

УДК 629.783: 658.562

**В.В. ХАРЧЕНКО, В.С. ЗЕВАКО, П.Н. ЖЕЛТОВ, М.Н. ХВОСТОВ,
Д.С. АБРАМЕНКО, И.А. ШАРАЙ***Публичное акционерное общество «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения»***МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗАВИСИМОСТИ ОЧИЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖИДКОСТНОЙ СТРУИ ОТ ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ СОПЛОВОГО УСТРОЙСТВА ОБОРУДОВАНИЯ СТРУЙНОЙ ОЧИСТКИ ПОЛОСТЕЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

В статье рассмотрена задача оптимизации оборудования гидроструйной механизированной очистки топливных отсеков изделий ракетно-космической техники. Для решения поставленной задачи была разработана обобщенная математическая модель влияния конструктивных особенностей проходного канала соплового устройства на распределение динамического давления в струе моющей жидкости по ее длине. Представленная математическая модель может быть использована при проектировании дальнобойных компактных сопловых устройств моечного оборудования низкого давления для очистки механических и органических загрязнений как в ракетно-космической отрасли, так и в химической, нефтехимической, пищевой и сельскохозяйственной отраслях промышленности.

Ключевые слова: *незаплавленная струя моющей жидкости, моечная головка, сопловое устройство.*

Введение

Надежность изделий ракетно-космической техники в значительной мере определяется степенью чистоты узлов и агрегатов. Особенно это относится к уровню очистки топливных систем и внутренних полостей от механических и органических загрязнений. Из общего количества загрязнений топливной системы более 60% приходится на топливные емкости [1].

Как показала практика, в частности создание ракетно-космического комплекса «Циклон-4», ракеты-носителя «Зенит», загрязненность полостей (металлическая стружка, ворс, кварцеподобные частицы, жировые загрязнения и др.) обуславливает выход из строя элементов турбонасосного агрегата (ТНА), распределительных и регулировочных устройств, элементов управления и приводит к отказу отдельных узлов и агрегатов в целом. Переход украинской ракетно-космической отрасли на международные стандарты привел к ужесточению требований к чистоте полостей баковых конструкций, трубопроводов и других узлов пневмо- и гидросистем ракет-носителей (РН) [2].

Для достижения требуемого уровня чистоты внутренних полостей баков и высокого качества подготовки поверхностей к испытаниям на герметичность в конструкторскую документацию при обезжиривании и очистке от механических загрязнений поверхностей введено использование 0,01 –

0,02 % раствора бихромата калия (хромпика) в дистиллированной воде. Взрывобезопасность, негорючесть и химическая инертность данного раствора позволяют применять его в устройствах для механизированной жидкоструйной очистки изделий за счет гидродинамического воздействия струи. Однако при этом необходимо обеспечить оптимальную работоспособность струй моющей жидкости, а именно: максимальные динамические характеристики при минимальных энергетических затратах.

На сегодняшний момент при создании моечных головок, благодаря которым обеспечивается механизированная гидроструйная очистка баков РН, основное внимание уделяется повышению их надежности и минимизации гидравлического сопротивления, без модификации сопловых устройств. Для определения дальнобойности, сплошности, а в конечном итоге, производительности струи использовались эмпирические зависимости, которые не оценивали в полной мере влияния конструктивных особенностей соплового устройства (СУ) на физические свойства струи [1, 2].

В связи с этим исследования, направленные на повышение эффективности использования подводимой к моечной головке энергии для удаления внутрибаковых загрязнений, базирующиеся на изучении динамических характеристик струи и процессов ее формирования в СУ, являются весьма важными.

