

УДК 629.78.048.7-716

П.Г. ГАКАЛ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## **ЗАМЫКАЮЩИЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПУТЕВЫХ ПОТЕРЬ ДАВЛЕНИЯ В ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И СТАНЦИЙ**

Представлены результаты поиска замыкающих соотношений для расчета путевых потерь давления в условиях невесомости. Поиск проводился путем сравнения экспериментальных данных по путевым потерям давления в условиях микрогравитации с данными, полученными по различным замыкающим соотношениям для расчета путевых потерь давления в двухфазных потоках. Найденные замыкающие соотношения будут использоваться при математическом моделировании закономерностей теплогидравлических процессов в двухфазных системах терморегулирования космических аппаратов и станций.

**система терморегулирования, космические аппараты и станции, двухфазный поток, потери давления, невесомость**

### **Введение**

Система терморегулирования (СТР) является одной из основных систем космического аппарата (КА), от работы которой зависит его нормальное функционирование. До настоящего времени в космических аппаратах и станциях использовались пассивные СТР на основе тепловых труб и СТР с вынужденным течением жидкого теплоносителя. Однако рост тепловыделения в КА с одновременным увеличением его линейных размеров ставит задачу разработки СТР, использующей двухфазный кипящий теплоноситель (ДФ СТР) [1]. В ДФ СТР теплота аккумулируется в теплоносителе в виде скрытой теплоты парообразования, что позволяет переносить значительно большее количество теплоты на единицу массового расхода теплоносителя, чем в случае применения однофазных теплоносителей. Кроме того, высокая интенсивность теплоотдачи при кипении позволяет поддерживать температуру объектов практически на всей протяженности контура, близкой к температуре кипения выбранного теплоносителя. Все процессы теплопередачи, протекающие при изменении агрегатного состояния вещества, происходят значительно интенсивнее, чем при обычном конвективном теплообмене, поэтому масса

теплообменных аппаратов ДФ СТР будет значительно меньше их массы в контуре с однофазным теплоносителем.

### **1. Проблема моделирования теплогидравлических процессов в ДФ СТР**

ДФ СТР является принципиально новой, ранее не использовавшейся в практике проектирования космических объектов системой. Одной из проблем, ограничивающей широкое использование ДФ СТР, является слабая изученность поведения двухфазного потока в условиях невесомости.

Проектирование ДФ СТР проводится на основе результатов математического моделирования закономерностей теплогидравлических процессов как в самой системе, так и в ее элементах. Моделирование возможно только при адекватном описании потерь давления в двухфазном потоке в условиях невесомости. Поэтому ставится задача: используя существующие экспериментальные данные по путевым потерям давления в условиях невесомости, выбрать замыкающие соотношения, обеспечивающие наилучшее согласование расчетных и экспериментальных значений путевых потерь давления.

## 2. Обзор экспериментальных исследований потерь давления в двухфазном потоке в условиях невесомости

Исследования гидродинамики и теплообмена двухфазного потока в условиях микрогравитации были начаты в 50–60-е годы. Подробный обзор полученных за этот период результатов содержится в работе [2]. Результаты более поздних исследований нашли отражение в монографиях [3, 4] и обзоре [5]. Однако результаты, представленные в указанных работах, устарели и относятся, как правило, к кипению криогенных жидкостей в больших объемах в условиях невесомости. Путевые потери давления в двухфазных потоках или вообще не рассматриваются, или освещены достаточно мало. Поэтому начиная с 1990 года NASA (США) провело серию экспериментов по изучению путевых потерь давления в условиях микрогравитации. Работы были инициированы проектированием Международной космической станции (МКС), в которой планировалось использовать ДФ СТР. Результаты исследований представлены в работах [6 - 9]. Краткая информация по экспериментам приведена в табл. 1.

## 3. Замыкающие соотношения для расчета путевых потерь давления в двухфазном потоке

Рассмотрим различные модели двухфазного потока и замыкающие соотношения для расчета путевых потерь давления, построенные в рамках моделей.

