты, в которой находятся различные системы управления и наблюдения. На рис. 1 изображена испытательная камера, смонтированная на стенде. В качестве рабочей жидкости была выбрана вода. Физические свойства воды при комнатной температуре сходны со свойствами масла (Mobil Jet Oil II) при обычной рабочей температуре в опоре подшипника авиационного двигателя.



Рис. 1. Испытательная установка и коммуникации стенда

### Описание установки

Установка (рис. 2) состоит из основной камеры и стандартного маслосборника, присоединённого к камере. Маслосборник представляет собой простой короб квадратного сечения 200 × 200 мм. Глубина маслосборника составляет 65 мм.

На дне маслосборника находится сливное отверстие, соединённое с откачивающим трубопроводом.

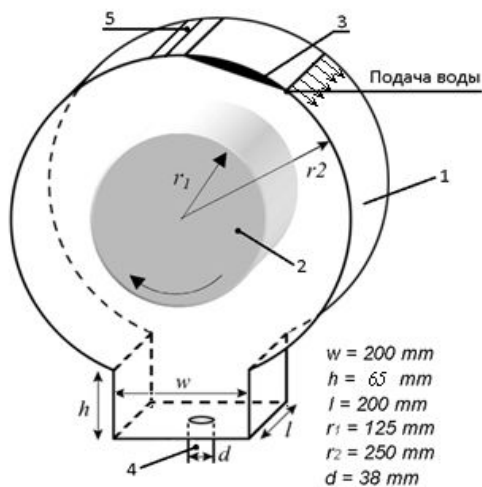


Рис. 2. Схема геометрии полости

Испытательный стенд выполнен целиком из оргстекла для визуального наблюдения происходящих в нём процессов.

В центре основной камеры установлен вал. Вал выполнен из пустотелого алюминиевого барабана длиной 200 мм и диаметром 250 мм, соединённого с приводным валом из нержавеющей стали. Приводной вал может вращаться с частотой до 15 000 об/мин.

Вода поступает в основную камеру через устройство для создания плёнки, изображённое на рис. 3. Такая система впрыска способна создавать жидкую плёнку постоянной толщины и подавать её равномерно по внутренней стенке камеры. Подаваемая в устройство для создания плёнки вода разделяется в блоке коллекторов на 8 трубок с одинаковым расходом, как схематично показано на рис. 3. Внутри устройства для создания плёнки поток сталкивается с нижней пластиной, служащей для успокоения потока, затем выравнивается и осредняется набором направляющих лопаток и подаётся через горло на стенку камеры.

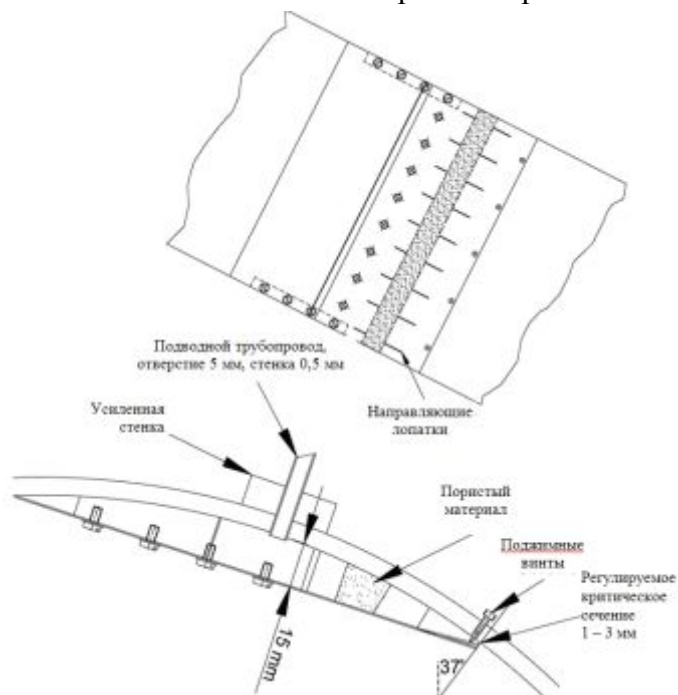


Рис. 3. Устройство для создания плёнки

На рис. 4 представлена процедура измерения величины  $V_R$  (объёма воды, стационарно присутствующего во время работы установки) в эксперименте. Точность экспериментальных данных составляла  $\pm 100 \text{ см}^3$ .

