

УДК 621.454.2.018 (075.8)

- Головин Д. Ю.** инженер-конструктор 1 категории отдела разработки и экспериментальной отработки пневмогидравлических систем ракет-носителей ГП «КБ «Южное», Днепр, Украина, e-mail: info@yuzhnoye.com;
- Куда С. А.** начальник сектора отдела разработки и экспериментальной отработки пневмогидравлических систем ракет-носителей ГП «КБ «Южное», Днепр, Украина, e-mail: info@yuzhnoye.com;
- Ломской Д. А.** ведущий инженер отдела разработки и экспериментальной отработки пневмогидравлических систем ракет-носителей ГП «КБ «Южное», Днепр, Украина, e-mail: info@yuzhnoye.com

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЗАХОЛАЖИВАНИЯ КРИОГЕННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

*Приведена математическая модель циркуляционной системы захлаживания криогенной двигательной установки, основанная на уравнениях теплообмена и гидродинамики, описывающих основные ее физические процессы. Проведен ряд экспериментальных исследований в натурных условиях. Приведены параметры циркуляционной системы захлаживания, полученные в результате экспериментов. Показана удовлетворительная сходимость результатов расчета с экспериментальными данными. Дана оценка влияния уровня заправки бака на расход циркуляции. Определены направления для дальнейших исследований.*

**Ключевые слова:** захлаживание двигателя, циркуляция, гейзерный эффект.

### Введение

В процессе заправки и стоянки в заправленном состоянии РН на криогенных компонентах топлива расходная магистраль и тракт окислителя двигателя заполнены жидким кислородом. Под воздействием внешнего теплопритока температура жидкого кислорода постепенно повышается до температуры кипения, соответствующей местному давлению. Это может привести к появлению гейзерного эффекта в расходной магистрали и кислородном тракте жидкостного ракетного двигателя.

Гейзерный эффект (фонтанирование) — это вытеснение столба жидкости ее парами в длинном трубопроводе при резком повышении скорости парообразования [1]. Причина его возникновения — перегрев и интенсивное кипение при пониженном давлении в насыщенном или перегретом столбе жидкости.

В результате происходит выброс жидкости из трубопровода. При последующем гравитационном заполнении возникает пик давления, аналогичный гидравлическому удару. Этот пик может быть настолько большим, что возможны разрушения и повреждения конструкции трубопровода, элементов автоматики и их креплений.

После заполнения трубопровода криогенная жидкость оказывается в термодинамически неустойчивом состоянии. По мере подвода тепла путем конвекции ее температура постепенно повышается до температуры насыщения, соот-

ветствующей местному статическому давлению. В зависимости от эффективности теплоизоляции, степени чистоты жидкости, геометрии и шероховатости трубопровода и т.д. при дальнейшем подводе тепла жидкость либо закипает, либо продолжается режим конвективного нагрева, при котором тепло расходуется на перегрев компонента. При перегреве на 1,5...2,5 °С начинается кипение.

Для частичного или полного устранения гейзерного эффекта на практике возможно применение:

- 1) теплоизоляции бака и трубопроводов;
- 2) переохлажденного компонента;
- 3) внешней или внутренней циркуляции;
- 4) обратных клапанов (локализация ударных явлений);
- 5) подпитки;
- 6) подачи компонента с переменновозрастающим расходом;
- 7) соответствующей технологической обработки внутренней поверхности трубопровода.

Некоторые из указанных способов являются нежелательными из-за увеличения массы конструкции и продолжительности времени экспериментальной отработки. Поэтому общепринятыми, нашедшими широкое применение, являются такие методы:

- 1) вдув инертного газа (гелия), метод барботажа;
- 2) подпитка с регулируемым расходом;
- 3) циркуляция компонента по двум трубо-

проводам (по замкнутому контуру).

В данной статье рассматривается математическая модель циркуляционной системы захлаживания. Циркуляционная система захлаживания представляет собой трубопровод, соединяющий занасосную полость двигателя с баком и обеспечивающий сброс из расходной магистрали и кислородного тракта двигателя в бак парогазовых включений и подогретого кислорода.