### 3.1. Соотношения на основе гомогенной модели двухфазного потока

Двухфазная среда рассматривается как однородная смесь, которую можно представить как однофазную среду. Потери давления рассчитывают по формуле

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{2\phi} = f_m \frac{1}{D} \frac{1}{2} \rho_m u_m^2. \quad (1)$$

Здесь  $\rho_m = \frac{1}{\frac{x}{\rho_g} + \frac{1-x}{\rho_l}}$  – плотность двухфазной

смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $u_m$  – скорость двухфазной смеси, м/с.

Коэффициент трения  $f_m$  определяют по соотношениям для однофазного потока. Число Рейнольдса, используемое для расчета коэффициента трения,

находят по формуле  $Re_m = \frac{G_m D}{\mu_m}$ , где  $G_m$  – массо-

Таблица 1

Информация по экспериментам

Работа	Метод получения невесомости	Рабочее тело	Режимные параметры	Геометрия
[6]	Полет на борту самолета КС-135 по траектории Кеплера	ф-114	$p = 0,63 \dots 0,65$ МПа, $x = 0,15 \dots 0,86$ , $G = 190 \dots 220$ кг/(м <sup>2</sup> ·с)	Труба $L = 1,38$ м, $D = 1,58$ см
[7, 9]	Полет на борту Шаттл (миссия STS-46 Space Shuttle)	аммиак	$T_{\text{sat}} = 294 \dots 300$ К, $x = 0,17 \dots 0,52$ , $m = 0,03 \dots 2,5$ г/с	Труба $L = 0,756$ м, $D = 3,34$ мм
[8]	Полет на борту самолета КС-135 по траектории Кеплера	ф-12	Канал № 1: $p = 5,9 \dots 6,4$ МПа, $x = 0,1 \dots 0,8$ , $T_{\text{sat}} = 295 \dots 298$ К, $m = 6,2 \dots 14$ г/с; Канал № 2: $p = 4,95 \dots 5,6$ МПа, $x = 0,01 \dots 0,94$ , $T_{\text{sat}} = 288 \dots 292$ К, $m = 7 \dots 60$ г/с	Канал № 1: $L = 1,22$ м, $D = 4,6$ мм Канал № 2: $L = 1,22$ м, $D = 10,5$ мм

вая скорость, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\mu_m$  – динамическая вязкость двухфазной смеси, Па·с. Для расчета динамической вязкости смеси используют соотношения:

- МакАдамса [6]

$$\mu_m = \frac{1}{\frac{x}{\mu_g} + \frac{1-x}{\mu_l}}; \quad (2)$$

- Битти – Уэлли [11]

$$\mu_m = \mu_g \alpha + \mu_l (1-\alpha)(1+2,5\alpha). \quad (3)$$

В приведенных соотношениях (1) – (3)  $\mu_g$ ,  $\mu_l$  – динамическая вязкость пара и жидкости соответственно, Па·с;  $\rho_g$ ,  $\rho_l$  – плотность пара и жидкости соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $x$  – массовое паросодержание;  $\alpha$  – объемное паросодержание.

### 3.2. Соотношения, основанные на кольцевой модели двухфазного потока

Считается, что жидкость движется по стенке трубы в виде пленки, а в центральной части трубы пар образует «ядро» потока. Потери давления рассчитываются по формуле [6]

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{2\Phi} = \frac{4\tau_i}{(D-2\delta)}, \quad (4)$$

где  $\delta$  – толщина пленки, м;  $\tau_i = f_i \left| \rho_g \frac{(u_g - u_i)^2}{8} \right|$  –

касательные напряжения на межфазной поверхности, Па;  $f_i$  – межфазный коэффициент трения;  $u_g$  – средняя скорость парового ядра, м/с;  $u_i$  – межфазная скорость, м/с.

