

УДК 629.196.3

Р. М. Петренко

## О МЕТОДЕ РАСЧЕТА ГЕНЕРАТОРНЫХ СИСТЕМ НАДДУВА БАКОВ С АЗОТНЫМ ТЕТРОКСИДОМ

*Рассмотрен метод расчета генераторной системы наддува бака с азотным тетроксидом, в которой предпринята попытка моделирования температурного расслоения газа в баке по его высоте. Используемая физическая модель учитывает влияние газодинамических процессов, теплообмена и химических реакций на параметры газа в баке. Показана удовлетворительная сходимость результатов расчета с экспериментальными данными.*

*Розглянуто метод розрахунку генераторної системи наддування бака з азотним тетроксидом, у якій зроблено спробу моделювання температурного розшарування газу в баку по його висоті. Використана фізична модель враховує вплив газодинамічних процесів, тепломасообміну та хімічних реакцій на параметри газу в баку. Показано задовільну збіжність результатів розрахунку з експериментальними даними.*

*The paper considers the method of calculation of generative pressurization system for a tank with nitrogen tetroxide in which an attempt is made to model the temperature stratification of gas in the tank throughout the height of the tank. The applied physical model takes into account the impact of gas dynamic processes, heat-mass-exchange, and chemical reactions on gas parameters in the tank. The satisfactory convergence of the calculation results with the experimental data is shown.*

Система наддува (СН), обеспечивающая бескавитационную работу насосов двигательной установки и устойчивость конструкции бака, является одной из важнейших систем ракеты-носителя. В то же время конструктивная простота и эффективность СН существенно влияют на массовое совершенство РН и характер ее эксплуатации. Поэтому в ходе разработки СН расчетные методики играют важную роль, содействуют выбору ее рациональных параметров.

Известные методики расчета СН [1] за время своего применения не претерпели существенных изменений. В них газовый объем принимается равномерно распределенным, состав и температура газа по нему усредняются. Влияние теплообмена на параметры СН уточнялось для каждого изделия по результатам стендовых и летных испытаний. В то же время известно о существовании оптимума скорости и направления ввода газа в бак, использование которых позволило сократить тепловые потери СН до 50%, и их выбор проводился методом подбора в процессе экспериментальной

отработки. В современных условиях такого рода операции существенно увеличивают стоимость изделия, что требует совершенствования методов моделирования внутрибаковых процессов.

Эта задача усложняется особыми химическими и теплофизическими свойствами азотного тетроксида (АТ), которые зависят от давления и температуры. Учитывается это явление с помощью введения модели так называемой стратификации (расслоения) газа в баке.

На рис. 1 показана принципиальная схема СН бака с АТ, на верхнем днище которого установлены газогенератор наддува (ГГ) и предохранительный клапан.

При работе СН горячие продукты сгорания (ПС) через распылитель подаются в свободный объем бака. Принимается, что распылитель подводит ПС радиально (перпендикулярно своей продольной оси) и равномерно по всей окружности. Сформированная газовая смесь в баке расширяется (при вытеснении компонента) и участвует в химических реакциях и теплообменных процессах (нагрев кон-

струкции бака и компонента топлива в совокупности с испарением (конденсацией)

его паров) [2].

