

Н. А. Выборнов, М. Н. Протасевич

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА БАРБОТИРОВАНИЯ РАКЕТНОГО ТОПЛИВА ЖИДКИМ АЗОТОМ

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия

Поступила в редакцию 03.06.2022 г.

Принята к публикации 22.06.2022 г.

90

Для цитирования: *Выборнов Н. А., Протасевич М. Н.* Разработка математической модели процесса барботирования ракетного топлива жидким азотом // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Сер. Физико-математические и технические науки. 2022. №1. С. 90–100.

Для достижения оптимальной температуры ракетного топлива его необходимо охладить до отрицательных значений температуры и произвести очищение от примесей. С этой целью разработана математическая модель зависимости температуры внутри барботера, представленная в данной статье.

Ключевые слова: ракета, математическая модель, барботер, температура, ракетное топливо, жидкий азот, передаточная функция

Введение

При подготовке ракетного топлива к заправке необходимо установить химический состав и плотность при заданной температуре. Температура топлива должна быть определенной и постоянной по всему объему заправочного бака. Данные условия удовлетворяются при процессе барботирования топлива перед заправкой. Расслоение температуры жидкости в заправочном баке происходит при конвекции (свободной или вынужденной) или при радиационном воздействии Солнца и Земли. При определенных условиях для получения конкретных плотности и температуры в тех или иных системах топливо охлаждают и подвергают термостатированию. Зная необходимую температуру топлива, можно определить его плотность, и по ней же можно вычислить необходимый объем заправляемого топлива.

Процессы охлаждения при подаче жидкого азота в массу топлива характеризуются высокой эффективностью [1]. В процессе барботажа топлива азотом происходит исключение легких фракций углеводородного топлива.

В настоящее время моделирование является одним из основных методов исследования во всех областях знаний, а также методом определения свойств сложнейших систем, используемых для принятия решений в разных областях техники [2].



В любом реальном процессе параметры по разным причинам не остаются постоянными и могут варьироваться в довольно широком диапазоне. Следовательно, необходимо проанализировать функционирование моделируемого процесса при изменении различных параметров.

Описание процесса барботирования

Процесс барботирования заключается во введении криогенных жидкостей (в данном случае жидкого азота) в емкость, наполненную ракетным топливом. Жидкий азот поступает через сетчатые трубы на дне барботера. Закипая, жидкий азот «вытягивает» органические примеси, а также другие жидкостные примеси. Ниже приведен рисунок устройства барботера. Сам процесс барботирования является оптимальной операцией над горючим для ракеты, так как выполняет две важные функции – охлаждение топлива и его очистку [3].

91

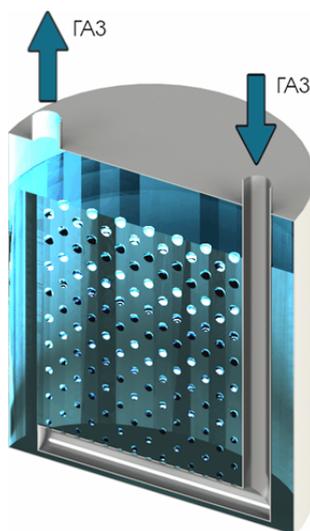


Рис. 1. Устройство барботера

При слишком интенсивном процессе барботирования может произойти кристаллизация горючего или, наоборот, его недостаточное охлаждение. В связи с этими факторами необходимо контролировать температуру получившейся смеси. Регулирование процесса барботирования может осуществляться путем изменения температуры жидкого азота, поступающего в барботер.

Построение параметрической модели барботера

Входные контролируемые параметры:

t_{r1} — температура горючего на входе;

t_{a1} — температура жидкого азота на входе;



t_{oc} – температура окружающей среды;

t_{ar1} – температура смеси на входе.

Управляемые выходные параметры:

t_{ar2} – температура смеси на выходе;

t_{r2} – конечная температура горючего;

t_k – температура конденсата на выходе;

G_{ar2} – расход смеси на выходе;

G_k – расход конденсата на выходе;

G_{r2} – расход горючего на выходе.

Управляющие параметры:

G_a – расход барботирующего азота на входе;

G_{ar1} – расход смеси на входе;

G_{r1} – расход горючего.

Входные неконтролируемые параметры:

i – энтальпия газообразного азота.

Следует иметь в виду, что данная модель (рис. 2) не является единственно возможной и ее представление зависит от принятых вариантов рассмотрения объекта управления.