Постановка задачи исследования

Теоретический путь исследования вопросов движения водяных струй в воздухе представляется весьма сложным. Рассматривая струи моющей жидкости как ограниченные потоки капельной жидкости, двигающейся в воздушной среде, необходимо учитывать совокупное влияние таких факторов, как сила тяжести, турбулентность потока при входе в СУ и после выхода из него, содержание в потоке воздуха и, наконец, сопротивление воздуха, являющееся одной из причин нарушения сплошности течения потока. Разрывность течения жидкости в струях моющей жидкости не позволяет в достаточной мере применить при их исследовании математический аппарат гидродинамики, основывающийся на непрерывных функциях и приспособленный для исследования потоков со сплошным течением [3].

Решение теоретической задачи сводится к определению параметров струи на расстояниях, при которых процесс разрушения адгезионных связей загрязнения и очищаемой поверхности изделия полностью затухает, т.е. к вычислению максимально возможной длины рабочего участка струи в зависимости от прочности адгезионных связей удаляемых промышленных загрязнений.

Основной параметр, который используется для описания струи моющей жидкости – динамическое давление. Этому есть ряд обоснований:

– величина динамического давления определяет способность струи разрушать адгезионные связи загрязнений с очищаемой поверхностью.

– на базе динамического давления можно создать критерий качества струи моющей жидкости, связывающий параметры моечной головки и конечные показатели по гидравлическому удалению промышленных загрязнений (производительность, энергоёмкость и т.д.);

– динамическое давление достаточно просто измерить с помощью гидравлического датчика полного давления (трубки Пито) либо тензометрического датчика веса;

Анализ существующих научных трудов показал, что движение жидкой струи в среде газа описывается уравнением движения и неразрывности каждой фазы и условиями на границе раздела фаз. В векторной форме эти уравнения записываются в следующем виде [4]:

– уравнение движения

$$\begin{aligned} \rho \bar{F} - \nabla p + \mu \left(\nabla^2 U + \frac{1}{3} \nabla (\nabla \cdot U) \right) = \\ = \rho \left[\frac{dU}{dt} + (U, \nabla) U \right]; \end{aligned} \quad (1)$$

– уравнение неразрывности

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho U) = 0, \quad (2)$$

где U – вектор скорости, м/с

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

σ – поверхностное натяжение, Н/м;

\bar{F} – объёмные силы, действующие на единицу массы;

В случае несжимаемой среды плотность постоянна ($\rho = \text{const}$) и для установившегося процесса опускаются члены, соответствующие локальной нестационарности, уравнения (1) и (2) упрощаются и принимают вид:

$$\rho \bar{g} - \nabla p + \mu (\nabla^2 U) = \rho [(U, \nabla) U]; \quad (3)$$

$$\nabla \cdot U = 0. \quad (4)$$

Для решения системы уравнений, написанных отдельно для каждой из сред, необходимо знать начальные и граничные условия, устанавливающие связь между скоростями и давлениями в плоскости истечения струи, а также условия взаимодействия фаз на границе раздела. Кроме того, нужно иметь представление о форме поверхности раздела в плоскости истечения струи.

Поверхностный слой по своим свойствам в значительной степени отличается от остального объема жидкости вследствие того, что молекулы этого слоя находятся под воздействием силовых полей молекул различных сред. В результате на молекулы поверхностного слоя действует сила, направленная перпендикулярно к поверхности внутрь жидкости, – молекулярное давление. Толщина поверхностного слоя весьма мала и составляет величину порядка нескольких молекулярных размеров. Вследствие действия молекулярного давления поверхностный слой жидкости аналогичен растянутой пленке, стремящейся сжаться. Этому сжатию препятствуют силы, касательные к поверхности жидкости, называемые силами поверхностного натяжения [5].

Увеличение поверхности раздела фаз на величину $dS_{\text{гр}}$ связано с затратой работы сил поверхностного натяжения и приводит к увеличению внутренней энергии поверхностной пленки жидкости $dE = \sigma dS_{\text{гр}}$.

