

УДК 621.391.8

И. Б. КУЗНЕЦОВ<sup>1</sup>, В. П. БОЖКО<sup>2</sup>, Е. В. ЦЕГЕЛЬНИК<sup>2</sup>, Д. А. БРЕГА<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный университет обороны Украины им. Ивана Черняховского, Киев*<sup>2</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УДАЛЕНИЯ МИКРОЧАСТИЦ ДЕТонирующими газowymi смесями при очистке деталей ГТД

*Разработана аналитическая модель для исследования процесса детонационной очистки деталей агрегатов авиационных двигателей, учитывающая особенности данного процесса. На основании численного моделирования воздействия сдвигового потока на микрочастицу обоснован выбор зависимости для задания силы отрыва микрочастиц при прохождении ударной волны. На основе анализа баланса сил получена оценка для определения минимального диаметра микрочастицы, которая может быть удалена с поверхности при прохождении вдоль нее детонационной волны. Полученная оценка относится к случаю отрыва частицы ударной волной, распространяющейся вдоль поверхности, и может быть принята в качестве верхней границы качества детонационной очистки.*

**Ключевые слова:** детонационная очистка, микрочастицы, сила Саффмана, адгезия.

### Введение

Очистка деталей авиационной техники является обязательным этапом восстановительного ремонта. От ее эффективности во многом зависит послеремонтный ресурс техники. Основными источниками загрязнений поверхности деталей авиационной и военной техники, подлежащие удалению при восстановительных ремонтах являются: микрочастицы, появляющиеся в результате износа в ходе эксплуатации; рабочие среды; пыль в производственных помещениях; предметы, с которыми соприкасаются детали при ремонтных работах и др.

Наиболее перспективными методами очистки поверхностей деталей агрегатов авиационных двигателей являются газодетонационный и лазерный методы [1]. Однако лазерный метод, способный удалять как химические загрязнения, так и микрочастицы, эффективен только для очистки внешней поверхности деталей [2]. Назначение режимов детонационной очистки на основе экспериментов является практически неразрешимой задачей, поскольку требует учета большого числа факторов.

Задача исследования поведения микрочастицы при прохождении над запыленной поверхностью ударной волны исследовалась как экспериментально, так и методами численного моделирования. Анализ методов, применявшихся для моделирования отрыва микрочастиц [3] показывает, что к настоящему времени сформировалось несколько подходов к моделированию взаимодействия частицы с движущейся вдоль поверхности ударной волной.

Во-первых, это модель динамики материальной точки. Поведение частицы описывается дифференциальными уравнениями движения под действием

заданных сил. Как правило, при этом учитывается сила Саффмана. Гораздо реже с силы Магнуса и аэродинамической интерференции. Для задания профиля скорости газа в пристеночном слое используются численные или автомоделные решения [4].

Во-вторых, в задачах, моделирующих поведения пылевого слоя, применяются диффузионные модели для описания движения примеси на известном фоне движения газовой фазы или модели гетерогенной среды в двухскоростном двухтемпературном приближении [5].

В-третьих, это прямое численное моделирование отрыва единичной частицы или группы частиц с использованием эйлерового подхода при сохранении контакта частицы с поверхностью и Лагранжевых сеток – после ее отрыва [3].

С точки зрения практического использования для задания режимов детонационной очистки все эти модели имеют общий недостаток. Сила адгезии между частицей реальной формы и шероховатой поверхностью, неоднородной с точки зрения структуры и распределения поверхностной энергии, является случайной величиной, причем разброс суммарной силы адгезии с учетом возможного множественного контакта с поверхностью может быть очень существенным.

Поэтому учитывая неопределенность в назначении величины силы адгезии чрезмерное усложнение расчетной модели, оправдываемое стремлением повышения точности моделирования, представляется неоправданным.

Более перспективным путем изучения процесса детонационной очистки представляется построение аналитических моделей, являющихся разумным

компромиссом с точки зрения как точности, так и скорости получения результатов моделирования.