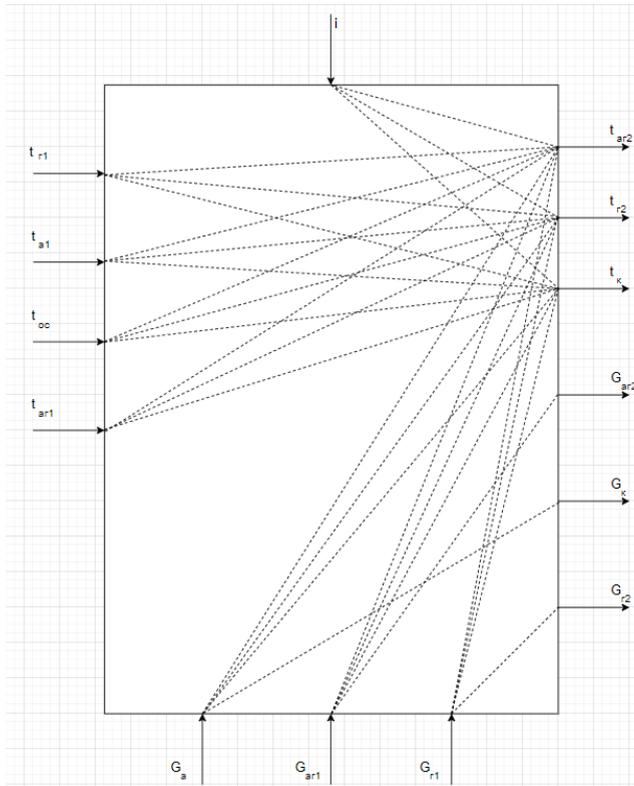


Рис. 2. Параметрическая схема процесса



Разработка математической модели изменения температуры внутри барботера

Математическая модель изменения температуры топливной смеси внутри барботера представляет совокупность передаточных функций по основным каналам передачи информации.

Температура топливной смеси должна находиться в районе $-25,4^{\circ}\text{C}$ для топливной «связки» керосина и сжиженного кислорода [4]. Данное значение достигается за счет подачи жидкого азота, а охлаждение смеси — за счет изменения расхода жидкого азота на входе.

Для моделирования процесса изменения температуры смеси горючего и жидкого азота в барботере примем следующие допущения:

- 1) теплофизические характеристики смеси горючего, жидкого азота, конденсата и горючего примем постоянными и равными среднему значению в рассматриваемом диапазоне величин;
- 2) объект с сосредоточенными параметрами;
- 3) толщина стенки барботера учитывается непосредственно в коэффициенте теплопередачи от смеси горючего к окружающей среде;
- 4) жидкий азот полностью переходит в состояние газа.

Принимаем:

$$c_{r1} = c_{r2} = c_r;$$

$$c_{ar1} = c_{ar2} = c_{ar3} = c_{ar};$$

$$G_{ar1} = G_{ar2} = G_{ar3} = G_{ar};$$

$$G_{a1} = G_{ara3} = G_a.$$

Составляем уравнения теплового баланса для барботера в установившемся режиме работы.

1. Теплопередача от охлаждающего азота к смеси горючего:

$$Q_M = G_{a1}i - G_{ar1}c_{ar1}t_{ar1} \left(\frac{\text{Дж}}{\text{c}} \right); \quad (1)$$

$$Q_{yx} = G_{ar2}c_{ar2}t_{ar2} + G_{ara3}c_{ara3}t_{ara3} \quad (\text{Дж}/\text{c}). \quad (2)$$

Нарушение теплового баланса на ΔQ ведет к изменению температуры смеси горючего:

$$m_{ar}c_{ar} \frac{dt_{ar}}{d\tau} = Q_M - Q_{yx} \quad (\text{Дж}/\text{c}); \quad (3)$$

$$G_{ar}c_{ar} \frac{dt_{ar2}}{d\tau} = G_{a1}i - G_{ar1}c_{ar}t_{ar1} - G_{ar2}c_{ar}t_{ar2} - G_{ara3}c_{ara3}t_{ara3} \quad (\text{Дж}/\text{c}), \quad (4)$$

где G_{ar} — расход смеси горючего ($\frac{\text{кг}}{\text{с}}$); c_{ar} — удельная теплоемкость смеси горючего ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$); t_{a1} — температуры смеси горючего на входе



установки ($^{\circ}\text{C}$); $t_{\text{ar}2}$ – температуры смеси горючего на выходе установки ($^{\circ}\text{C}$); $G_{\text{a}1}$ – расход охлаждающего азота ($\frac{\text{кг}}{\text{с}}$); i – энтальпия охлаждающего азота ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$); $G_{\text{ара}3}$ – расход газообразного азота ($\frac{\text{кг}}{\text{с}}$); $c_{\text{ара}3}$ – удельная теплоемкость газообразного азота ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$); $t_{\text{ара}3}$ – температура газообразного азота ($^{\circ}\text{C}$).

