

УДК 629.78.048.7-716

П.Г. ГАКАЛ

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

## ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Предложен подход к физическому моделированию теплогидравлических процессов в системе терморегулирования космических аппаратов. Подход позволит моделировать процессы на экспериментальных установках, для которых в силу разветвленности, многоэлементности, особенностей протекания рабочих процессов затруднительно, а иногда и невозможно выдержать подобие прототипу. Подход включает несколько этапов: ранжирование процессов, явлений, элементов оборудования, проектирование экспериментальной установки с учетом результатов ранжирования, экспериментальные исследования, оценка адекватности математической модели, применение математической модели для анализа теплогидравлических процессов в прототипе. Применение подхода проиллюстрировано на примере решения задачи оценки работоспособности системы терморегулирования космического аппарата на базе двухфазного контура теплопереноса, расширения базы замыкающих соотношений по теплогидравлическим процессам и явлениям в условиях микрогравитации..*

**Ключевые слова:** физическое моделирование, теплогидравлический процесс, система терморегулирования космических аппаратов, двухфазный контур теплопереноса.

### 1. Постановка задачи

Наряду с математическим моделированием, для успешной реализации всех задач, возникающих на различных этапах жизненного цикла сложных систем, к которым относятся и системы терморегулирования космических аппаратов (СТР КА), необходимо проводить и физическое моделирование процессов в системе. Физическое моделирование проводят на экспериментальных установках (моделях), которые в общем случае проектируют с учетом требований подобия модели натурному объекту (прототипу). Прямое физическое моделирование для сравнительно простых систем оправдывает себя, так как приходится оперировать ограниченным числом критериев подобия, достаточно легко выдерживать условие геометрического подобия модели и прототипа. Однако в сложных системах и процессах образуется большой набор критериев подобия, которые одновременно не совместимы и, следовательно, не могут быть реализованы. Кроме того, достаточно часто для сложных систем трудно выдержать даже геометрическое подобие.

В связи с трудностью, а иногда и невозможностью выдержать подобие модели прототипу разрабатываются специальные подходы к физическому моделированию. Большинство из подходов используются для анализа аварийных и переходных режимов работы ЯЭУ и достаточно полно описаны в работах [3, 4]. Однако, несмотря на широкое распространение, эти подходы также не позволяют выдер-

жать подобие модели прототипу в строгой постановке. Кроме того, принципиальным недостатком предложенных подходов является то, что в них отсутствуют четкие требования к экспериментальной модели, которые учитывали бы ее неполное подобие прототипу, но в тоже время позволяли бы использовать полученные результаты при анализе различных процессов в прототипе.

Поэтому, необходим подход к физическому моделированию, который включал бы требования, выполнение которых позволило бы создавать экспериментальные установки для исследования теплогидравлических процессов в СТР КА, с достаточной степенью обоснованности переносимые на прототип в условиях неполного подобия.

### 2. Подход к физическому моделированию теплогидравлических процессов в СТР КА

При формировании подхода учитывались следующие требования:

1. Так как выдержать подобие для всех процессов и явлений, реализующихся в системе невозможно, то необходимо выбрать только те процессы и явления, выдерживание подобия для которых наиболее важно для решаемой задачи.

2. При проектировании экспериментальной установки необходимо учитывать неравнозначность влияния процессов, явлений, элементов оборудования на результат решения задачи.

3. Перенос результатов моделирования с экспериментальной установки на прототип необходимо проводить по схеме: экспериментальная установка → математическая модель → прототип.

4. При переносе необходимо учитывать влияние погрешностей и неопределенностей входных данных, факторов модели на результат моделирования и учитывать это влияние при сравнении расчетных и экспериментальных результатов.

Подход к физическому моделированию тепло-гидравлических процессов в СТР КА, в котором учтены, перечисленные выше требования, включает следующие этапы.

Этап 1. Ранжирование процессов, явлений и элементов оборудования СТР КА по степени их влияния на цель эксперимента.

