

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ТЕРМИЧЕСКОГО УДАЛЕНИЯ ОСТАТКОВ ГОРЮЧЕГО ИЗ ТОПЛИВНОГО БАКА РАКЕТЫ.

Система термического удаления остатков горючего из топливного бака ракеты действует следующим образом. В топливный бак впрыскивается в небольших количествах окислитель. Происходит его реагирование с горючим. В результате в баке повышается температура и давление. Горючее испаряется, реагирует и истекает из бака через дренажное отверстие. Существуют ограничения по нагреву конструкции бака и давлению внутри бака. Чтобы соблюсти эти ограничения, а так же экологические требования должны быть правильно выбраны режим подачи окислителя и компоновка системы.

Первоначально предполагалось, что все количество впрыскиваемого окислителя немедленно реагирует с горючим в стехиометрическом соотношении. Была составлена среднемассовая тепловая модель, в которой все внутреннее пространство бака имело осредненную температуру, а мощность тепловыделений была пропорциональна количеству впрыскиваемого окислителя.

Однако критерий, учитывающий параметры химических реакций, указывал на то, что в топливном баке происходит диффузионное горение. Диффузионное горение характеризуется большой неравномерностью распределения температуры и концентраций реагирующих компонентов по объему, в котором происходит реакция. Чтобы учесть эту неравномерность, и ее влияние на температурный режим конструкции бака и прохождение химических реакций, было принято решение использовать математическую модель на основе системы дифференциальных уравнений в частных производных. В качестве характерных переменных были выбраны компоненты вектора скорости, температура и концентрации реагирующих веществ.

В конструкции бака предусмотрен предохранительный клапан, регулирующий давление. Поэтому расчет проводим в предположении квазисжимаемости среды. Давление внутри бака считаем равным максимально допустимому, а плотность пересчитываем на каждом шаге по времени по значению средней температуры среды.

Основные уравнения сохранения можно записать в следующем виде:

уравнения Навье-Стокса

$$\begin{aligned} \nabla \mathbf{V} &= 0 \\ \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) &= \frac{1}{\rho} \nabla(\mu \nabla \mathbf{V}) - \frac{\nabla P}{\rho} + \mathbf{G} \end{aligned} \quad (1)$$

уравнение энергии

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}h) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\frac{\lambda}{C_p} \nabla h \right) + S \quad (2)$$

уравнение сохранения компонентов смеси

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla(\mathbf{V}C_i) = \nabla(D_i \nabla C_i) + M_i \quad (3)$$

где, \mathbf{V} – вектор скорости;

h – энтальпия;

ρ – плотность;

P – давление;

\mathbf{G} – силы тяжести;

S – источники тепловыделений;

μ – динамическая вязкость;

C_p – удельная теплоемкость;

λ – коэффициент теплопроводности;

C_i – массовая доля i -ой компоненты;

D_i – коэффициент диффузии i -ой компоненты;

M_i – скорость изменения массы i -ой компоненты.

Термическое уравнение состояния:

$$\rho = \frac{P_0}{RT} \quad (4)$$

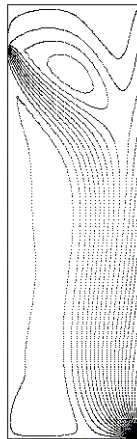
где P_0 – статическое давление, характерное для данной задачи.

Химические превращения внутри бака моделируются тремя реакциями: окисление горючего; термическое разложение горючего; окисление продуктов термического разложения.

Результаты численного моделирования показали, что процессы в топливном баке происходят не так, как предполагалось в среднемассовой модели. Лимитирующим фактором является не количество подаваемого окислителя, а распределение жидкого топлива внутри бака и скорость его испарения. Впрыскиваемый окислитель постепенно заполняет большую часть объема бака. Реакция окисления происходит над поверхностями испарения горючего. Соответственно этому распределяется температура (рис.1-6).

Одной из задач исследования было не допустить выброс из бака не прореагировавшего горючего. Для решения этой задачи необходимо было выбрать правильное взаимное расположение форсунки впрыска окислителя, остатков горючего и дренажного отверстия. Проведены численные исследования и определена оптимальная схема (рис.7-12).

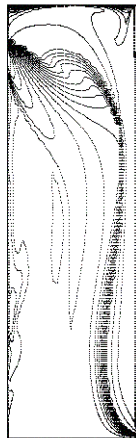
Применение математической модели на основе системы дифференциальных уравнений в частных производных показало, что первоначальные предположения о прохождении процесса были неверными. И, что теоретические исследования подобных систем возможны только в рамках такой модели.