Энергия E представляет собой ту часть внутренней энергии, которая может быть превращена в работу при изотермическом сжатии, и называется свободной энергией; σ – коэффициент поверхностного натяжения, численно равный изменению свободной энергии E пленки при увеличении поверхности раздела фаз на единицу.

$$\sigma = \frac{dE}{dS_{гр}} \quad (5)$$

Численная величина коэффициента поверхностного натяжения зависит от физических свойств граничных сред.

В состоянии равновесия величина свободной энергии должна быть минимальной, поэтому жидкая струя стремится при равновесии принять форму с наименьшей поверхностью.

Наличие сил поверхностного натяжения приводит, в случае криволинейной поверхности раздела, к тому, что давления в жидкости и газе не равны. Эта разность давлений определяется формулой Лапласа:

$$p_{ж} - p_{г} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = p_{\sigma}, \quad (6)$$

где R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны поверхности раздела фаз.

В общем, для границы раздела жидкость – газ могут быть записаны следующие условия [5]:

– тангенциальная составляющая скорости на поверхности раздела фаз должна оставаться непрерывной по условию отсутствия скольжения фаз относительно друг друга:

$$u_{ж} = u_{г}; \quad (7)$$

– при отсутствии фазового превращения нормальные составляющие скорости равны нулю:

$$v_{ж} = v_{г} = 0; \quad (8)$$

– касательные напряжения равны друг другу:

$$\tau_{ж} = \tau_{г}; \quad (9)$$

– нормальные напряжения равны друг другу:

$$p_{г} + p_{\sigma} = p_{ж}. \quad (10)$$

Численный метод моделирования движения струи жидкости в газовой среде

Интегрирование составленной системы уравнений представляет значительные трудности и возможно только в отдельных случаях. Поэтому при решении ряда практических задач приходится прибегать к опытам. Альтернативой опыта является численное интегрирование. Наиболее важным преимуществом численного решения является его небольшая стоимость. Численное решение можно провести очень быстро. Разработчик имеет возможность меньше, чем за день, просчитать сотни вариантов и выбрать оптимальную конструкцию. Численное решение задачи дает подробную и полную информацию. С его помощью можно найти значения всех имеющихся переменных (таких, как ско-

рость, давление, температура, концентрация, интенсивность турбулентности) во всей области решения.

В данной работе используется метод контрольного объема, как инструмент для получения дискретного аналога фундаментальных уравнений, описанных выше. Для получения дискретного аналога будем использовать уравнения (1) и (2) в общем виде, как для жидкости, так и для газа в цилиндрической системе координат (рис. 1), что уменьшит количество уравнений и переменных.

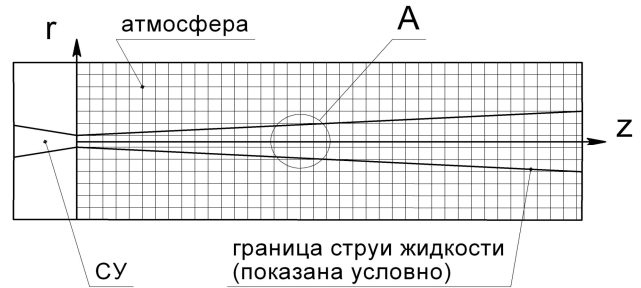


Рис. 1. Расчетная область (вид А см. на рис. 2)

В общем виде система уравнений для любой из фаз выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \\ + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right); \\ v \frac{\partial v}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \\ + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - \frac{v}{r^2} \right); \\ \frac{1}{r} \frac{\partial (rv)}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0, \end{cases} \quad (11)$$

где u – осевая скорость;

v – радиальная скорость.

Для получения дискретного аналога будет использовано показанное на рис. 2.2 и 2.3 расположение узловых точек.