Если учесть, что  $u_g = \frac{j_g}{\alpha}$ , и пренебречь межфазной скоростью  $u_i$ , то

$$\tau_i = f_i \left| \rho_g \frac{\left(\frac{j_g}{\alpha}\right)^2}{8} \right|, \quad (5)$$

где  $j_g$  – приведенная скорость газа, м/с.

Для случая кольцевого потока  $\alpha$  определяется по формуле

$$\alpha = \left(1 - \frac{2\delta}{D}\right)^2. \quad (6)$$

Подставляя в выражение (4) формулы (5) и (6), получают выражения для параметров двухфазности при кольцевом режиме течения:

$$\Phi_g^2 = \frac{f_i}{f_{wg} \alpha^{2,5}}; \quad (7)$$

$$\Phi_l^2 = \frac{1}{(1-\alpha)^2}. \quad (8)$$

Перепад давления с учетом выражений (7) и (8) вычисляются по соотношениям

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{2\Phi} = \Phi_g^2 f_{wg} \frac{\rho_g j_g^2}{2} \frac{1}{D}, \quad (9)$$

или

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{2\Phi} = \Phi_l^2 f_{wl} \frac{\rho_l j_l^2}{2} \frac{1}{D}. \quad (10)$$

Сопоставив представленные соотношения с учетом, что приведенная скорость пара

$$j_g = \frac{m_g}{\rho_g A} = \frac{mx}{\rho_g A}, \text{ а приведенная скорость жидкости}$$

$$j_l = \frac{m_l}{\rho_l A} = \frac{m(1-x)}{\rho_l A}, \text{ получают}$$

$$\frac{\alpha^{2,5}}{(1-\alpha)^2} = \frac{f_i \rho_l}{f_{wg} \rho_g} \left(\frac{x}{1-x}\right)^2. \quad (11)$$

В общем случае формула для расчета  $\alpha$  имеет вид

$$\alpha = \frac{x/\rho_g}{x/\rho_g + \bar{s}(1-x)/\rho_l}, \quad (12)$$

где  $\bar{s}$  – фактор скольжения. Для определения  $\bar{s}$  в [6] предложена формула Премоли (Premoli):

$$\bar{s} = 1 + E_1 \left( \frac{y}{1 + yE_2} - yE_2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

Здесь

$$y = \frac{\beta}{1-\beta}, \quad \beta = \frac{j_g}{j_g + j_l}, \quad E_1 = 1,578 \text{Re}^{-0,19} \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{-0,022},$$

$$E_2 = 0,0273 \text{We} \text{Re}^{-0,51} \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{-0,06}, \quad \text{Re} = \frac{GD}{\mu_l}, \quad \text{We} = \frac{G^2 D}{\sigma \rho_l}.$$

Следовательно, определив по (12)  $\alpha$ , из (11) находят  $f_i$ , а по соотношениям (7) – (10) – перепад давления.

Для расчета  $f_i$  можно также воспользоваться эмпирическим соотношением [6]:

$$\frac{f_i}{f_{wg}} = 1 + 11,7 \left( \frac{\delta}{D} \right)^{0,39}. \quad (14)$$

В работе [7] для расчета  $\delta$  предложено выражение

$$\delta_g^+ = \delta \frac{\left( \frac{\tau_i}{\rho_g} \right)^{1/2}}{v_g}, \quad (15)$$

где  $v_g$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Величина  $\delta_g^+$  находится по формуле

$$\delta_g^+ = 0,34 \operatorname{Re}_l^{0,6} \frac{\mu_l}{\mu_g} \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1/2}. \quad (16)$$

Здесь  $\operatorname{Re}_l$  – число Рейнольдса жидкой пленки.

