

## ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ЗАЩИТЫ ПОВЕРХНОСТИ КРИОГЕННЫХ БАКОВ ОТ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА

© 2009 В. В. Бирюк<sup>1</sup>, О. Н. Николаева<sup>2</sup>, А. И. Шепелев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет

<sup>2</sup>Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс»

Рассмотрен процесс образования льда на стенках криогенных баков ракет-носителей, проведен теоретический расчет массы льда, образующейся из дождевой воды, попавшей на холодную стенку бака, проведены экспериментальные исследования процесса образования льда, а также методов защиты криогенных поверхностей от образования льда.

*Криогенный бак, ракета-носитель, дождь, намерзание влаги, образование льда, экспериментальное исследование, гидрофобное покрытие, термозащитное покрытие*

### 1. Теоретический расчёт толщины льда, образующегося на наружных поверхностях криогенных баков РН

Теоретический расчёт нарастания льда на поверхности криогенного бака включает:

- определение количества дождевой воды, попадающей на поверхность криогенного бака, в зависимости от интенсивности дождя и скорости ветра;
- определение времени остывания воды до температуры замерзания.

При расчёте количества дождевой воды, попадающей на поверхность криогенных баков, предварительно принималось: на криогенный бак попадает дождевая вода, стекающая с теплой вышерасположенной конструкции, а также непосредственно попадающая на боковую поверхность при наклонном дожде.

При вертикально падающем дожде количество дождевой воды, попадающей на криогенный бак с тёплых вышерасположенных поверхностей, определяется интенсивностью дождя и площадью поперечного сечения вышерасположенной конструкции. При наклонном дожде масса воды, непосредственно попадающей на бак, значительно меньше массы воды, стекающей с вышерасположенных конструкций, поэтому ей можно пренебречь. При теоретическом расчёте предполагалось, что дождевая вода стекает с тёплой вышерасположенной конструкции в виде равномерно распределенной по периметру пелены (или половине периметра в случае наклонного дождя), которая

замерзает при попадании на холодную поверхность бака окислителя. Были получены результаты по количеству дождя, попадающего на поверхность кислородного бака, и толщине образовавшегося льда с учетом принятия допущения, что вся масса дождевой воды должна замерзнуть. Однако в результате проведенных экспериментальных исследований было установлено, что дождевая вода стекает с вышерасположенных поверхностей не в виде пелены, а в виде отдельных жгутов, которые на баке окислителя практически не замерзают. Поэтому рассмотрение случая стекания воды в виде пелены в дальнейшем нецелесообразно.

Таким образом, представляет интерес случай, когда дождевая вода попадает непосредственно на боковые поверхности кислородных баков при наклонном дожде без стекания с вышерасположенных теплых конструкций.

В этом случае расход воды на единицу поверхности бака определяется формулой

$$\bar{m} = H \cdot \rho \cdot \cos \alpha,$$

где  $H$  – интенсивность дождя (мм\*м<sup>2</sup>/ч);

$\rho$  – плотность воды (кг/м<sup>3</sup>);

$\alpha$  – угол наклона дождя к горизонтальной плоскости (градусы).

При скорости ветра 10 м/с угол наклона дождя к горизонту может составлять 45°. Образование льда под воздействием дождя на поверхности криогенного бака представляет собой многократно повторяющийся процесс замерзания отдельных капель, по-

степенно образующих на поверхности бака слой льда.

Время замерзания капли в зависимости от температуры поверхности подложки, на которую падает капля, и от размера капли приведено на рис.1, 2, 3.