На первом этапе открывались клапаны на подающей воду и откачивающей смеси магистралях, обороты ротора выводились на заданный режим. Установка работала необходимое для достижения стационарного режима время.

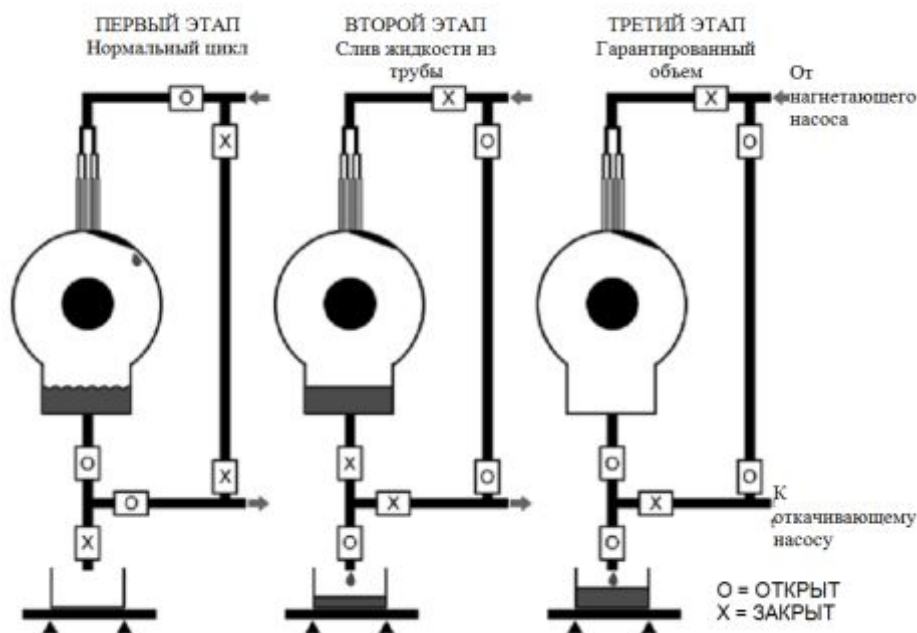


Рис. 4. Процедура измерения величины  $V_R$

На втором этапе клапаны на подающей и откачивающей магистралях перекрывались, отсекая воду в полости, выключался привод ротора и сливалась вода из магистралей.

На третьем этапе открывался клапан на откачивающей магистрали, вода сливалась из полости и регистрировался её объём.

### Расчётная модель

Расчётная модель масляного картера – полость с вращающимся валом соответствует схеме геометрии полости (рис. 2). Условия работы модуля были следующими: в полость 1 с валом 2, вращающимся со скоростью 10000 об/мин, подаётся вода через генератор плёнки 3, при этом смесь воды и воздуха откачивается через сливной канал 4 с постоянным объёмным расходом, через дренажное отверстие 5 засасывается воздух. Расчёты выполнялись в ПК ANSYS Fluent - 14.5 при помощи Эйлеровой гомогенной модели мультифазного течения VOF с учётом сил поверхностного натяжения (модель CSS) и массовых сил. Задачи решались в несжимаемой стационарной постановке. В расчётах применялись модель турбулентности realizable k-ε, неявная схема дискретиза-

ции по времени для уравнения сохранения объёмной доли.