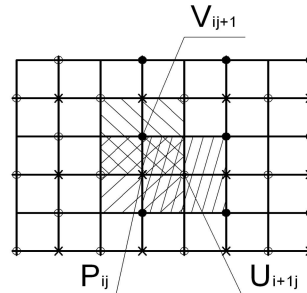


Рис. 2. Расположение давления, осевой и радиальной скоростей в шахматном порядке

Сетку располагаем таким образом, чтобы ее левый край совпадал с выходом из сопла и узловые точки на этом крае являлись точками осевой скорости u , по верхнему и нижнему краю располагались узловые точки радиальной скорости v , на правом крае – осевая скорость u .

Рассмотрим контрольный объем в общем случае (в независимости от параметра) на рис. 3.

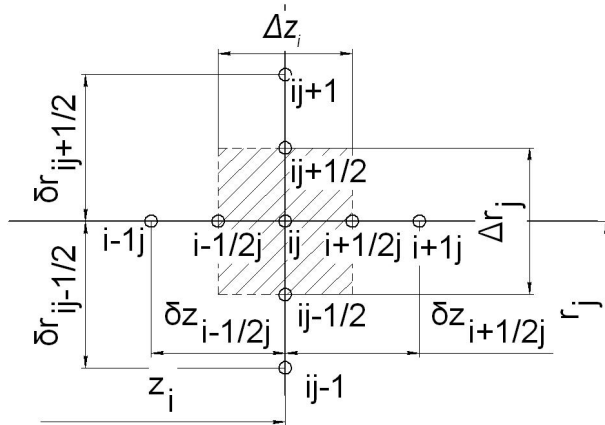


Рис. 3. Контрольный объем (заштрихованная область) для двухмерного случая

В центре нашего внимания оказывается точка i,j , окруженная точками $i-1,j$, $i+1,j$, $i,j-1$ и $i,j+1$. Штрихом показаны границы контрольного объема, в данном случае выбрана равномерная сетка, которая удовлетворяет точности расчета и сокращает написание программы. Эти границы обозначены соответственно $i-1/2,j$, $i+1/2,j$, $i,j-1/2$ и $i,j+1/2$.

Для рассматривания двумерной задачи предположим, что размер контрольного объема в угловом направлении равен единице. Таким образом, объем показанного контрольного объема равен $\Delta z \times \Delta r \times 1$. Интегрируя преобразованное уравнение для осевой скорости по контрольному объему, получаем:

$$\int_{i,j-1/2}^{i,j+1/2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r v u - r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right] dr dz + \int_{i,j-1/2}^{i,j+1/2} \frac{\partial}{\partial z} \left[r u^2 - r \mu \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{r}{\rho} p \right] dz dr = 0. \quad (12)$$

Используя для определения $\frac{\partial u}{\partial z}$ и $\frac{\partial u}{\partial r}$ в уравнении (12) кусочно-линейный профиль, и группируя по соответствующим граням и направлениям, применяя схему против потока и преобразуя полученное, приведем уравнение (12) к виду:

$$a_{i,j}^u u_{i,j} = a_{i,j+1}^u u_{i,j+1} + a_{i,j-1}^u u_{i,j-1} + a_{i+1,j}^u u_{i+1,j} + a_{i-1,j}^u u_{i-1,j} - \frac{r_j}{\rho} \Delta r_j (p_{i+1,j} - p_{i,j}), \quad (13)$$

где

$$a_{i,j+1}^u = \left[- \left(r_j + \frac{\Delta r_j}{2} \right) \cdot \frac{v_{i,j} + v_{i+1,j}}{2}, 0 \right] \Delta z_i + \left(r_j + \frac{\Delta r_j}{2} \right) \mu \frac{\Delta z_i}{\delta r_j}; \quad (14)$$

$$a_{i,j-1}^u = \left[\left(r_j - \frac{\Delta r_j}{2} \right) \cdot \frac{v_{i,j-1} + v_{i+1,j-1}}{2}, 0 \right] \Delta z_i + \left(r_j - \frac{\Delta r_j}{2} \right) \mu \frac{\Delta z_i}{\delta r_{j-1}}; \quad (15)$$