Изменяющиеся параметры:

$$Q_{\text{м}} = f(G_{\text{ар}}, t_{\text{a}1}, i, G_{\text{а}});$$

$$Q_{\text{yx}} = f(G_{\text{ар}}, t_{\text{ар}2}, G_{\text{а}}, t_{\text{ара}3}).$$

Составляем уравнение в отклонениях (линеаризуем его по изменяемым параметрам), заменив $\frac{d}{d\tau}$ на p :

$$m_{\text{ар}} c_{\text{ар}} p \Delta t_{\text{ар}2} = \Delta G_{\text{а}} i + G_{\text{а}} \Delta i + \Delta G_{\text{ар}} c_{\text{ар}} t_{\text{а}1} + G_{\text{ар}} c_{\text{ар}} \Delta t_{\text{а}1} - \Delta G_{\text{ар}} c_{\text{ар}} t_{\text{ар}2} - G_{\text{ар}} c_{\text{ар}} \Delta t_{\text{ар}2} - \Delta G_{\text{а}} c_{\text{ара}3} t_{\text{ара}3} - G_{\text{а}} c_{\text{ара}3} \Delta t_{\text{ара}3}; \quad (5)$$

$$\Delta t_{\text{ар}2} (m_{\text{ар}} c_{\text{ар}} p + G_{\text{ар}} c_{\text{ар}}) = \Delta G_{\text{а}} i + G_{\text{а}} \Delta i + \Delta G_{\text{ар}} c_{\text{ар}} t_{\text{а}1} + G_{\text{ар}} c_{\text{ар}} \Delta t_{\text{а}1} - \Delta G_{\text{ар}} c_{\text{ар}} t_{\text{ар}2} - \Delta G_{\text{а}} c_{\text{ара}3} t_{\text{ара}3} - G_{\text{а}} c_{\text{ара}3} \Delta t_{\text{ара}3}; \quad (6)$$

$$\Delta t_{\text{ар}2} = \frac{\Delta G_{\text{а}} i + G_{\text{а}} \Delta i + \Delta G_{\text{ар}} c_{\text{ар}} t_{\text{а}1} + G_{\text{ар}} c_{\text{ар}} \Delta t_{\text{а}1} - \Delta G_{\text{ар}} c_{\text{ар}} t_{\text{ар}2} - \Delta G_{\text{а}} c_{\text{ара}3} t_{\text{ара}3} - G_{\text{а}} c_{\text{ара}3} \Delta t_{\text{ара}3}}{m_{\text{ар}} c_{\text{ар}} p + G_{\text{ар}} c_{\text{ар}}}. \quad (7)$$

2. Теплопередача от смеси горючего к горючему и окружающей среде:

$$Q_{\text{г}} = G_{\text{ар}} c_{\text{ар}} t_{\text{ар}2} + G_{\text{г}1} c_{\text{г}1} t_{\text{г}1} \quad (\text{Дж} / \text{с}); \quad (8)$$

$$Q_{\text{yx}} = G_{\text{г}2} c_{\text{г}2} t_{\text{г}} + KF(t_{\text{ар}2} - t_{\text{oc}}) + G_{\text{ар}3} c_{\text{ар}3} t_{\text{ар}3} \quad (\text{Дж} / \text{с}). \quad (9)$$

Нарушение теплового баланса на ΔQ ведет к изменению температуры горючего $t_{\text{г}2}$:

$$m_{\text{г}} c_{\text{г}} \frac{dt_{\text{г}2}}{d\tau} = Q_{\text{г}} - Q_{\text{yx}} \quad (\text{Дж} / \text{с}); \quad (10)$$

$$m_{\text{г}} c_{\text{г}} \frac{dt_{\text{г}2}}{d\tau} = G_{\text{ар}} c_{\text{ар}} t_{\text{ар}2} + G_{\text{г}1} c_{\text{г}1} t_{\text{г}1} - KF(t_{\text{ар}2} - t_{\text{oc}}) - G_{\text{ар}3} c_{\text{ар}3} t_{\text{ар}3} \quad (\text{Дж} / \text{с}), \quad (11)$$

