

УДК 621.5.049

И.И. ПЕТУХОВ, Ю.В. ШАХОВ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУЙНОГО ОХЛАДИТЕЛЯ ЖИДКОСТИ

Использование струйного охладителя жидкости в качестве теплообменного устройства в системах заправки и термостатирования криогенных компонентов топлива, а также в составе стендов для отработки насосных агрегатов жидкостных ракетных двигателей невозможно без достоверного описания статических характеристик охладителя. Сложность термодинамических процессов, происходящих в его проточной части, не позволяют создать единую математическую модель для устройства в целом. Более приемлемо при описании рабочего процесса разделение устройства на составные элементы – сопло на вскипающей жидкости, поверхностный сепаратор и диффузор с двухфазным потоком на входе. Расчёт характеристик устройства в целом обеспечивается в результате объединения математических моделей элементов. В данной статье представлен именно такой подход.

Ключевые слова: криогенное топливо, испарительное охлаждение, струйный охладитель жидкости, поверхностный сепаратор, сверхзвуковой диффузор, вскипающий поток, характеристики, метод расчета, эмпирические коэффициенты

Введение

Настоящий этап развития ракетно-космической техники характеризуется неослабевающим интересом к использованию криогенных компонентов топлива. Однако низкая рабочая температура жидких кислорода и водорода является причиной значительных теплопритоков к компонентам в ходе процесса заправки и термостатирования топливных баков ракет-носителей во время предстартовой подготовки, а также при испытаниях агрегатов жидкостных ракетных двигателей. По этой же причине осложняется и охлаждение криогенных жидкостей, особенно водорода. В качестве охлаждающей среды используют, как правило, часть охлаждаемого компонента при более низком давлении, обеспечивающем его испарение при подводе теплоты от основного потока.

При такой схеме значения температурного напора малы. Поэтому традиционные теплообменные аппараты-рекуператоры имеют большие габариты и массу. Кроме удорожания конструкции это приводит также к дополнительным затратам испаряющегося компонента на её захлаживание.

В связи с этим сохраняется актуальность задачи создания новых высокоэффективных теплообменных устройств, к каковым и относятся струйные охладители жидкости (СОЖ) [1, 2], реализующие быстрое (до 600 К/с) охлаждение жидкости. Жидкость охлаждается за счет частичного испарения при расширении вскипающего потока в сопле. Кроме снижения температуры здесь за счёт работы пара

наблюдается увеличение полного давления охлаждаемой жидкости. Далее охлажденная жидкость отделяется от пара в поверхностном сепараторе и направляется в диффузор. Ввиду неполного отделения пара поток на его входе двухфазный, с неоднородным по высоте паросодержанием. Торможение такого потока сопровождается скачком конденсации.

Использование СОЖ в составе установок различного назначения предполагает возможность достоверного определения его характеристик, что требует соответствующей математической модели. Ввиду существенных различий структуры двухфазного потока и физических эффектов при взаимодействии фаз в элементах СОЖ единая (сквозная) модель для его расчёта в настоящее время вряд ли может быть реализована. Поэтому был принят подход с разделением охладителя на основные элементы – сопло на вскипающей жидкости, поверхностный сепаратор и диффузор с двухфазным потоком на входе. Для каждого из них рассматривается собственная модель.

Математическая модель и полуэмпирический метод расчета характеристик сопла СОЖ при адиабатном истечении криогенной вскипающей жидкости были описаны в [3].

В данной статье представлены математическая модель и метод расчета параметров поверхностного сепаратора с массообменом разделяемых фаз и диффузора с высокоскоростным двухфазным потоком на входе, а также результаты расчетов характеристик СОЖ, полученные с использованием этих моделей.

1. Расчет поверхностного сепаратора

При расчете характеристик сепаратора СОЖ в качестве исходных данных используются параметры на срезе сопла, полученные в результате расчёта по упомянутой выше методике [3]. В их числе скорость, температура и диаметр монодисперсных капель, скорость насыщенного пара и массовые расходы фаз. Целью расчета сепаратора является определение скорости и температуры потока на входе в диффузор, паросодержания по высоте отсепарированного потока.