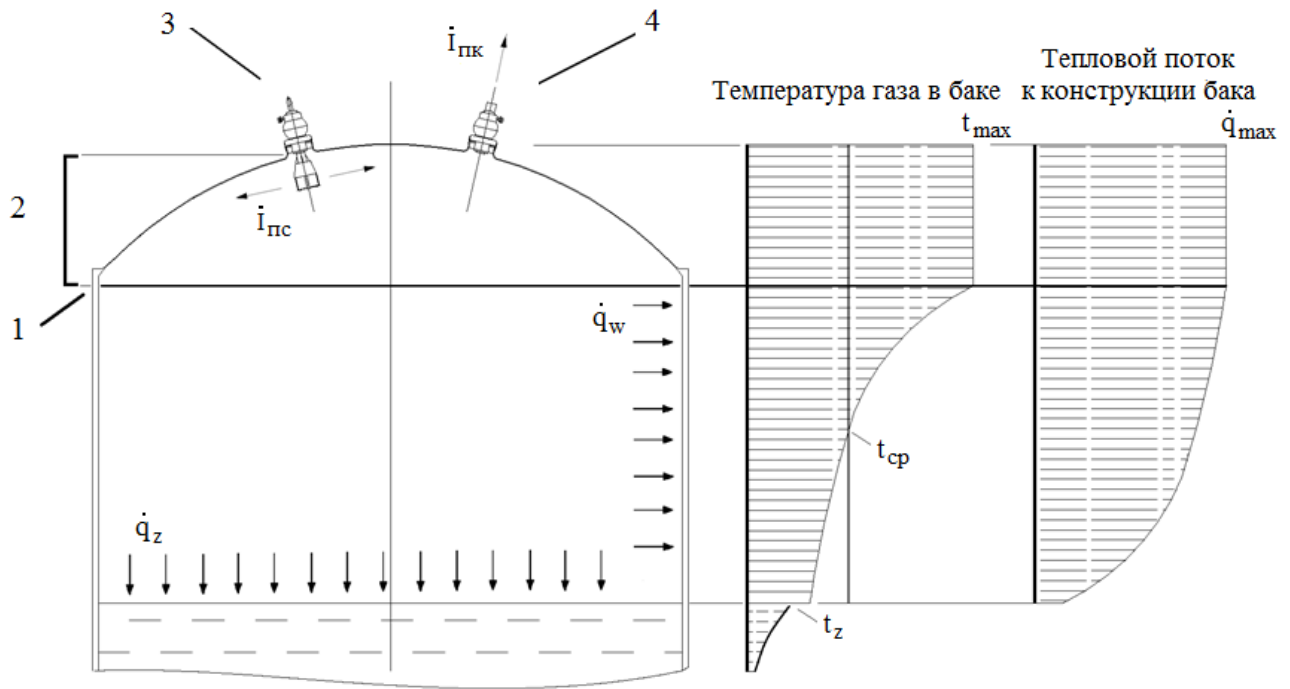


Рис. 1. Модель работы генераторной СН с учетом температурного расслоения газа в баке:  
 1 – уровень дальнобойности струйных течений; 2 – зона интенсивного перемешивания;  
 3 – газогенератор наддува; 4 – предохранительный клапан

При введении ПС в бак образуются струйные газовые течения, происходит смешение вдуваемого газа с уже имеющимся. Из результатов отработки СН известно о наличии дальнобойности этих течений, в рамках которой происходит интенсивное перемешивание газа. Между верхним дном и уровнем, до которого распространяются струйные течения в газовом объеме, формируется зона интенсивного перемешивания, в которой устанавливается примерно одинаковая температура (рис. 1). При вытеснении жидкого компонента часть газа выходит из этой зоны и в дальнейшем участвует лишь в теплообменных процессах с зеркалом компонента и конструкцией бака.

В процессе отработки и эксплуатации генераторных СН получено эмпирическое выражение дальнобойности струйных течений [3]

$$h_d = m \sqrt{\frac{S_{np}}{\pi}} \left( \frac{W_{np}^2}{8gn_x \frac{S_{np}}{\pi}} \frac{RT}{(RT)_{пс} - RT} \right)^n, \quad (1)$$

где  $m, n$  – эмпирические коэффициенты;  $S_{np}$  – приведенная площадь проходного сечения распылителя;  $W_{np}$  – средняя скорость газа на выходе из распылителя;  $g$  – ускорение свободного падения;  $n_x$  – осевая перегрузка;  $(RT)_{пс}$ ,  $RT$  – удельная работоспособность ПС и газа в баке соответственно.

Выражение (1) позволяет в зависимости от конфигурации распылителя определить расстояние, на которое распространяется зона интенсивного перемешивания. При этом учитывается влияние выталкивающей силы на дальнобойность, которая, в свою очередь, зависит от значения осевой перегрузки и соотношения плотностей вдувае-

мого и уже имеющегося газов ( $RT/[(RT)_{лс} - RT]$ ).

Таким образом, под влиянием перемешивания и выталкивающей силы формируется тепловое расслоение газа. На рис. 1 условно приведена эпюра его температур  $t$  и удельного теплового потока в конструкцию бака по его высоте  $q_w$ .

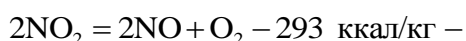
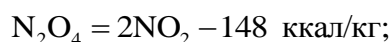
Рассмотрим особенности внутриваковых процессов при наддуве бака с АТ генераторным газом. Известно, что АТ и некоторые ПС на его основе обладают ярко выраженной химической активностью [4]. Характер протекания этих реакций зависит от параметров среды, в которой находятся реагирующие вещества.