где $G_{\text{ар}}$ – расход смеси горючего ($\frac{\text{кг}}{\text{с}}$); $c_{\text{ар}}$ – удельная теплоемкость смеси горючего ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}}$); $G_{\text{г}1}$ – расход горючего на входе ($\frac{\text{кг}}{\text{с}}$); $G_{\text{г}2}$ –



расход горючего на выходе ($\frac{\text{кг}}{\text{с}}$); c_m – удельная теплоемкость горючего ($\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$); t_{r1}, t_{r2} – температура горючего ($^\circ\text{C}$); t_{ar2}, t_{ar3} – температура смеси горючего АГ ($^\circ\text{C}$); t_{oc} – температура окружающей среды ($^\circ\text{C}$); F – площадь поверхности стенок барботера (м^2); K – коэффициент теплопередачи (от смеси горючего к окружающей среде) ($\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$).

Изменяющиеся параметры:

$$Q_m = f(G_{r1}, t_{r1}, t_{ar2});$$

$$Q_{yx} = f(G_{r2}, t_{r2}, t_{ar3}, t_{oc}).$$

Составляем уравнение в отклонениях (линеаризуем его по изменяемым параметрам), заменив $\frac{d}{dt}$ на p :

$$m_e c_e p \Delta t_{e2} = G_{ae} c_{ae} \Delta t_{ae2} + \Delta G_{e1} c_{e1} t_{e1} + G_{e1} c_e \Delta t_{e1} - \Delta G_{e2} c_e t_{e2} - G_{e2} c_e \Delta t_{e2} - KF \Delta t_{ae2} + KF \Delta t_{oc} - G_{ae} c_{ae} \Delta t_{ae3}; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} & \Delta t_{r2} (m_r c_r p + G_{r2} c_r) \\ & = G_{ar} c_{ar} \Delta t_{ar2} + \Delta G_{r1} c_r t_{r1} + G_{r1} c_r \Delta t_{r1} - \Delta G_{r2} c_r t_{r2} - \\ & - KF \Delta t_{ar2} + KF \Delta t_{oc} - G_{ar} c_{ar} \Delta t_{ar3}. \end{aligned} \quad (13)$$

3. Составляем систему уравнений и решаем ее:

$$\begin{aligned} \Delta t_{ar2} = & \frac{\Delta G_a i + G_a \Delta i + \Delta G_{ar} c_{ar} t_{a1} + G_{ar} c_{ar} \Delta t_{a1} - \Delta G_{ar} c_{ar} t_{ar2} -}{m_{ar} c_{ar} p + G_{ar} c_{ar}} \\ & - \frac{\Delta G_a c_{ar3} t_{ar3} - G_a c_{ar3} \Delta t_{ar3}}{m_{ar} c_{ar} p + G_{ar} c_{ar}}; \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \Delta t_{r2} (m_r c_r p + G_{r2} c_r) = & G_{ar} c_{ar} \Delta t_{ar2} + \Delta G_{r1} c_r t_{r1} + G_{r1} c_r \Delta t_{r1} - \\ & - \Delta G_{r2} c_r t_{r2} - KF \Delta t_{ar2} + KF \Delta t_{oc} - G_{ar} c_{ar} \Delta t_{ar3}. \end{aligned} \quad (15)$$

Из уравнения (14) Δt_{ar2} подставляем в уравнение (15):