$$a_{i+1,j}^u = \left[-r_j \cdot \frac{u_{i,j} + u_{i+1,j}}{2}, 0 \right] \Delta r_j - r_j \mu \frac{\Delta r_j}{\delta z_{i+1}}; \quad (16)$$

$$a_{i-1,j}^u = \left[r_j \cdot \frac{u_{i-1,j} + u_{i,j}}{2}, 0 \right] \Delta r_j - r_j \mu \frac{\Delta r_j}{\delta z_i}; \quad (17)$$

$$a_{i,j}^u = a_{i,j+1}^u + a_{i,j-1}^u + a_{i+1,j}^u + a_{i-1,j}^u; \quad (18)$$

дискретный аналог для радиальной скорости:

$$a_{i,j}^v v_{i,j} = a_{i,j+1}^v v_{i,j+1} + a_{i,j-1}^v v_{i,j-1} + a_{i+1,j}^v v_{i+1,j} + a_{i-1,j}^v v_{i-1,j} - \frac{1}{\rho} (p_{i,j+1} - p_{i,j}) \Delta z_i, \quad (19)$$

где

$$a_{i,j+1}^v = \left[- \frac{v_{i,j+1} + v_{i,j}}{2}, 0 \right] \Delta z_i + \mu \frac{\Delta z_i}{\delta r_j}; \quad (20)$$

$$a_{i,j-1}^v = \left[\frac{v_{i,j-1} + v_{i,j}}{2}, 0 \right] \Delta z_i + \mu \frac{\Delta z_i}{\delta r_{j-1}}; \quad (21)$$

$$a_{i+1,j}^u = \left[- \frac{u_{i,j} + u_{i+1,j}}{2}, 0 \right] \Delta r_j + \mu \frac{\Delta r_j}{\delta z_i}; \quad (22)$$

$$a_{i-1,j}^u = \left[\frac{u_{i-1,j} + u_{i,j}}{2}, 0 \right] \Delta r_j + \mu \frac{\Delta r_j}{\delta z_{i-1}}; \quad (23)$$

$$a_{i,j}^v = a_{i,j+1}^v + a_{i,j-1}^v + a_{i+1,j}^v + a_{i-1,j}^v; \quad (24)$$

дискретный аналог поправки давления:

$$c_{i,j} p'_{i,j} = c_{i,j+1} p'_{i,j+1} + c_{i,j-1} p'_{i,j-1} + c_{i+1,j} p'_{i+1,j} + c_{i-1,j} p'_{i-1,j} + (r_{j-1} v_{i,j-1}^* - r_j v_{i,j}^*) \Delta z_i + (u_{i-1,j}^* - u_{i,j}^*) r_j \Delta r_j, \quad (25)$$

где

$$c_{i,j+1} = \frac{r_j \Delta z_i^2}{\rho a_{i,j}^v}; \quad (26)$$

$$c_{i,j-1} = \frac{r_{j-1} \Delta z_i^2}{\rho a_{i,j-1}^v}; \quad (27)$$

$$c_{i+1,j} = \frac{r_j^2 \Delta r_j^2}{\rho a_{i,j}^u}; \quad (28)$$

$$c_{i-1,j} = \frac{r_j^2 \Delta r_j^2}{\rho a_{i-1,j}^u}; \quad (29)$$

$$c_{i,j} = c_{i,j+1} + c_{i,j-1} + c_{i+1,j} + c_{i-1,j}. \quad (30)$$

У струи нет четко выраженного края. Вокруг нее всегда наблюдается ореол из мельчайших брызг. Поэтому нельзя провести поверхность, с одной стороны которой есть струя, а с другой нет. В этом случае границу можно определить как поверхность уровня скалярного поля динамического давления, на которой оно имеет постоянное значение p_z . Это значение выбирается в зависимости от решаемой задачи, например, естественную границу можно определить, полагая, что p_z равно атмосферному давлению. Это будет технологическая граница струи. При этом часть воды останется за границей, но это должна быть та часть, которая не оказывает существенного влияния на процесс разрушения. Инженерная теория тем и отличается, что рассматривает только характеристики, влияющие на технологические параметры.