Зависимость параметров ПС в ГГ от коэффициента  $K_m$

Коэффициент соотношения компонентов топлива $K_m$	Температура ПС, °С	Газовая постоянная ПС, Дж/(кг·К)	Массовая доля веществ в ПС, %					
			$\varphi_{CO_2}$	$\varphi_{N_2}$	$\varphi_{H_2O}$	$\varphi_{O_2}$	$\varphi_{NO_2}$	$\varphi_{NO}$
16	483,89	245,64	8,1	13,8	6,6	23,6	34,4	14
17	413,5	241,72	7,8	13,1	6,3	22,1	38,2	12,9
18	346	237,95	7,5	12,4	6	20,6	42	11,5
19	281,5	234,42	7,2	11,7	5,8	19,4	45,8	10,2
20	219	231,03	6,9	11,1	5,5	18,1	49,5	8,8

На изделиях разработки предприятия для СН баков с АТ освоены температуры в ГГ от 200 до 500 °С. В таблице приведены массовый состав и теплофизические свойства этих ПС [5].

При сгорании компонентов топлива в ГГ равновесие основных химических реакций при участии АТ –



сдвигается в сторону накопления тепловой энергии, и ПС при попадании в бак, в котором снижаются давление и температура среды, эту энергию выделяют [5]. Свободный объем бака заполняется химически активными продуктами, которые на любое изменение параметров газовой среды отвечают изменением массового состава и соответствующим тепловым эффектом. Эти особенности являются отличительными среди всех известных СН, поскольку в прочих системах газ наддува не претерпевает значительных изменений по составу и теплофизическим свойствам.

Явление температурной стратификации газа в баке существенно влияет на протекание химических реакций. Сдвиг их рав-

новесия в каждой точке газового объема зависит от температуры в ней, и учет этого явления существенно повышает точность расчета параметров СН.

На основании законов термо- и газовой динамики сформируем алгоритм расчета параметров СН.

Для учета температурного расслоения газа свободный газовый объем разбивают на некоторое количество малых объемов. Принимается, что в пределах каждой ячейки газ равномерно распределен и имеет одинаковую температуру. Эти объемы выполняют работу расширения при опускании уровня компонента, отдают (воспринимают) тепловой поток от конструкции бака. Принимается упрощенное разбиение газового объема (рис. 2), в котором параметры газа в радиальном направлении на одной и той же высоте усредняются.

Количество малых объемов выбирают максимальным в зависимости от производительности вычислительной техники. Однако на практике разбиения на малые объемы (<1 см<sup>3</sup>) не требуется, так как оно незначительно влияет на точность расчетов.

В начальный момент все элементарные объемы  $V_v$  равномерно заполняются газом

с одинаковой температурой. Суммарная внутренняя энергия газа в баке

$$u = PV/(k - 1), \quad (2)$$

где  $P$  – давление газа;  $V$  – занимаемый газом объем;  $k$  – показатель адиабаты газа.

Внутренняя энергия элементарного объема определяется по формулам

$$u_v = G_v R_v T_v / (k_v - 1); \quad (3)$$

$$\sum u_v = u, \quad (4)$$

где  $G_v, R_v, T_v, k_v$  – масса, газовая постоянная, температура и показатель адиабаты газа в элементарном объеме.

В процессе работы СН газовые объемы выполняют работу расширения, изменяются их массы и теплофизические свойства, они отдают или воспринимают тепловой поток. Все эти процессы приводят к изменению их внутренней энергии:

$$\begin{aligned} \dot{u}_v = & \frac{(k_v - 1)^2 \left( \dot{I}_{v_\Sigma} + \dot{Q}_{v_\Sigma} \right) \cdot V_v}{(k_v - 1) \cdot \left( \left[ k_v + \dot{k}_v \Delta \tau \right] - 1 \right) \cdot V_v} - \\ & - \frac{\dot{V}_v (k_v - 1) k_v P}{(k_v - 1) \cdot \left( \left[ k_v + \dot{k}_v \Delta \tau \right] - 1 \right) \cdot V_v}, \quad (5) \end{aligned}$$

где  $\dot{V}_v$  – увеличение элементарного объема;  $\dot{k}_v$  – изменение показателя адиабаты в элементарном объеме;  $\dot{I}_{v_\Sigma}$  – суммарная энтальпия подводимого газа в элементарный объем;  $\dot{Q}_{v_\Sigma}$  – суммарный тепловой поток, воспринимаемый элементарным объемом.

Суммарная энтальпия подводимого газа в элементарный объем определяется так:

$$\dot{I}_{v_\Sigma} = \dot{G}_{пс.j} T_{пс} \sum C_{p_j} \varphi_j, \quad (6)$$

где  $\dot{G}_{пс.j}$  – массовый расход газа на наддув, который подводится в элементарный объем;  $T_{пс}$  – температура вводимых в бак ПС;  $C_{p_j}$  – теплоемкость при постоянном давлении;  $\varphi_j$  – массовая доля каждого  $j$ -того вещества, входящего в состав ПС.