$$\begin{aligned} & \Delta t_{e2} (m_e c_e p + G_{e2} c_e) = \\ & G_{ae} c_{ae} \left(\frac{\Delta G_a i + G_a \Delta i + \Delta G_{ae} c_{ae} t_{a1} + G_{ae} c_{ae} \Delta t_{a1} - \Delta G_{ae} c_{ae} t_{ae2} -}{m_{ae} c_{ae} p + G_{ae} c_{ae}} \right) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} & \frac{-\Delta G_a c_{\text{араз}} t_{\text{араз}} - G_a c_{\text{араз}} \Delta t_{\kappa}}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} + \Delta G_{\varepsilon_1} c_{\varepsilon} t_{\varepsilon_1} + G_{\varepsilon_1} c_{\text{м}} \Delta t_{\varepsilon_1} - \Delta G_{\varepsilon_2} c_{\varepsilon} t_{\varepsilon_2} - \\ & - KF \left(\frac{\Delta G_a i + G_a \Delta i + \Delta G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} t_{\text{а1}} + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} \Delta t_{\text{а1}} - \Delta G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} t_{\text{аз2}} -}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} \right. \\ & \left. \frac{-\Delta G_a c_{\text{араз}} t_{\text{араз}} - G_a c_{\text{араз}} \Delta t_{\text{араз}}}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} \right) + KF \Delta t_{\text{oc}} - G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} \Delta t_{\text{аз3}} ; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \Delta t_{\varepsilon_2} (m_{\varepsilon} c_{\varepsilon} p + G_{\varepsilon_2} c_{\varepsilon}) = \\ & \left(\frac{\Delta G_a i G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} + G_{\text{н}} \Delta i G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} + \Delta G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} t_{\text{а1}} G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} +}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} \right. \\ & \left. + \frac{G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} \Delta t_{\text{а1}} G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} - \Delta G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} t_{\text{аз2}} G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} - \Delta G_a c_{\text{араз}} t_{\text{араз}} G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} -}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} \right. \\ & \left. \frac{-G_a c_{\text{араз}} \Delta t_{\text{араз}} G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} \right) + G_{\varepsilon_1} c_{\varepsilon} \Delta t_{\varepsilon_1} - \Delta G_{\varepsilon_2} c_{\varepsilon} t_{\varepsilon_2} + \Delta G_{\varepsilon_1} c_{\varepsilon} t_{\varepsilon_1} - \\ & - \left(\frac{\Delta G_a i KF + G_a \Delta i KF + \Delta G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} t_{\text{а1}} KF + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} \Delta t_{\text{а1}} KF -}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} \right. \\ & \left. \frac{-\Delta G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} t_{\text{аз2}} KF - \Delta G_a c_{\text{араз}} t_{\text{араз}} KF - G_{\text{н}} c_{\kappa} \Delta t_{\kappa} KF}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} \right) + KF \Delta t_{\text{oc}} - G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} \Delta t_{\text{аз3}} ; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} & \Delta t_{\varepsilon_2} (m_{\varepsilon} c_{\varepsilon} p + G_{\varepsilon_2} c_{\varepsilon}) = \\ & \left(\frac{\Delta G_a i G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} + G_a \Delta i G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} + \Delta G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} t_{\text{а1}} G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} +}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} \right. \\ & \left. + \frac{G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} \Delta t_{\text{а1}} G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} - \Delta G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} t_{\text{аз2}} G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} - \Delta G_a c_{\text{араз}} t_{\text{араз}} G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} -}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} \right. \\ & \left. \frac{-G_a c_{\text{араз}} \Delta t_{\text{араз}} G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} + \Delta G_{\varepsilon_1} c_{\varepsilon} t_{\varepsilon_1} (m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}) +}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} \right. \\ & \left. + \frac{G_{\varepsilon_1} c_{\varepsilon} \Delta t_{\varepsilon_1} (m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}) - \Delta G_{\varepsilon_2} c_{\varepsilon} t_{\varepsilon_2} (m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}) -}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} \right. \\ & \left. \frac{-\Delta G_a i KF - G_a \Delta i KF - \Delta G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} t_{\text{а1}} KF - G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} \Delta t_{\text{а1}} KF +}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} \right. \\ & \left. + \frac{\Delta G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} t_{\text{аз2}} KF + \Delta G_a c_{\text{араз}} t_{\text{араз}} KF + G_a c_{\text{араз}} \Delta t_{\text{араз}} K + KF \Delta t_{\text{oc}} (m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}) -}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} \right. \\ & \left. \frac{-G_{\text{аз}} c_{\text{аз}} \Delta t_{\text{аз3}} (m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}})}{m_{\text{аз}} c_{\text{аз}} p + G_{\text{аз}} c_{\text{аз}}} \right) ; \end{aligned} \quad (18)$$