Граница струи дает пределы интегрирования при вычислении потока кинетической энергии и других интегральных величин.

Поскольку уравнение для p' не является одним из основных уравнений, следует дать некоторое пояснение к аппроксимации граничных условий для этого уравнения.

Обычно имеется два вида условий на границе. Либо задано давление на границе (скорость является не известной), либо определена компонента скорости, нормальная к границе. Если предполагаемое поле давления принимается таким, что на границе оно равно заданному, то значение p на границе будет нулевым.

Если сетка строится таким образом, что граница совпадает с гранью контрольного объема, то осевая скорость является заданной. При получении уравнения для определенного контрольного объема скорость потока через граничную поверхность будет выражена не через u^* и соответствующую поправку, а через само u . В этом случае значение p' в уравнении не появится или $a_{i,j}^u$ будет равно нулю в

уравнении для p' . Таким образом, информация о $p'_{i,j}$ не будет нужна.

Процедура, разработанная для расчета поля течения, получила название SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), что означает полунявный метод для связывающих давление уравнений.

Последовательность операций. Ниже перечислены основные операции в порядке их выполнения:

- задание поля давления p^* ;
- решение уравнений движения, таких, как уравнения (13) и (19), для получения u^* и v^* ;
- решение уравнения для p' ;
- расчет p путем добавления p' к p^* ;
- расчет u и v с учетом соответствующих значений со звездочкой;
- решение дискретных аналогов для других характеристик (турбулентных и др.), если они влияют на поле течения через физические свойства жидкости, источниковые члены и т.д.

Представление скорректированного давления p как нового p^* , возвращение к пункту 2 и повторение всей процедуры до тех пор, пока не будет получено сходящееся решение.

Для вычисления поправки давления необходимо использовать некоторую нижнюю релаксацию [5], которая вычисляется по формуле:

$$p = p^* + \alpha_p p', \quad (31)$$

где α_p – коэффициент релаксации равный 0,8.

Анализ результатов численных расчетов

Для выбора оптимальных геометрических параметров сопел использовались сопловые устройства с набором сменных насадков и успокоителей [1, 2].

Были выбраны четыре СУ одинаковой геометрии проходного канала и отличающиеся только конструкцией успокоителей. СУ представляет собой гладкий цилиндр внутренним диаметром 10 мм и длиной 30 мм с заканчивающимся коническим насадком. Общая длина устройства равна 42 мм. Первое СУ было без успокоителя. Второе – с встроенным в него успокоителем в виде пакета четырех металлических трубок $d_t = 3$ мм, $\delta = 0,1$ мм, $l_t = 20$ мм. Третье СУ представляет собой СУ №1 с успокоителем в виде пакета: "треугольный элемент + сотовый элемент". Устройство №4 представляет собой укороченную вдвое конструкцию СУ №1 с успокоителем в виде пакета: "z-образный элемент + сетка".

Как результат определялось наиболее эффективное СУ [1, 2].

В качестве критерия оптимизации принималось отношение осевого давления P_L струи, измеренное трубкой Пито на расстоянии L от среза сопла, к давлению P_0 перед входом в канал соплового устройства. Чем ближе к 1,0 значение P_L/P_0 , тем лучше гидродинамические характеристики соплового устройства. В этом случае предполагалось, что сохранение гидродинамических характеристик струи на расстоянии L происходит благодаря ее минимальному распаду (распыливанию). Отношение P_L/P_0 можно назвать коэффициентом осевого динамического давления, что очень удобно и наглядно характеризует качество того или иного соплового устройства. Кроме того, благодаря этому коэффициенту можно исследовать влияние элементов струеформирования (успокоителей и сопловых устройств) на разрушающую способность струи, сравнивать сопловые устройства различной конфигурации и т.д.

