

УДК 536.04

ПРОЦЕСС ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА НА ПОВЕРХНОСТИ КРИОГЕННЫХ БАКОВ

© 2008 В. В. Бирюк¹, А. И. Шепелев²¹Самарский государственный аэрокосмический университет,²Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс»

Рассмотрен процесс образования льда на стенках криогенных баков ракет-носителей (РН), построена расчетная модель образования льда из воды, попавшей на холодную стенку бака.

Криогенный бак, ракета-носитель, предстартовая подготовка, дождь, намерзание влаги, образование льда, расчетная модель, экспериментальное исследование

Образование льда на криогенных поверхностях ракеты-носителя (баков, трубопроводов) является весьма опасным процессом, приводящим не только к увеличению взлетного веса РН, но и способным вызвать аварийную ситуацию.

Так, на космодроме "Байконур" во время заправки РН над местом старта прошел сильный дождь, резко возросла влажность воздуха. В результате на стенках баков окислителя РН стал образовываться лед. Кроме того, при наборе стартовой готовности прошел отбой, и согласно действующей документации изделие было переведено в режим 24-х часовой стоянки на стартовом комплексе. В процессе стоянки слой льда на "холодных" баках продолжал нарастать и к моменту пуска составил 50...60 мм.

Во время старта РН отваливающиеся куски льда перебили один из кабелей, по которому передаются управляющие команды от центрального блока на боковой, из-за чего в течение всего полета двигатель бокового блока работал в неуправляемом режиме.

Полет проходил нештатно, и только благодаря высокой надежности РН удалось избежать аварии.

Ещё более остро проблема льдообразования встает при осуществлении пусков РН с космодромов с тропическим климатом, где среднегодовая влажность воздуха составляет 98% и нередко тропические ливни. И если в настоящее время процессом льдообразования на криогенных трубопроводах РН можно управлять путем подачи в отсеки воздуха с необходимой влажностью, то на поверхностях криогенных баков этот процесс протекает бесконтрольно.

Очевидно, что наибольший эффект на образование льда будет оказывать дождевая вода, попавшая на холодную стенку бака. Для упрощения расчетов рассмотрим только попадание дождя и не будем учитывать влагу, конденсированную на поверхности бака из воздуха.

Схема образования льда приведена на рис. 1.

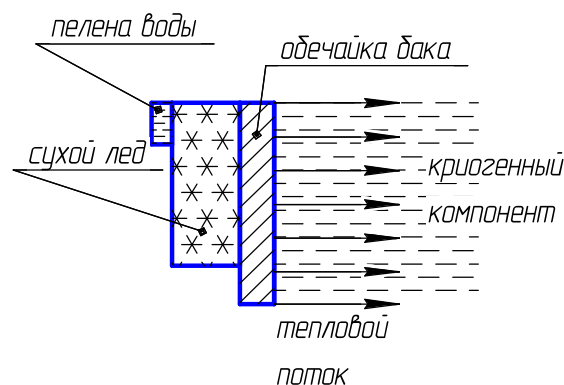


Рис. 1. Расчетная схема образования льда

Математическая модель образования льда на стенке криогенного бака

Рассмотрим процесс образования льда на криогенной стенке бака в результате попадания на ее поверхность воды. Для упрощения построения математической модели примем, что бак имеет цилиндрическую форму, вода движется по поверхности бака в виде равномерно распределенной по периметру пелены, при этом толщина водяной пленки постоянна, скорость движения пленки равномерна и направлена вертикально вниз. Тогда получим, что при равномерном движении пленки воды сила трения - F_{mp} уравнивается весом элементарного объема - $M \cdot g$. Сила трения $F_{mp} = \mu \cdot \frac{\Delta U}{\delta} \cdot s$, $\Delta U = U_{max}$, где U_{max} - максимальное значение скорости пленки - скорость на внешней границе пленки, δ - толщина пленки воды, μ - динамическая вязкость воды, s - площадь элементарного объема пленки воды, соприкасающейся с поверхностью бака. Если предположить, что значение скорости поперек пелены воды меняется линейно, то справедливо

$$M \cdot g = \mu \cdot \frac{\Delta U}{\delta} \cdot s$$

или

$$\rho \cdot \delta \cdot g = \mu \cdot \frac{\Delta U}{\delta} \cdot s,$$

где ρ - плотность воды.