$$\begin{aligned}
 & \Delta t_{e2} (m_e c_e p + G_{e2} c_e) = \\
 & \frac{p(\Delta G_{e1} c_e t_{e1} m_{ae} c_{ae} + G_{e1} c_e \Delta t_{e1} m_{ae} c_{ae} - \Delta G_{e2} c_e t_{e2} m_{ae} c_{ae} +}{m_{ae} c_{ae} p + G_{ae} c_{ae}} \\
 & \frac{+KF\Delta t_{oc} m_{ae} c_{ae} - G_{ae} c_{ae}^2 \Delta t_{ae3} m_{ae}) - G_a c_{ae23} \Delta t_{ae23} G_{ae} c_{ae} +}{m_{ae} c_{ae} p + G_{ae} c_{ae}} \\
 & + \Delta G_a i G_{ae} c_{ae} + G_a \Delta i G_{ae} c_{ae} + \Delta G_{e1} c_e t_{e1} G_{ae} c_{ae} + G_{e1} c_e \Delta t_{e1} G_{ae} c_{ae} + \\
 & \frac{m_{ae} c_{ae} p + G_{ae} c_{ae}}{+ \Delta G_{ae} c_{ae}^2 t_{a1} G_{ae} + G_{ae} c_{ae}^2 \Delta t_{a1} - \Delta G_{e2} c_e t_{e2} G_{ae} c_{ae} -} \\
 & \frac{m_{ae} c_{ae} p + G_{ae} c_{ae}}{- \Delta G_{ae} c_{ae}^2 t_{ae2} G_{ae} - \Delta G_{\pi} c_{\kappa} t_{\kappa} G_{ae} c_{ae} - \Delta G_{\pi} i KF - G_{\pi} \Delta i KF -} \\
 & \frac{m_{ae} c_{ae} p + G_{ae} c_{ae}}{- \Delta G_{ae} c_{ae} t_{a1} KF - G_{ae} c_{ae} KF \Delta t_{a1} + \Delta G_{ae} c_{ae} t_{ae2} KF + \Delta G_{\pi} c_{\kappa} t_{\kappa} KF +} \\
 & \frac{m_{ae} c_{ae} p + G_{ae} c_{ae}}{+ G_{\pi} c_{\kappa} \Delta t_{\kappa} KF - KF \Delta t_{oc} G_{ae} c_{ae} - G_{\text{двс}} c_{ae}^2 \Delta t_{ae3} G_{ae}}. \tag{19}
 \end{aligned}$$

Пусть $A = m_r c_r$, $B = G_{r2} c_r$, тогда преобразованное выражение будет иметь вид

$$\begin{aligned}
 & \Delta t_{r2} (Ap + B) = \\
 & \frac{p(\Delta G_{r1} c_r t_{r1} m_{ar} c_{ar} + G_{r1} c_r \Delta t_{r1} m_{ar} c_{ar} + G_{rp} c_{rp} \Delta t_{rp1} m_{ar} c_{ar} -}{m_{ar} c_{ar} p + G_{ar} c_{ar}} \\
 & \frac{- \Delta G_{r2} c_r t_{r2} m_{ar} c_{ar} + KF \Delta t_{oc} m_{ar} c_{ar} - G_{\text{двс}} c_{ar}^2 \Delta t_{ar3} m_{ar}) -}{m_{ar} c_{ar} p + G_{ar} c_{ar}} \\
 & \frac{- G_a c_{ae23} \Delta t_{ae23} G_{ar} c_{ar} + \Delta G_{\pi} i G_{ar} c_{ar} + G_{\pi} \Delta i G_{ar} c_{ar} + \Delta G_{r1} c_r t_{r1} G_{ar} c_{ar} +}{m_{ar} c_{ar} p + G_{ar} c_{ar}} \\
 & \frac{+ G_{r1} c_r \Delta t_{r1} G_{ar} c_{ar} + \Delta G_{ar} c_{ar}^2 t_{a1} G_{ar} + G_{ar} c_{ar}^2 \Delta t_{a1} -}{m_{ar} c_{ar} p + G_{ar} c_{ar}} \\
 & \frac{- \Delta G_{r2} c_r t_{r2} G_{ar} c_{ar} - \Delta G_{ar} c_{ar}^2 t_{ar2} G_{ar} - \Delta G_a c_{\kappa} t_{\kappa} G_{ar} c_{ar} - \Delta G_{\pi} i KF -}{m_{ar} c_{ar} p + G_{ar} c_{ar}} \\
 & \frac{- G_a \Delta i KF - \Delta G_{ar} c_{ar} t_{a1} KF - G_{ar} c_{ar} KF \Delta t_{a1} + \Delta G_{ar} c_{ar} t_{ar2} KF}{m_{ar} c_{ar} p + G_{ar} c_{ar}} \\
 & \frac{+ \Delta G_a c_{ae23} t_{ae23} KF + G_a c_{ae23} \Delta t_{ae23} KF - KF \Delta t_{oc} G_{ar} c_{ar} - G_{\text{двс}} c_{ar}^2 \Delta t_{ar3} G_{ar}}{m_{ar} c_{ar} p + G_{ar} c_{ar}}. \tag{20}
 \end{aligned}$$



