

УДК 629.7.085; 629.764.7

### Математическая модель процесса температурной подготовки компонентов жидкого ракетного топлива с использованием теплообменника и теплоносителя, охлаждаемого жидким азотом

Павлов С. К.<sup>1,\*</sup>, Чугунков В. В.<sup>1</sup>

\*[Pavlov.s.k@yandex.ru](mailto:Pavlov.s.k@yandex.ru)

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

---

Одной из актуальных проблем настоящего времени является подготовка компонентов жидкого ракетного топлива (КЖРТ) по температуре, в частности охлаждение. Эту проблему можно решить различными способами. Одной из перспективных технологий охлаждения ракетного топлива является охлаждение жидким азотом, получаемым в виде побочного продукта при производстве жидкого кислорода на кислородно-азотных заводах космодромов. В статье обоснован вывод о необходимости определения параметров процесса охлаждения (КЖРТ) за счет теплообмена топлива в теплообменнике с теплоносителем, охлаждаемым жидким азотом при контактном теплообмене в резервуаре теплоносителя. Математическая модель описывает поставленную задачу в предположении о квазистационарности теплообмена КЖРТ и теплоносителя между собой в теплообменнике и с окружающей средой через стенки емкостей и трубопроводов контуров циркуляции. Полученные зависимости позволяют проводить расчеты изменения температур топлива и теплоносителя, времени охлаждения и затрат жидкого азота в зависимости от параметров процесса: расхода жидкого азота, начальной температуры теплоносителя, характеристик насосов, тепловой изоляции емкостей и трубопроводов контуров циркуляции КЖРТ и теплоносителя.

Применение разработанной методики при создании подобных систем позволяет определять рациональные конструктивные и режимные параметры системы охлаждения топлива для проведения операции охлаждения КЖРТ до требуемой температуры при наименьших затратах жидкого азота.

**Ключевые слова:** жидкий азот, стартовое оборудование, теплообменник, охлаждение ракетного топлива

---

## Введение

Температурная подготовка компонентов жидкого ракетного топлива (КЖРТ) перед заправкой их в топливные баки ракет, разгонных блоков и космических аппаратов является необходимой операцией, выполняемой технологическим оборудованием наземных комплексов в период предстартовой подготовки ракет космического назначения (РКН).

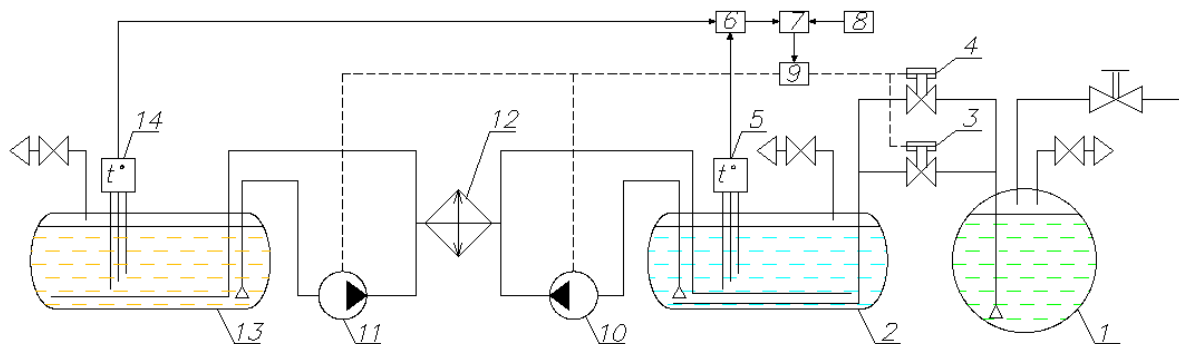
Как правило, требуется проводить охлаждение топлива для увеличения его плотности и компенсации нагрева в ходе операций предстартовой подготовки РКН [1]. Для охлаждения топлива применяются топливные системы обеспечения температурного режима (ТСОТР) с различными принципами действия и видами теплоносителей.

Одной из перспективных технологий охлаждения ракетного топлива является охлаждение жидким азотом, получаемым в виде побочного продукта при производстве жидкого кислорода на кислородно-азотных заводах космодромов. Возможно применение различных схем охлаждения КЖРТ посредством теплообмена с жидким азотом [3,4]: при непосредственном контакте топлива с диспергированным жидким азотом, при охлаждении топлива кипящим жидким азотом в теплообменнике, а также за счет теплообмена топлива в теплообменнике с теплоносителем, охлаждаемым жидким азотом при контактном теплообмене в резервуаре теплоносителя.

Охлаждение КЖРТ жидким азотом при контактном теплообмене приводит к насыщению топлива газообразным азотом, что требует проведения последующей операции дегазации компонента с контролем в нем остаточного газосодержания. При этом отводимый после теплообмена с топливом газообразный азот содержит пары топлива, которые должны подвергаться нейтрализации в случае, когда КЖРТ являются токсичными средами.

Охлаждение топлива кипящим жидким азотом в теплообменнике из-за низкой температуры кипения жидкого азота может приводить к обледенению КЖРТ на внутренней поверхности теплообменного аппарата и ухудшению теплообмена со стороны КЖРТ. При этом отводимый из теплообменника газообразный азот имеет значительную недорекуперацию, что приводит к ухудшению эффективности функционирования ТСОТР.