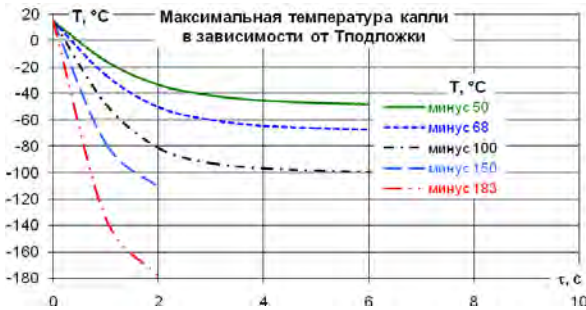


Рис.1. Расчёт замерзания капли радиусом 0,5 мм

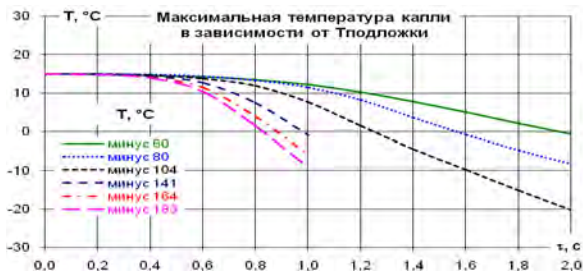


Рис.2. Расчёт замерзания капли радиусом 2,5 мм

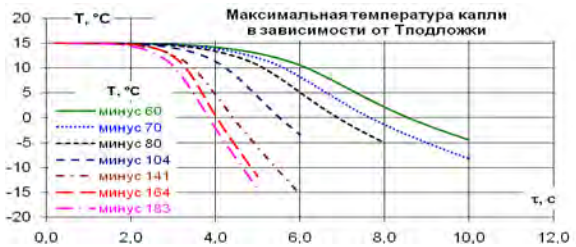


Рис. 3. Расчёт замерзания капли радиусом 5 мм

Из анализа рисунков следует, что время замерзания капель даже диаметром 10 мм составляет 6...8 с (чем меньше капля, тем быстрее она замерзает), что составляет малую часть от времени заполнения всего слоя толщиной, равной диаметру капли, каплями такого размера. Время заполнения составит 450 с при интенсивности дождя 40 мм за 30 мин. При такой интенсивности вся вода, попадающая на поверхность криогенного бака, замерзает (процесс образования сухого льда).

Зависимость толщины льда при максимальной интенсивности дождя от угла его падения представлено на рис. 4.

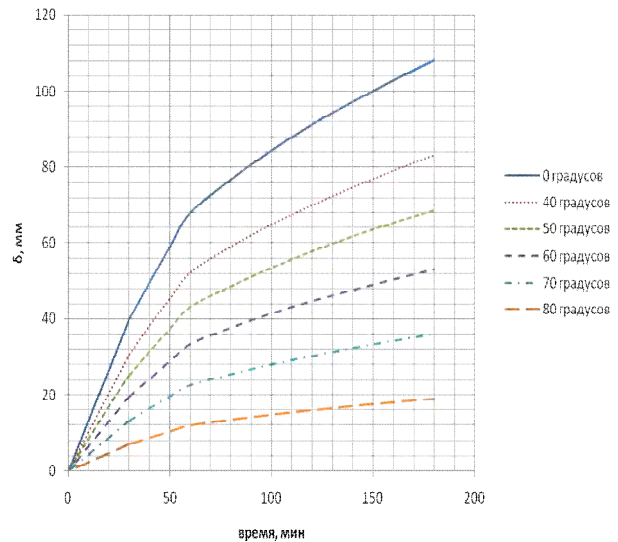


Рис.4. Изменение толщины сухого льда при максимальной интенсивности дождя от угла его падения

Учитывая, что вероятность максимальной интенсивности дождя (40 мм за 30 мин) мала, для расчётного случая принимается интенсивность дождя средняя за сутки (260 мм за 24 ч), что составляет 11 мм в час. В этом случае максимальная толщина льда на лобовом участке бака (где вектор скорости перпендикулярен к поверхности бака) не превысит 18 мм за 1,5 часа, а средняя толщина льда на половине цилиндрической поверхности 11,5 мм.

## 2 Экспериментальное исследование процесса образования льда на поверхности стенки кислородного бака

Для исследований образования льда из дождевой воды на поверхности бака жидкого кислорода разработана установка, представляющая собой модельный бак, заполняемый жидким кислородом при абсолютном давлении 1,2...1,8 кг/см<sup>2</sup>. Конструкция бака представляет собой усечённый конус. В течение эксперимента, время которого не менее 30 мин, температура и давление жидкого кислорода поддерживаются системами установки постоянными. Подача воды на поверхность бака через устройство, моделирующее поток дождевой воды разной степени интенсивности, производится после заполнения бака жидким кислородом.

Подача воды на поверхность бака обеспечивает следующие, представляющие интерес ситуации:

- моделирование условий аккумуляции дождевой воды на теплых поверхностях, расположенных выше криогенной поверхности, при дожде максимальной интенсивности и различном угле наклона дождя, и стекание этой воды на поверхность бака модели;

- моделирование условий непосредственного попадания дождя на криогенную поверхность (без аккумуляции).

При проведении экспериментальных работ было установлено, что при имитации условий аккумуляции дождевой воды она, стекая с вышерасположенных теплых конструкций, жгутуется и стекает несколькими струями. Уменьшение в несколько раз поверхности соприкосновения воды с поверхностью бака, увеличение скорости движения воды в жгутах приводит к тому, что происходит только частичное замерзание стекающей воды. Толщина льда, образующегося из стекающих с теплых поверхностей на холодную струй воды, не превышает 5...7 мм при максимальной интенсивности дождя (40 мм за 30 мин). Причём, происходило периодическое опадание намороженного льда.