Ранжирование позволяет определить только наиболее значимые явления, процессы, подсистемы элементы оборудования системы, для которых и выдерживается их подобие прототипу. Ранжирование проводим по методике Т. Саати [5], которая позволяет минимизировать влияние субъективного фактора при нечеткой исходной информации. В процессе ранжирования формируем иерархическую структуру физического моделирования, состоящую из следующих уровней:

1-й уровень – цель эксперимента;

2-й уровень – подсистемы и элементы системы;

3-й уровень – процессы и явления, реализующиеся в подсистемах и элементах СТР КА.

Далее строим матрицу парных сравнений и на ее базе проводим ранжирование элементов оборудования и подсистем СТР КА по степени их значимости и влияния на достижение цели эксперимента. Затем отдельно для каждого элемента оборудования или подсистемы строим матрицы парных сравнений и ранжируем процессы и явления, перечисленные на 3-м уровне иерархической структуры опять же по степени их влияния на процесс достижения цели эксперимента. В результате значимость  $i$ -го явления или процесса с учетом поставленной цели и значимости подсистем и элементов определяется «весом»,

рассчитываемым по формуле  $w_i = \sum_{j=1}^{N_{el}} w_j w_{ji}$ . Здесь:

$w_j$  – «вес»  $j$ -го элемента оборудования или подсистемы;  $w_{ji}$  – «вес»  $i$ -го явления или процесса в  $j$ -м элементе или подсистеме;  $N_{el}$  – количество элементов или подсистем.

Этап 2. Проектирование экспериментальных установок, планирование и проведение экспериментов. Выдерживаем подобие модели и прототипа только для явлений, процессов и элементов, имеющих наибольший «вес». В процессе проектирования:

1) выдерживаем структурно-функциональное подобие модели и прототипа, то есть элементы установки объединены теми же гидравлическими, тепловыми связями, а также связями управления, что и в прототипе;

2) в экспериментальной установке выдерживаем тепловые, гидравлические характеристики элементов прототипа. Гидросопротивление сети в модели должны быть такими же, как и в прототипе, правильно учитываться влияние массовых сил;

3) постоянные времени, определяющие числа подобия выдерживаем только для процессов, явлений и элементов, имеющих наибольший «вес»;

4) если конструктивно элемент оборудования модели отличается от элемента прототипа, то тепловую инерционность следует воспроизводить, задавая различные законы управления системой теплоподвода или теплоотвода;

5) в элементах с теплоподводом/теплоотводом выдерживаем объемно-мощностной масштаб;

6) в характерных сечениях экспериментальной установки и прототипа термодинамические и гидравлические параметры идентичны.

Этап 3. Параметрическая идентификация и оценка адекватности математической модели по результатам экспериментальных исследований. Задача разбивается на ряд частных задач:

1) анализ чувствительности отклика модели к погрешности и неопределенности параметров модели;

2) определение значений входных параметров, наиболее существенно влияющих на отклик модели, минимизирующих расхождение между расчетом и экспериментом (параметрическая идентификация);

3) количественная и качественная оценка адекватности;

4) выработка рекомендаций по моделированию прототипа (образца).

Этап 4. Численное исследование рассматриваемого режима работы для условий СТР КА и оценка величины неопределенности, полученного результата. На результат моделирования оказывают влияние неопределенности факторов и параметров модели, которые в общем случае носят случайный характер. Поэтому, задача оценки неопределенности расчленяется на ряд частных задач.

1) анализ чувствительности результатов расчета (отклика модели) к неопределенности входных параметров модели. Цель этапа – поиск входных параметров, наиболее сильно влияющих на отклик;

2) формирование поверхности отклика. Поверхность отклика – это функциональная зависимость отклика модели от входных параметров. Поверхность отклика необходима для ускорения расчетов;

3) используя генератор случайных чисел, например, стандартный численный метод Монте-Карло, формировать наборы параметров, подставлять их в поверхность отклика и получать отклик (результат моделирования) с коридором неопределенности. Рассматриваем только те факторы и параметры, которые наиболее сильно влияют на отклик;

4) исходя из полученного результата, сделать заключение о неопределенности моделирования и о факторах и параметрах, наиболее сильно влияющих на результат.