Охлаждение топлива в теплообменнике теплоносителем, охлаждаемым жидким азотом при контактном теплообмене в резервуаре теплоносителя, не имеет недостатков, присущих описанным выше процессам охлаждения КЖРТ с применением жидкого азота. ТСОТР в этом случае состоит из двух рабочих емкостей с КЖРТ и теплоносителем, связанными контурами циркуляции топлива и теплоносителя с теплообменником, и азотной системы охлаждения теплоносителя (рис.1).



**Рис.1.** Схема системы охлаждения топлива теплоносителем, охлаждаемым жидким азотом: 1 – емкость с жидким азотом; 2 – емкость с теплоносителем; 3 – клапан малого расхода; 4 – клапан большого расхода; 5,14 – датчики температуры; 6 – преобразователь температуры; 7 – блок сравнения; 8 – задатчик температуры; 9 – командное устройство; 10, 11 – центробежные насосы; 12 – теплообменный аппарат; 13 – емкость с КЖРТ.

Для проведения операции охлаждения КЖРТ в емкости 1 с жидким азотом создается избыточное давление за счет подачи газообразного азота в газовое пространство емкости 1. Далее при открытии клапанов 3 и 4 осуществляется выдавливание жидкого азота из емкости 1 в барботажный аппарат емкости теплоносителя 2, что приводит к охлаждению теплоносителя. При включении насосов 10 и 11 осуществляется циркуляция охлажденного теплоносителя и КЖРТ через теплообменник 12, за счет теплообмена в котором осуществляется охлаждение топлива до требуемой температуры.

Для определения параметров процесса охлаждения КЖРТ за счет теплообмена топлива в теплообменнике с теплоносителем, охлаждаемым жидким азотом при контактном теплообмене в резервуаре теплоносителя, требуется составление математической модели данного процесса и методики расчета, позволяющих определить конструктивные параметры системы охлаждения топлива и необходимых запасов жидкого азота для проведения операции охлаждения КЖРТ до требуемой температуры.

## **1. Обзор источников**

Обсуждение проблем реализации и результатов исследования процессов охлаждения с применением криопродуктов, в том числе и жидкого азота приведены в работах [1-10].

В статьях [1,2] даны отдельные характеристики и схемное построение систем термостатирования в составе наземного технологического оборудования «Рокот» на космодроме «Плесецк» ТСОТР, в которой реализовано охлаждение КЖРТ за счет теплообмена топлива в теплообменнике с теплоносителем, охлаждаемым жидким азотом при контактном теплообмене в резервуаре теплоносителя.

В работах [3] и [4] приведены результаты экспериментальных исследований контактного теплообмена воды с жидким азотом. В [3] предложена модель процесса тепло-массообмена, включающая три зоны: зону струйного истечения криогенной жидкости, зону дробления и испарения капель и зону нагрева пузырей азота, представлены результаты расчетов высоты нагрева азота в зависимости от температуры газа и среднего диаметра пузырей, а также экспериментальные данные по распределению температуры азотного потока по высоте.

Вопросы технологии охлаждения и обезвоживания при непосредственном контакте ракетного топлива с диспергированным жидким азотом применительно к КЖРТ «нафтил» рассмотрены в публикациях [1, 5-8].

Работы [9, 10] посвящены вопросам определения рациональных параметров охлаждения топлива кипящим жидким азотом в рекуперативных теплообменниках с целью снижения затрат жидкого азота при охлаждении КЖРТ.

Таким образом, для определения параметров процесса охлаждения КЖРТ за счет теплообмена топлива в теплообменнике с теплоносителем, охлаждаемым жидким азотом при контактном теплообмене в резервуаре теплоносителя, позволяющих определить рациональные условия охлаждения топлива до заданной температуры, требуются проведение исследований в данном направлении.

## 2. Математическая модель

Уравнения, описывающие временные изменения температуры в емкостях с КЖРТ и теплоносителем при функционировании системы охлаждения в предположении о равенстве температур конструкций емкостей соответствующим температурам жидкостей, находящихся в них, представлены в виде уравнений теплового баланса:

$$\begin{cases} Q_{11} + Q_{12} + Q_{13} + Q_{14} - Q_{15} + Q_{16} = (m_p c_p + m_{e1} c_{e1} + \sum_{i=1}^{n_1} m_{e1i} c_{e1i}) \frac{dT_1}{d\tau} \\ Q_{21} + Q_{22} + Q_{23} + Q_{24} - Q_{25} + Q_{26} = (m_T c_T + m_{e2} c_{e2} + \sum_{i=1}^{n_2} m_{e2i} c_{e2i}) \frac{dT_2}{d\tau} \end{cases}, \quad (1)$$