Коэффициент трения на межфазной поверхности находят по формуле

$$\frac{f_i}{f_{wg}} = \begin{cases} 1 + 0,045(\delta_g^+ - 5,9), & \text{если } \delta_g^+ > 5,9; \\ 1, & \text{если } \delta_g^+ \leq 5,9. \end{cases} \quad (17)$$

Из соотношения (15), используя формулу для касательных напряжений, находят толщину пленки:

$$\delta = \frac{\delta_g^+ v_g}{\left( \frac{f_i}{8} \right)^{1/2} u_g}. \quad (18)$$

Скорость паровой фазы рассчитывают по формуле

$$u_g = \frac{mx}{\rho_g \frac{\pi}{4} (D - 2\delta)^2}. \quad (19)$$

Зная  $f_i$ ,  $u_g$  и  $\delta$  окончательно перепад давления определяют по формуле

$$\left( \frac{dp}{dz} \right)_{2\phi} = f_i \frac{1}{D - 2\delta} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho_g u_g^2}{2}. \quad (20)$$

В случае кольцевого режима течения с гладкой пленкой, который, как указывается в [8, 11], реали-

зуется при  $\alpha \geq 0,76$ , связь между  $\alpha$  и  $\frac{f_i}{f_{wg}}$  упрощается и принимает вид

$$\frac{f_i}{f_{wg}} = 1. \quad (21)$$

### 3.3. Замыкающее соотношение на основе параметра Локкарта – Мартинелли

Используя соотношения (7) и (8), получим параметр Локкарта – Мартинелли в форме

$$X^2 = \left( \frac{\Phi_g}{\Phi_l} \right)^2 = \frac{(1-\alpha)^2}{\alpha^{2,5}} \frac{f_i}{f_{wg}}. \quad (22)$$

С другой стороны параметр Локкарта – Мартинелли равен [10, 11]

$$X^2 = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{1,8} \frac{\rho_g}{\rho_l} \left( \frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0,2}. \quad (23)$$

Следовательно, вычислив по (23)  $X^2$  и зная связь между  $\alpha$  и  $\frac{f_i}{f_{wg}}$ , определяют  $\left( \frac{dp}{dz} \right)_{2\phi}$ . В каче-

стве связи между  $\alpha$  и  $\frac{f_i}{f_{wg}}$  используют различные соотношения. В [9] предложена формула

$$\frac{f_i}{f_{wg}} = 1 + 6,81(1-\alpha)^{0,39}. \quad (24)$$

Таким образом, решая систему уравнений (22) – (24), получают значения  $\alpha$  и  $\frac{f_i}{f_{wg}}$ , подставив кото-

рые в (7), определяют  $\Phi_g^2 = \frac{f_i}{f_{wg} \alpha^{2,5}}$ . Окончательно

перепад давления рассчитывают по формуле

$$\left( \frac{dp}{dz} \right)_{2\phi} = \Phi_g^2 f_{wg} \frac{\rho_g j_g^2}{2} \frac{1}{D}. \quad (25)$$

### 3.4. Замыкающее соотношение Трониевского и Ульбриха (Troniewski and Ulbrich) [12]

Перепад давления в двухфазном потоке рассчитывают по формуле

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{2\Phi} = \begin{cases} \left(\frac{dp}{dz}\right)_l \Phi_l^2, & \text{если } X \geq 100; \\ \left(\frac{dp}{dz}\right)_g \Phi_g^2, & \text{если } X < 100, \end{cases} \quad (26)$$

где

$$\Phi_g = \begin{cases} \exp\left\{\sum_{m=0}^5 [a_m (\ln X)^m]\right\}, & \text{если } 0,01 < X < 100; \\ \exp[a_6 \exp(a_7 \ln X)], & \text{если } X \leq 0,01; \end{cases} \quad (27)$$

$$\Phi_l = \exp[a_8 \exp(a_9 \ln X)], \text{ если } X \geq 100.$$

Значения констант  $a_0 - a_9$  в зависимости от режимов течения паровой и жидкой фаз (ламинарный или турбулентный) приведены в табл. 2 [12].