Попытки построения такого рода моделей ранее уже предпринимались. Так, например, в работе [6] моделировалось поведение одиночных частиц с размером большим толщины пограничного слоя при прохождении вдоль поверхности ударных волн различной интенсивности. По результатам моделирования был сделан вывод о том, что в таком случае основным является механизм подъема, обусловленный аэродинамической интерференцией частицы и поверхности. В работах не учитывалось действие сил адгезии, хотя для рассматриваемых частиц ее значение может быть существенно больше веса.

Поведение частицы под действием сдвига потока в пограничном слое рассматривалось в ряде работ [4, 7]. Силы адгезии учитывались по JKR модели, а в качестве основного механизма удаления рассматривался отрыв частицы силой Саффмана. Однако в работе [8] было показано, что условиям очистки поверхностей деталей авиационной техники, с учетом характерных размерам частиц износа и их материала, в наибольшей степени соответствует DMT модель адгезии. Оценка величины градиента скорости в пограничном слое в работе [4] проводилась по результатам численного моделирования с применением  $k-\epsilon$  модели турбулентности, которая в большей степени соответствует условиям удаленных от стенок течений.

В работе [3] для случая термоимпульсной очистки рассматривалось влияние на отрыв микрочастицы термоупругого расширения поверхности, вызванного прохождением ударной волны. Введение в рассмотрение этого фактора было вызвано тем, что импульсное термическое расширение является основным механизмом очистки от микрочастиц при лазерной очистке. Однако из-за существенно меньших по величине удельных тепловых потоков, характерных для термоимпульсной очистки, влияние термоупругого расширения оказалось несущественным, и в данной работе был сделан вывод о том, что им можно пренебречь. Поведение частицы исследовалось методом прямого численного моделирования.

Таким образом, до настоящего времени не разработана модель для исследования процесса детонационной очистки, учитывающая особенности данного процесса и позволяющая получать данные моделирования на основе аналитических решений. Разработка такой модели остается актуальной научной задачей.

### Аналитическая модель удаления микрочастиц

Для построения модели примем следующие допущения.

Согласно рекомендациям работы [9] для обеспечения качества очистки она должна проводиться в три этапа. На первом проводится ультразвуковая очистка, которая удаляет органические загрязнения и крупные микрочастицы. В ходе дальнейшей термоимпульсной очистки удаляются микрочастицы меньшего размера, после чего производится финишная мойка и сушка деталей.

Такая последовательность операций позволяет допустить, что в ходе термоимпульсной (детонационной) очистки удаляются частицы, погруженные в пограничный слой. Как показывает проведенный анализ, в этом случае основной силой отрыва является сила Саффмана, возникающая в сдвиговом пристеночном слое течения. С учетом требований по шероховатости, выдвигаемым к прецизионным деталям авиационных двигателей, это позволяет принять для моделирования отрыва частицы схему со сферической частицей, расположенной на плоской поверхности (рис. 1).

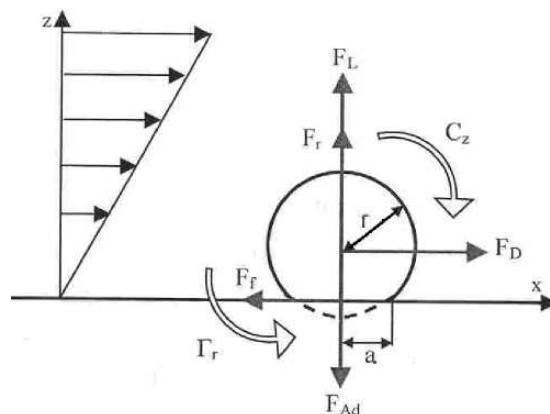


Рис. 1. Силы, действующие на микрочастицу

В работе [4] рассматривалось три возможных варианта движения частицы при действии на нее набегающего потока: отрыв, качение и скольжение. При качении сферической частицы будет возникать дополнительная отрывающая ее от поверхности сила – сила Магнуса, вызванная обтеканием потоком вращающегося тела. Однако учет этой силы при оценке возможности ее влияния на отрыв частиц проводиться не будет. Это с одной стороны упростит модель, а с другой – позволит избежать завышенных оценок качества очистки.