где  $Q_{11}$  – тепловой поток к емкости с КЖРТ, подводимый из окружающей среды через стенки емкости;  $Q_{12}$  – тепловой поток к емкости с КЖРТ, подводимый из окружающей среды через опоры емкости;  $Q_{13}$  – тепловой поток к КЖРТ, подводимый из окружающей среды через стенки трубопроводов контура циркуляции топлива через теплообменник;  $Q_{14}$  – тепловой поток к КЖРТ, подводимый из окружающей среды через наружные поверхности теплообменного аппарата;  $Q_{15}$  – тепловой поток, отводимый от компонента в теплообменном аппарате за счет теплообмена с теплоносителем;  $Q_{16}$  – тепловой поток к топливу от насоса контура циркуляции;  $Q_{21}$  – тепловой поток к емкости с теплоносителем, подводимый из окружающей среды через стенки емкости;  $Q_{22}$  – тепловой поток к емкости с теплоносителем, подводимый из окружающей среды через опоры емкости;  $Q_{23}$  – тепловой поток к теплоносителю, подводимый из окружающей среды через стенки трубопроводов контура циркуляции теплоносителя через теплообменник;  $Q_{24}$  – тепловой поток, подводимый к теплоносителю от компонента в теплообменнике;  $Q_{25}$  – тепловой поток, отводимый от теплоносителя диспергированным жидким азотом за счет фазового перехода последнего, а также изменения энтальпии газообразного азота;  $Q_{26}$  – тепловой поток к теплоносителю.

лю от насоса контура циркуляции;  $m_1, c_1$ —масса и удельная теплоемкость КЖРТ;  $m_{e1}, c_{e1}$ —масса и удельная теплоемкость емкости КЖРТ;  $m_{1i}, c_{1i}$ —масса и удельная теплоемкость  $i$ -ого элемента контура циркуляции КЖРТ через теплообменник;  $n_1$  – количество элементов в контуре циркуляции КЖРТ через теплообменник;  $m_2, c_2$ —масса и удельная теплоемкость теплоносителя;  $m_{e2}, c_{e2}$ —масса и удельная теплоемкость емкости теплоносителя;  $m_{2i}, c_{2i}$ —масса и удельная теплоемкость  $i$ -ого элемента контура циркуляции теплоносителя через теплообменник;  $n_2$ —количество элементов в контуре циркуляции теплоносителя через теплообменник;  $T_1$  – температура компонента;  $T_2$  – температура теплоносителя.

В предположении о квазистационарности теплообмена КЖРТ и теплоносителя между собой в теплообменнике и с окружающей средой через стенки емкостей и трубопроводов контуров циркуляции, тепловые потоки  $Q_{11} \dots Q_{14}, Q_{21} \dots Q_{23}$  и  $Q_{15}, Q_{24}$  могут быть представлены уравнениями

$$Q_{1i} = k_{1i} F_{1i} (T_H - T_1), \quad (2)$$

$$Q_{2i} = k_{2i} F_{2i} (T_H - T_2), \quad (3)$$

$$Q_{15} = k_{15} F_{15} (T_1 - T_2), \quad (4)$$

$$Q_{24} = k_{24} F_{24} (T_1 - T_2) = Q_{15}, \quad (5)$$

где  $k_{1i}, F_{1i}$ - коэффициенты и площади поверхностей теплопередачи при теплообмене КЖРТ с окружающей средой (через стенки емкости, опорных конструкций, трубопроводов контура охлаждения и теплообменника);  $T_H$  – температура окружающей среды;  $k_{2i}, F_{2i}$ - коэффициенты и площади поверхностей теплопередачи при теплообмене теплоносителя с окружающей средой (через стенки емкости, опорных конструкций и трубопроводов контура циркуляции теплоносителя);  $k_{15}(k_{24}), F_{15}(F_{24})$ - коэффициент и площадь поверхности теплопередачи теплообменника.

Тепловые потоки к КЖРТ и теплоносителю от насосов контуров циркуляции их через теплообменник могут быть представлены соотношениями

$$Q_{16} = \frac{G_1 \Delta P_1}{\rho_1 \eta_{n1}}, \quad (6)$$

$$Q_{26} = \frac{G_2 \Delta P_2}{\rho_2 \eta_{n2}}, \quad (7)$$

где  $G_1, G_2$  – массовые расходы КЖРТ и теплоносителя в контурах их циркуляции через теплообменник;  $\Delta P_1, \Delta P_2$  – потери давлений КЖРТ и теплоносителя в контурах их цирку-

ляции через теплообменник;  $\rho_1, \rho_2$  – плотности КЖРТ и теплоносителя;  $\eta_{н1}, \eta_{н2}$  – КПД насосов контуров циркуляции КЖРТ и теплоносителя через теплообменник.

В следствие большого температурного напора между теплоносителем и жидким азотом, происходит фазовый переход последнего, с последующим изменением энтальпии газообразной фазы, и как следствие прогрев газообразного азота до температуры теплоносителя. Таким образом тепловой поток, отводимый от теплоносителя за счет контактного теплообмена с диспергированным жидким азотом, определяется зависимостью

$$Q_{25} = G_a [r_a + c_a (T_2 - T_{ka})], \quad (8)$$

где  $G_a$  – массовый расход жидкого азота, подаваемого на охлаждение теплоносителя;  $r_a$ ,  $T_{ka}$  – удельная теплота и температура кипения жидкого азота при давлении в емкости с теплоносителем;  $c_a$  – удельная теплоемкость газообразного азота.