ФУНКЦИЯ ТОКА

- 1 0.001260
- 2 0.002325
- 3 0.005909
- 4 0.009494
- 5 0.013078
- 6 0.016663
- 7 0.020247
- 8 0.023832
- 9 0.027416
- 10 0.031001
- 11 0.034585
- 12 0.038170
- 13 0.041754
- 14 0.045338
- 15 0.048923
- 16 0.052507
- 17 0.056092
- 18 0.059676
- 19 0.063261

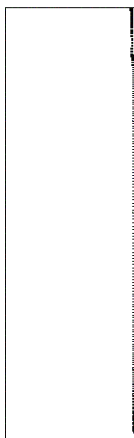
Рис. 1. Верхнее расположение форсунок, функция тока.



ТЕМПЕРАТУРА

- 1 0.005000
- 2 42.070000
- 3 84.135000
- 4 126.200000
- 5 168.265000
- 6 210.330000
- 7 252.395000
- 8 294.460000
- 9 336.525000
- 10 378.590000
- 11 420.655000
- 12 462.720000
- 13 504.785000
- 14 546.850000
- 15 588.915000
- 16 630.980000
- 17 673.045000
- 18 715.110000
- 19 757.175000
- 20 799.240000

Рис 2. Верхнее расположение форсунок, температура

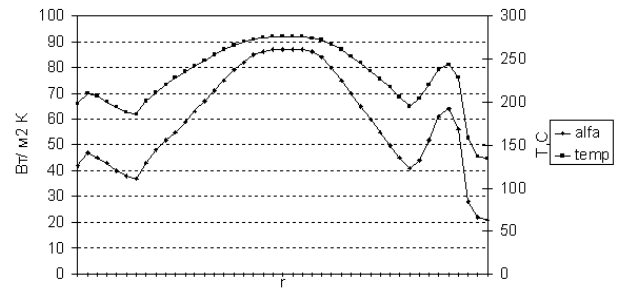


МАССОВАЯ ДОЛЯ ГОР.

- 1 0.005000
- 2 0.040000
- 3 0.075000
- 4 0.110000
- 5 0.145000
- 6 0.180000
- 7 0.215000
- 8 0.250000
- 9 0.285000
- 10 0.320000
- 11 0.355000
- 12 0.390000
- 13 0.425000
- 14 0.460000
- 15 0.495000
- 16 0.530000
- 17 0.565000
- 18 0.600000
- 19 0.635000
- 20 0.670000

Рис. 3. Верхнее расположение форсунок, массовая доля горючего.

Распределение температуры и коэффициента теплоотдачи вдоль дна бака.



Распределение температуры и коэффициента теплоотдачи вдоль тоннельного трубопровода.

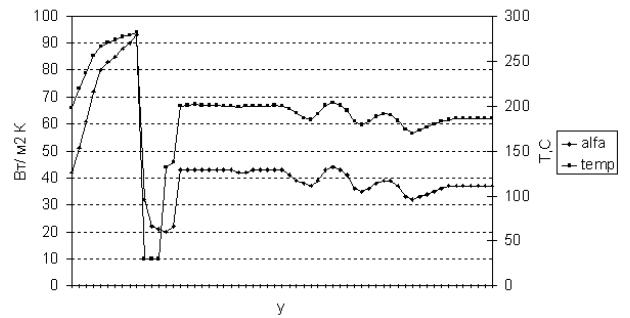


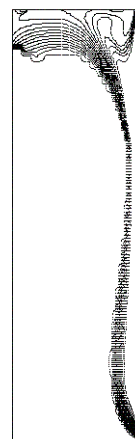
Рис 4.



МАССОВАЯ ДОЛЯ ОК.

- 1 0.005000
- 2 0.040000
- 3 0.075000
- 4 0.110000
- 5 0.145000
- 6 0.180000
- 7 0.215000
- 8 0.250000
- 9 0.285000
- 10 0.320000
- 11 0.355000
- 12 0.390000
- 13 0.425000
- 14 0.460000
- 15 0.495000
- 16 0.530000
- 17 0.565000
- 18 0.600000
- 19 0.635000
- 20 0.670000

Рис. 5. Верхнее расположения форсунок, массовая доля окислителя.



МАССОВАЯ ДОЛЯ ПР.

- 1 0.005000
- 2 0.042000
- 3 0.079000
- 4 0.116000
- 5 0.153000
- 6 0.190000
- 7 0.227000
- 8 0.264000
- 9 0.301000
- 10 0.338000
- 11 0.375000
- 12 0.412000
- 13 0.449000
- 14 0.486000
- 15 0.523000
- 16 0.560000
- 17 0.597000
- 18 0.634000
- 19 0.671000
- 20 0.708000

Рис. 6. Верхнее расположения форсунок, массовая доля продуктов термического разложения горючего.

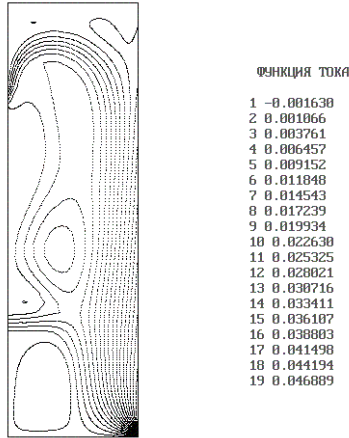


Рис. 7. Равномерное расположение форсунок с наклоном, функция тока.