Предварительная операция ультразвуковой очистки должна выполняться в растворах, которые обеспечивают уменьшение, а не рост адгезии частиц. Поэтому, пренебрегая электростатическими силами, будем считать, что в исходном состоянии перед очисткой на частицы действуют силы адгезии и трения. На рис. 1 приведена расчетная схема для моделирования удаления микрочастиц при детонационной очистке с учетом сделанных допущений.

При сделанных допущениях частица в состоянии покоя находится под действием сил адгезии. Это приводит к ее деформации, а площадка контакта представляет собой круг радиусом  $a$ . При описании адгезии при помощи DMT модели [8] сила, требующаяся для отрыва частицы от поверхности определяется выражением:

$$F_{Po}^{DMT} = \pi W_A d, \quad (1)$$

а радиус пятна контакта зависимостью

$$a_0 = \left( \frac{\pi W_A d^2}{2K} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2)$$

$$\text{где } K = \frac{4}{3} \left[ \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right]^{-1}.$$

Ряд авторов указывает, что при отрыве частиц, погруженных в пограничный слой, основное значение имеет сила Саффмана, возникающая из-за поперечного градиента скорости [4, 7]. С учетом малых размеров частиц пристеночный профиль скорости принимается линейным. С учетом этих допущений сила Саффмана задается выражением:

$$F_S = 1,615 \eta d^2 \left( \frac{\rho}{\eta} \frac{\partial u_r}{\partial y} \right)^{1/2} U_p, \quad (3)$$

где  $\partial u_r / \partial y$  обозначает поперечный градиент скорости (ось  $Y$  перпендикулярна поверхности);

$U_p$  – скорость потока в центре масс частицы, т.е. при  $y = d/2$ .

Значение коэффициента 1,615, полученное Саффманом, впоследствии уточнялось рядом авторов для различных диапазонов чисел Рейнольдса. В работе [10], например, предложен следующий вид поправочного коэффициента для вычисления подъемной силы  $F_L$ :

$$k = \frac{F_L}{F_S} = \begin{cases} (1 - 0,3314\alpha^{1/2}) \times \\ \times \exp(Re_p/10) + \\ + 0,3314\alpha^{1/2}, & Re_p \leq 40, \\ 0,0524(\alpha Re_p), & Re_p > 40, \end{cases} \quad (4)$$

где  $Re_p = \frac{|u_r - u_p| d}{\nu}$  – число Рейнольдса для частицы;

$$\alpha = \frac{d^2 \partial u_r / \partial y}{|u_r - u_p|}.$$

В работах [4, 7] при записи уравнений баланса сил сделана существенная ошибка, связанная с тем, что выражения (3), (4) справедливы для случая час-

тицы, удаленной от стенок на расстояние, превышающее масштаб Саффмана. Для случая частицы, находящейся в контакте с поверхностью, применение этих зависимостей может привести к существенной погрешности.

В работах [11, 12] были получены выражения для силы, действующей на сферическую частицу, находящейся в контакте с плоскостью, в сдвиговом потоке. Для подъемной силы, действующей на покоящуюся частицу, были получены следующие выражения:

$$\text{в работе [12]} - F_L = 9,22 \frac{\partial u}{\partial y} \mu r^2 \left( \frac{\partial u}{\partial y} \frac{r^2}{\nu} \right);$$

$$\text{в работе [11]} - F_L = 9,257 \frac{\partial u}{\partial y} \mu r^2 \left( \frac{\partial u}{\partial y} \frac{r^2}{\nu} \right). \quad (5)$$

Значения коэффициентов в данных выражениях были получены при малых значениях числа Рейнольдса. Поэтому в рамках выполнения настоящей работы для уточнения величины этого коэффициента было проведено дополнительное численное моделирование.

Для оценки величины корректирующего коэффициента подъемной силы для больших значений числа Рейнольдса была проведена серия численных экспериментов. Рассчитывались параметры обтекания микрочастицы в пристеночной области. Частица стационарно располагалась в канале, а конечно-элементная сетка строилась таким образом, чтобы пограничный слой включал в себя частицу. На входе в расчетную область задан профиль скоростей с линейной зависимостью скорости от высоты канала. Для учета характера течения в пограничном слое использовалась SST модель турбулентности совместно с Gamma-Theta моделью для учета переходных течений.