Подстановка зависимостей (2) - (8) в систему уравнений (1) приводит к следующей системе дифференциальных уравнений первого порядка

$$\begin{cases} \frac{dT_1}{d\tau} + \alpha_1 T_1 - \beta_1 T_2 = \gamma_1 \\ \frac{dT_2}{d\tau} + \alpha_2 T_2 - \beta_2 T_1 = \gamma_2 \end{cases} \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{\sum_{i=1}^5 k_{1i} F_{1i}}{m_1 c_1 (1 + A_1)} & \beta_1 &= \frac{k_{15} F_{15}}{m_1 c_1 (1 + A_1)} \\ \gamma_1 &= \frac{\frac{G_1 \Delta P_1}{\rho_1 \eta_{H1}} + T_H \sum_{i=1}^4 k_{1i} F_{1i}}{m_1 c_1 (1 + A_1)} & \alpha_2 &= \frac{-G_a c_a + \sum_{i=1}^4 k_{2i} F_{2i}}{m_2 c_2 (1 + A_2)} \\ \beta_2 &= \frac{k_{15} F_{15}}{m_2 c_2 (1 + A_2)} & \gamma_2 &= \frac{\frac{G_2 \Delta P_2}{\rho_2 \eta_{H2}} - G_a (r_a + c_a T_{ka}) + T_H \sum_{i=1}^3 k_{2i} F_{2i}}{m_2 c_2 (1 + A_2)} \\ A_1 &= \frac{m_{e1} c_{e1} + \sum_{i=1}^{n_1} m_{1i} c_{1i}}{m_1 c_1} & A_2 &= \frac{m_{e2} c_{e2} + \sum_{i=1}^{n_2} m_{2i} c_{2i}}{m_2 c_2} \end{aligned} \quad (10)$$

Учитывая небольшой диапазон изменения температуры КЖРТ (10-15 градусов) и теплоносителя (20-25 градусов), теплофизические характеристики КЖРТ и теплоносителя будут претерпевать незначительные изменения, что в свою очередь дает возможность рассчитать коэффициенты входящих в систему уравнений (9) среднеинтегральными по температурному диапазону и принять их постоянными. При постоянных значениях коэффи-

циентов, входящих в систему уравнений (9) и определяемых при средних значениях температур КЖРТ и теплоносителя, ее общее решение имеет вид:

$$T_2 = B_1 e^{\mu_1 \tau} + B_2 e^{\mu_2 \tau} + T_{2Y} \quad (11)$$

$$T_1 = B_1 \frac{(\mu_1 + \alpha_2)}{\beta_2} e^{\mu_1 \tau} + B_2 \frac{(\mu_2 + \alpha_2)}{\beta_2} e^{\mu_2 \tau} + \frac{\alpha_2 T_{2Y} - \gamma_2}{\beta_2} \quad (12)$$

где  $B_1$  и  $B_2$  – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий (при  $\tau = 0$   $T_1 = T_{1N}$ ,  $T_2 = T_{2N}$ ,  $T_{1N}$ ,  $T_{2N}$  – начальные температуры КЖРТ и теплоносителя соответственно):

$$B_2 = T_{2N} - T_{2Y} - B_1 \quad (13)$$

$$B_1 = \frac{\beta_2 T_{1N} + (T_{2N} - T_{2Y})(\mu_2 + \alpha_2) - \alpha_2 T_{2Y} + \gamma_2}{\mu_1 - \mu_2} \quad (14)$$

$\mu_1, \mu_2$  – корни характеристического уравнения

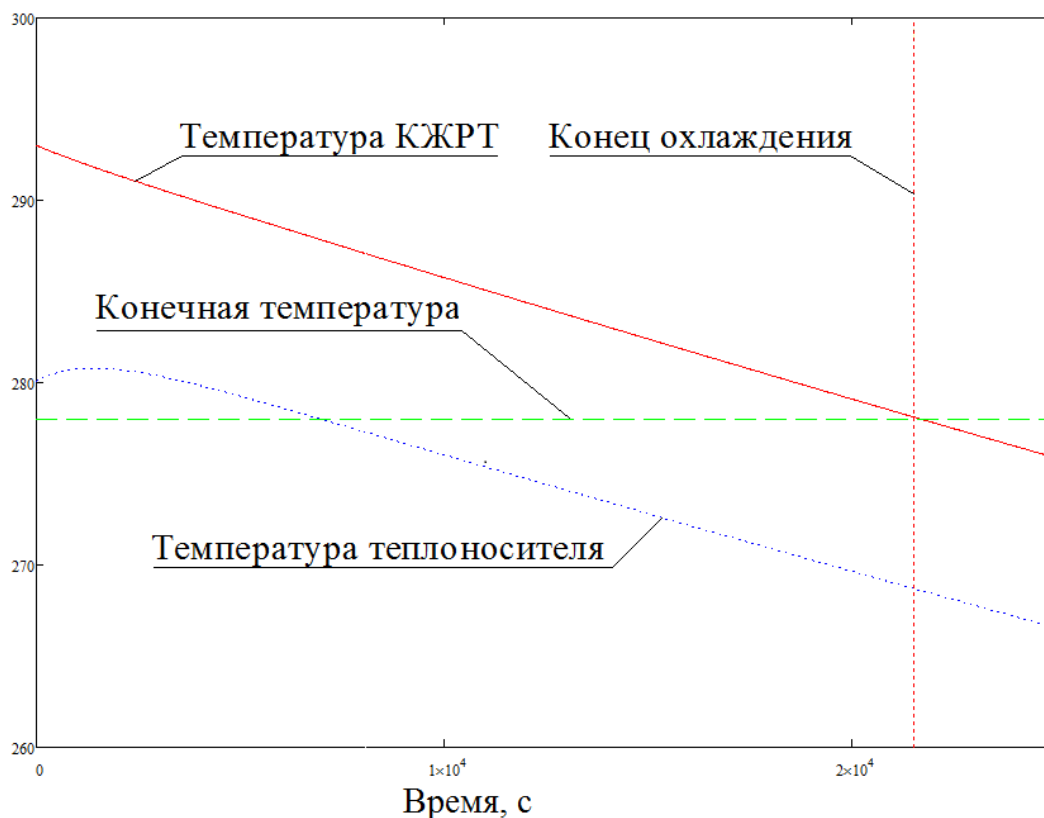
$$\mu^2 + (\alpha_1 + \alpha_2)\mu + \alpha_1\alpha_2 - \beta_1\beta_2 = 0 \quad (15)$$