#### 4. Выбор замыкающих соотношений для расчета путевых потерь давления в условиях невесомости

При решении задачи будем экспериментальные результаты сравнивать с данными, полученными по следующим замыкающим соотношениям:

- 1) Макадамса (гомогенная модель с использованием формулы (2) для расчета вязкости);
- 2) Битти – Уэлли (гомогенная модель с использованием формулы (3) для расчета вязкости);

3) Премоли (кольцевая модель, используется для расчета фактора скольжения (13));

4) кольцевая модель с использованием формул (15) - (20);

5) кольцевого потока (кольцевая модель; для расчета межфазного трения используется формула (14));

6) гладкого кольцевого потока (кольцевая модель; межфазное трение рассчитывается по формуле (21));

7) Локкарта – Мартинелли (формулы (22) – (25));

8) Трониевского – Ульбриха (для расчета используются формулы (26) - (27)).

На рис. 1, а - е представлено сравнение экспериментальных и расчетных данных, полученных по различным замыкающим соотношениям. В подписях приводится информация о величине среднеквадратичного отклонения  $RMS$ :

$$RMS = \sqrt{\frac{(\Delta p_{\text{exp}} - \Delta p_{\text{calc}})^2}{N}}, \quad (28)$$

Таблица 2

Значения констант  $a_0...a_9$  в модели Трониевского и Ульбриха

Коэффициенты	Режим течения паровой и жидкой фаз			
	Т-Т $Re_g > 2100$ $Re_L > 2100$	Т-Л $Re_g \leq 2100$ $Re_L > 2100$	Л-Т $Re_g > 2100$ $Re_L \leq 2100$	Л-Л $Re_g \leq 2100$ $Re_L \leq 2100$
$a_0$	1,442234405141	1,250764152382	1,242340822498	$9,794209495283 \cdot 10^{-1}$
$a_1$	$4,987124154600 \cdot 10^{-1}$	$5,597574859964 \cdot 10^{-1}$	$5,351838346275 \cdot 10^{-1}$	$5,666477220093 \cdot 10^{-1}$
$a_2$	$5,843703063995 \cdot 10^{-2}$	$6,699986422058 \cdot 10^{-2}$	$6,968848631602 \cdot 10^{-2}$	$9,627530204125 \cdot 10^{-2}$
$a_3$	$-1,336126166103 \cdot 10^{-3}$	$-5,573698621418 \cdot 10^{-3}$	$-4,987204907644 \cdot 10^{-3}$	$-4,506788218734 \cdot 10^{-3}$
$a_4$	$-4,755698575268 \cdot 10^{-4}$	$-6,002645641090 \cdot 10^{-4}$	$-5,805807194990 \cdot 10^{-4}$	$-1,475254575799 \cdot 10^{-3}$
$a_5$	$3,146521209930 \cdot 10^{-5}$	$1,291950426484 \cdot 10^{-4}$	$1,381135151789 \cdot 10^{-4}$	$7,773850936810 \cdot 10^{-5}$
$a_6$	1,596	1,0192	1,751	2,682
$a_7$	0,4148	0,5025	0,4760	0,9960
$a_8$	118,48	121,75	39,518	302,27
$a_9$	-1,554	-1,554	-1,265	-1,781