### 1. Описание математической модели

Во время работы циркуляционной системы движение жидкости в контуре осуществляется благодаря естественной конвекции, возникающей в результате разности температур в расходной магистрали и трубопроводе циркуляции (ТЦ).

Расчет массового расхода в контуре циркуляции на номинальном режиме определяется по формуле:

$$\dot{G} = \frac{\rho_{\text{Ц}} F_{\text{Ц}}}{\sqrt{\xi + 1}} \sqrt{2gh \frac{\rho_{\text{PM}} - \rho_{\text{Ц}}}{\rho_{\text{Ц}}}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{Ц}}$  — плотность жидкого кислорода в ТЦ;

$F_{\text{Ц}}$  — площадь поперечного сечения ТЦ;

$\xi$  — суммарный коэффициент гидравлических потерь в контуре циркуляции;

$h$  — высота ТЦ;

$\rho_{\text{PM}}$  — осредненное значение плотности жидкого кислорода в расходной магистрали и баке (ниже точки ввода ТЦ в бак).

Прогрев в расходной магистрали и ТЦ рассчитывается по формуле:

$$\Delta T = \frac{qF\tau}{\dot{G}c_p}, \quad (2)$$

где  $q$  — удельный тепловой поток к рассматриваемому участку контура циркуляции;

$F$  — площадь боковой поверхности рассматриваемого участка контура циркуляции;

$\tau$  — время, за которое единичный объем жидкости пройдет всю длину рассматриваемого участка контура циркуляции;

$c_p$  — удельная теплоемкость жидкого кислорода.

Если в ТЦ происходит кипение необходимо учесть влияние парожидкостной смеси на среднюю плотность компонента. Методика расчета плотности парожидкостной смеси приводится ниже.

Расход пара кислорода со стенок трубопровода в бак при кипении определяется по формуле:

$$\dot{G}_n = \frac{qF_k}{r}, \quad (3)$$

где  $q$  — удельный тепловой поток к участку ТЦ с кипением;

$F_k$  — площадь поверхности участка ТЦ с кипением;

$r$  — теплота парообразования жидкого кислорода.

Зная давление и температуру по высоте ТЦ можно определить глубину кипящего слоя.

Массовое паросодержание потока на выходе из ТЦ [2]:

$$x_{\text{ВЫХ}} = \dot{G}_{\text{П}} / \dot{G}, \quad (4)$$

Приведенная скорость жидкости на выходе из ТЦ:

$$w'_{0\text{ВЫХ}} = w_{\text{Ц}}(1 - x_{\text{ВЫХ}}), \quad (5)$$

где  $w_{\text{Ц}}$  — скорость движения компонента в контуре циркуляции.

Приведенная скорость пара на выходе из ТЦ:

$$w''_{0\text{ВЫХ}} = x_{\text{ВЫХ}} w_{\text{Ц}}(\rho' / \rho''), \quad (6)$$

где  $\rho'$ ,  $\rho''$  — плотность жидкости и пара.

Приведенной скоростью называется средняя скорость, которую имела бы жидкость или пар при заполнении всего сечения трубопровода.

Приведенная скорость смеси:

$$w_{\text{СМ}} = w'_{0\text{ВЫХ}} + w''_{0\text{ВЫХ}}. \quad (7)$$

Объемное расходное паросодержание потока на выходе из ТЦ:

$$\beta = w''_{0\text{ВЫХ}} / w_{\text{СМ}}. \quad (8)$$

Истинное объемное паросодержание на участке трубопровода циркуляции с кипением определяется по формуле:

$$\phi = \beta \left[ 1 + 3,7 \left( \frac{\rho' - \rho''}{\rho'} \right)^5 \left( \frac{\sqrt{\sigma / (\rho' d)}}{w_{\text{СМ}}} \right)^{0,5} \left( \frac{w_{\text{СМ}}^2}{gd} \right)^{-n} \right], \quad (9)$$

где  $n = 0,25 / \exp(0,025 w_{\text{СМ}} \sqrt{\rho' / gd})$ ;

$d$  — диаметр трубопровода;

$\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения.