$T_{2Y}$  – установившееся значение температуры теплоносителя, определяемое из системы уравнений (1) при

$$\frac{dT_1}{d\tau} = 0 \text{ и } \frac{dT_2}{d\tau} = 0$$

$$T_{2Y} = \frac{\left( k_{15} F_{15} \frac{\sum_{i=1}^4 k_{1i} F_{1i}}{5} + \sum_{i=1}^3 k_{2i} F_{2i} \right) T_H + \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^4 k_{1i} F_{1i}}{\sum_{i=1}^5 k_{1i} F_{1i}} \right) \frac{G_1 \Delta P_1}{\eta_{H1} \rho_1} - G_a (r_a - c_a T_{ka}) + \frac{G_2 \Delta P_2}{\eta_{H2} \rho_2}}{k_{15} F_{15} \frac{\sum_{i=1}^4 k_{1i} F_{1i}}{5} + \sum_{i=1}^3 k_{2i} F_{2i} + G_a c_a} \quad (16)$$

Полученные зависимости позволяют проводить расчеты изменения температур топлива и теплоносителя, времени охлаждения и затрат жидкого азота в зависимости от параметров процесса: расхода жидкого азота, начальной температуры теплоносителя, характеристик насосов, тепловой изоляции емкостей и трубопроводов контуров циркуляции КЖРТ и теплоносителя. На рис.2 приведены характерные графики изменения температур КЖРТ и теплоносителя, по которым можно определить время охлаждения.



**Рис.2.** Характерное изменение температур компонента и теплоносителя в процессе охлаждения жидким азотом.

Проведенный анализ результатов расчетов показал, что чем меньше температура теплоносителя, тем быстрее будет осуществляться охлаждение КЖРТ, однако следует отметить следующее: 1) начальная температура теплоносителя не может быть меньше температуры замерзания компонента; 2) теплоноситель необходимо предварительно охладить, что в свою очередь приведет к временным затратам и затратам азота, а это значит, что необходимо рассматривать процесс охлаждения КЖРТ совместно с предварительным охлаждением теплоносителя и учитывать этот факт при проведении оптимизации параметров системы.

В связи с этим, запишем уравнение теплового баланса для теплоносителя:

$$Q_1 + Q_2 - Q_3 = (m_T c_T + m_{e2} c_{e2} + \sum_{i=1}^{n_2} m_{e2i} c_{e2i}) \frac{dT_2}{d\tau} \quad (17)$$

где  $Q_1$  – тепловой поток к емкости с теплоносителем, подводимый из окружающей среды через стенки емкости;

$Q_2$  – тепловой поток к емкости с теплоносителем, подводимый из окружающей среды через опоры емкости;

$Q_3$  – тепловой поток, отводимый от теплоносителя диспергированным жидким азотом за счет фазового перехода последнего, а также изменения энтальпии газообразного азота.



В предположении о квазистационарности теплообмена теплоносителя с окружающей средой через стенки емкостей тепловые потоки  $Q_1 \dots Q_3$  могут быть представлены уравнениями

$$Q_1 = k_1 F_1 (T_{окр} - T_2), \quad (18)$$

$$Q_2 = k_2 F_2 (T_{окр} - T_2) \quad (19)$$

$$Q_3 = G_a [r_a + c_a (T_2 - T_{ка})] \quad (20)$$

Подстановка зависимостей (18) - (20) в уравнение (17) приводит к следующему дифференциальному уравнению первого порядка

$$\frac{dT_2}{d\tau} = \alpha_3 + \beta_3 T_2 \quad (21)$$

где

$$\alpha_3 = \frac{T_{окр} \sum_{i=1}^2 k_i F_i - G_a (r_a - c_a T_{кин})}{m_2 c_2 (1 + A_2)} \quad (22)$$

$$\beta_3 = \frac{\sum_{i=1}^2 k_i F_i - G_a c_a}{m_2 c_2 (1 + A_2)}$$

Решение уравнения (17) примет вид

$$T_2(\tau) = (T_0 - \frac{\alpha_3}{\beta_3}) e^{-\beta_3 \tau} + \frac{\alpha_3}{\beta_3} \quad (23)$$

