

УДК 629.86:629.76

В. И. РУЗАЙКИН, И. Н. ЛУКАШЕВ, Т. Ю. ФЕДОРЕНКО

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

## ДВУХФАЗНЫЕ ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ В РАЗДАТОЧНОМ КОЛЛЕКТОРЕ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Выполнен анализ существующих методик инженерных оценок потерь давления. Представлена схема испытываемого образца коллектора, участвующего в эксперименте. Определены теоретические оценки потери давления и причины их появления. Приведены результаты гидравлического испытания раздаточного коллектора на фреоне R134a при различных режимных параметрах однофазного и двухфазного потока. Проведено сравнение полученных экспериментальных перепадов давления с теоретическими оценками. Показан уровень адекватности существующих методов оценки гидравлических характеристик разветвленных теплотехнических систем на этапе проектирования.*

**Ключевые слова:** *потери давления, двухфазный поток, раздаточный коллектор, разветвленные теплотехнические системы, экспериментальные перепады давления.*

### Введение

Коллекторы являются неотъемлемой частью любой разветвленной теплогидравлической системы. Везде, где необходимо обеспечить заданное распределение рабочей среды между различными линиями общего технологического процесса, мы устанавливаем коллекторы, в частности в системах охлаждения телекоммуникационных спутников [1].

Коллекторы бывают разной формы, но по сути, это просто труба с боковыми ответвлениями. В зависимости от направления потока коллекторы разделяют на приточные и раздаточные. В приточных коллекторах происходит слияние потоков от боковых ответвлений, в раздаточном коллекторе общий поток разделяется по боковым направлениям.

Коллекторы могут являться существенным источником местных и путевых потерь давления в теплогидравлических системах. В результате, понижения давления вдоль коллектора от одного бокового ответвления до другого могут являться причиной неравномерного распределения теплоносителя по боковым линиям, снижая эффективность теплогидравлической системы. Известны способы борьбы с подобными проблемами, в частности, дросселирование потока в боковых ответвлениях и/или профилирование/оптимизация проходного сечения коллектора [2]. Первой решение возможно только при условии существенного запаса напора насоса системы, а второе приводит к ее значительному удорожанию. В любом случае, потери давления в коллекторе должны быть теоретически предсказуемыми на этапе проектирования системы, чтобы выбрать правильное решение.

До настоящего времени накоплены значитель-

ные экспериментальные данные по однофазным потерям давления в коллекторах, предложены надежные методики инженерных оценок потерь давления [2]. Что касается двухфазных потерь давления в парожидкостной смеси, то для коллекторов этих данных явно недостаточно. При этом существующие методики расчета потерь основаны на гомогенном подходе, когда полагается равенство скоростей отдельных фаз и отсутствие сепарации, что далеко не всегда справедливо.

Обнаружив брешь в нашем понимании того насколько адекватно можно оценить потери давления в раздаточном коллекторе при течении парожидкостной смеси R134a, мы решили провести краткое экспериментальное исследование и сравнить полученные потери давления с теоретически предсказанными.

### 1. Экспериментальные данные

Схема испытываемого образца раздаточного коллектора изображена на рис.1. Фото коллектора и экспериментальной установки представлено на рис. 2. Принципиальная схема экспериментальной установки не приводится в интересах конфиденциальности. Рабочая среда – R134a. Полученные данные сведены в табл. 1 и 2 с соответствующей погрешностью измерительных средств.

Теоретические оценки. Общие потери давления в коллекторе можно условно разделить на путевые и местные. Путевые потери давления обусловлены трением потока о стенки в канале между отводами. Местные потери давления связаны с разделением потока и последующим расширением его сразу после ответвления.