Истинное среднее значение плотности газожидкостной смеси:

$$\rho_{\text{ИСТ}} = \rho'' \phi + \rho'(1 - \phi). \quad (10)$$

Учитывая долю парожидкостной смеси в объеме ТЦ, определяется среднемассовая плотность по всей высоте трубопровода.

Так как в приведенной формуле для расчета расхода жидкого кислорода две неизвестные величины, весь расчет осуществляется с использованием метода последовательных приближений.

## 2. Применение математической модели для экспериментальной установки

Для подтверждения работоспособности системы циркуляции были проведены экспериментальные исследования на стендовой установке, в конструкции которой реализован один из вариантов технического решения системы. С целью обоснования математической модели циркуляционной системы на экспериментальной установке (рис. 1) проводились замеры параметров работы циркуляционной системы, а также был проведен расчет этих параметров.

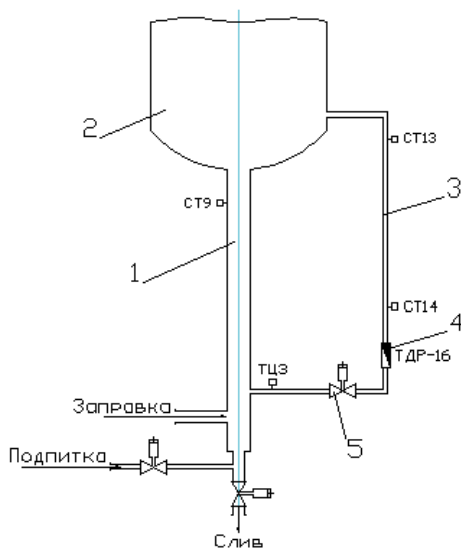


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

- 1 – расходная магистраль; 2 – топливный отсек;
- 3 – трубопровод циркуляции; 4 – отсечный клапан трубопровода циркуляции; 5 – турбинный датчик расхода

Установка представляла собой топливный отсек 2 (диаметр 3 м, высота 11,2 м) с изолированной расходной магистралью окислителя 1 (диаметр 0,4 м, длина 6,8 м) и трубопроводом циркуляции 3 (внутренний диаметр 50 мм). Выходной участок трубопровода циркуляции (от расходной магистрали до вертикального участка за бортом изделия) выполнен горизонтальным, длиной 1,7 м. На этом участке на расстоянии 1,1 м от магистрали имеется отсечный клапан 4. Ввод трубопровода циркуляции в бак осуществляется на расстоянии 1,2 м выше полюса нижнего днища. Расход компонента в контуре циркуляции измерялся турбинным датчиком

расхода 5, установленным в нижней части вертикального участка трубопровода циркуляции.

Заправка бака проводилась через расходную магистраль кипящим или перегретым (относительно условий атмосферного давления) кислородом с температурой на входе от -176 до -183 °С.

С целью исследования влияния уровня заправки баков на характеристики системы захлаживания были проведены две серии экспериментов с различными уровнями заправки – 6 (испытания № 2 и 3) и 10 м (испытания № 4, 5, 7, 8, 10, 18, 23).

Результаты замеров, сделанных в ходе экспериментов, были осреднены по времени стоянки баков с открытыми дренажами (табл. 1).

По результатам экспериментов видно, что с ростом столба жидкости расход в контуре циркуляции уменьшается. Отмеченный характер изменения расхода вызывается процессом кипения кислорода в контуре захлаживания. Паровые пузыри, образовавшиеся в жидкости при кипении, выполняют роль парового насоса, снижающего плотность жидкости в ТЦ, что при низких давлениях приводит к увеличению расхода. С ростом давления пузыри уменьшаются в объеме, поэтому с увеличением столба жидкости снижается объемное паросодержание потока, возрастает плотность смеси в ТЦ и, следовательно, падает расход. Дальнейший рост давления приводит к конденсации пузырей. Парожидкостная смесь исчезает и расход снижается.