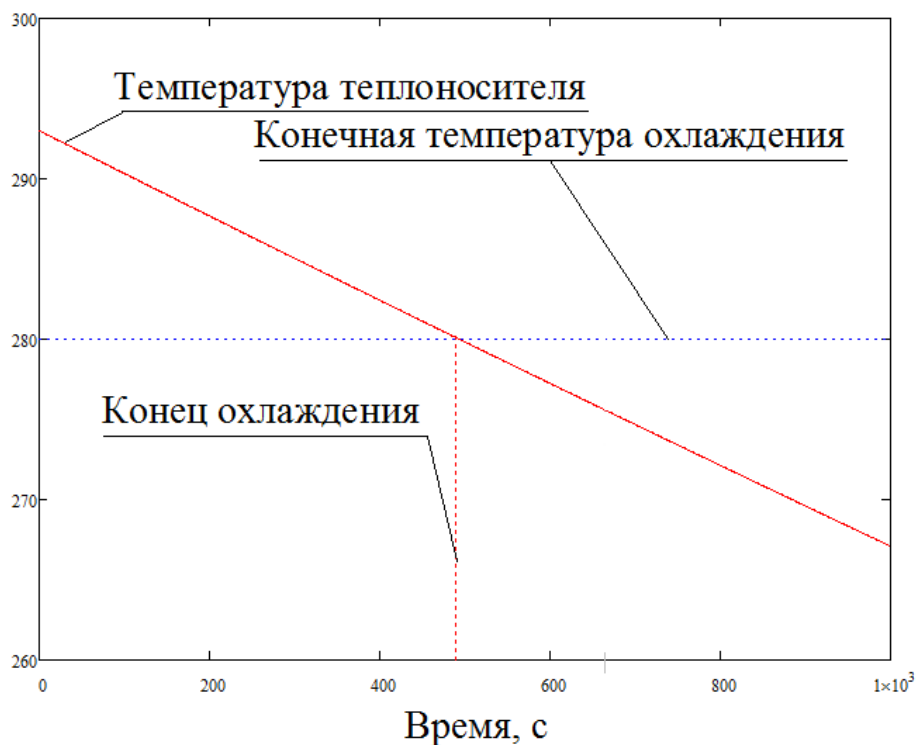
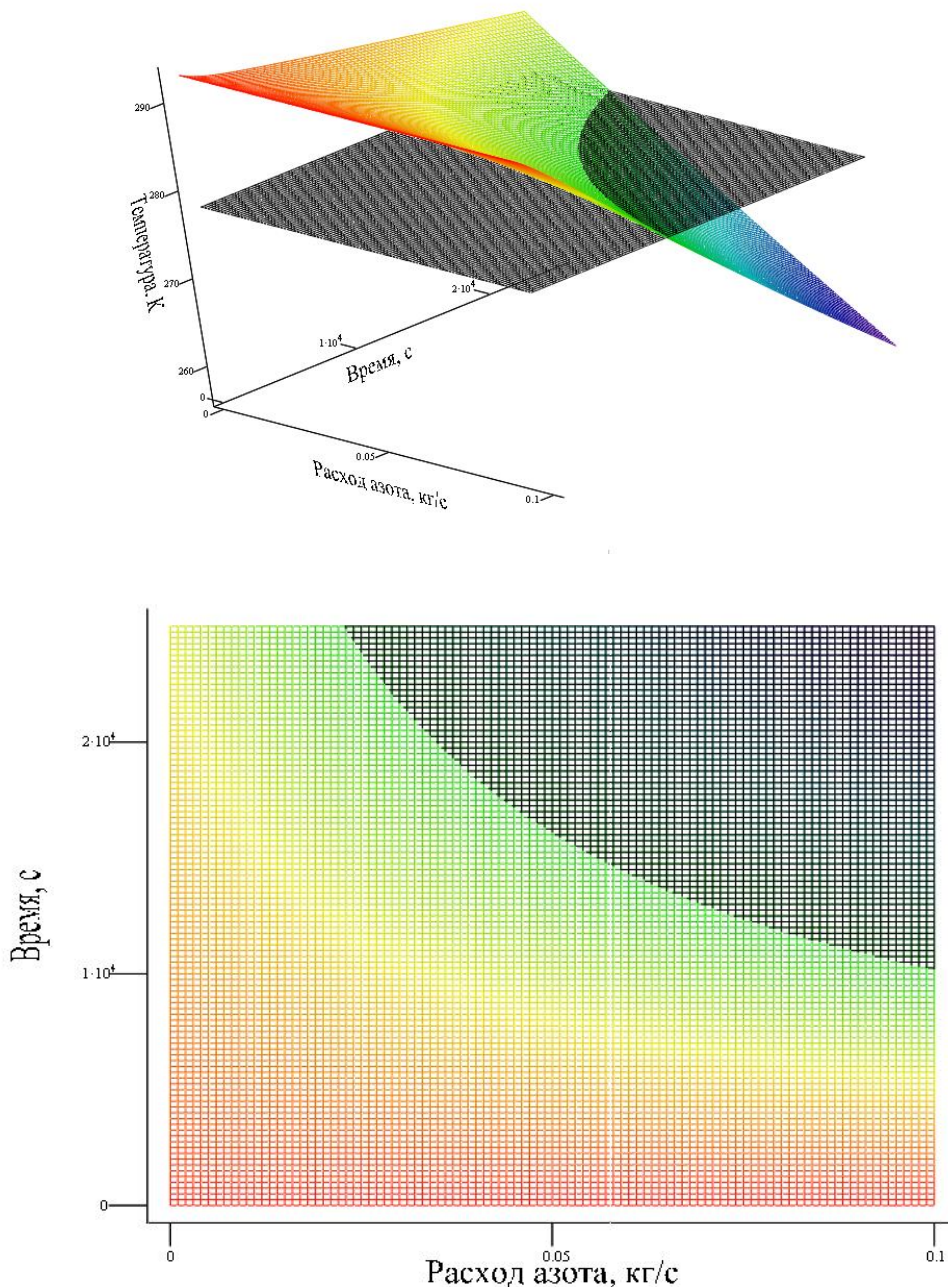