Суммарный тепловой поток, подводимый к элементарному объему, определяется как

$$\dot{Q}_{v_\Sigma} = \dot{Q}_{z.v} + \dot{Q}_{w.v}, \quad (7)$$

где  $\dot{Q}_{z.v}$  и  $\dot{Q}_{w.v}$  – подводимые тепловые потоки к элементарному объему от зеркала компонента и конструкции бака соответственно.

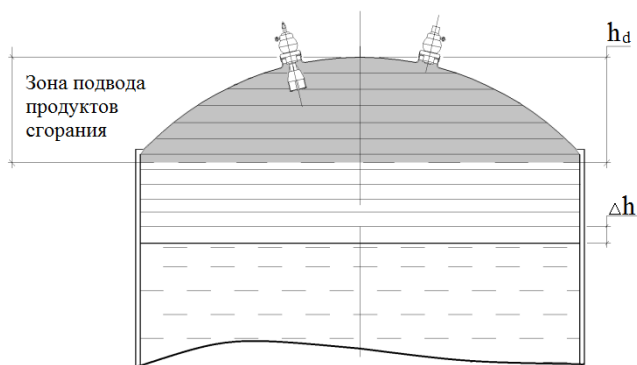
Температура каждого элементарного объема связана с его массой, внутренней энергией и теплофизическими свойствами:

$$T_v = \frac{(k_v - 1)}{G_v R_v} u_v. \quad (8)$$

Давление газа в баке определяется по усредненным параметрам:

$$P = \frac{\sum u_v}{\sum V_v} (k - 1). \quad (9)$$

Подвод ПС осуществляется только в те объемы, которые находятся в зоне интенсивного перемешивания. С помощью уравнения (1) определяем дальнобойность струйного течения, после чего проводим расчет с условием подвода ПС только в те элементарные объемы, которые находятся между верхним дном бака и уровнем распространения струйных газовых течений (рис. 2).



$$\dot{Q}_{w,v} = a_w S_{w,v} (T_v - T_w), \quad (11)$$

где  $S_z$  – площадь зеркала компонента;  $S_{w,v}$  – площадь теплообмена элементарного объема с конструкцией бака;  $T_z$  и  $T_w$  – средние температуры зеркала компонента и конструкции бака соответственно.

Процесс теплопередачи в жидкий компонент выполняется тем слоем газа, который с ним контактирует. В большинстве случаев в газовом объеме бака происходит непрерывное движение газовых масс, таким образом «обновляя» газовый слой непосредственно вблизи жидкости. Для упрощения принимается, что теплообмен происходит с газом, имеющим усредненную температуру, и его влияние распространяется на все газовые объемы пропорционально доле занимаемого ими объема.

В свою очередь, зеркало компонента под воздействием теплового потока изменяет свою температуру по времени работы СН. Оценка его прогрева проводится по формуле [1]

$$\Delta T_z = \frac{b \cdot a_z \sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi} S_z \lambda_z} \int_0^{\tau} \sum \dot{Q}_{z,v} d\tau, \quad (12)$$

где  $b$  – эмпирический коэффициент;  
 $\tau$  – время работы ГГ;  
 $\lambda_z$  – теплопроводность жидкого АТ.

Аналогично температура конструкции бака претерпевает изменения по времени работы СН. Определение средней темпе-

Рис. 2. Разбиение объема на элементарные составляющие

Из анализа результатов стендовых и летных испытаний РН известны коэффициенты теплоотдачи от газа к жидкому компоненту  $a_z$  и конструкции бака  $a_w$  [1], на основе которых определяют соответствующие тепловые потоки:

$$\dot{Q}_{z,v} = \frac{V_v}{V} a_z S_z (T - T_z); \quad (10)$$

ратуры проводится на основе уравнения теплового баланса

$$T_w = \frac{a_w T + \frac{c_w \rho_w \delta_w}{\Delta \tau} T_{w(i-1)}}{\frac{c_w \rho_w \delta_w}{\Delta \tau} + a_w}, \quad (13)$$

где  $c_w$  – теплоемкость материала бака;  
 $\rho_w$  – плотность материала бака;  
 $\delta_w$  – средняя толщина конструкции бака;  
 $\Delta \tau$  – шаг интегрирования;  
 $T_{w(i-1)}$  – средняя температура конструкции бака на предыдущем шаге интегрирования.