Движение капель в криволинейном канале поверхностного сепаратора сопровождается изменением их скорости и отклонением от прямолинейной траектории вследствие воздействия пара. В связи с этим меняются вдоль сепарирующей поверхности условия соударения капель с осадившейся плёнкой жидкости. Однако в определённом диапазоне геометрических и режимных параметров эти особенности можно учесть надлежащим выбором коэффициента поверхностного трения C_{ff} жидкости о твёрдую поверхность и использовать для расчёта скорости отсепарированного потока упрощённую методику [4]. Она учитывает только потери импульса жидкости на удар о наклонную поверхность и трение отсепарированного слоя при движении по твёрдой пластине.

Расчетные соотношения имеют следующий вид:

$$\phi_{CY} = \frac{W_{L3}}{W_{L2}} = \left[\frac{1}{\phi_{P0}} + \frac{C_{ff} \cdot (\Pi - 1)}{2 \cdot \alpha_{L2} \cdot \sin \theta} \right]^{-1}, \quad (1)$$

$$\phi_{P0} = \frac{\alpha_{L2} \cdot \sin \theta \cdot (E - 1)}{C_{ff}}, \quad (2)$$

$$E = \sqrt{1 + 2 \cdot C_{ff} \cdot \frac{\text{ctg} \theta}{\alpha_{L2}}}, \quad (3)$$

где $\Pi = L_{CY} \cdot \sin \theta / h_2$ - коэффициент перекрытия потока из сопла;

W_{L2} , W_{L3} - скорость жидкой фазы соответственно на входе (срез сопла) и выходе поверхностного сепаратора;

α_{L2} - объемное влагосодержание потока на срезе сопла;

Θ - средний угол установки участка осаждения капель;

L_{CY} - длина сепарирующей поверхности, м.

Сравнения с данными более точной модели показали, что хорошие результаты для кислорода и водорода получаются при значении коэффициента поверхностного трения 0,004 и 0,003 соответственно.

Важной особенностью процесса сепарации однокомпонентного парожидкостного потока является массообмен между фазами и охлаждение жидкости в сепараторе, которое может составлять до 30% этой величины для СОЖ в целом. В области парок капельной структуры потока механизм теплообмена не отличается от описанного в работе [3]. Соответственно, в математической модели поверхностного сепаратора для этого участка использованы те же допущения. Охлаждение жидкости определяется её начальным (на срезе сопла) перегревом, диаметром капель и временем их движения до осаждения в отсепарированный слой.

Возможность кипения жидкости обусловлена её перегревом на срезе сопла, а возможность конденсации пара - значительным превышением статического давления у криволинейной сепарирующей поверхности над давлением насыщения. Направление и интенсивность фазового перехода определяются величиной и знаком разности давления насыщения и местного статического давления. Более низкие значения последнего на участке осаждения капель и более высокая, чем на участке повышенной кривизны (участке дегазации), температура жидкости, а также перемешивание отсепарированного слоя влетающими каплями интенсифицируют процесс охлаждения.

На участке дегазации охлаждения жидкости практически не наблюдается. Температура T_{04} по высоте отсепарированного слоя, рассчитанная с учётом конденсации пара, с хорошей точностью может быть принята постоянной. Соотношение для расчета этой температуры учитывает охлаждение жидкости при движении капли к сепарирующей поверхности и из-за её кипения в периферийной части отсепарированного слоя, а также нагрев из-за трения жидкости о поверхность. Конечное выражение имеет следующий вид:

$$\frac{T_{L2} - T_{04}}{T_{L2} - T_{V2}} = \chi_d \left[1 - \frac{1 - \exp(-1,5\pi^2 Fo_{YOK})}{1,5\pi^2 Fo_{YOK}} \right] + \chi_f \times \quad (4)$$

$$\times \frac{(dP/dT)_S (T_{L2} - T_{V2})}{m_{L2} U_L / b \cdot r_W} Fo_f Ja_2 - \frac{W_{L2}^2}{2C_L} \frac{1 - \phi_{CY}^2}{T_{L2} - T_{V2}},$$

где T_{L2} , T_{V2} - температура жидкой и паровой фаз на входе в поверхностный сепаратор,

C_L - теплоемкость жидкой фазы,

b - ширина проточной части сепаратора,

r_W - радиус кривизны сепарирующей поверхности,

m_{L2} - массовый расход жидкой фазы на входе в сепаратор,

U_L – окружная составляющая скорости движения жидкой фазы.