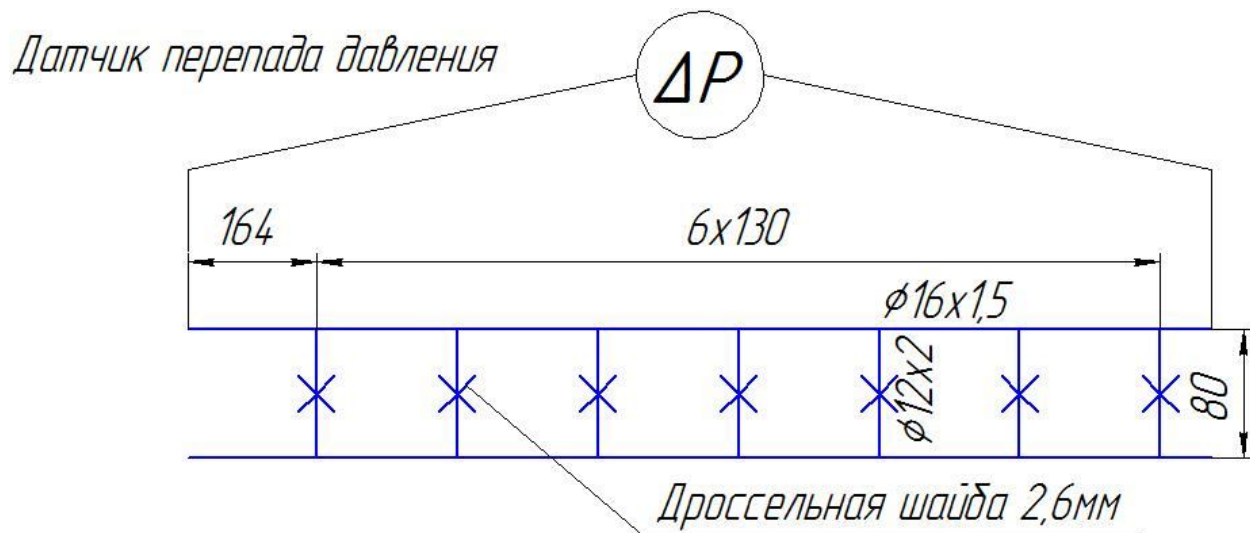


Рис. 1. Схема коллектора



Рис. 2. Испытуемый образец коллектора и общий вид экспериментальной установки

Путевые потери давления можно оценить, используя гомогенную модель двухфазного потока [3]:

$$\Delta P_f = f_1(Re_1) \frac{L}{D} \Phi_{L0}^2 \frac{M^2}{2\rho_{1s} F^2}, \quad (1)$$

$$f_1(Re_1) = \frac{64}{Re_1} \text{ при } Re_1 < 2300, \quad (2)$$

$$f_1(Re_1) = \frac{0,316}{Re_1^{0,25}} \text{ при } Re_1 \geq 2300, \quad (3)$$

$$Re_1 = \frac{M \cdot D}{F \cdot \mu_{ls}}, \quad (4)$$

$$\Phi_{L0}^2 = \left[ 1 + x \left( \frac{\rho_{ls}}{\rho_{vs}} - 1 \right) \right] \left[ 1 + x \left( \frac{\mu_{ls}}{\mu_{vs}} - 1 \right) \right]^{-0,25}, \quad (5)$$

где  $L$  – длина участка коллектора между отводами, м;

$D$  – внутренний диаметр коллектора, м;

$F$  – площадь проходного сечения коллектора, м<sup>2</sup>;

$\rho_{ls}, \rho_{vs}$  – плотность насыщенной жидкости и пара, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_{ls}, \mu_{vs}$  – динамическая вязкость насыщенной жидкости и пара, Па·с;

$M$  – массовый расход смеси на рассматриваемом участке, кг/с;

$x$  – массовое паросодержание.

Местные потери давления при разделении потока в тройнике будем оценивать следующим образом, используя все те же допущения о гомогенности двухфазного потока:

$$\Delta P_1 = \varphi \frac{M^2}{2\rho_m F^2}, \quad (6)$$

$$\rho_m = \frac{1}{\frac{x}{\rho_{vs}} + \frac{1-x}{\rho_{ls}}}. \quad (7)$$

Таблица 1

Сравнение экспериментальных и расчетных перепадов (двухфазный поток)

№	Температура насыщения, °С	Массовый расход, г/с	Массовое паросодержание	Эксп. потери давления, Па	Расчетные потери давления, Па
1	49,6±0,5	30,7±0,4	0,04±0,02	190±5	111
2	50,1±0,5	30,4±0,4	0,09±0,02	270±5	158
3	50,6±0,5	30,5±0,4	0,21±0,02	475±5	261
4	51,3±0,5	30,4±0,4	0,34±0,02	690±5	372
5	51,6±0,5	30,6±0,4	0,39±0,02	805±5	423
6	63,6±0,5	30,2±0,4	0,08±0,02	175±5	121
7	64,1±0,5	29,9±0,4	0,27±0,02	370±5	233
8	65,1±0,5	30,3±0,4	0,38±0,02	515±5	304
9	62,3±0,5	19,9±0,2	0,03±0,02	56±5	39
10	64,1±0,5	20,1±0,2	0,11±0,02	93±5	63
11	64,6±0,5	19,9±0,2	0,27±0,02	180±5	105
12	64,6±0,5	19,6±0,2	0,51±0,02	280±5	165
13	65,1±0,5	19,6±0,2	0,79±0,02	400±5	231
14	50,3±0,5	19,8±0,2	0,07±0,02	110±5	61
15	50,6±0,5	20,0±0,2	0,21±0,02	230±5	119
16	50,8±0,5	19,4±0,2	0,42±0,02	350±5	188
17	51,1±0,5	19,5±0,2	0,59±0,02	490±5	251
18	51,1±0,5	19,1±0,2	0,74±0,02	570±5	292