Передаточная функция – это отношение изображения Лапласа переменной на выходе к изображению Лапласа переменной на входе [5]. В данной работе в качестве выходного параметра принята регулируемая величина Δt_{r2} .

Рассматриваем канал по управлению:

1) Изменение конечной температуры горючего – Изменение расхода охлаждающего азота ($\Delta t_{r2} - \Delta G_a$):

$$\Delta t_{r2} (Ap + B) = \Delta G_a (i G_{ar} c_{ar} - c_{a2a3} t_{a2a3} G_{ar} c_{ar} + c_{a2a3} t_{a2a3} KF); \quad (21)$$

$$\frac{\Delta t_{r2}}{\Delta G_a} = \frac{i G_{ar} c_{ar} - c_{a2a3} t_{a2a3} G_{ar} c_{ar} + c_{a2a3} t_{a2a3} KF}{Ap + B} = \frac{k_1}{Ap + B}, \quad (22)$$

где $k_1 = i G_{ar} c_{ar} - c_{a2a3} t_{a2a3} G_{ar} c_{ar} + c_{a2a3} t_{a2a3} KF$.

Рассматриваем каналы по возмущению:

1) Изменение конечной температуры горючего – Изменение расхода охлаждающего азота ($\Delta t_{r2} - \Delta G_a$):

$$\Delta t_r (Ap + B) = \Delta G_{r1} (c_m t_{r1} m_{ar} c_{ar} p + c_r t_{r1} G_{ar} c_{ar}); \quad (23)$$

$$\frac{\Delta t_r}{\Delta G_{r1}} = \frac{c_r t_{r1} m_{ar} c_{ar} p + c_r t_{r1} G_{ar} c_{ar}}{Ap + B} = \frac{T_1 p + k_2}{Ap + B}, \quad (24)$$

где $k_2 = c_m t_{r1} G_{ar} c_{ar}$, $T_1 = c_r t_{r1} m_{ar} c_{ar}$;

2) Изменение конечной температуры горючего – Изменение начальной температуры горючего ($\Delta t_{r2} - \Delta t_{r1}$):

$$\Delta t_m (Ap + B) = \Delta t_{r1} (G_{r1} c_m m_{ar} c_{ar} p + G_{r1} c_m G_{ar} c_{ar}); \quad (25)$$

$$\frac{\Delta t_m}{\Delta t_{r1}} = \frac{G_{r1} c_m m_{ar} c_{ar} p + G_{r1} c_m G_{ar} c_{ar}}{Ap + B} = \frac{T_2 p + k_3}{Ap + B}, \quad (26)$$

где $k_3 = G_{r1} c_m G_{ar} c_{ar}$, $T_2 = G_{r1} c_m m_{ar} c_{ar}$;

3) Изменение конечной температуры горючего – Изменение расхода смеси горючего ($\Delta t_{r2} - \Delta G_{ar}$):

$$\Delta t_{r2} (Ap + B) = \Delta G_{ar} (c_{ar}^2 t_{a1} G_{ar} - c_{ar}^2 t_{a2} G_{ar} + c_{ar} t_{a2} KF); \quad (27)$$

$$\frac{\Delta t_{r2}}{\Delta G_{ar}} = \frac{c_{ar}^2 t_{a1} G_{ar} - c_{ar}^2 t_{a2} G_{ar} + c_{ar} t_{a2} KF}{Ap + B} = \frac{k_4}{Ap + B}, \quad (28)$$

где $k_4 = c_{ar}^2 t_{a1} G_{ar} - c_{ar}^2 t_{a2} G_{ar} + c_{ar} t_{a2} KF$;