Число Фурье для капли на участке парокпельного потока

$$Fo_{yOK} = \frac{4 \cdot D_L^{(T)} \cdot L_{yOK} \cdot \cos\Theta}{W_{L2} \cdot d_d^2}, \quad (5)$$

для парового пузырька на участке осаждения капель

$$Fo_f = \frac{4 \cdot D_L^{(T)} \cdot L_{yOK}}{U_L \cdot d_b^2}, \quad (6)$$

где L_{yOK} – длина участка осаждения капель,

d_d – средний диаметр капель на участке осаждения капель,

d_b – средний диаметр пузырька в отсепарированном слое,

$D_L^{(T)}$ – коэффициент температуропроводности жидкости, m^2/c ,

χ_d, χ_f – константы, зависящие от рода рабочего тела.

Слой отсепарированной жидкости формируется в результате осаждения капель и поэтому существенно неоднороден по высоте. Представление об этом дают измерения профиля динамического давления (рис. 1). Кривая 1 отвечает середине участка осаждения капель, кривая 2 выходу из него, а кривая 3 соответствует выходному сечению сепаратора.

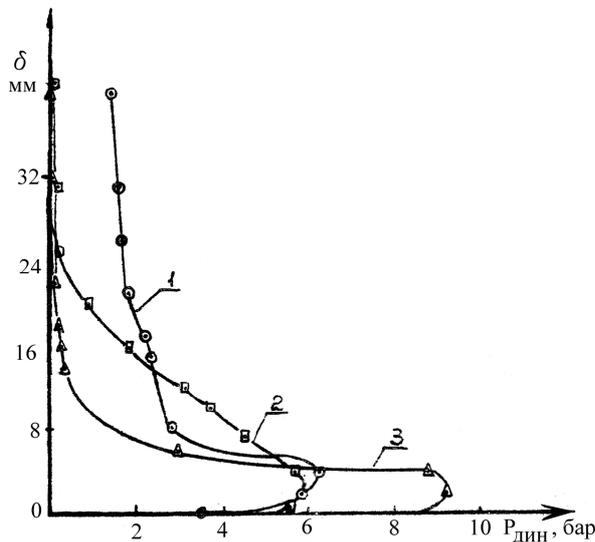


Рис. 1. Изменение динамического напора в отсепарированном слое вдоль сепаратора: кислород; модель СА-9,5-2; $P_0^* = 0,93$ МПа; $T_0^* = 91$ К; 1 - $L_{cy} = 120$ мм; 2 - $L_{cy} = 280$ мм; 3 - $L_{cy} = 400$ мм

Неоднородность динамического напора связана, прежде всего, с изменением паросодержания двухфазного потока по высоте отсепарированного слоя.

Локальные значения объемного влагосодержания, необходимые далее для расчёта параметров в диффузоре, определяли, используя для идентификации показаний трубки Пито модель скачка конденсации. При этом учитывалось, что вблизи сепарирующей поверхности на выходе из участка дегазации наблюдается слой чистой (без паровых включений) жидкости, сформировавшийся в результате схлопывания паровых пузырьков в зоне повышенного давления.

Пример найденного таким образом изменения объёмного влагосодержания по высоте отсепарированного слоя представлен на рис. 2 значками в виде круга. Чистой жидкости отвечает влагосодержание, равное единице.