### Сеточная модель

На начальном этапе было проведено исследование влияния сеточной сходимости на результаты расчётов. Исследования проводились на гексаэдральной сетках размерностью 2,74; 3,81; 21,94 млн. ячеек. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1 - Результаты сеточной сходимости

Вариант	Количество ячеек сетки	$V_{R,3}$ см <sup>3</sup>	$\frac{V_R}{V_{R,эксп}}$
Эксперимент	–	806,02	–
Сетка 1	2,74E+06	1065,56	1,322
Сетка 2	3,81E+06	1077,54	1,337
Сетка 3	2,19E+07	1089,83	1,352

Из табл. 1 следует, что использование подробных сеток слабо влияет на результаты расчётов (значение  $V_R$ , полученное на сетке 1 отличается от полученного на сетке 3 на 2,2%). Дальнейшие расчёты проводились на сетке 1 (рис. 5).

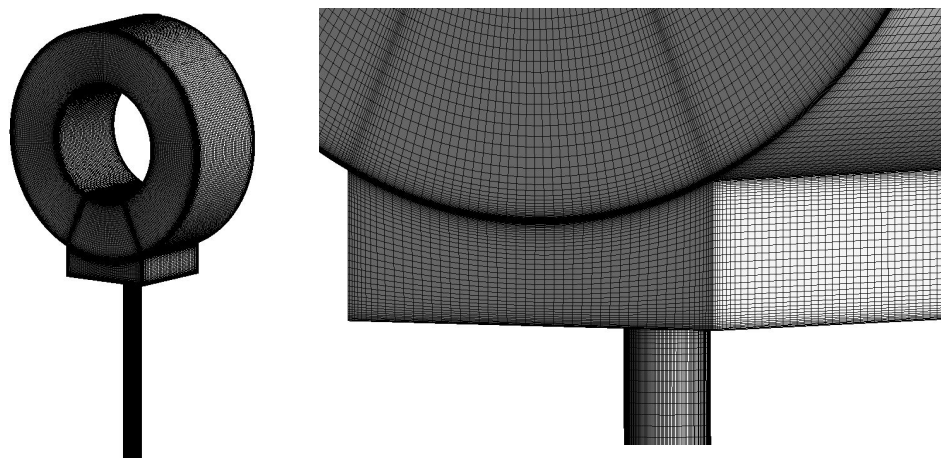


Рис.5. Расчётная сетка №1

### Граничные условия и результаты расчётов

Схема расположения граничных условий представлена на рис. 6.

В табл. 2 представлены результаты расчётов, полученные для расчётных точек v1-v4 и v5-v8. Сравнение эксперимента и расчёта представлено на рис. 7. SR – коэффициент откачки, равный отношению общего объёмного расхода на выходе из камеры к объёмному расходу жидкости на входе.

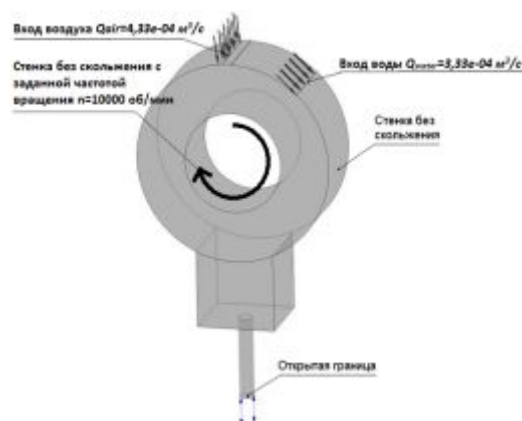


Рис. 6. Схема расположения граничных условий

Таблица 2 - Результаты расчётов

Расчётная точка	Расход воды, л/мин	SR	Объём воды в полости $V_R$ , см <sup>3</sup>		$V_R/V_R^{\text{эсп}}$
			расчёт	эксперимент	
v1	20	1,1	1294	851	1.52
v2	20	2,3	1065	806	1.32
v3	20	5,5	940	751	1.25
v4	20	7,5	872	745	1.17
v5	30	1,1	1796	1299	1.38
v6	30	2,4	1289	1109	1.16
v7	30	3,8	1158	1052	1.10
v8	30	5,1	1066	1022	1.04

Из рис. 7 видно, что с увеличением коэффициента SR откачивающий насос лишь захватывает больше воздуха, откачиваемый воздух почти не захватывает воду, и скапливающуюся в полости маслосборника. Это приводит к тому, что значение  $V_R$  при увеличении SR более 3 ÷ 4 снижается мало.