Применим предложенный подход для анализа работоспособности, расширения базы замыкающих соотношений применительно к системе терморегулирования КА на базе двухфазного контура теплопереноса (ДФ СТР). Под работоспособностью системы подразумевается способность системы отводить теплоту от источников тепловыделения, переносить ее и сбрасывать в окружающую среду, поддерживать температуру в заданном диапазоне при переменных условиях теплоподвода, изменении условий в окружающей среде. Кроме того, системы терморегулирования на базе двухфазных контуров теплопереноса являются принципиально новой системой, ранее не использовавшейся в практике проектирования КА. Основной причиной, препятствующей внедрению таких систем на КА, является отсутствие знаний об особенностях протекания теплогидравлических процессов в двухфазном потоке в условиях микрогравитации.

В соответствии с подходом к физическому моделированию проведем ранжирование элементов ДФ СТР, процессов и явлений в элементах по степени их значимости для решения задач обоснования работоспособности, многокритериальной оптимизации СТР КА в условиях микрогравитации.

Построим для данной задачи иерархическую структуру элементов оборудования системы, процессов и явлений. Иерархическая структура включает три уровня (см. рис. 1): 1-й уровень – цель задачи, 2-й уровень – элементы оборудования системы, процессы и явления в которых оказывают существенное влияние на решаемую задачу, 3-й уровень – непосредственно сами процессы и явления.

В соответствии с подходом сформируем матрицу приоритетов для элементов оборудования системы (уровень 2). Затем, строим матрицы приоритетов для явлений и процессов (уровень 3) отдельно для каждого элемента системы и определяем «вес» перечисленных явлений и процессов для каждого элемента. Исходя из поставленной цели эксперимента, «веса» элементов равны:

- испарители – 0,196;
- насос – 0,078;
- конденсатор – 0,196;

- радиатор-излучатель – 0,085;
- система автоматического управления – 0,085;
- запорно-регулирующая арматура – 0,047;
- трубопроводы – 0,047;
- гидроаккумулятор с тепловым регулированием (ТГА) – 0,18;
- тепловые трубы – 0,085.

Также, в результате ранжирования определено, что «веса» каждого процесса или явления, с учетом значимости элемента оборудования, в котором они реализуются равны:

- кипение – 0,11;
- кризис теплоотдачи – 0,12;
- конденсация – 0,14;
- потери давления на трение в двухфазном потоке – 0,11;
- кавитация – 0,097;
- капиллярные эффекты – 0,17;
- «запирание» потока – 0,135;
- переходные процессы – 0,12.

Таким образом, в результате ранжирования процессов и явлений применительно к цели эксперимента было определено, что наибольший приоритет имеют испарители, конденсаторы, гидроаккумулятор с тепловым регулированием. Наряду с кипением, кризисом теплоотдачи, капиллярными эффектами и др. наиболее значимыми являются процессы теплопередачи при конденсации, путевые потери давления в двухфазном потоке. Кризис теплоотдачи, теплопередача при кипении, капиллярные эффекты в условиях микрогравитации в настоящее время изучены достаточно полно. По этим процессам проведено большое количество теоретико-экспериментальных исследований, накоплен большой объем опытных данных. Однако по потерям давления в двухфазном потоке и интенсивности теплопередачи при конденсации в условиях микрогравитации информации недостаточно, она не обобщена или вообще отсутствует. Особенно следует отметить отсутствие какой либо информации по интенсивности теплопередачи при конденсации в конденсаторах с капиллярным отводом конденсата.

По результатам ранжирования с учетом приведенных выше требований, были созданы наземные экспериментальные стенды ФВ-А ХАИ, НИИ ТП, а также стенд для изучения поведения системы в условиях микрогравитации ЛЭУ-1М. Описание стендов, и полученных на них результатов, представлено в работах [6 - 8]. В соответствии с проведенным ранжированием элементов оборудования СТР, явлений и процессов в экспериментальных установках использовались элементы штатной системы, имеющие высокий приоритет: испарители, конденсаторы, ТГА. Элементы оборудования с низким приорите-