Таблица 2

Сравнение расчетных и экспериментальных перепадов (жидкость)

№	Температура насыщения, °С	Массовый расход, г/с	Эксп. потери давления, Па	Расчетные потери давления, Па
1	47,8±0,5	31,0±0,4	94,0±5	71,0
2	59,6±0,5	30,3±0,4	91,0±5	69,9
3	58,6±0,5	20,7±0,2	44,6±5	33,4
4	46,3±0,5	19,9±0,2	43,0±5	29,8
5	24,0±0,5	5,0±0,2	3,8±5	1,9
6	24,4±0,5	10,0±0,2	11,3±5	7,5
7	24,3±0,5	15,6±0,2	24,8±5	17,6

Коэффициент местных потерь давления в проходе раздаточного тройника  $\varphi=0,7$  [1]. Это значение взято как максимальное для данного вида местных потерь независимо от степени разделения потока.

Суммарные потери давления представляют собой сумму всех потерь по всем участкам и отводам.

### Заключение

Сравнение экспериментальных и расчетных потерь давления представлено в табл. 1 для двухфазного потока и в табл. 2 для жидкости.

На основе полученных данных можно сделать выводы, что теоретические оценки дают существенно заниженные потери давления по сравнению с фактическими (до +90% для двухфазного потока и до +50% для жидкости).

Поступила в редакцию 02.02.2016, рассмотрена на редколлегии 15.02.2016

### ДВОФАЗНІ ВТРАТИ ТИСКУ В РОЗДАТКОВОМУ КОЛЕКТОРІ РОЗГАЛУЖЕНИХ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИХ СИСТЕМ

*В. І. Рузайкін, І. М. Лукашов, Т. Ю. Федоренко*

Виконано аналіз існуючих методик інженерних оцінок втрат тиску. Представлено схему випробуваного зразку колектора, що бере участь в експерименті. Визначено теоретичні оцінки втрати тиску і причини їх появи. Наведено результати гідравлічного випробування роздаткового колектора на фреоні R134a при різних режимних параметрах однофазного і двофазного потоку. Проведено порівняння отриманих експериментальних перепадів тиску з теоретичними оцінками. Показано рівень адекватності існуючих методів оцінки гідравлічних характеристик розгалужених теплотехнічних систем на етапі проектування.

**Ключові слова:** втрати тиску, двофазний потік, роздатковий колектор, розгалужені теплотехнічні системи, експериментальні перепади тиску.

### THE TWO-PHASE PRESSURE LOSS IN THE DISTRIBUTING COLLECTOR OF THE BRANCHED HEAT HYDRAULIC SYSTEMS

*V. I. Ruzaikin, I. N. Lukashov, T. Y. Fedorenko*

The analysis of existing methods of engineering grade pressure loss has been performed. The scheme of the test sample collector participating in the experiment has been submitted. The theoretical estimates determined pressure losses and their causes have been identified. Hydraulic test results of collector on R134a at different regime parameters of single-phase and two-phase flow have been represented. A comparison analyses between experimental and theoretical pressure drops has been provided. The level of adequacy of the existing methods of valuation of the hydraulic characteristics of the branched thermal systems at the design stage has been shown.

**Keywords:** loss of pressure, two-phase flow, distributing collector, branched thermotechnical systems, experimental pressure drops.

**Рузайкин Василий Иванович** – канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: vasylruzaykin@gmail.com.

**Лукашев Иван Николаевич** – мл. науч. сотрудник кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ubah@i.ua.

**Федоренко Татьяна Юрьевна** – аспирант кафедры аэрокосмической теплотехники Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ftania1609@gmail.com.

### Литература

1. *Development of a Two-Phase Mechanically Pumped Loop (2PMPL) FOR THE Thermal Control of Telecommunication Satellites [Электронный ресурс] / J. Hugon, A. Larue de Tournemine, G. Gorbenko, P. Gakal, V. Ruzaykin, T. Tjptahardja // International Two-Phase Thermal Control Technology Workshop 2008. ESTEC, 13 – 15 May, 2008. – Режим доступа: [http://www.dlr.de/rd/Portaldata/28/Reources/dokument\\_e/rp6/newsletter/Partnersearch\\_SPA.2010.2.2-01-EO-FUS\\_ANNEX.pdf](http://www.dlr.de/rd/Portaldata/28/Reources/dokument_e/rp6/newsletter/Partnersearch_SPA.2010.2.2-01-EO-FUS_ANNEX.pdf). – 12.07.2011.*

2. *Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И. Е. Идельчик. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.*

3. *Баттерворс, Д. Теплопередача в двухфазном потоке [Текст] / Д. Баттерворс, Г. Хьюит. – М. : Энергия, 1980. – 328 с.*