4) Изменение конечной температуры горючего – Изменение начальной температуры смеси горючего ($\Delta t_{r2} - \Delta t_{a1}$):

$$\Delta t_{r2} (Ap + B) = \Delta t_{a1} (G_{ar}^2 c_{ar}^2 - G_{ar} c_{ar} KF); \quad (29)$$



$$\frac{\Delta t_{r2}}{\Delta t_{a1}} = \frac{G_{ar}^2 c_{ar}^2 - G_{ar} c_{ar} KF}{Ap + B} = \frac{k_5}{Ap + B}, \quad (30)$$

где $k_5 = G_{ar}^2 c_{ar}^2 - G_{ar} c_{ar} KF$;

5) Изменение конечной температуры горючего – Изменение окружающей среды ($\Delta t_{r2} - \Delta t_{oc}$):

$$\Delta t_{r2} (Ap + B) = \Delta t_{oc} (KFm_{ar} c_{ar} p - KFG_{ar} c_{ar}); \quad (31)$$

$$\frac{\Delta t_m}{\Delta t_{oc}} = \frac{KFm_{ar} c_{ar} p - KFG_{ar} c_{ar}}{Ap + B} = \frac{T_3 p + k_6}{Ap + B}, \quad (32)$$

где $T_3 = KFm_{ar} c_{ar}$ $k_6 = -KFG_{ar} c_{ar}$;

6) Изменение конечной температуры смеси горючего – Изменение энтальпии охлаждающего азота ($\Delta t_{r2} - \Delta i$):

$$\Delta t_{r2} (Ap + B) = \Delta i (G_a G_{ar} c_{ar} - G_a KF); \quad (33)$$

$$\frac{\Delta t_{r2}}{\Delta t_{c1}} = \frac{G_a G_{ar} c_{ar} - G_a KF}{Ap + B} = \frac{k_8}{Ap + B}. \quad (34)$$

Выводы

В результате проведенного исследования технологического процесса составлена математическая модель процесса, происходящего в барботере. Данная математическая модель не претендует на возможность описания всех процессов, происходящих в сложных реальных системах. Она разработана для описания общего технологического процесса, происходящего непосредственно в барботере при тепловых процессах, с использованием жидкого азота для охлаждения ракетного топлива. В дальнейшем данная математическая модель будет применена при разработке учебного стенда для имитации одного из этапов процесса подготовки ракетного топлива к заправке.

Список литературы

1. Александров А.А., Гончаров Р.А., Игрицкий В.А., ЧуGUNков 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.
2. Денисов О.Е., Золин А.В., Денисова К.И. Методика проектирования базы хранения и подготовки высококипящих компонентов ракетного топлива космодрома «Восточный» // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. №11. С. 378–398.
3. Александров А.А., Бармин И.В., Кунис И.Д., ЧуGUNков В.В. Особенности создания и развития криогенных систем ракетно-космических стартовых комплексов «Союз» // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. №2. С. 7–27.



4. *Кобышев С.В.* Методика поверочного расчета процесса осушки углеводородного горючего методом барботажа газообразным азотом // Актуальные проблемы Российской космонавтики : материалы XXXVII академических чтений по космонавтике / Комиссия РАН. М., 2013. С. 385–386.

5. *Накоряков В.Е., Цой А.Н., Мезенцев И.В., Мелешкин А.В.* Экспериментальные исследования процесса инъекции жидкого азота в воду // Теплофизика и аэромеханика. 2014. №3. С. 293–298.

Об авторах

Выборнов Никита Андреевич – магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: vybornov@mail.ru

Михаил Николаевич Протасевич – ст. преп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград, Россия.

E-mail: MProtasevich@kantiana.ru

N.A. Vybornov, M.N. Protasevich

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL FOR THE PROCESS OF ROCKET FUEL BUBBLING WITH LIQUID NITROGEN

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Received 03 June 2022

Accepted 22 June 2022

To cite this article: Vybornov N.A., Protasevich M.N. 2022, Development of a mathematical model for the process of rocket fuel bubbling with liquid nitrogen, *Vestnik of Immanuel Kant Baltic Federal University. Series: Physical-mathematical and technical sciences*, №1. P. 90–100.

To achieve an optimum temperature of rocket fuel, its negative temperature and the amount of its purification from impurities are necessary. For this purpose, a mathematical model of the temperature dependence inside the bubbler has been developed in this article.

Keywords: rocket, mathematical model, bubbler, temperature, rocket fuel, liquid nitrogen, transfer function

The authors

Nikita A. Vybornov, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: vybornov@mail.ru

Michael N. Protasevich, Assistant Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia.

E-mail: Protasevich@kantiana.ru