Для использования этих данных при расчёте характеристик СОЖ необходима соответствующая формализация и аппроксимация структуры отсепарированного потока. С этой целью рассматривались три его части. Из концептуального назначения сепаратора границе h_a отсепарированного слоя отвечает условие равенства локального влагосодержания таковому на срезе сопла (рис. 2). Высота слоя чистой жидкости определяется положением изобары, на которой возможно полное схлопывание паровых пузырьков за время движения отсепарированного слоя на участке дегазации. В неотсепарированной части потока объемное влагосодержание уменьшается от значения на срезе сопла до нуля. Структура потока здесь аппроксимирована отрезком прямой, вторая координата которой определяется из условия, что расход жидкости в слое высотой h_e такой же, как на выходе из сепаратора.

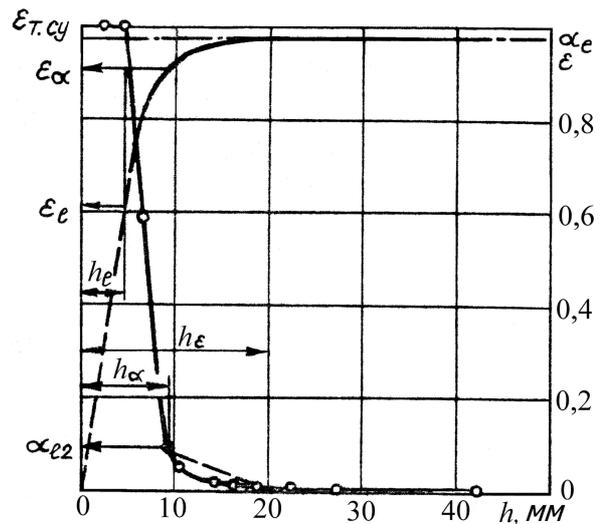


Рис. 2. Структура отсепарированного слоя: $V_{L2} = 37,2$ м/с; $T_{L2} = 91,3$ К; $\alpha_{L2} = 0,08$

Соотношение для расчета доли жидкости в ядре слоя получается из выражения для определения

положения изобары, на которой возможно полное схлопывание паровых пузырьков:

$$\varepsilon_a - \varepsilon_\ell = \chi_p \cdot \frac{(dP/dT)_S \cdot (T_{L2} - T_{V2})}{m_{L2} \cdot U_L / b \cdot r_W} \times \left(1 + \frac{\chi_b}{Ja_2 \cdot \sqrt{Fo_b}} - \chi_T \cdot \frac{T_{L2} - T_{04}}{T_{L2} - T_{V2}} \right), \quad (7)$$

где доля жидкости в отсепарированном слое с границей $\alpha_L = \alpha_{L2}$ находится из соотношения:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_o + \chi_\alpha \cdot \alpha_{L2} + \chi_V \cdot W_{L2}. \quad (8)$$

Число Фурье для пузырька на участке дегазации

$$Fo_b = \frac{4 \cdot D_L^{(T)} \cdot \tau_{дв}}{d_d^2}, \quad (9)$$

где $\tau_{дв} = L_{дв} / W_{дв}$ - время движения слоя на участке дегазации.

Число Якоба

$$Ja_2 = \frac{C_L \cdot \rho_L^0 \cdot [T_{L2} - T_{V2}]}{\rho_{V2}^0 \cdot \Psi_S(P_2)}. \quad (10)$$

определяется по перегреву на входе в сепаратор.

Значения входящих в формулы коэффициентов определяются путем обработки экспериментальных данных по сепарации паракапельных потоков жидких кислорода и водорода в СОЖ методом наименьших квадратов.

2. Модель и метод расчета диффузора

Исходными для расчета диффузора являются параметры двухфазного потока на выходе поверхностного сепаратора. Ввиду неоднородности влагосодержания по высоте слоя существенное значение имеет ещё один внешний фактор – высота захватывающей щели диффузора. Её выбор определяет как количество пара, захватываемого вместе с жидкостью, так и количество жидкости, отсекаемое и уносимое вместе с отводимым паром.