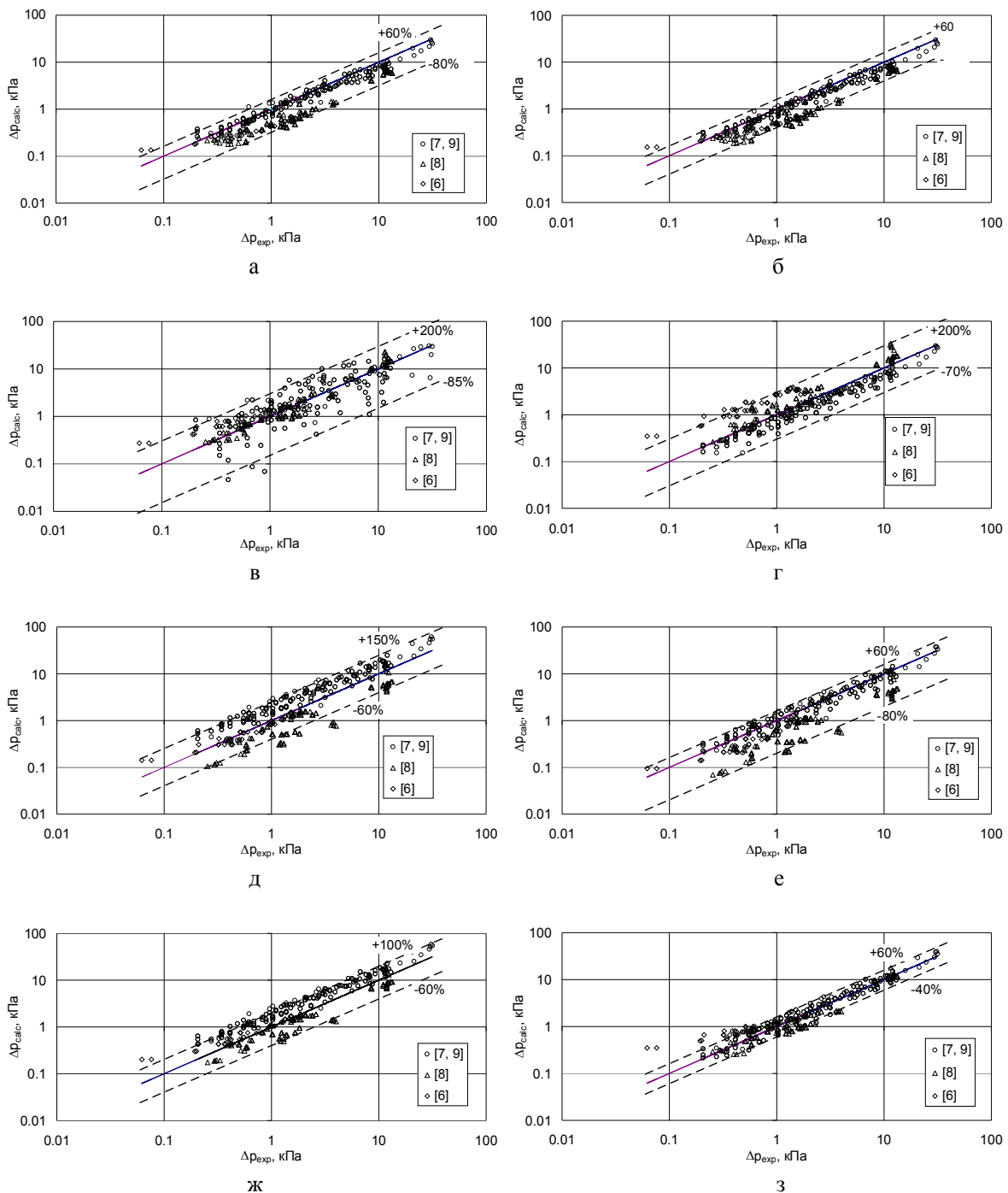


Рис. 1. Сравнение экспериментальных данных с данными, полученными по различным замыкающим соотношениям: а – соотношение Макадамса ( $RMS = 2,06$ ); б – соотношение Бетти – Уэлли ( $RMS = 2,04$ ); в – соотношение Премоли ( $RMS = 2,85$ ); г – кольцевая модель с использованием формул (15) – (20) ( $RMS = 2,92$ ); д – соотношение для кольцевого потока ( $RMS = 3,92$ ); е – соотношение для гладкого кольцевого потока ( $RMS = 2,19$ ); ж – соотношение Локкарта – Мартинелли ( $RMS = 3,43$ ); з – соотношения Трониевского – Ульбриха ( $RMS = 1,15$ )

где  $\Delta p_{\text{эксп}}$  – экспериментальное значение перепада давления;  $\Delta p_{\text{calc}}$  – вычисленное значение перепада давления;  $N$  – количество точек, в которых проводится сравнение.