Рис.3. Изменение температуры теплоносителя в процессе охлаждения жидким азотом.

С увеличением расхода жидкого азота время охлаждения топлива уменьшается (рис.3). При этом относительные затраты жидкого азота на охлаждение КЖРТ сначала также снижаются и, достигнув минимума, начинают возрастать, что обусловлено увеличением поверхности и теплоемкости теплообменника и мощностей насосных установок в контурах циркуляции КЖРТ и теплоносителя.



**Рис.4.** Изменение времени охлаждения КЖРТ в зависимости от требуемой конечной температуры и расхода жидкого азота.

### 3. Заключение

Для процесса охлаждения КЖРТ в теплообменнике теплоносителем, охлаждаемым жидким азотом при контактном теплообмене в резервуаре теплоносителя, разработана математическая модель данного процесса и методика расчета, позволяющая определять изменения температур топлива и теплоносителя, время охлаждения и затрат жидкого азота в зависимости от параметров процесса: расхода жидкого азота, начальной температуры теплоносителя, характеристик насосов, тепловой изоляции емкостей и трубопроводоконтуров циркуляции КЖРТ и теплоносителя.

Применение разработанной методики при создании подобных систем позволяет определять рациональные конструктивные и режимные параметры системы охлаждения топлива для проведения операции охлаждения КЖРТ до требуемой температуры при наименьших затратах жидкого азота.

### Список литературы

1. Комлев Д.Е., Соловьев В.И. Охлаждение нафтила методом криогенного барботажа // Новости техники: сб. М.: КБТМ, 2004. С.137-141.
2. Денисов О.Е., Золин А.В., Чугунков В.В. Методика моделирования охлаждения компонентов ракетного топлива с применением жидкого азота и промежуточного теплоносителя // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 3. С. 145-161. DOI: [10.7463/0314.0699941](https://doi.org/10.7463/0314.0699941)
3. Домашенко А.М., Блинова И.Д. Исследования тепломассообмена при сбросе криогенных продуктов в воду // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2007. № 12. С. 17-19.
4. Wen D.S., Chen H.S., Ding Y.L., Dearman P. Liquid nitrogen injection into water: Pressure build-up and heat transfer // Cryogenics. 2006. Vol. 46, no. 10. P. 740-748. DOI: [10.1016/j.cryogenics.2006.06.007](https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2006.06.007)
5. Золин А.В., Чугунков В.В. Методика анализа теплообменных процессов компонентов ракетного топлива при выполнении операции заправки топливных баков ракеты на стартовом комплексе // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2012. № 12. С. 8-12.
6. Золин А.В., Чугунков В.В. К выбору технического облика и рациональных параметров систем охлаждения и обезвоживания для хранилищ углеводородного горючего космодромов // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2012. Спец. вып. «Работы студентов и молодых ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана». С. 39-42.
7. Александров А.А., Золин А.В., Кобызев С.В., Чугунков В.В. Сравнительный анализ технологий обезвоживания ракетного топлива с применением азота для наземных комплексов космодромов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2013. № 1. С. 12-22.

8. Александров А.А., Денисов О.Е., Золин А.В., Чугунков В.В. Охлаждение ракетного топлива стартовым оборудованием с применением жидкого азота // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2013. № 4. С. 24-29.
9. Александров А.А., Гончаров Р.А., Игрицкий В.А., Чугунков В.В. Методика выбора рациональных режимов охлаждения углеводородного горючего стартовым оборудованием перед заправкой топливных баков ракеты – носителя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. № 1. С. 40-46.
10. Гончаров Р.А., Чугунков В.В. Определение параметров и режимов работы стартового оборудования по охлаждению углеводородного горючего перед заправкой в бортовые баки ракеты-носителя // Известия ВУЗов. Серия Машиностроение. 2012. Спец. вып. «Работы студентов и молодых ученых МГТУ им. Н.Э. Баумана». С. 34-38.

## **Mathematical Model-Based Temperature Preparation of Liquid-Propellant Components Cooled by Liquid Nitrogen in the Heat Exchanger with a Coolant**

S.K. Pavlov<sup>1,\*</sup>, V.V. Chugunkov<sup>1</sup>

[\\*Pavlov.s.k@yandex.ru](mailto:Pavlov.s.k@yandex.ru)

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

---

**Keywords:** liquid nitrogen, launch equipment, heat exchanger, propellant cooling

---

Before fuelling the tanks of missiles, boosters, and spacecraft with liquid-propellant components (LPC) their temperature preparation is needed. The missile-system ground equipment performs this operation during prelaunch processing of space-purpose missiles (SPM). Usually, the fuel cooling is necessary to increase its density and provide heat compensation during pre-launch operation of SPM. The fuel temperature control systems (FTCS) using different principles of operation and types of coolants are applied for fuel cooling.