На рис. 2 показана расчетная конечно-элементная (КЭ) сетка задачи. Качество расчетной сетки проверялось как по геометрическим параметрам, рекомендуемым при использовании тетраэдрических элементов, так и по величине переменной  $u^+$ . Типичная картина распределения данной переменной в зоне расположения микрочастицы приведена на рис. 3.

В качестве начальных условий при расчетах задавался линейный профиль скорости в расчетной области и на входе. Задача решалась в стационарной постановке. При расчетах варьировались значения сдвига невозмущенного потока. Число Рейнольдса  $Re$  при этом менялось в пределах 3,23...404. В табл. 1 приведены некоторые результаты численных расчетов подъемной силы, действующей на неподвижную частицу на плоскости).

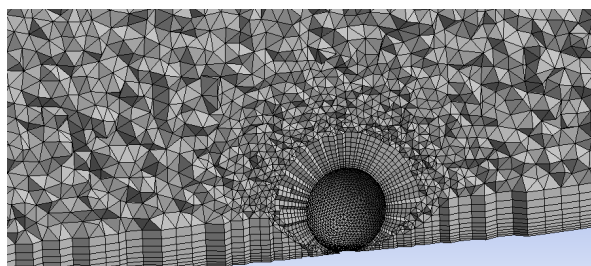


Рис. 2. КЭ сетка задачи обтекания микрочастицы

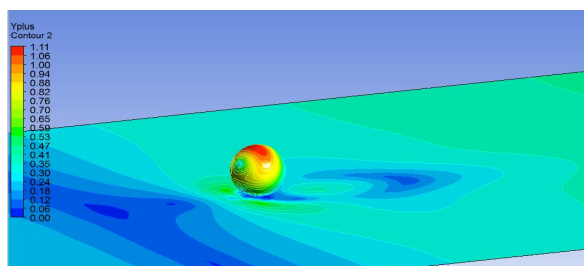


Рис. 3. Распределение  $y^+$  на стенке ( $Re = 15$ )

Таблица 1

Результаты расчета подъемной силы, действующей на сферическую частицу в сдвиговом потоке

Re	3,23	32,3	80,8	161,6	404,4
Численный расчет	$2,4885 \cdot 10^{-8}$	$9,4632 \cdot 10^{-8}$	$7,0531 \cdot 10^{-7}$	$1,2928 \cdot 10^{-6}$	$3,7661 \cdot 10^{-6}$
(3)	$1,3537 \cdot 10^{-8}$	$4,2809 \cdot 10^{-8}$	$6,7688 \cdot 10^{-8}$	$9,5725 \cdot 10^{-8}$	$3,7839 \cdot 10^{-7}$
(5)	$2,7373 \cdot 10^{-8}$	$1,0031 \cdot 10^{-7}$	$6,8476 \cdot 10^{-7}$	$1,3695 \cdot 10^{-6}$	$3,4238 \cdot 10^{-6}$

Как и следовало ожидать, результаты расчета силы Саффмана по зависимости (3) оказались существенно ниже, чем полученные численным расчетом и по зависимостям (5), учитывающими влияние экрана. Зависимость, предложенная в работе [11] в целом дала более близкие результаты к данным прямого численного моделирования. В области низких чисел Рейнольдса значения подъемной силы, полученные при ее использовании превышали данные численного моделирования на величину до 11 %, при больших числах Рейнольдса, наоборот давали заниженные на 6...12 % значения подъемной силы.

В целом, данная зависимость адекватно описывала значения силы отрыва во всем диапазоне чисел Рейнольдса потока. Поэтому она была принята для дальнейшего моделирования с учетом того, что оценки, полученные с ее помощью, при повышенных значениях числа Рейнольдса потока не ухудшат оценку качества детонационной очистки.