Из результатов сравнения следует, что наилучшее совпадение расчета с экспериментом обеспечивает замыкающее соотношение Трониевского – Ульбриха (27) – (28). Расхождение находится в диа-

пазоне +60...-40%. Среднеквадратичное отклонение составляет  $RMS = 1,15$ .

### Заключение

В статье представлены результаты поиска замыкающего соотношения для расчета путевых потерь давления в двухфазном потоке в условиях микрогравитации. Задача решалась путем сравнения расчетных результатов, полученных по разным замыкающим соотношениям, с экспериментальными данными. При сравнении использовались экспериментальные данные, полученные при различных способах имитации невесомости (полет на борту космического аппарата, самолета, летящего по траектории Кеплера, и в свободно падающем контейнере) и с разными теплоносителями. Определено, что наилучшее совпадение расчета с экспериментом обеспечивает замыкающее соотношение Трониевского – Ульбриха. Данное соотношение рекомендуется использовать в математических моделях тепло-гидравлических процессов в ДФ СТР КА.

### Литература

1. Никонов А.А., Горбенко Г.А., Блинков В.Н. Теплообменные контуры с двухфазным теплоносителем для систем терморегулирования космических аппаратов. – М: Машиностроение, 1991. – 302 с.
2. Зигель Р. Теплообмен в условиях ослабленной гравитации. – В кн.: Успехи теплопередачи. – М.: Мир, 1970. – 358 с.
3. Григорьев В.А., Павлов Ю.М., Аметистов Е.В. Кипение криогенных жидкостей. – М.: Энергия, 1977. – 288 с.
4. Фрост У. Теплопередача при низких температурах. – М.: Мир, 1977. – 391 с.
5. Авдеевский В.С. Основные задачи исследования гидромеханики и теплообмена в условиях невесомости // Изв. АН СССР. – Сер. Физика. – 1985. – Т. 49, № 4. – С. 627 – 634.

6. Chen I., Downing R., Keshock E.G. and Al-Sharif M. Measurements and Correlation of Two-Phase Pressure Drop Under Microgravity Conditions // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 1991. – Vol. 5, № 4. – P. 514 – 523.

7. Eugene K. Ungar and John D. Cornwell. Two-phase pressure drop of ammonia in small diameter horizontal tubes // AIAA 17<sup>th</sup> Aerospace Ground Testing Conference, Nashville, TN, July 6 - 8, 1992.

8. Miller K. M., Ungar E. K., Dzenitis J. M. and Wheeler M. Microgravity two-phase pressure drop data in smooth tubing // Proceedings of Symposium on Fluid Mechanics Phenomena in Microgravity, AMD – Vol. 174; FED – Vol. 175, ASME Winter Annual Meeting, New Orleans, LA, November 28 – December 3, 1993. – P. 37 – 50.

9. Reinarts T. R., Ungar E. K., Butler C. D. Adiabatic two-phase pressure drop in microgravity: TEMP2A-3 flight experiment measurements and comparison with predictions // 33<sup>rd</sup> Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, January 9 – 12, 1995.

10. Теплопередача в двухфазном потоке: Пер. с англ. / Под ред. Д. Баттерворса и Г. Хьюитта. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.

11. Хьюитт Дж., Холл-Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1974. – 408 с.

12. Troniewski L. and Ulbrich R. Two Phase Gas-Liquid Flow in Rectangular Channels // Chemical Engineering Science. – 1984. – Vol. 39, N 4. – P. 751-765.

*Поступила в редакцию 01.03.04*

**Рецензенты:** д-р физ.-мат. наук, проф. А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков; д-р техн. наук, проф. В.В. Соловей, Институт проблем машиностроения им. А. М. Подгорного НАН Украины, г. Харьков