Скорость движения отсепарированного потока превышает равновесную скорость звука в смеси. Переход от сверхзвукового течения к дозвуковому происходит в скачке уплотнения в проточной части диффузора или перед входом в него в зависимости от противодавления. Помимо восстановления давления в диффузоре происходит повышение температуры потока за счет диссипативных потерь и конденсации паровых пузырьков в скачке уплотнения.

На критическом режиме скачок располагается в расширяющейся части диффузора. Площадь сечения определяет параметры двухфазного потока перед скачком и, следовательно, его интенсивность. Чем

меньше противодавление, тем ниже по потоку располагается скачок и тем больше в нем потери.

С ростом давления за диффузором скачок движется вверх по потоку, диссипативные потери уменьшаются. При этом картина течения во входном сечении не меняется до тех пор, пока скачок располагается в расширяющейся части. Смещению скачка уплотнения в горло диффузора отвечает наступление предельного критического режима. Для монотонно расширяющегося диффузора скачок в этом случае находится в сечении входа.

Дальнейшее повышение давления переводит диффузор на допредельный режим работы. Скачок уплотнения выходит из диффузора и располагается перед его входом. В результате на участке между скачком и входом в диффузор часть потока отклоняется от первоначального направления, что приводит к уменьшению расхода через диффузор. Работоспособность СОЖ при этом не нарушается, хотя существенно увеличиваются потери жидкости в результате уноса её вместе с паром.

Таким образом, высота захватывающей щели диффузора определяет не только долю уносимой с паром жидкости, но и максимальное противодавление, соответствующее предельному критическому режиму. Эти параметры находятся при заданной высоте h_3 диффузора на основе описанной выше кусочно-линейной аппроксимации структуры отсепарированного слоя (рис. 2). Сначала определяются опорные точки:

- толщина жидкостного ядра :

$$h_\ell = \varepsilon_\ell \cdot k_\ell, \quad (11)$$

- толщина отсепарированного слоя:

$$h_a = h_\ell + 2 \cdot \frac{k_\ell \cdot (\varepsilon_a - \varepsilon_\ell)}{\alpha_{L2} + 1}; \quad (12)$$

- суммарная толщина парожидкостного потока на выходе из поверхностного сепаратора СОЖ:

$$h_\varepsilon = h_a + 2 \cdot \frac{k_\ell \cdot (\varepsilon_{T.CY} - \varepsilon_a)}{\alpha_{L2}}. \quad (13)$$

Здесь

$$k_\ell = \frac{\alpha_{L2} \cdot h_2}{\phi_{CY}} \quad (14)$$

высота слоя отсепарированной жидкости на выходе из сепаратора при отсутствии межфазного массообмена;

$$\varepsilon_{T.CY} = \frac{1 - \frac{W_{L2}^2 \cdot (1 - \phi_{CY}^2)}{2 \cdot [\Psi - C_L \cdot (T_{L2} - T_{04})]}}{1 + \frac{C_L \cdot (T_{L2} - T_{04})}{\Psi - C_L \cdot (T_{L2} - T_{V2})}} \quad (15)$$

предельно достижимое значение коэффициента сепарации, где Ψ - скрытая теплота парообразования при давлении на срезе сопла СОЖ. Значение $\varepsilon_{т.су}$ отличается от единицы вследствие массообмена между фазами в сепараторе.

С учетом изложенного доля жидкости в слое высотой h_3 , равной высоте захватывающей щели диффузора СОЖ, определяется из выражения:

$$\varepsilon = \frac{1}{k_\ell} \cdot \left[h_3 - \frac{(h_3 - h_\ell)^2}{2 \cdot (h_a - h_\ell)} \cdot (1 - \alpha_{L2}) \right] \quad (16)$$

при $h_\ell \leq h_3 < h_a$ или

$$\varepsilon = \varepsilon_a + \frac{\alpha_{L2}}{k_\ell} \cdot \frac{h_3 - h_a}{h_\varepsilon - h_a} \cdot \left(h_\varepsilon - \frac{h_3 + h_a}{2} \right) \quad (17)$$

при $h_a \leq h_3 \leq h_\varepsilon$.