С учетом возможного скольжения частицы, записывая подъемную силу в виде, предложенном в работе [11], и учитывая силу аэродинамической интерференции согласно [6] получим условие отрыва частицы с поверхности в виде:

$$F_L = 9,257 \frac{\partial u}{\partial y} \mu r^2 \left( \frac{\partial u}{\partial y} \frac{r^2}{v} \right) - 9,044 \mu r U_p \left( \frac{\partial u}{\partial y} \frac{r^2}{v} \right) + 1,755 \mu r U_p \left( U_p \frac{r}{v} \right) + \pi d^2 \frac{\gamma}{2} p_0 M^2 C_p \geq \pi W_A d. \quad (6)$$

Сила аэродинамической интерференции возникает при воздействии ударной волны на частицу, диаметр которой превышает размер пограничного

слоя. По данным работы [6] величина этой силы достаточна для отрыва таких частиц от поверхности. Для частиц полностью погруженных в пограничный слой максимальное значение силы отрыва достигается, когда ударная волна проходит через покоящуюся частицу. В этом случае пренебрегая скольжением, получим значение для минимального диаметра частицы, которая может быть оторвана от поверхности ударной волной:

$$d_{отр} = \sqrt[3]{\frac{\pi W_A}{9,257 \frac{\partial u}{\partial y} \mu r^2}} = 1,0725 \sqrt[3]{\frac{W_A}{\rho} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^{-2/3}}. \quad (7)$$

При увеличении плотности смеси минимальный диаметр удаляемой ударной волной частицы понижается. Поэтому очистку от микрочастиц целесообразно проводить на более плотных смесях. Так, например при использовании пропан-кислородной смеси с начальным давлением 1,5 МПа, при величине сдвига скорости в погранслое порядка  $3 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$  для металлических частиц с значениями поверхностной энергии  $\sigma \approx 1 \dots 2 \text{ Дж/м}^2$  для оценки минимального значения диаметра удаляемой частицы получим  $d_{отр} = 1,8 \dots 4 \text{ мкм}$ .

### Заключение

На основе анализа баланса сил получена оценка для определения минимального диаметра микрочастицы, которая может быть удалена с поверхности детали при прохождении вдоль нее детонационной волны.

Полученная оценка относится к случаю отрыва частицы ударной волной, распространяющейся вдоль поверхности. В условиях распространения ударных волн в замкнутой камере волны могут от-

ражаться от поверхности под различными углами, что приводит к образованию вихрей и даже отрыву пограничного слоя. В этих условиях на частицу дополнительно воздействует перепад давлений, вызванный разрежением в вихре [3]. Поэтому сделанная оценка может быть принята в качестве верхней границы качества детонационной очистки.

## Литература

1. *Современные методы финишной очистки интенсивными потоками энергии [Текст] : монография / О. В. Шипуль, Е. В. Цегельник, А. О. Гарин [и др.]*. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2013. – 189 с.

2. *Перспективы лазерной очистки при ремонте ГТД [Текст] / С. И. Планковский, Е. В. Цегельник, И. И. Головин [и др.] // Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 10 (127). – С. 54 – 57.

3. *Козлов, В. Г. Повышение эффективности финишной очистки деталей гидравлических систем самолетов на базе термоимпульсного метода [Текст] : дис. ... канд. техн. наук : 05.07.02 : защита 20.09.2013 ; утв. 6.12.2013 / Козлов Владислав Григорьевич*. – Х., 2013. – 176 с.

4. *Zoetewij, M. L. Particle removal in linear shear flow : model prediction and experimental validation [Text] / M. L. Zoetewij, J. C. Van der Donck, R. Versluis // Journal of adhesion science and technology*. – 2009. – Vol. 23, Iss. 6. – P. 899 – 911.

5. *Федоров, А. В. Смесеобразование при распространении волновых процессов в газозвезях (обзор) [Текст] / А. В. Федоров // Физика горения и взрыва*. – 2004. – Т. 40, № 1. – С. 21 – 37.

6. *Гостеев, Ю. А. К расчету подъема пыли проходящей ударной волной [Текст] / Ю. А. Гостеев, А. В. Федоров // Физика горения и взрыва*. – 2002. – Т. 38, № 3. – С. 80 – 84.

7. *Burdick, G. M. Hydrodynamic particle removal from surfaces [Text] / G. M. Burdick, N. S. Berman, S. P. Beaudoin // Thin Solid Films*. – 2005. – Vol. 488, Iss. 1–2. – P. 116 – 123.