Непосредственное попадание распыленной воды на поверхность приводит к её полному замерзанию при длительном, непрерывном расходе с максимальной интенсивностью. Максимальная толщина льда, образующегося на поверхности кислородного бака за 30...35 минут непрерывного дождя максимальной интенсивности 40 мм за 30 мин, достигает 30...42 мм. За один час толщина льда может достигать 60...70 мм при интенсивности дождя 68 мм за 1 час.

Таким образом, при имитации условий непосредственного попадания дождевой воды были подтверждены основные закономерности процесса образования льда на поверхности кислородного бака, полученные при теоретических исследованиях.

Экспериментально определено, что образование инея на поверхности кислородного бака не препятствует образованию льда из воды, попадающей на поверхность кислородного бака, предварительно покрытую инеем. Время теплового разрушения инея потоком дождевой воды заданной интенсивности не превышает нескольких минут.

### **3 Экспериментальное исследование способов защиты поверхности кислородного бака от образования льда**

Проведен комплекс экспериментально-расчетных работ по исследованию процесса образования льда на криогенной поверхности кислородного бака РН, оценки скорости образования льда и эффективности противообледенительных мероприятий.

Результатами расчетных исследований определено, что поверхность заполненного кислородом криогенного бака покрывается льдом со скоростью, обусловленной интенсивностью дождя, углом падения капель дождя.

Эксперименты включали опробование защиты бака от образования льда из дождевой воды:

- покрытиями с гидрофобным эффектом, связанным с несмачиваемостью поверхности;

- термозащитными покрытиями, для изготовления которых используются материалы с малыми коэффициентами теплопроводности.

Из материалов, рассматриваемых как гидрофобные, использовались для экспериментов:

- пленка из фторопласта 4 марки ПН толщиной 0,6 мм и шириной 60 мм. Температурный диапазон  $-200...+60^{\circ}\text{C}$ , плотность  $21...226 \text{ кг/м}^3$ , теплопроводность  $0,23 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;

- кислородная смазка ВНИИНП-229 ГОСТ 12.2.052 1981г., температурный диапазон  $-200...+260^{\circ}\text{C}$ , плотность  $500 \text{ кг/м}^3$ .

Из термозащитных материалов с малым коэффициентом теплопроводности использовались:

- термокраска Thermal-Coat<sup>TM</sup> ОАО ГИПРОНИИАВИАПРОМ. Температурный диапазон  $-70...+160^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности от 0,01 до  $0,023 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ;

- K-FLEX ST трубный и листовой теплоизоляционный материал из синтетического каучука для холодильных и инженерных систем, безопасен для кислородных систем. Температурный диапазон  $-200...+160^{\circ}\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности  $0,038 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , плотность  $70 \text{ кг/м}^3$ .

Эксперименты с термокраской Thermal-Coat<sup>TM</sup>, нанесенной на часть крио-

генной поверхности бака тремя слоями по 0,5 мм, показали недостаточность этой толщины, поскольку на поверхности трех слоев продолжает образовываться лед. По оценкам для защиты поверхности бака от дождя толщина термокраски должна составлять не менее 5 мм.

Эксперименты с нанесением покрытия K-FLEX ST различной толщины: 6мм, 10мм, 13мм, и 20мм на криогенную поверхность показали хорошую защиту поверхности от образования льда. Даже на покрытии толщиной 6 мм температура за 10 мин захлаживания снижалась только до 0°C, а при подаче воды через форсунки температура поверхности покрытия оставалась положительной за время испытания – 30 мин.

Эксперименты с гидрофобным покрытием – фторопластом 4 - не дали положительного результата, по всей вероятности из-за быстрого замерзания первого слоя капель воды. Поскольку на поверхности тонкого слоя достаточно теплопроводного фторопласта 4 устанавливается температура, всего на 5-8°C отличная от температуры наружной стенки бака, то вода, не успевая стекать, замерзает. Все последующие слои замерзают так же быстро, как на непокрытой стенке бака.

Эксперименты с кислородной смазкой ВНИИП-229 также не дали положительного результата.

Таким образом, гидрофобные покрытия при таких температурах и теплофизических свойствах АМг-6 неэффективны для решения задачи защиты криогенной поверхности от обледенения.

С другой стороны, подтверждена эффективность термозащитных покрытий на базе трубного и листового теплоизоляционного материала из синтетического каучука K-FLEX-ST толщиной 6-20мм с малыми коэффициентами теплопроводности 0,038Вт/(м·К).