Тогда толщина пленки воды будет определяться следующим образом:

$$\delta^2 = \frac{\mu \cdot \Delta U}{g \cdot \rho}. \quad (1)$$

Среднемассовая скорость равна $U_{cp} = 0,5 \cdot \Delta U$, а расход воды по стенке бака:

$$m = U_{cp} \cdot \rho \cdot \delta \cdot \pi \cdot D = 0,5 \cdot \Delta U \cdot \rho \cdot \delta \cdot \pi \cdot D, \quad (2)$$

где D - диаметр бака.

Используя (1) и (2), получим значения толщины пленки воды, движущейся равномерно вдоль вертикальной поверхности, в

зависимости от расхода воды по стенке бака (интенсивности дождя) и диаметра бака:

$$\delta^3 = \frac{2 \cdot \mu \cdot m}{g \cdot \rho^2 \cdot \pi \cdot D}. \quad (3)$$

Если учесть, что расход воды по стенке бака связан с интенсивностью дождя

$$m = D \cdot L_T \cdot H \cdot \cos \alpha \cdot \rho / \tau,$$

где L_T - высота теплых конструкций бака, H - интенсивность дождя за время τ , α - угол наклона дождя к горизонту, то несложно заметить, что при постоянной интенсивности дождя увеличение угла падения дождя приводит к уменьшению расхода воды, стекающей с поверхности бака, а при горизонтальном движении каплей дождя расход будет максимальным.

В предположении о стекающей пленке дождевой воды постоянного расхода правильно рассматривать стадию остывания пленки при ее движении по холодной поверхности криогенного бака до температуры замерзания воды, возможно даже несколько ниже нуля градусов. Для оценки времени остывания дождевой воды, стекающей по поверхности криогенного бака, до температуры замерзания использовались представления и соотношения, сформированные при изучении теплообмена жидкости, движущейся в трубе постоянного сечения.

Поскольку температура воды дождя может достигать 35°C, то целесообразно рассмотреть изменение температуры воды при ее течении вдоль стенки, имеющей постоянную температуру криогенного бака. Используя уравнение теплового баланса и обозначения $\theta = t - t_w$, $A = \alpha \cdot \pi \cdot D / (m \cdot C_p)$, получаем формулу для определения средней разницы температуры пленки и стенки:

$$\Theta = t - t_w = (t - t_w)_0 e^{-Ax}, \quad (4)$$

где t - средняя температура пленки воды, t_w - постоянная температура стенки бака, $\theta_0 = (t - t_w)_0$ - начальный температурный напор между водой и стенкой,

α – коэффициент теплоотдачи жидкости, постоянен по длине, значение определяется выражением $\alpha = \lambda/\delta$,

πD – периметр боковой поверхности равномерной пленки вокруг бака при вертикальном дожде и $0,5 \pi D$ при наклонном дожде,

m – расход дождевой воды,

C_p – теплоемкость воды,

x – координата, совпадающая по направлению со скоростью движения пленки воды.

Анализ показывает, что время и путь остывания воды до замерзания и до переохлажденного состояния тем больше, чем больше расход воды. Для представляющих интерес значений расхода дождевой воды ($m = 0,1235$ кг/с) время остывания до температуры замерзания не превышает $0,1 \dots 0,5$ с, а длина пути остывания до этой температуры для расхода пленки $0,15$ кг/с не превышает 5 мм и достигает 90 мм при увеличении расхода воды до $0,3$ кг/с.

Предполагается, что остывшая до температуры замерзания или даже переохлажденная пленка воды становится неподвижной и замерзает.

Для оценки времени замерзания слоя воды использована формула для полного затвердевания пластины толщиной 2δ , противоположные поверхности которой охлаждаются и поддерживаются при температуре $-T_w$, меньшей температуры замерзания T_z .

Время полного замерзания толщины δ равно

$$\tau = \frac{\delta^2 \cdot (r \cdot \rho_g + 0,5(C_p \cdot \rho)_{\text{лед}})}{2 \cdot \lambda_{\text{лед}} \cdot (T_z - T_w)} \quad (5)$$

Время замерзания на стенке с температурой до -25°C пленки воды размером до $0,4$ мм, охлажденной до нуля градусов, не превышает $0,8$ с. Эти оценки показывают, что при температуре стенки до -25°C пленка воды замерзает полностью за время, меньшее 1 с.