To determine parameters of LPC cooling process through the fuel heat exchange in the heat exchanger with coolant, which is cooled by liquid nitrogen upon contact heat exchange in the coolant reservoir, a mathematical model of this process and a design technique are necessary. Both allow us to determine design parameters of the cooling system and the required liquid nitrogen reserve to cool LPC to the appropriate temperature.

The article presents an overview of foreign and domestic publications on cooling processes research and implementation using cryogenic products such as liquid nitrogen. The article draws a conclusion that it is necessary to determine the parameters of LPC cooling process through the fuel heat exchange in the heat exchanger with coolant, which is liquid nitrogen-cooled upon contact heat exchange in the coolant reservoir allowing to define rational propellant cooling conditions to the specified temperature.

The mathematical model describes the set task on the assumption that a heat exchange between the LPC and the coolant in the heat exchanger and with the environment through the walls of tanks and pipelines of circulation loops is quasi-stationary.

The obtained curves allow us to calculate temperature changes of LPC and coolant, cooling time and liquid nitrogen consumption, depending on the process parameters such as a flow rate of liquid nitrogen, initial coolant temperature, pump characteristics, thermal insulation of tanks and pipelines of circulation loops of LPC and coolant.

To cool LPC in the heat exchanger with coolant which is liquid nitrogen-cooled upon contact heat exchange in the coolant reservoir, a mathematical model of this process and design technique is developed. It allows us to define PLC and coolant temperature changes, cooling time, and liquid nitrogen consumption, depending on the parameters of the process such as a flow rate of liquid nitrogen, initial temperature of the coolant, pump characteristics, thermal insulation of tanks and pipeline circulation loops of LPC and coolant.

The application of the developed technique in creating these systems allows us to determine the rational design and operating parameters of the fuel cooling system to provide LPC cooling operation to the required temperature at the lowest liquid nitrogen flow rate.

## References

1. Komlev D.E., Solov'ev V.I. Refrigerating naftil with cryogenic sparging. *Novosti tekhniki: sb.* [Engineering news: coll. pap.]. Moscow, Nudelman Precision Engineering Design Bureau (KBtochmash) Publ., 2004, pp.137-141. (in Russian).
2. Denisov O.E., Zolin A.V., Chugunkov V.V. Simulation methods of rocket fuel refrigerating with liquid nitrogen and intermediate heat carrier. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 3, pp. 145-161. DOI: [10.7463/0314.0699941](https://doi.org/10.7463/0314.0699941) (in Russian).
3. Domashenko A.M., Blinova I.D. Study of heat exchange during discharge of cryogenic products into water. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2007, no. 12, pp. 17-19. (English translation: *Chemical and Petroleum Engineering*, 2007, vol. 43, iss. 11-12, pp. 720-725. DOI: [10.1007/s10556-007-0130-9](https://doi.org/10.1007/s10556-007-0130-9) ).
4. Wen D.S., Chen H.S., Ding Y.L., Dearman P. Liquid nitrogen injection into water: Pressure build-up and heat transfer. *Cryogenics*, 2006, vol. 46, no. 10, pp. 740-748. DOI: [10.1016/j.cryogenics.2006.06.007](https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2006.06.007)
5. Zolin A.V., Chugunkov V.V. Technique to analyze heatexchange processes of rocket fuel components when performing operation of rocket fuel tanks filling at the starting complex. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2012, no. 12, pp. 8-12. (in Russian).
6. Zolin A.V., Chugunkov V.V. On the choice of technological character and efficient parameters of cooling and underwatering systems for hydrocarbon fuel storehouses of cosmodromes. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2012, spec. iss. "Collected papers of students and young scientists of the Bauman MSTU", pp. 39-42. (in Russian).
7. Aleksandrov A.A., Zolin A.V., Kobzyev S.V., Chugunkov V.V. Comparative analysis of nitrogen-using technologies for propellant dehydration at ground-based cosmodrome complexes. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering*, 2013, no. 1, pp. 12-22. (in Russian).

8. Aleksandrov A.A., Denisov O.E., Zolin A.V., Chugunkov V.V. Refrigerating Rocket Fuel by Launching Equipment with the Use of Liquid Nitrogen. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2013, no. 4, pp. 24-29. (in Russian).
9. Aleksandrov A.A., Goncharov R.A., Igritskiy V.A., Chugunkov V.V. Methodology of Selection of Rational Regimes for Cooling the Hydrocarbon Fuel by Launch Equipment before Filling of Fuel Tanks of Launch Vehicle. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie = Herald of the Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering*, 2011, no. 1, pp. 40-46. (in Russian)..
10. Goncharov R.A., Chugunkov V.V. Determining parameters and modes of startup equipment operation to cool hydrocarbon fuel before fuelling the carrier rocket on-board tanks. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2012, spec. iss. "Collected papers of students and young scientists of the Bauman MSTU", pp. 34-38. (in Russian).