Таким образом, для предотвращения образования льда целесообразно рассматривать теплоизоляционные материалы, например ППУ-17 или K-FLEX ST. Потери полезного веса при использовании теплоизоляционных материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Потери полезного веса при использовании теплоизоляционных материалов

	ППУ 17 толщина 16 мм		K-FLEX ST толщина 6 мм	
	Масса материала, кг	Потеря полезного груза, кг	Масса материала, кг	Потеря полезного груза, кг
ЦБ	137	28	69	14
ББ	360	22	184	11
III ступень	22	22	11	11
Σ потери полезного груза, кг		72		36

Следует отметить, что для материала K-FLEX ST не отработана технология наклейки на поверхность бака. При экспериментальных исследованиях материал K-FLEX ST просто бандажировался к поверхности модельного бака, в связи с этим при приклеивании K-FLEX ST на поверхность кислородного бака возможно ухудшение его характеристик. Для материала K-FLEX ST требуется отработка технологии приклеивания на поверхности кислородного бака и проверка его характеристик.

Пенопласт ППУ-17 многократно применялся для теплоизоляции криогенных баков. Технология нанесения ППУ-17 отработана.

Для защиты криогенных баков от образования льда рассматривались не только методы пассивной защиты, но устройства для сброса льда.

### Библиографический список

1. Анфимов, Н.А. Теплопередача при низких температурах/ Н.А. Анфимов.- М.: Изд-во иностр. лит., 1977.
2. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей/ Н.Б. Варгафтик. М.: Наука, 1972.
3. Луканин, В.Н. Теплотехника/ В.Н. Луканин.- М.: Высш. шк., 2006.
4. Ривкин, С.Л. Термодинамические свойства воды и водяного пара: справочник/ С.Л. Ривкин, А.А. Александров.- М.: Энергоатомиздат, 1984.

### References

1. Anfimov N. Heat-transfer at low temperatures .- M. Foreign Literature Publishing House, 1977.
2. Vargaftik N. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids .- M., Science, 1972.
3. Lukanin V. Heat engineering.-M., High School, 2006.
4. Rivkin S., Alexandrov A. Thermodynamic properties of water and water vapor. Handbook.- M., Energoatomizdat, 1984.

## RESEARCH OF METHODS FOR PROTECTION THE SURFACE OF CRYOGENIC TANKS FROM ICE FORMATION

©2009 V. V. Biryuk<sup>1</sup>, O. N. Nikolaeva<sup>2</sup>, A. I. Shepelev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University  
<sup>2</sup>«Progress» Design Bureau

Process of formation of ice on walls of cryogenic tanks of carrier rockets is observed, theoretical calculation of weight of ice formed of the rain water which has got on a cold wall of a tank is carried out, experimental researches of process of formation of ice, and also protection methods cryogenic surfaces from ice formation are spent.

*Criogenic tank, carrier rocket, freezing of moisture, formation of ice, experimental research, gidrobic protection*

### Информация об авторах

**Бирюк Владимир Васильевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Теплотехника и тепловые двигатели» Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846) 335-18-12. E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Область научных интересов: тепломассообмен, термодинамика.

**Николаева Ольга Николаевна**, начальник сектора отдела Государственного научно-производственного ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». Тел: (846) 335-18-12. E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Область научных интересов: тепломассообмен, термодинамика.

**Шепелев Алексей Иванович**, аспирант, заместитель начальника отдела Государственного научно-производственного ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». Тел: (846) 335-18-12. E-mail: [uran\\_74@mail.ru](mailto:uran_74@mail.ru). Область научных интересов: тепломассообмен, термодинамика.

**Biruk Vladimir Vasilevich**, doctor of engineering science, professor of the department of thermotechnics and heat engines of Samara State Aerospace University. Phone: 335-18-12, E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Area of research: Thermodynamics, teplotmassoobmen.

**Nikolaeva Olga Nikolaevna**, group director of «Progress» Design Bureau, Samara. Phone: 846) 335-18-12. E-mail: [Teplotex\\_ssau@bk.ru](mailto:Teplotex_ssau@bk.ru). Area of research: Thermodynamics, teplotmassoobmen.

**Shepelev Aleksei Ivanovich**, post-graduate student, deputy group director of «Progress» Design Bureau, Samara. Phone: (846) 335-18-12. E-mail: [uran\\_74@mail.ru](mailto:uran_74@mail.ru). Area of research: Thermodynamics, teplotmassoobmen.