Таким образом, можно считать, что при движении пленки воды по поверхности криогенного бака при температуре стенки и льда до -20°C могут реализоваться условия полного замерзания пленки воды толщиной

до $0,38$ мм, значения соответствующего максимальному значению пленки при расходе $m = 0,1235$ кг/с. Режим полного замерзания текущей пленки воды считается режимом образования «сухого» льда на криогенном баке.

При полном замерзании текущей пленки воды образуется так называемый «сухой» лед, предельная толщина которого определяется в основном толщиной пленки воды. Для оценки предельной толщины сухого льда и времени его образования на поверхности бака использовано условие квазистационарного теплообмена, которое увязывает тепловой поток от замерзающей пленки воды толщиной δ на стенке бака с изменяющимися при увеличении толщины слоя льда условиями теплообмена текущей пленки воды со слоем льда и, в конечном счете, с кислородом. Для простоты оценок предположим, что температура на внутренней поверхности бака не изменяется и равна -183°C , а температура движущейся воды равна нулю градусов. Определяется предельная толщина «сухого» льда $\delta_{\text{СУХлед}}$, которая позволяет пропустить тепловой поток при замерзании пленки толщиной δ дождевой воды.

Тепловой поток при предельной толщине «сухого» льда равен:

$$q = \frac{T_z - T_{w02}}{\left(\frac{\delta_{\text{СУХлед}}}{\lambda_{\text{л}}} + \frac{\delta_{\text{АМг}}}{\lambda_{\text{АМг}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{O}_2}} \right)}$$

Количество тепла при замерзании пленки воды толщиной δ в единицу времени на единицу поверхности бака равно

$$q = \frac{Q}{\tau \cdot F} = \frac{m \cdot r}{F} = \frac{\delta \cdot x \cdot \Pi \cdot \rho \cdot r}{\tau \cdot \Pi \cdot x} = \frac{\delta \cdot \rho \cdot r}{\tau}$$

где δ - толщина пленки замерзающей воды,

x - длина замерзающей пленки воды,

Π - периметр замерзающей пленки воды,

ρ - плотность воды,

r - теплота замерзания,

$\lambda_{\text{л-АМГ}}$ - теплопроводность льда (средняя по температуре) и АМГб,

α_{O_2} - коэффициент теплоотдачи к кислороду,

τ - время движения пленки на длину x - 1 с,

F - теплообменная площадь пленки,

$$F = x\Pi,$$

T_3 температура замерзания воды,

T_{wO2} - температура внутренней стенки бака,

T_w - температура внешней стенки бака,

$\delta_{сух\text{лед}}$ - предельная толщина «сухого» льда, при которой режим полного замерзания пленки дождевой воды сменяется ее частичным замерзанием, характеризуемым коэффициентом K . При квазистационарных условиях передачи тепла от замерзающей воды внутрь бака значение потока тепла от замерзающей воды равно

$$q = \frac{\delta_6 \cdot \rho \cdot r}{\tau} = \frac{T_3 - T_{wO2}}{\left(\frac{\delta_{сух\text{лед}}}{\lambda_l} + \frac{\delta_{AMg}}{\lambda_{AMg}} + \frac{1}{\alpha_{O2}} \right)}. \quad (6)$$

Из выражения (6) получим формулу для расчета толщины сухого льда:

$$\delta_{сух\text{лед}} = \lambda_l \cdot \left(\frac{T_3 - T_{wO2}}{q_6} - \frac{\delta_{AMg}}{\lambda_{AMg}} - \frac{1}{\alpha_{O2}} \right).$$

Результаты расчетов позволяют считать, что при значении расхода воды 0,125кг/с самое интенсивное нарастание льда в режиме полного застывания воды происходит за достаточно короткое время - менее одной минуты, толщина сухого льда составляет 9,6мм, длина поверхности бака покрытая льдом не превышает 82мм. Если по каким - либо причинам при заданном расходе воды толщина пленки воды увеличивается (скорость воды падает), то, соответственно, возрастает тепловой поток, отдаваемый водой при замерзании, и укорачивается длина пленки воды, замерзающей в единицу времени.