Исследования показали, что введение в канал СУ успокоителя изменяет характер истечения жидкостей. Распад струи происходит менее интенсивно. Значительно лучшие и близкие между собой гидродинамические показатели отмечены при исследованиях сопловых устройств типа №3 и №4, имеющих по две ступени выпрямления турбулентного жидкостного потока в цилиндрическом подводящем канале [3].

Уменьшение диаметра истечного отверстия сопел ведет к увеличению распада струи и к ухудшению гидродинамических характеристик P_L и P_L/P_0 (рис. 4).

Заключение

Разработанная обобщенная математическая модель влияния конструктивных особенностей проходного канала соплового устройства на распределение динамического давления в струе моющей жидкости по ее длине может быть использована при проектировании дальнобойных компактных СУ для моечного оборудования низкого давления. Расхождение теоретических расчетов от экспериментальных результатов не превышает 15 %.

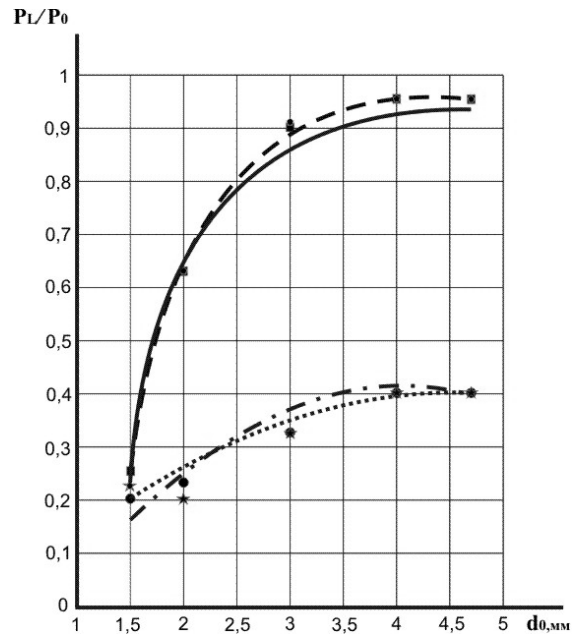


Рис. 4. Зависимость гидродинамического давления на оси жидкостной струи на расстоянии $L = 0,5$ м от среза СУ для начального давления жидкости 0,2 МПа (\triangle – экспериментальные данные для сеточного успокоителя; — — — теоретическая кривая для сеточного успокоителя; \blacksquare – экспериментальные данные для сотового успокоителя; — — — теоретическая кривая для сотового успокоителя; \bullet – экспериментальные данные для СУ без успокоителя; \cdots – теоретическая кривая для СУ без успокоителя; \ast – экспериментальные данные для СУ с пакетом трубок; $-\cdot-\cdot-$ – теоретическая кривая для СУ с пакетом трубок)

Литература

1. Абраменко, Д.С. Исследования по оптимизации конструктивно-технологических решений жидкоструйной очистки [Текст] / Д.С. Абраменко, М. Н. Хвостов, Б. П. Ефимчук // Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки: зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту. – Т. X. – Днепропетровск : Пороги, 2010. – С. 3–10.
2. Абраменко, Д.С. Исследования по оценке динамического воздействия струи моющей жидкости на очищаемую поверхность [Текст] / Д.С. Абраменко, М. Н. Хвостов, Б. П. Ефимчук // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія «Ракетно-космічна техніка». – 2011. – № 4/19. – С. 3–9.
3. Экспериментальные и теоретические исследования по влиянию конструктивных особенностей успокоителей в сопловых устройствах на динамические характеристики струи моющей жидкости [Текст] / Д.С. Абраменко, М. Н. Хвостов, И. А. Шарай, В. Ф. Решетников, Е. Г. Смирнова // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія «Ракетно-космічна техніка». – 2012. – №4/20. – С. 67–73.

4. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена динамики жидкости [Текст]: пер. с англ. / С. Патанкар. – М.: Энергостомиздат, 1984. – 152 с.

5. Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика [Текст] / В. Г. Левич. – М.: Гос. изд. физ.-мат. литер, 1959. – 700 с.

Поступила в редакцию 03.03.2013, рассмотрена на редколлегии 11.09.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник, В.И. Сливинский, Публичное акционерное общество «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения», Днепропетровск.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗАЛЕЖНОСТІ ОЧИСНОЇ ЗДАТНОСТІ СТРУМЕНЯ РІДИНИ ВІД ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКИХ РІШЕНЬ СОПЛОВИХ ПРИСТРОЇВ ЩОДО ОБЛАДНАННЯ СТРУМІННОЇ ОЧИСТКИ ПОРОЖНИН РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ

В.В. Харченко, В.С. Зевако, П.М. Желтов, М.М. Хвостов, Д.С. Абраменко, І.А. Шарай

У статті представлено задачу оптимізації обладнання гідрострумінного механізованого очищення паливних відсіків виробів ракетно-космічної техніки. Для вирішення поставленої задачі було розроблено узагальнену математичну модель впливу конструктивних особливостей прохідного каналу соплового пристрою на розподіл динамічного тиску в струмені миючої рідини по її довжині. Представлена математична модель може бути використана при проектуванні далекобійних компактних соплових пристроїв для мийного обладнання низького тиску для очищення механічних і органічних забруднень як в ракетно-космічній галузі, так і в хімічній, нафтохімічній, харчовій та сільськогосподарській галузях промисловості.

Ключові слова: незатоплений струмінь миючої рідини, мийна голівка, сопловий пристрій.

MATHEMATICAL MODEL DEPENDING CLEAN ABILITY LIQUID JETS FROM DESIGN SOLUTIONS NOZZLE ARRANGEMENTS EQUIPMENT INKJET PIGGING ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

V.V. Kharchenko, V.S. Zevako, P.N. Zheltov, M.N. Khvostov, D.S. Abramenko, I.A. Sharay

An evolutionary method for choice of a multistage axial compressor guide vanes control program is offered. Optimization is conducted with the purpose of providing of a maximal efficiency along the line of operating conditions at the determined stability level. The examined task behaves to the class of multiobjective tasks of parametrical optimization. Solution of the problem by downgrading it to the modification task is offered. Application of offered approach and adaptation procedures of the choice of genetic algorithm parameters, used in an evolutionary method, provides the substantial decreasing of the rational decision search algorithm informative complication. The example of multistage axial compressor guide vanes control program choosing for modern turbojet engine of the passenger regional airplane is considered.

Key words: theory of the large systems, optimization, evolutionary methods, turbojet engines, axial multi-stage compressor.

Харченко Владимир Викторович – председатель правления – директор ПАО «УкрНИИТМ», Днепропетровск, Украина

Зевако Василий Сергеевич – канд. техн. наук, заместитель председателя правления – директора по научной работе, директор ПАО «УкрНИИТМ», Днепропетровск, Украина

Желтов Павел Николаевич – заместитель директора по специальной технике, ПАО «УкрНИИТМ», Днепропетровск, Украина

Хвостов Михаил Николаевич – начальник научно-исследовательского отдела технологии сборки и испытаний ПАО «УкрНИИТМ», Днепропетровск, Украина

Абраменко Дмитрий Сергеевич – ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела технологии сборки и испытаний, ПАО «УкрНИИТМ», Днепропетровск, Украина, abramenko@i.ua, (056) 373 28 81, (096) 332 30 55

Шарай Игорь Анатольевич – ведущий инженер-технолог научно-исследовательского отдела технологии сборки и испытаний, ПАО «УкрНИИТМ», Днепропетровск, Украина