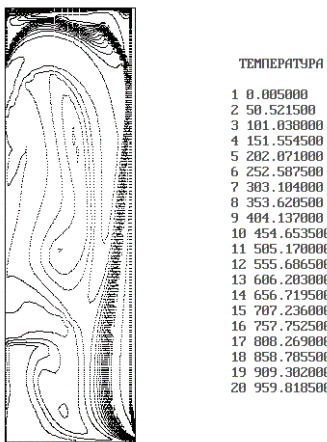


Рис. 8. Равномерное расположения форсунок с наклоном, температура.

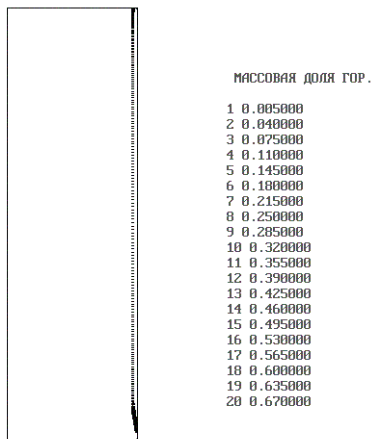


Рис. 9. Равномерное расположения форсунок с наклоном, массовая доля горючего.

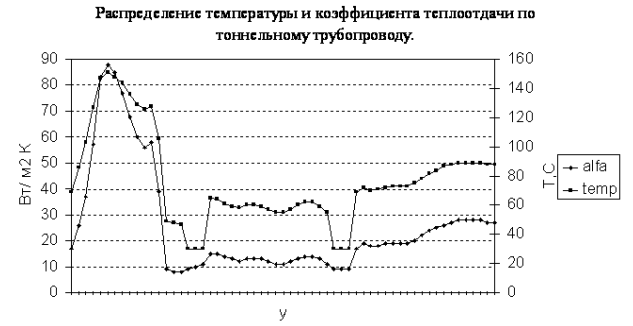
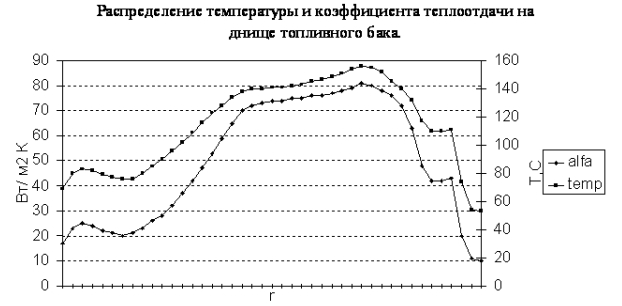


Рис 10.

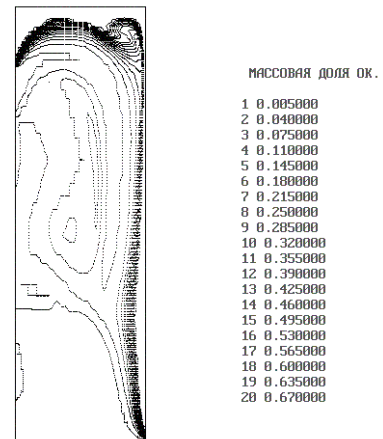


Рис. 11. Равномерное расположение форсунок с наклоном, массовая доля окислителя.

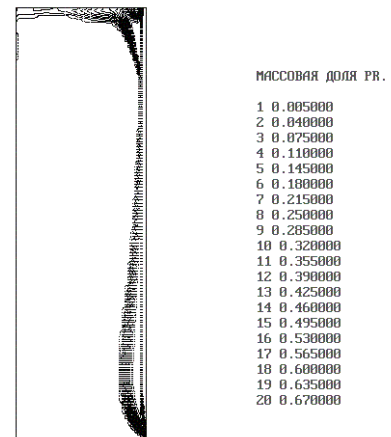
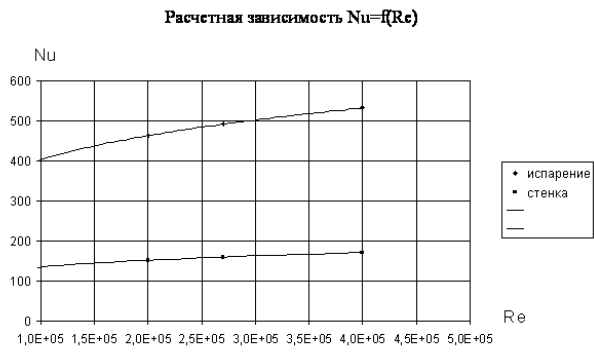


Рис. 12. Равномерное расположения форсунок с наклоном, массовая доля продуктов термического разложения горючего.



Copyright © 2007 Computational Engineering