Таким образом, показано, что режим полного замерзания пленки воды - образования «сухого» льда, характеризуется длительностью и предельной толщиной «сухого» льда, которые зависят от расхода воды, набегающей на поверхность криогенного бака, от угла наклона дождя, толщины образующейся пелены воды.

Кроме того, важно отметить, что из-за малых скоростей пленки воды образование «сухого» льда происходит на поверхности бака, длина которой ограничена длиной пу-

ти, которую проходит пелена до своего замерзания. В принятой схематизации процессов остывания и замерзания длина поверхности образующегося льда определяется средней скоростью пелены дождевой воды.

Дальнейшее нарастание льда над поверхностью «сухого» льда происходит в режиме частичного замерзания протекающей пленки воды.

После того, как завершится процесс образования сухого льда на поверхности бака на довольно ограниченной поверхности его, определяемой его гидравлическими параметрами и не превышающей длины, равной произведению скорости пелены воды и времени ее движения, начинается процесс частичного образования льда из пленки воды, характеризуемый коэффициентом K_i .

Особенностью этого процесса является образование льда из части пелены воды, соответствующей непрерывно уменьшающемуся потоку тепла, пропускаемому возрастающим слоем льда. Значение K_i равно отношению текущего значения прироста слоя льда $\delta_{\text{льда}}$ к постоянному значению толщины пленки воды δ :

$$K_i = \frac{\delta_{\text{льда}}}{\delta}. \quad (7)$$

С увеличением толщины льда на поверхности тепловое сопротивление возрастает и уменьшается значение теплового потока, пропускаемого рассматриваемой тепловой системой внутрь бака.

В предположении о квазистационарности процесса теплопередачи при наращивании толщины льда можно произвести оценки изменения значения коэффициента частичного замерзания пленки воды K_i при изменении δ_i - текущей толщины льда. Значение коэффициента K_i определяется как отношение теплового потока, определяемого тепловым сопротивлением рассматриваемой системы (слой льда - стенка АМгб - кислород), в основном нарастающим слоем льда, к значению теплового потока от замерзания всей пленки воды - на режиме образования «сухого» льда. Следовательно, предполагается, что при толщине льда δ_i из-за увеличения теплового сопротивления слоя льда замерзнет часть пленки воды толщиной δ , равная K_i :

$$K_i = \frac{\frac{\delta_{\text{СУХлед}}}{\lambda_{\text{л}}} + \frac{\delta_{\text{АМз}}}{\lambda_{\text{АМз}}}}{\frac{\delta_i}{\lambda_{\text{л}}} + \frac{\delta_{\text{АМз}}}{\lambda_{\text{АМз}}}},$$

следовательно, определяется

$$K_i = f(\delta_i). \quad (8)$$

По формуле (8) вычисляются значения K_i от 1 до 0,1 при соответствующих значениях толщины льда. Тепловое сопротивление стенки бака не учитывается для простоты оценок, поскольку при реализуемых значениях тепловых потоков погрешность такого допущения невелика.

Время нарастания льда при частичном намерзании определяется значением коэффициента K_i , поскольку каждый слой воды толщиной δ , ежесекундно протекающий по поверхности льда, доля которого, равная K_i , остается на поверхности льда. Поэтому при толщине льда δ_i , превышающей $\delta_{\text{СУХлед}}$ с использованием зависимости (8) определяется время $\Delta\tau_i$ нарастания толщины льда ($\delta_i - \delta_{i-1}$):

$$\Delta\tau_i = \frac{(\delta_i - \delta_{i-1})}{\delta \cdot 0,5 \cdot (K_i + K_{i-1})}. \quad (9)$$

Значение $0,5(K_i - K_{i-1})$ является средним значением коэффициента K на участке льда ($\delta_i - \delta_{i-1}$). По изменению толщины льда δ_i определяется масса льда при соответствующей длине поверхности льда L_i за время замерзания, при этом

$$L_i = U_{\text{сп}} \cdot \tau.$$

Используя полученные отношения, можно сделать вывод, что за один час непрерывного дождя на баке окислителя длиной 1,65 м и интенсивности дождя 68 мм/ч толщина льда может достигать 111 мм на длине $L_i = 0,082$ м. Масса льда в этом случае составляет 76,0 кг. Масса на 1 погонный метр поверхности льда по смачиваемому периметру бака 926,8 кг/м, общий коэффи-

циент замерзания воды на этой длине - 0,171. На всей длине бака общий коэффициент замерзания равен единице.