Таблица 1. Характеристики циркуляционной системы захлаживания, полученные в результате экспериментов

| Нормер эксперимента | $t_B, ^\circ\text{C}$ | $t_H, ^\circ\text{C}$ | $\tilde{t}_M, ^\circ\text{C}$ | $\tilde{t}_Ц, ^\circ\text{C}$ | H, м  | $\dot{G}, \text{кг/с}$ |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------|------------------------|
| 2                   | -181,8                | -179,8                | -181                          | -179                          | 6,04  | 0,74                   |
| 3                   | -181,6                | -179,6                | -180,8                        | -178,9                        | 5,95  | 0,92                   |
| 4                   | -181,7                | -179,5                | -180,9                        | -178,6                        | 10,31 | 0,63                   |
| 5                   | -181,7                | -179,4                | -181,6                        | -179,3                        | 10,31 | 0,645                  |
| 7                   | -181,5                | -179                  | -181                          | -178,5                        | 10,29 | 0,675                  |
| 8                   | -181,4                | -178,8                | -179,8                        | -177,7                        | 10,4  | 0,605                  |
| 10                  | -181,7                | -179,5                | -180,1                        | -178,6                        | 10,1  | 0,61                   |
| 18                  | -181                  | -179,6                | -180,2                        | -177,9                        | 10,63 | 0,635                  |
| 23                  | -181,3                | -178,2                | -180,3                        | -177,4                        | 10,25 | 0,7                    |

**Примечание к таблице:**  $t_B$  – температура в верхней части расходной магистрали (датчик СТ9);  $t_H$  – температура в нижней части расходной магистрали (датчик ТЦ3);  $\tilde{t}_M$  – среднemasсовая температура кислорода в расходной магистрали;  $\tilde{t}_Ц$  – среднemasсовая температура кислорода в ТЦ; H – высота столба жидкости

в баке от полюса нижнего днища до свободной поверхности (зеркала жидкости);  $\dot{G}$  – значение расхода в контуре циркуляции, зафиксированное датчиком ТДР-16.

Экспериментальные данные получены для условий теплопритоков к баку порядка 1000 ккал/(м<sup>2</sup>час).

На экспериментальной установке не был установлен двигатель. По этой причине при проведении расчетов не учитывалось возможное гидравлическое или тепловое влияние двигателя.

В табл. 2 приведены значения расхода циркуляции, полученные при проведении экспериментов и в результате расчета для испытаний с уровнем заправки 10 м.

**Таблица 2.** Расчетные и экспериментальные значения расхода циркуляции для испытаний с уровнем заправки 10 м

| Номер эксперимента | Экспериментальное значение расхода циркуляции (без кипения), кг/с | Расчетное значение расхода циркуляции (без кипения), кг/с |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 4                  | 0,63                                                              | 0,67                                                      |
| 5                  | 0,645                                                             |                                                           |
| 7                  | 0,675                                                             |                                                           |
| 8                  | 0,605                                                             |                                                           |
| 10                 | 0,61                                                              |                                                           |
| 18                 | 0,635                                                             |                                                           |
| 23                 | 0,7                                                               |                                                           |

В табл. 3 приведены значения расхода циркуляции, полученные при проведении экспериментов и в результате расчета для испытаний с уровнем заправки 6 м с учетом кипения в верхнем участке ТЦ.

**Таблица 3.** Расчетные и экспериментальные значения расхода циркуляции для испытаний с уровнем заправки 6 м

| Номер эксперимента | Экспериментальное значение расхода циркуляции (с кипением), кг/с | Расчетное значение расхода циркуляции (с кипением), кг/с |
|--------------------|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| 2                  | 0,74                                                             | 0,85                                                     |
| 3                  | 0,92                                                             |                                                          |

**Заключение**

По данным экспериментов установлено, что рассмотренная система захлаживания обеспечивает приемлемые расходы в контуре циркуляции. При этом расход циркуляции для уровня заправки 6 м превышает расход циркуляции для уровня 10 м. Это обусловлено тем, что при меньшем уровне заправки в верхнем участке трубопровода циркуляции имеет место кипение, которое интенсифицирует расход циркуляции.