При известном массовом расходе и скорости жидкости в слое толщиной h_3 остальные параметры потока определяются при допущении равенства скоростей фаз и равновесности пара.

Полученные параметры являются исходными при расчете диффузора СОЖ. Предельно достижимое давление за диффузором, соответствующее моменту выхода из него скачка, для несжимаемой жидкости, плотность которой значительно выше плотности пара, может быть рассчитано по формуле

$$P_{04} = P_2 + \frac{\rho_L^0 \cdot W_{L3}^2}{2} \cdot \tilde{\alpha}_{L3} \cdot (2 - \tilde{\alpha}_{L3}), \quad (18)$$

где $\tilde{\alpha}_{L3}$ - среднее объемное влагосодержание жидкости по высоте захватывающей щели диффузора.

Значение температуры охлажденного потока криогенной жидкости за диффузором СОЖ практически совпадает с T_{04} , рассчитанной по соотношению (4).

Коэффициент возврата, равный отношению расходов охлажденной и исходной жидкости, рассчитывается по формуле:

$$K_B = \varepsilon \cdot (1 - X_2) \cdot \left[1 + \frac{\rho_{V2}^0 \cdot (1 - \tilde{\alpha}_{L3})}{\rho_{L2}^0 \cdot \tilde{\alpha}_{L3}} \right], \quad (19)$$

где X_2 - массовая степень сухости двухфазного потока на срезе сопла.

3. Расчёт характеристик СОЖ

Изложенные методики расчёта параметров потока за сепаратором и диффузором в совокупности с методикой [3] расчёта сопла и значениями эмпирических коэффициентов, зависящих от рода жидкости, составляют метод расчёта характеристик СОЖ. На его основе могут быть определены зависимости коэффициента возврата, температуры и предельно

достижимого давления охлажденной жидкости от параметров на входе и геометрии СОЖ. Пример такого расчёта для жидкого водорода представлен на рис. 3. Здесь ΔT_{15} представляет разность температур водорода на входе и выходе СОЖ, предельное давление отвечает условию расположения скачка уплотнения-конденсации на входе в диффузор.

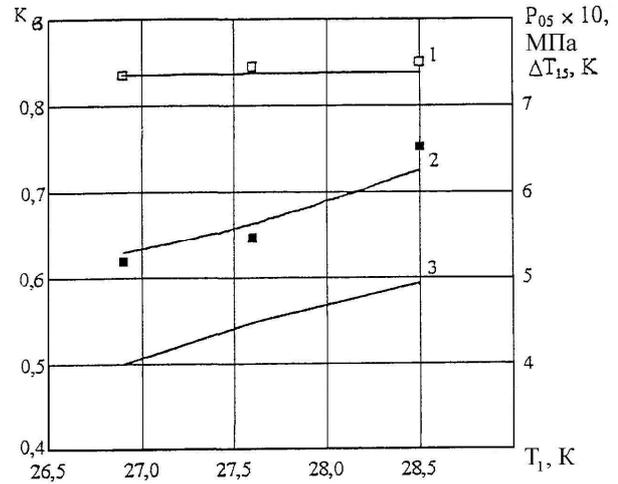


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные характеристики струйного охладителя жидкого водорода:

$P_1 = 0,6$ МПа. 1 – расчетное значение K_B ;

□ – экспериментальное значение K_B ;

2 – расчетное значение величины захлаживания жидкости ΔT_{15} ; ■ – экспериментальное значение величины захлаживания жидкости ΔT_{15} ;

3 – предельное давление охлажденной жидкости за диффузором СОЖ P_{05} .

Практически постоянное значение коэффициента возврата при увеличении температуры T_1 жидкости на входе СОЖ свидетельствует о правильном выборе высоты захватывающей щели диффузора для этого диапазона параметров. Более слабое увеличение величины охлаждения ΔT_{15} по сравнению с ростом температуры T_1 объясняется ростом перегрева (неравновесности) жидкости, что связано с фиксированной длиной сопла и участка осаждения капель СОЖ. Рост предельно достижимого давления охлажденной жидкости связан с увеличением удельной (на единицу массы жидкости) работы пара при расширении вскипающего потока в сопле.