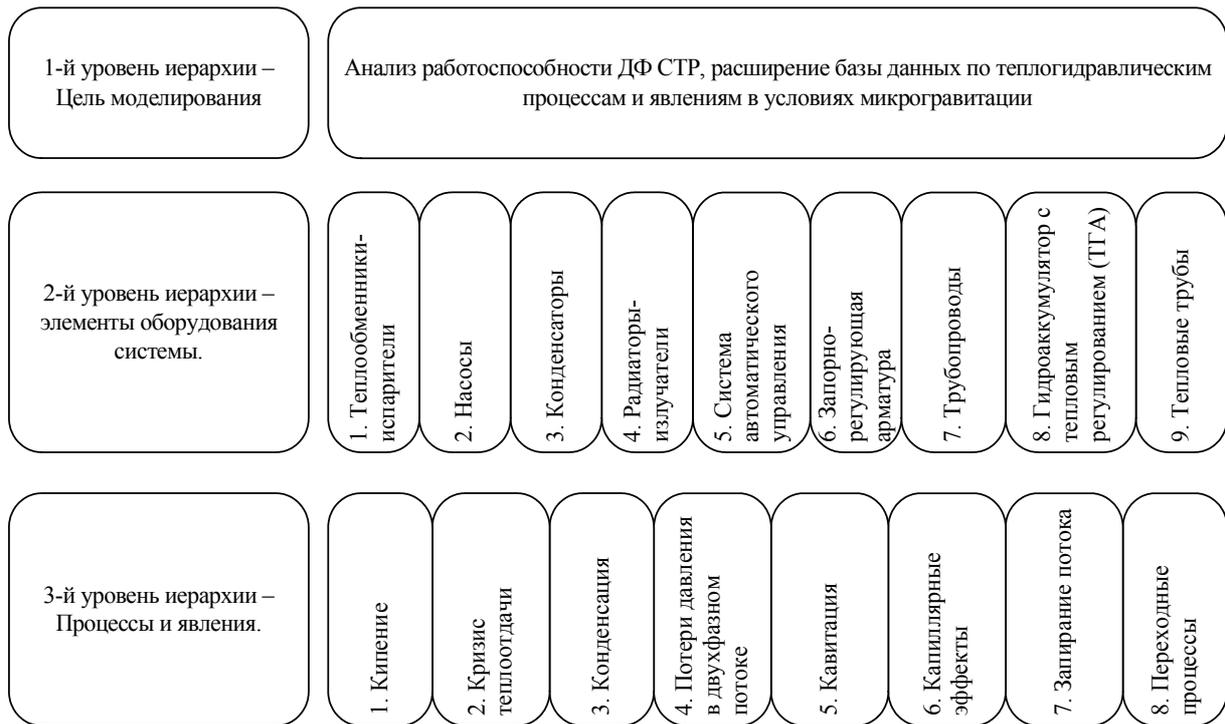


Рис. 1. Иерархическая структура задачи анализа работоспособности ДФ СТР в условиях микрогравитации

том моделировались функциональными аналогами. Элементы оборудования установки объединялись теми же тепловыми, гидравлическими связями и связями управления и регулирования, что и в штатной системе. Характеристики элементов оборудования были подобраны таким образом, чтобы обеспечить идентичность параметров в характерных сечениях модели и прототипа.

Результаты исследований, проведенных на Земле и в условиях микрогравитации, подтвердили работоспособность системы терморегулирования на базе двухфазного контура теплопереноса. При решении следующей задачи – формирование и расширение базы замыкающих соотношений по теплогидравлическим явлениям для условий микрогравитации – исследовались наименее изученные явления – теплопередача при конденсации и потери давления на трение в двухфазном потоке.

Данные для определения коэффициентов теплоотдачи при кипении были получены на стенде ЛЭУ-1М и НИИ ТП. Определение коэффициентов теплоотдачи в конденсаторах проводили в процессе решения задачи параметрической идентификации. При решении задачи определяли компоненты вектора параметров математической модели, которые обеспечивали минимальное расхождение между соответствующими компонентами векторов наблюдаемых параметров и выходных параметров математической модели. В математической модели исполь-

зовалась стационарная, односкоростная, однотемпературная модель двухфазного потока.

Задачу идентификации решали методом наименьших квадратов с использованием матричной факторизации (SVD-разложения), что позволяло получать решение в случае плохой обусловленности системы уравнений.