Представленная математическая модель дает достаточно близкие к эксперименту значения расхода циркуляции, что позволяет на начальных этапах проектирования оценить возможности систем циркуляции различной конфигурации.

В дальнейшем возможно применение данной математической модели для проектирования циркуляционных систем захлаживания, работающих на других криогенных компонентах топлива, таких как жидкий метан или жидкий водород.

**Литература**

1. Ринг Э. Двигательные установки ракет на жидком топливе [Текст] : пер. с англ. / Э. Ринг – М., : Мир, 1986. – 113 с.
2. Кутепов А. М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании [Текст] : учеб. пособие для вузов / А. М. Кутепов, Л. С. Стерман, Н. Г. Стюшин. – М. : Высшая школа, 1986. – 425 с.

Поступила в редакцию 1.06.2018

**Д. Ю. Головін, С. А. Кудя, Д. А. Ломської. Математична модель циркуляційної системи заохолодження криогенної двигунної установки**

*Приведено математичну модель циркуляційної системи заохолодження криогенної двигунної установки, засновану на рівняннях теплообміну і гідродинаміки, що описують основні її фізичні процеси. Проведено ряд експериментальних досліджень в натурних умовах. Приведено параметри циркуляційної системи заохолодження, отримані у результаті експериментів. Показано задовільну збіжність результатів розрахунку з експериментальними даними. Дана оцінка впливу рівня заправки бака на витрату циркуляції. Визначено напрямки для подальших досліджень.*

**Ключові слова:** заохолодження двигуна, циркуляція, гейзерний ефект.

**D. Y. Holovin, S. A. Kuda, D. A. Lomskoy. The mathematical model of the circulation chilldown system of the cryogenic propulsion system**

*During integrated launch vehicle filling and its standing in filled condition the feed line and main engine oxidizer channel are filled with liquid oxygen. At impact of external heat leakage the liquid oxygen temperature is gradually increased up to a saturation temperature corresponding to the local pressure. This leads to liquid overheating, occurrence of the geyser effect and hydraulic shocks in the feed line and main engine oxygen channel. In order to exclude the above listed negative effects the circulation system is envisaged. This system represents the pipeline laid overboard the rocket and connecting the overpump engine cavity with the tank and providing venting of gas inclusions and heated oxygen into the tank.*

*The mathematical model of the circulation chilldown system of cryogenic propulsion system based on equations of heat exchange and hydrodynamics, describing its basic physical processes. The series of experimental researches were carried out in full-scale conditions. There are given the parameters of the circulation chilldown system, obtained as a result of experiments.*

*According to the experimental results, it can be seen that the flow rate in the circulation circuit decreases with a growth of the liquid column. The noted nature of change of the flow rate is caused by the boiling of the oxygen in the circulation circuit. The steam bubbles formed in the liquid during boiling act as a steam pump that reduces the density of the liquid in the circulation pipeline. At low pressures this leads to an increase in the flow rate. As the pressure increases, the bubbles decrease in volume, therefore, as the liquid column increases, the volumetric vapor content of the stream decreases, the mixture density in the circulation pipeline increases and, consequently, the flow rate decreases. A further pressure increase leads to the condensation of the bubbles. The vapor-liquid mixture disappears and the flow rate decreases.*

*The engine was not installed on the test bench. For this reason, the calculations did not take into account the possible hydraulic and thermal influence of the engine.*

*The satisfactory convergence of calculation results with the experimental data are shown. The estimation of the influence of the filling level of the tank on the circulation rate is given. Directions for the further researches are defined.*

**Keywords:** *chilldown of the engine, circulation, geyser effect.*

**References**

1. Ring E. Rocket propellant and pressurization system. Englewood cliffs, Prentice hall, 1964. 86 p. (Russ. ed.: Ring E. Dvigatel'nye ustanovki raket na zhidkom toplive. Moscow, Mir Publ., 1986. 113 p.)

2 Kutepov A.M., Sterman L.S., Styushin N.G. *Gidrodinamika i teploobmen pri paroobrazovanii* [Hydrodynamics and heat exchange at steam generation]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 425 p.