Заключение

Разработанная методика расчета основных параметров функциональных элементов и струйного охладителя жидкости в целом и комплекс соответствующих программ позволяют определить характеристики СОЖ заданной геометрии для исследованных жидкостей. В методике заложена возмож-

ность определения влияния изменения геометрии СОЖ на его характеристики. Это позволяет получить статические характеристики различных криогенных стендов с СОЖ, работающих на жидких кислороде или водороде. Расчёт характеристик на других средах требует определения относительно небольшого числа эмпирических коэффициентов.

Литература

1. Струйная система утилизации жидкого водорода при испытаниях насоса ГТД / И.И. Петухов, Ю.В. Шахов, В.Н. Сырый, Ю.Е. Давыдов, И.П. Косицын // *Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 4. – Х., 1997. –

С. 364-369.

2. Петухов И.И. Рабочий процесс струйного генератора шугообразного водорода / И.И.Петухов // *Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 13. – Х. 1999. – С. 103-110.

3. Петухов И.И. Метод расчета сопла струйного охладителя криогенной жидкости / И.И.Петухов, Ю.В. Шахов, В.Н. Сырый // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2006. – № 9 (35). – С. 98-103.

4. Петухов И.И. Исследование движения жидкости на участке осаждения капель поверхностного сепаратора / И.И.Петухов // *Газотермодинамика многофазных потоков в энергоустановках: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 5. – Х., 1982. – С. 86-93.

Поступила в редакцию 1.06.2010.

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.

РОЗРАХУНОК СТАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУМІННОГО ОХОЛОДЖУВАЧА РІДИНИ

І.І. Петухов, Ю.В. Шахов

Використання струмінного охолоджувача рідини в якості теплообмінного пристрою в системах заправки та термостатування криогенних компонентів палива, а також у складі стендів для відпрацювання насосних агрегатів рідинних ракетних двигунів неможливе без достовірного опису статичних характеристик охолоджувача. Складність термогідрравлічних процесів, що відбуваються у його проточній частині, не дозволяють створити єдину математичну модель для пристрою в цілому. Прийнятніше при описі робочого процесу розділення пристрою на складові елементи - сопло на скипаючій рідині, поверхневий сепаратор і дифузор з двофазним потоком на вході. Розрахунок характеристик пристрою в цілому забезпечується в результаті об'єднання математичних моделей елементів. У даній статті запропонований саме такий підхід.

Ключові слова: криогенне паливо, випарне охолодження, струмінний охолоджувач рідини, поверхневий сепаратор, надзвуковий дифузор, скипаючий потік, характеристики, метод розрахунку, емпіричні коефіцієнти.

LIQUID JET COOLER STATIC CHARACTERISTICS CALCULATION

I.I. Petukhov, Y.V. Shakhov

Liquid jet cooler using as the heat exchanger in the fuel cryogenic components fueling and thermostating systems and the turbo-driven pump assembly of the liquid-propellant rocket engines working off stands is impossible without reliable description of the jet cooler static characteristics. Complexity of the thermal-hydraulic processes in the jet cooler flow channel does not allow developing of the single mathematical model for device. More acceptable at the working process description is dividing of the jet cooler into main component elements - boiling liquid nozzle, surface separator and two-phase input flow diffuser. The calculation of the full jet cooler characteristics is provided as a result of the integration of the elements mathematical models. Such approach is presented in this article.

Key words: cryogenic fuel, evaporative cooling, jet cooler of liquid, surface separator, supersonic diffuser, boiling flow, characteristics, calculation method, empiric coefficients.

Петухов Ілья Іванович – канд. техн. наук, доцент кафедри аэрокосмической теплотехники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ilya@fsigma.kharkov.ua.

Шахов Юрий Васильевич – ст. научн. сотр. кафедры аэрокосмической теплотехники Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: k205@mail.ru.