В результате идентификации математической модели блока конденсаторов была получена критериальная зависимость, описывающая интенсивность теплоотдачи в конденсаторах резьбового типа в условиях невесомости при давлении аммиака 12–13 бар [8]:

$$Nu = c_1 \cdot Re^{c_2} Pr^{0,43},$$

где  $c_1 = 41,454$ ,  $c_2 = 0,7191$  – определенные в результате идентификации параметры;

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda_L} \text{ – число Нуссельта;}$$

$$Re = \frac{ql}{\mu_L \tau} \text{ – число Рейнольдса;}$$

$$Pr = \frac{\mu_L c_p}{\lambda_L} \text{ – число Прандтля;}$$

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$l$  – характерный размер, м;

$\lambda_L$  – теплопроводность жидкой фазы, Вт/(м·К);

$\mu_L$  – динамическая вязкость жидкой фазы, Па·с;

г – скрытая теплота парообразования, Дж/кг.

Оценочное значение погрешности составило  $\pm 18\%$ .

Замыкающее соотношение для расчета потерь давления на трение определялось по результатам сравнения экспериментальных результатов с расчетными данными, полученными с помощью различных моделей. Было установлено, что наилучшее согласование расчетных и экспериментальных результатов обеспечивает модель Troniewski-Ulbrich [9]. Математическая модель дополненная найденными замыкающими соотношениями, адекватность которой была подтверждена экспериментальными данными использовалась для анализа теплогидравлических процессов в системах терморегулирования на базе двухфазных контуров теплопереноса российского сегмента Международной космической станции [10], перспективного телекоммуникационного спутника корпорации THALES ALENIA SPACE [11].

### Заключение

В статье предложен подход к физическому моделированию теплогидравлических процессов в ДФ СТР космических аппаратов. Подход призван решить основную проблему анализа процессов в сложных системах экспериментальными методами, а именно – сложность в выдерживании подобия модели и прототипа.

Подход состоит из нескольких этапов.

На первом этапе проводится ранжирование процессов, явлений, подсистем и элементов оборудования по степени их влияния на достижение цели эксперимента.

На втором этапе проводится проектирование экспериментальных установок с учетом результатов ранжирования, планирование и проведение всего комплекса экспериментальных исследований.

На последующих этапах результаты экспериментов используются для доработки и оценки адекватности математических моделей и анализа теплогидравлических процессов в прототипе с использованием математических моделей, для которых оценка адекватности проводилась с использованием полученных экспериментальные данные.

Подход использовался для физического моделирования процессов в системах терморегулирования на базе двухфазных контуров теплопереноса российского сегмента Международной космической станции, перспективного телекоммуникационного спутника корпорации THALES ALENIA SPACE.

### Литература

1. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике /Л. И. Седов. – М.: Наука, 1987. – 437 с.
2. Кутателадзе С. С. Анализ подобия в теплофизике / С. С. Кутателадзе. – Новосибирск: Наука, 1982. – 280 с.
3. Current status of methodologies evaluating the uncertainty in the prediction of thermal-hydraulic phenomena in nuclear reactors / F. D'Auria, M. Leonardi, H. Glaeser, R. Pochard // *Proceeding of the First International Symposium on Two-phase flow Modeling and Experimentation*. – Rome, Italy, 9-11 October. – 1995. – P. 501-509.
4. Glaeser H. Review of uncertainty methods for thermal-hydraulic computer codes / H. Glaeser, R. Pochard // *Proceedings of the International conference "New trends in Nuclear System Thermohydraulics"*. – Pisa, Italy, 30 May - 2 June. – 1994. – Vol. 1. – P. 447-455.
5. Saaty T. L. Decision Making for Leaders / T. L. Saaty. – Vol. II of the AHP Series: RWS Publ., 2001 (new ed.), ISBN 0-9620317-8-x. – 315 p.
6. Two-Phase Heat Transfer Loop of Central Thermal Control System of the International Space Station ALPHA Russian Segment / G.A. Gorbenko, V.N. Blinkov, C.A. Malukhin et al. // *Proceedings of National Heat Transfer Conference*. – Houston, Texas, USA, August 3 - 5. – 1996. – P. 9 – 18.
7. Коэффициенты теплоотдачи в условиях микрогравитации в конденсаторах контура теплопереноса российского сегмента Международной космической станции / С.Ю. Романов, Г.А. Горбенко, П.Г. Гакал и др. // *Авиационно-космическая техника и технология: Сб. научн. трудов Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»* – Вып. 23 – X., 2001. – С. 99 – 103.
8. Identification of a heat transfer coefficients in condensers of the International space station Russian segment heat transport contour / S.U. Romanov, G.A. Gorbenko, P.G. Gakal at al. // *Proceeding of the 52<sup>nd</sup> International Astronautical Congress "Meeting the Needs of the New Millenium"*. – Toulouse, France, October 1 – 5. – 2001. – P. 29-300.
9. Гакал П.Г. Замыкающие соотношения для расчета путевых потерь давления в двухфазных системах терморегулирования космических аппаратов и станций / П.Г. Гакал // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 2(10). – С. 11-17.
10. Prediction of Parameters of International space station Alpha Russian segment two-phase thermal control system under various orbit environmental conditions / Y. I. Grigoriev, V. M. Cykhotsky, Y. M. Prokhorov, O. V. Surguchev, G. A. Gorbenko, V. N. Blinkov, N. A. Brus, E. N. Ganja // *Proceedings of National Heat*