8. *Анализ моделей адгезии при очистке поверхностей деталей авиационной техники от микрочастиц [Текст] / Е. В. Цегельник, И. Б. Кузнецов, П. И. Мельничук, В. Л. Малащенко // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Харьков, 2016. – Вып. 72. – С. 48 – 55.*

9. *Жданов, А. А. Термоимпульсные технологии очистки поверхностей деталей агрегатов авиационных двигателей [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.07.04 : защита 25.12.2003 ; утв. 15.02.2003 / Жданов Александр Андреевич*. – Х., 2003. – 182 с.

10. *Dandy, D. S. Sphere in shear flow at finite Reynolds number. Effect of shear on particle lift, drag, and heat transfer [Text] / D. S. Dandy, H. A. Dwyer //*

*The Journal of Fluid Mechanics*. – 1990. – Vol. 216. – P. 381 – 410.

11. *Leighton, D. T. The lift on a small sphere touching a plane in the presence of a simple shear flow [Text] / D. T. Leighton, A. Acrivos // Journal of Applied Mathematics and Physics*. – 1985. – Vol. 36. – P. 174 – 178.

12. *Krishnan, G. P. Inertial lift on a moving sphere in contact with a plane wall in a shear flow [Text] / G. P. Krishnan, D. T. Leighton // Physics of Fluids*. – 1995. – Vol. 7. – P. 2536 – 2545.

## References

1. *Shipul', O. V., Tsegel'nik, E. V., Garin, A. O., Garin, V. O., Trifonov, O. V. Sovremennyye metody finisshnoi ochistki intensivnymi potokami energii [The modern methods of final cleaning by intense energy flux]. Kharkov, KHAI Publ., 2013. 189 p.*

2. *Plankovskii, S. I., Tsegel'nik, E. V., Golovin, I. I., Mel'nichuk, P. I. Perspektivy lazernoi ochistki pri remonte GTD [Prospects for laser cleaning during repair GTE]. Aviatcionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya, 2015, no. 10 (127), pp. 54-57.*

3. *Kozlov, V. G. Povyshenie effektivnosti finisshnoi ochistki detalei gidravlicheskih sistem samoletov na baze termoimpul'snogo metoda. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving of finish cleaning of aircraft's hydraulic systems parts based thermal-pulse method. PhD diss.]. Kharkov, 2013. 176 p*

4. *Zoetewij, M. L., Van der Donck, J. C., Versluis, R. Particle removal in linear shear flow: model prediction and experimental validation. Journal of adhesion science and technology, 2009, vol. 23, no. 6, pp. 899-911.*

5. *Fedorov, A. V. Smeseobrazovanie pri rasprostraneni volnovykh protsessov v gazovzvesyakh (obzor) [Mixture formation in the propagation of the wave processes in gas suspensions (review)]. Fizika gorennya i vzryva, 2004, T. 40, no. 1, pp. 21-37.*

6. *Gosteev, Yu. A., Fedorov, A. V. K raschetu pod"ema pyli prokhodyashchei udarnoi volnoi [Calculation of dust lifting passing shock wave]. Fizika gorennya i vzryva – Physics of combustion and explosion, 2002, vol. 38, no. 3, pp. 80-84*

7. *Burdick, G. M., Berman, N. S., Beaudoin, S. P. Hydrodynamic particle removal from surfaces. Thin Solid Films, 2005, vol. 488, no. 1-2, pp. 116-123.*

8. *Tsegel'nik, E. V., Kuznetsov, I. B., Mel'nichuk, P. I., Malashenko, V. L. Analiz modelei adgezii pri ochistke poverkhnostei detalei aviatsionnoi tekhniki ot mikrochastits [Analysis of microparticles adhesion models at cleaning of aircraft parts surfaces]. Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannyye tekhnologii – An open information and computer integrated technologies, 2016, vol. 72, pp. 48-55.*

9. *Zhdanov, A. A. Termoimpul'snyye tekhnologii ochistki poverkhnostei detalei agregatov aviatsionnykh dvigatelei. Diss. kand. tekhn. nauk [Thermal pulse technology of aircraft engines components surface cleaning. PhD diss.]. Kharkov, 2003. 182 p.*

10. Dandy, D. S., Dwyer, H. A. Sphere in shear flow at finite Reynolds number. Effect of shear on particle lift, drag, and heat transfer. *The Journal of Fluid Mechanics*, 1990, vol. 216, pp. 381–410.