При малых коэффициентах откачки (1,1 ÷ 2,3) погрешность расчёта составляет от 16 до 50%. Это может быть связано с

тем, что используемая модель VOF является гомогенной. Уравнения движения решаются для осреднённой по фазам скорости, что может вносить некоторые погрешности при большом содержании воды относительно воздуха (в случае SR больше 3 ÷ 4 погрешность расчёта составляет от 4 до 15%). Изоперхность объёмной доли воды для характерных режимов работы представлена на рис. 8 и 9.

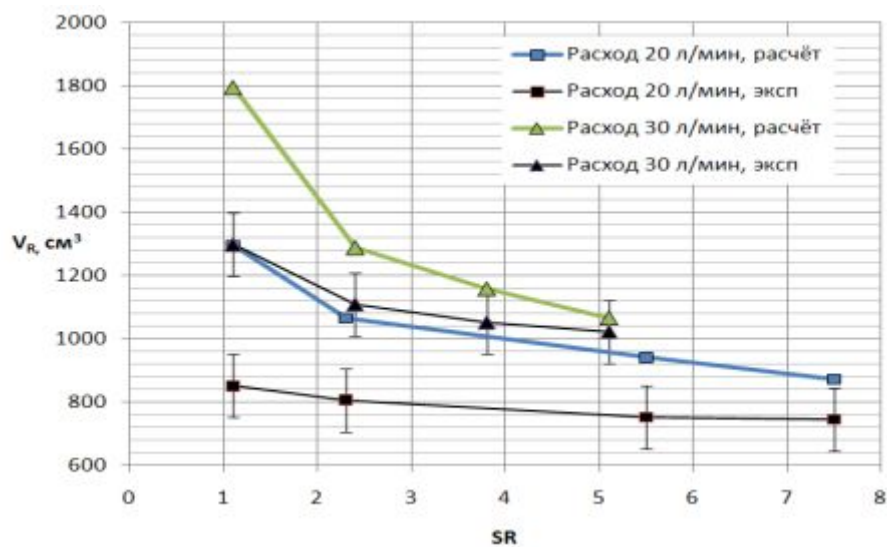


Рис. 7. Расчётные и экспериментальные данные для точек v1-v4 и v5-v8

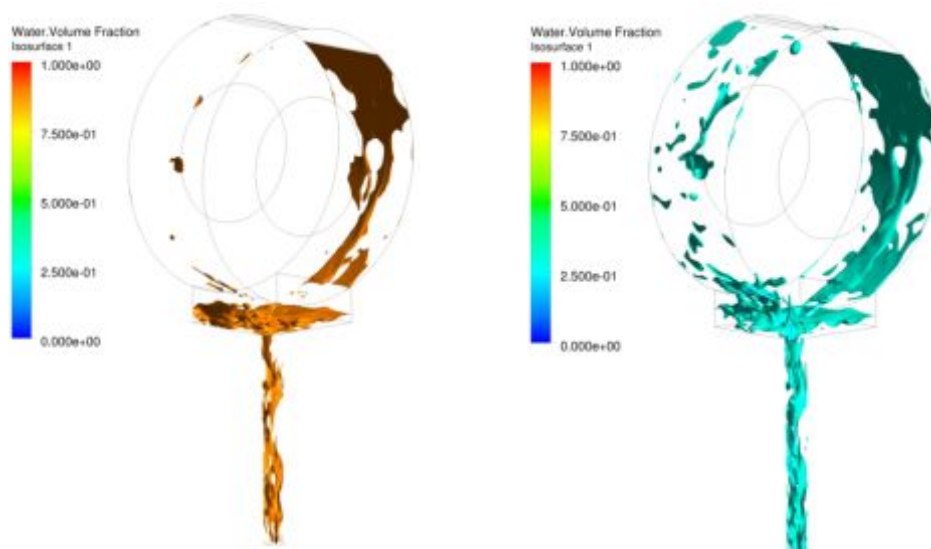


Рис. 8. Изоповерхность объёмной доли воды для точки v2.  
Объёмная доля  $V_{f_{water}}=0,9$  и  $V_{f_{water}}=0,3$

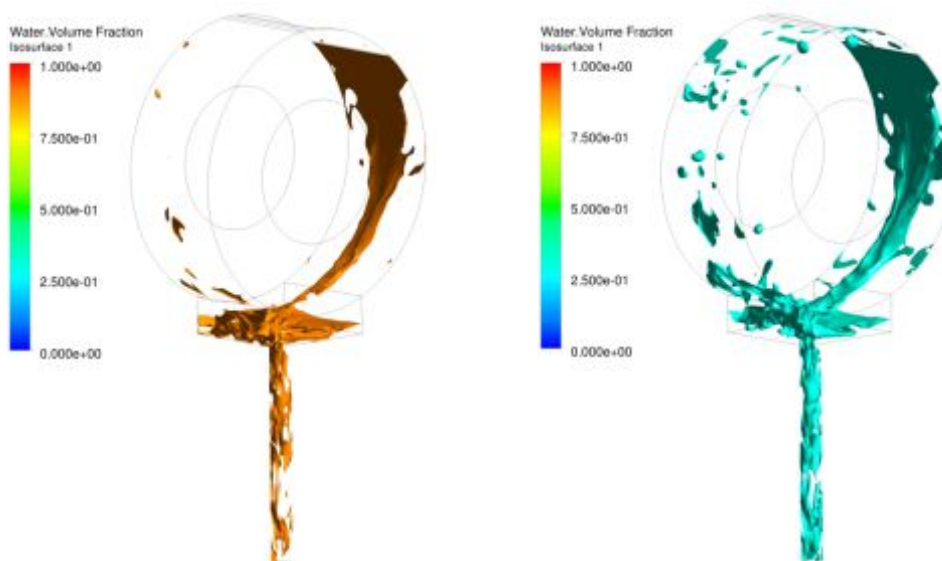


Рис. 9. Изоповерхность объёмной доли воды для точки v10.  
Объёмная доля  $V_{f_{water}}=0,9$  и  $V_{f_{water}}=0,3$

Эффект диффузии объёмной доли является неизбежным следствием использования метода контрольного объёма для решения уравнения сохранения объёмной доли. Поэтому в расчётах поверхность раздела, как правило, «размазана» по нескольким ячейкам, и на локальных участках расчётной области можно наблюдать «водяной туман» (рассеянную объёмную долю). Для того, чтобы более детально отразить это явление, на рис. 8,9 представлены изоповерхности объёмной доли воды, построенные для значений  $Vf_{\text{water}}=0,9$  и  $Vf_{\text{water}}=0,3$ .

#### Выводы

- Предполагается, что течение в картине представляет собой течение двух неперывных фаз, где могут присутствовать пузыри и/или капли. Наиболее пригодны-

ми для моделирования подобного рода течения являются модели VOF (Fluent).

- Анализ влияния размерности расчётной сетки на результаты расчётов в стационарной постановке показал, что использование подробных гексаэдральных сеток слабо влияет на результаты расчётов.

- Серия расчётов, выполненная для  $n=10000$  об/мин, различных значений расходов воды и производительности системы откачки показала, что результаты расчётов качественно согласуются с экспериментом. Отклонение от эксперимента уменьшается при увеличении производительности системы откачки или увеличении расхода подаваемой воды.