11. *Transfer Conference. – Houston, Texas, USA, August 3 – 5. – 1996. – P. 25-31.*

12. *Development of a Two-Phase Mechanically Pumped Loop (2ФМПЛ) for the Thermal Control of Telecommunication Satellites / J. Hugon, A. Larue de*

*Tournemine, G.A. Gorbenko, P.G. Gakal, V.I. Ruzaykin, T. Tjptahardja, R. Bleuler // International Two-Phase Thermal Control Technology Workshop ESA/ESTEC. – Noordwijk, the Netherlands, May 13 – 15. – 2008. – P. 23-30.*

*Поступила в редакцию 20.09.2010*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. кафедры аэрокосмической теплотехники Г.А. Горбенко, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМАХ ТЕРМОРЕГУЛЮВАННЯ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

*П.Г. Гакал*

Запропоновано підхід до фізичного моделювання теплогідрравлічних процесів в системах терморегулювання космічних апаратів. Підхід дозволить моделювати процеси на експериментальних установках, для яких в силу розгалуження, багатоелементності, особливостей перебігу робочих процесів важко, а іноді неможливо витримати подібність прототипу. Підхід має декілька етапів: ранжування процесів, явищ, елементів устаткування, проектування експериментальної установки з урахуванням ранжування, експериментальні дослідження, формування та оцінка адекватності математичної моделі, застосування математичної моделі для аналізу теплогідрравлічних процесів в прототипі. Застосування підходу проілюстровано на прикладі рішення задачі оцінки працездатності системи терморегулювання космічного апарату на базі двофазного контуру теплопереносу, розширення бази замикаючих відношень щодо теплогідрравлічних явищ в умовах мікрогравітації.

**Ключові слова:** фізичне моделювання, теплогідрравлічний процес, система терморегулювання, двофазний контур теплопереносу.

### THERMAL HYDRAULIC PHYSICAL MODELLING IN THE SPACECRAFTS THERMAL CONTROL SYSTEMS

*P.G. Gakal*

The thermal hydraulic physical modelling approach is proposed. The approach allows to model the thermal hydraulic processes in the experimental facilities for which the requirements of prototype similarity are not kept due to branching, multi elements of the system and specific parameters of the processes. The approach includes the following stages: the subsystems, elements, processes, phenomenon ranking, experimental facility design on the base of ranking, experimental investigation, mathematical model adequacy estimation and using the mathematical model for thermal hydraulic processes analyses for the prototype conditions. The using of approach is illustrated by the example of the analyzing of two-phase thermal control system efficiency and the relationships data base in the microgravity conditions expanding.

**Key words:** physical modelling, thermalhydraulic process, thermal control system, two-phase contour.

**Гакал Павел Григорьевич** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры аэрокосмической теплотехники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: ctrph.kharkiv@google.com.