

УДК 621.454.2.018 (075.8)

Д. Ю. Головин, И. Н. Ермоленко, С. А. Куда, Д. А. Ломской

## ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЗАХОЛАЖИВАНИЯ КРИОГЕННОЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

*Приведено описание экспериментов циркуляционной системы захлаживания криогенной двигательной установки, рассмотрена разработанная методика для оценки параметров циркуляции и дано сравнение расчетных и экспериментальных данных по этой системе.*

*Наведено опис експериментів циркуляційної системи захладження криогенної рушійної установки, розглянуто розроблену методику для оцінювання параметрів циркуляції та дано порівняння розрахункових і експериментальних даних з цієї системи.*

*The paper describes the experiments of cryogenic engine unit circulatory cooling system, considers the developed technique of circulation parameters evaluation and gives the comparison of calculated and experimental data on this system.*

### 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. 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 нестабильном состоянии. По мере подвода тепла путем конвекции температура жидкости постепенно повышает-

ся до температуры насыщения, соответствующей 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  $1,5 \dots 2,5^\circ\text{C}$  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:

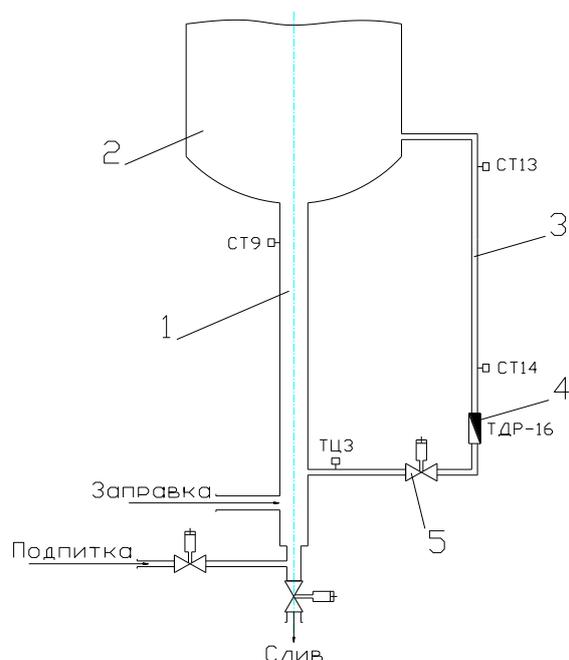
- 1) вдув инертного газа (гелия), метод барботажа;
- 2) подпитка с регулируемым расходом;

3) циркуляция компонента по двум трубопроводам (по замкнутому контуру).

В данной статье рассматривается метод борьбы с гейзерным эффектом с помощью системы циркуляции. Система циркуляции 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.

### Описание экспериментов

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 методики расчета основных характеристик системы циркуляции на экспериментальной установке (рисунок) проводились замеры параметров ее работы, а также были рассчитаны ее параметры.



Принципиальная схема экспериментальной установки:

- 1 – расходная магистраль; 2 – топливный отсек;
- 3 – трубопровод циркуляции; 4 – отсекающий 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 отсекающий 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  $-183^{\circ}\text{C}$ .

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 па-

росодержание 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

Экспериментальные значения характеристик системы захлаживания

Номер эксперимента	$t_в, ^\circ\text{C}$	$t_н, ^\circ\text{C}$	$\tilde{t}_м, ^\circ\text{C}$	$\tilde{t}_ц, ^\circ\text{C}$	$H, \text{ м}$	$\dot{G}, \text{ кг/с}$
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:  $t_в$  – температура в верхней части расходной магистрали (датчик СТ9);  $t_н$  – температура в нижней части расходной магистрали (датчик ТЦ3);  $\tilde{t}_м$  – среднemasсовая температура кислорода в расходной магистрали;  $\tilde{t}_ц$  – среднemasсовая температура кислорода в трубопроводе циркуляции (ТЦ);  $H$  – высота столба жидкости в баке от полюса нижнего днища до свободной поверхности (зеркала жидкости);  $\dot{G}$  – расход жидкого кислорода в контуре циркуляции (датчик ТДР-16).