#### Библиографический список

1. Chandra B., Simmons K., Pickering S., Tittel M. Factors affecting oil removal from an aeroengine bearing chamber // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2010. V. 1. P. 219-228.

#### Информация об авторах

**Лисицин Александр Николаевич**, инженер-конструктор третьей категории КО Систем инженерного анализа, Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск. E-mail: [lisitsin.aleksandr@gmail.com](mailto:lisitsin.aleksandr@gmail.com). Область научных интересов: вычислительная гидрогазодинамика, многофазные течения, проектирование высокотемпературных опор двигателей летательных аппаратов.

**Бадерников Артем Витальевич**, начальник бригады теплообмена и горения КО Систем инженерного анализа, Научно-производственное объединение

«Сатурн», г. Рыбинск. E-mail: [artem.badernikov@npo-saturn.ru](mailto:artem.badernikov@npo-saturn.ru). Область научных интересов: вычислительная гидрогазодинамика, процессы теплообмена и горения.

**Печеник Евгений Валерьевич**, инженер-конструктор КО Систем инженерного анализа, Научно-производственное объединение «Сатурн», г. Рыбинск. E-mail: [pechenikev@gmail.com](mailto:pechenikev@gmail.com). Область научных интересов: вычислительная гидрогазодинамика, оптимизация формы аэродинамических профилей на основе решения сопряжения сопряжённых уравнений.

## **RESULTS OF NUMERICAL MODELING OF TWO-PHASE LIQUID / GAS FLOW ON THE BASIS OF A SIMPLIFIED MODEL OF OIL CHAMBER**

© 2014 A.N. Lisitcin, A.V. Badernikov, E.V. Pechenik

Joint-Stock Company "NPO Saturn", Rybinsk, Russian Federation

Numerical simulation results of multiphase liquid/gas flow are presented. Calculation was performed for simplified bearing chamber. Work was kept within the framework of developing the methods of multiphase flows modeling in oil chambers of gas-turbine engine. At present there is no the instrument of the analysis, allowing to simulate the oil flow in oil systems, and oil chambers of gas-turbine engine. The tightening requirements to mass, overall dimensions and performance of the engine need to reduce of the oil system sizes and amount of the oil, used for lubrication and cooling of bearing with increasing of their resource. At present, oil chamber design based on successful previous experience of the similar work, but performance of oil system is checked only in process of the engine test. This problems in this case lead to significant time and financial expense, so this instrument of analysis allow simultaneously increase the bearing resource, reduce mass and size of the oil system. The most rational model of multiphase flow was also chosen and analysis of the mesh size influence on steady calculation results was made.

*Multiphase flow, bearing, bearing chamber.*

### **References**

1. Chandra B., Simmons K., Pickering S., Tittel M. Factors affecting oil removal from an aeroengine bearing chamber // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2010. V. 1. P. 219-228.

### **About the authors**

**Lisitcin Aleksandr Nikolaevich**, design engineer, Engineering Analysis Department, Joint-Stock Company «NPO «Saturn», Rybinsk, Postgraduate Student of Rybinsk State Aviation Technical University. E-mail: [lisitsin.aleksandr@gmail.com](mailto:lisitsin.aleksandr@gmail.com). Area of Research: fluid dynamics, multiphase flow, design of high-temperature bearing chambers.

**Badernikov Artem Vitaljevich**, head of the team of Heat Transfer and Combustion, Engineering Analysis Department,

Joint-Stock Company «NPO «Saturn», Rybinsk, E-mail: [artem.badernikov@npo-saturn.ru](mailto:artem.badernikov@npo-saturn.ru), Area of Research: fluid dynamics, heat transfer and combustion.

**Pechenik Evgeniy Valerjevich**, design engineer, Engineering Analysis Department, Joint-Stock Company «NPO «Saturn», Rybinsk. E-mail: [pechenikev@gmail.com](mailto:pechenikev@gmail.com). Area of Research: fluid dynamics and optimization.