11. Leighton, D. T., Acrivos, A. The lift on a small sphere touching a plane in the presence of a simple

shear flow. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 1985 vol. 36, pp. 174–178.

12. Krishnan, G. P., Leighton, D. T. Inertial lift on a moving sphere in contact with a plane wall in a shear flow. *Physics of Fluids*, 1995, vol. 7, pp. 2536–2545.

*Поступила в редакцию 2.05.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016*

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор, зав. кафедры технологии производства авиационных двигателей А. И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

#### АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ВИДАЛЕННЯ МІКРОЧАСТИНОК ДЕТОНУЮЧИМИ ГАЗОВИМИ СУМІШАМИ ПРИ ОЧИСТЦІ ДЕТАЛЕЙ ГТД

*І. Б. Кузнецов, В. П. Божко, Є. В. Цегельник, Д. А. Брега*

Розроблена аналітична модель для дослідження процесу детонаційної очистки деталей агрегатів авіаційних двигунів, яка враховує особливості даного процесу. На підставі чисельного моделювання впливу сдвигового потоку на мікрочастинку обґрунтовано вибір залежності для завдання сили відриву мікрочастинок при проходженні ударної хвилі. На основі аналізу балансу сил отримана оцінка для визначення мінімального діаметра мікрочастинок, яка може бути вилучена з поверхні при проходженні уздовж неї детонаційної хвилі. Отримана оцінка належить до випадку відриву частки ударною хвилею поверхні, що поширюється уздовж, і може бути прийнята в якості верхньої границі якості детонаційної очистки.

**Ключеві слова:** детонаційна очистка, мікрочастинок, сила Саффмана, адгезія.

#### ANALYTICAL MODEL OF MICROPARTICLES REMOVING BY DETONATING GAS MIXTURES AT GTE PARTS CLEANING

*I. B. Kuznetsov, V. P. Bozhko, Ye. V. Tsegelnyk, D. A. Brega*

Analytical model for the study of the detonation process of aircraft engines parts cleaning which takes into account features of the process is proposed. Based on the numerical simulation of the impact of shear flow on the microparticle grounded the choice the force dependence for the separation of the microparticles during the passage of the shock wave. Based on analysis of the balance of forces to determine an estimate of the minimum diameter of the microparticles, which can be removed from the surface by passing therealong detonation wave. This estimate applies to the case of detachment of the shock wave of particles propagating along the surface, and can be accepted as the upper limit of the quality of detonation cleaning.

**Key words:** detonation cleaning, microparticles, Saffman force, adhesion.

**Кузнецов Игорь Борисович** – канд. техн. наук, доц., заместитель начальника института оперативного обеспечения и логистики, Национальный университет обороны Украины им. Ивана Черняховского, Киев, Украина, e-mail: elisova@ukr.net.

**Божко Валерий Павлович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. финансов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

**Цегельник Евгений Владимирович** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина, e-mail: y.tsegelnyk@gmail.com.

**Брега Дмитрий Андреевич** – канд. техн. наук, доц. каф. технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: brega10.04@gmail.com.

**Kuznetsov Igor Borisovich** – Candidate of Technical Science, Assistant Professor, Deputy Head of the Institute of Operative Maintenance and Logistics, National University of Defense of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky, Kiev, Ukraine, e-mail: elisova@ukr.net.

**Bozhko Valeriy Pavlovich** – Doctore of Technical Science, Professor, Head of the Dept. of Finances, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine.

**Tsegelnyk Yevgeniy Vladimirovich** – Candidate of Technical Science, Senior Researcher of Dept. of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: y.tsegelnyk@gmail.com.

**Brega Dmitriy Andreevich** – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Aircraft Manufacturing Technology, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: brega10.04@gmail.com.