### Анализ результатов измерений расхода в контуре циркуляции

Для анализа экспериментальных данных по расходу жидкого кислорода в контуре циркуляции был проведен расчет по методике [1]. Основные формулы для расчета приведены ниже.

Расход жидкого кислорода в контуре циркуляции на номинальном режиме

$$\dot{G} = \frac{\rho_ц F_ц}{\sqrt{\xi + 1}} \sqrt{2gh \frac{\rho_{р.м} - \rho_ц}{\rho_ц}},$$

где  $\rho_ц$  – плотность жидкого кислорода в ТЦ;  
 $F_ц$  – площадь поперечного сечения ТЦ;  
 $\xi$  – суммарный коэффициент гидравлических потерь в контуре циркуляции;  
 $h$  – высота ТЦ;  
 $\rho_{р.м}$  – осредненное значение плотности жидкого кислорода в расходной магистрали и баке (ниже точки ввода ТЦ в бак).

Суммарное значение коэффициента гидравлических потерь для контура цирку-

ляции экспериментальной установки  $\xi = 16,3$ .

Прогрев жидкого кислорода на разных участках контура циркуляции рассчитывается по формуле

$$\Delta T = \frac{qF\tau}{\dot{G}c_p},$$

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;  
 $\dot{G}$  – массовый расход жидкого кислорода в контуре циркуляции;  
 $c_p$  – удельная теплоемкость жидкого кислорода.

Для испытаний с уровнем заправки 6 м имеет место кипение в верхнем участке трубопровода циркуляции. Расход пара кислорода со стенок трубопровода в бак при кипении определяется по формуле

$$\dot{G}_n = \frac{qF_k}{r},$$

где  $q$  – удельный тепловой поток к участку ТЦ с кипением;  
 $F_k$  – площадь поверхности участка ТЦ с кипением;  
 $r$  – теплота парообразования жидкого кислорода.

Плотность на кипящем участке трубопровода рассчитывается как плотность парожидкостной смеси [2]

$$\rho_{см} = \rho''\varphi + \rho'(1-\varphi),$$

где  $\rho'$ ,  $\rho''$  – плотность жидкости и пара;  
 $\varphi$  – истинное объемное газосодержание.

Истинное объемное газосодержание на участке трубопровода циркуляции с кипением определяется по формуле

$$\varphi = \beta \left( 1 + 3,7 \left( \frac{\rho' - \rho''}{\rho'} \right)^5 \left( \frac{\sqrt{\sigma / (\rho' d)}}{w_{см}} \right)^{0,5} \left( \frac{w_{см}^2}{gd} \right)^{-n} \right),$$

где  $n = 0,25 / \exp(0,025 w_{см}^4 \sqrt{\rho' / gd})$ ;  
 $d$  – диаметр трубопровода;  
 $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  
 $w_{см}$  – скорость смеси.

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

Таблица 2

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

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

Расчетные и экспериментальные значения расхода жидкости в контуре циркуляции для испытаний с уровнем заправки 10 м

Номер эксперимента	Экспериментальное значение расхода жидкости в контуре циркуляции (без кипения), кг/с	Расчетное значение расхода жидкости в контуре 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	

Таблица 3

Расчетные и экспериментальные значения расхода жидкости в контуре циркуляции для испытаний с уровнем заправки 6 м

Номер эксперимента	Экспериментальное значение расхода жидкости в контуре циркуляции (с кипением), кг/с	Расчетное значение расхода жидкости в контуре 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. Это обусловлено тем, что при меньшем уровне заправки в верхнем участке трубопровода циркуляции имеет место кипение, которое интенсифицирует расход жидкости в контуре циркуляции.

### Список использованной литературы

1. Оценка параметров циркуляции жидкого кислорода в системе захлаживания криогенной ЖРДУ. 22.8234.123 СТ: Техн. справка. – ГП "КБ "Южное".
2. Кутепов А. М., Стерман Л. С., Стюшин Н. Г. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. – М.: 1986.

Статья поступила 17.08.2017