Анализ полученных результатов показывает, что масса льда за 1 час непрерывного дождя составляет величину:

$$\frac{M}{Li} = \frac{Li \cdot \delta_{\text{льда}} \cdot P_{\text{бака}} \cdot \rho_{\text{льда}}}{Li}. \quad (10)$$

Следовательно, поскольку толщина льда за 1 час величина практически постоянная, то значение массы льда на погонный метр в час зависит только от смачиваемого периметра бака.

Общий коэффициент замерзания воды на рассматриваемой длине бака за 1 час определяется выражением

$$\frac{M_{\text{льда}}}{m_{\text{воды}} \cdot \tau} = \frac{\delta_{\text{льда}}}{\delta_{\text{воды}} \cdot 3600} \quad (11)$$

и зависит только от толщины пелены воды.

Оценки показывают, что общая масса льда на всей поверхности бака практически будет равна массе стекающей за час воды, то есть вся вода может замерзнуть на поверхности бака.

Поскольку при вертикальном падении дождя и при падении наклонного дождя, стекающего с длиной (10,2 м) «теплой» поверхности на довольно короткую «холодную» поверхность (1,65 м), образование «сухого» льда происходит на части поверхности, на которую успевает распространиться пелена воды в соответствии с ее гидравликой, расходом воды и поверхностью, на которую падает дождь, то при частичном намерзании льда незамерзшая вода начинает натекать на поверхности бака, расположенные ниже, и замерзать. Режимы ее замерзания будут повторять вышерассмотренные режимы: образование «сухого» льда и частичное замерзание пелены воды. Данная математическая модель позволяет спрогнозировать толщину и соответственно массу льда, образовавшегося на поверхности криогенного бака в зависимости от интенсивности и продолжительности осадков, геометрических характеристик бака.

Библиографический список

1. Анфимов Н.А. Теплопередача при низких температурах.- М.: Издательство иностранной литературы, 1977.
2. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей.- М.: Наука, 1972.

References

1. Anfimov N.A. Low-temperature Heat Transfer. Moscow: "Foreign Literature Publishing House", 1977.
2. Vargaftik N.B. Thermophysical Properties of Liquids and Gases Manual. Moscow: "Nauka", 1972.

3. Луканин В.Н. Теплотехника. -М.: Высшая школа, 2006.

4. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. - М.: Энергоатомиздат, 1984.

3. Lukanin V.N. Heat Engineering. Moscow: "Visshaya Shkola", 2006.

4. Rivkin S.L. and Aleksandrov A.A. Water and Water Steam Thermodynamic Properties Manual. Moscow: "Jenergoatomizdat", 1984.

THE PROCESS OF ICE FORMATION ON THE SURFACE OF CRYOGENIC TANKS

© 2008 V. V. Biryuk¹, A. I. Shepelev²

¹Samara State Aerospace University

²State Research and Production Space Rocket Center «TsSKB-Progress»

The process of ice formation on walls of cryogenic tanks of space rockets is observed, built the computational model of an ice formation from the water which has fallen on a cold wall of a tank.

Cryogenic tank, launchers, start, preparation, rain, education ice, pilotstudy

Информация об авторах

Бирюк Владимир Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. (846) 335-18-12. E-mail: teplotex_ssau@bk.ru. Область научных интересов: тепло-массообмен, термодинамика.

Шепелев Алексей Иванович, аспирант, заместитель начальника отдела Государственного научно-производственного ракетно-космического центра «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: uran_74@mail.ru. Область научных интересов: тепло-массообмен, термодинамика.

Biryuk Vladimir Vasiljevich, Doctor of Engineering Science, professor, of the Heat Engineering department of the Samara State Aerospace University. Phone: (846) 335-18-12. E-mail: teplotex_ssau@bk.ru Area of research: teplomassoobmen, thermodynamics.

Shepelev Aleksei Ivanovich, deputy head of the State Research and Production Space Rocket Center «TsSKB-Progress» department, postgraduate. E-mail – uran_74@mail.ru. Area of research: teplomassoobmen, thermodynamics.