В процессе наддува бака генераторным газом происходит насыщение свободного объема парами АТ. Снижение давления газа может достигать значения давления насыщенных паров АТ, что приводит к их конденсации. Учет этого явления выполняется за счет условия, что масса паров в каждом газовом объеме не превышает граничного значения

$$G_{s,t} = \frac{P_s(T_v) V_v}{R_s T_v}, \quad (14)$$

где  $P_s(T_v)$  – давление насыщенных паров АТ при температуре  $T_v$ ;  $R_s$  – газовая постоянная паров АТ.

Решая совместно уравнения (1) и (2)-(14) методами численного интегрирования, определяем параметры газа наддува в сво-

бодном объеме бака, температуру конструкции и компонента в баке.

В качестве примера апробации разработанного метода рассмотрим расчетные и экспериментальные данные по одному из пусков РН «Циклон-3». Для решения системы уравнений использован метод Эйлера.

На рис. 3 показана расчетная и экспериментальная зависимость давления газа в баке окислителя от времени работы II ступени.

В промежуток от 118 до 245 с проводится наддув бака, а после 245 с подача ПС в бак прекращается. При этом после выключения ГГ продолжает свою работу рулевая двигательная установка с полнотропным поступлением к ней компонента. На всем промежутке времени работы СН наблюдается сходимость расчетных данных с экспериментальными (относительная погрешность до 7%).

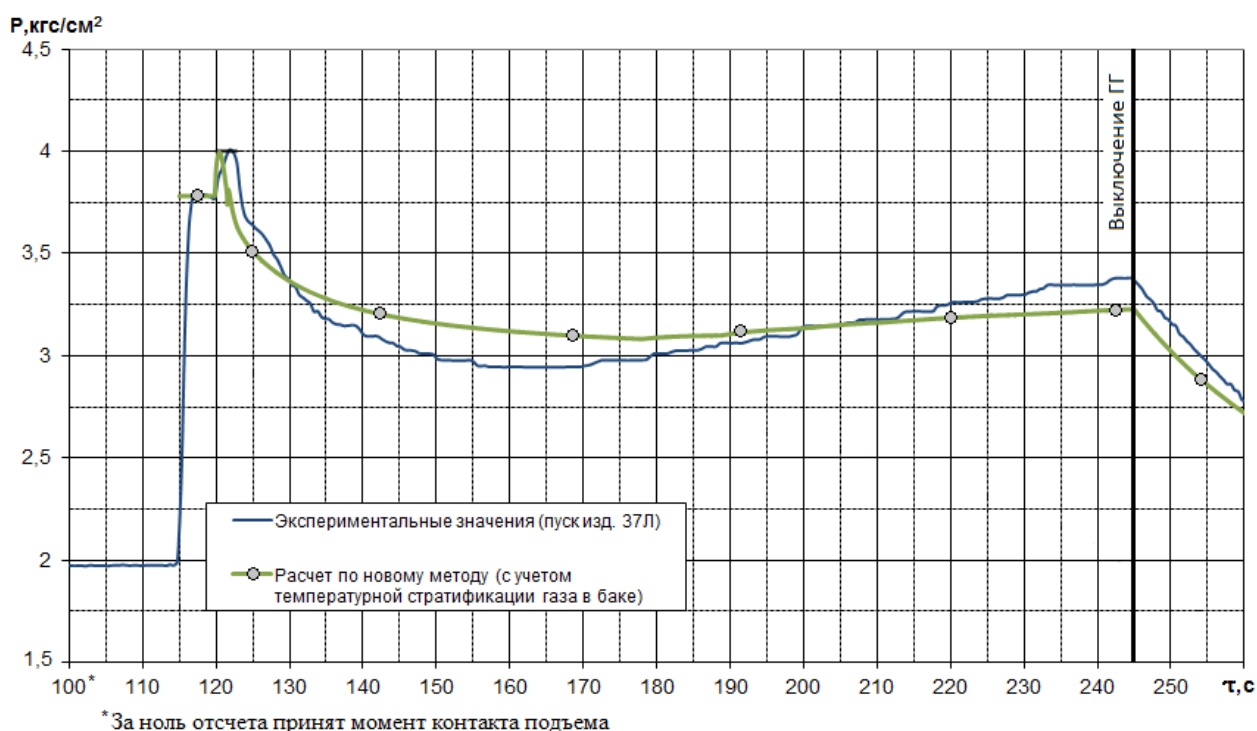


Рис. 3. Изменение по времени полета давления газа в баке

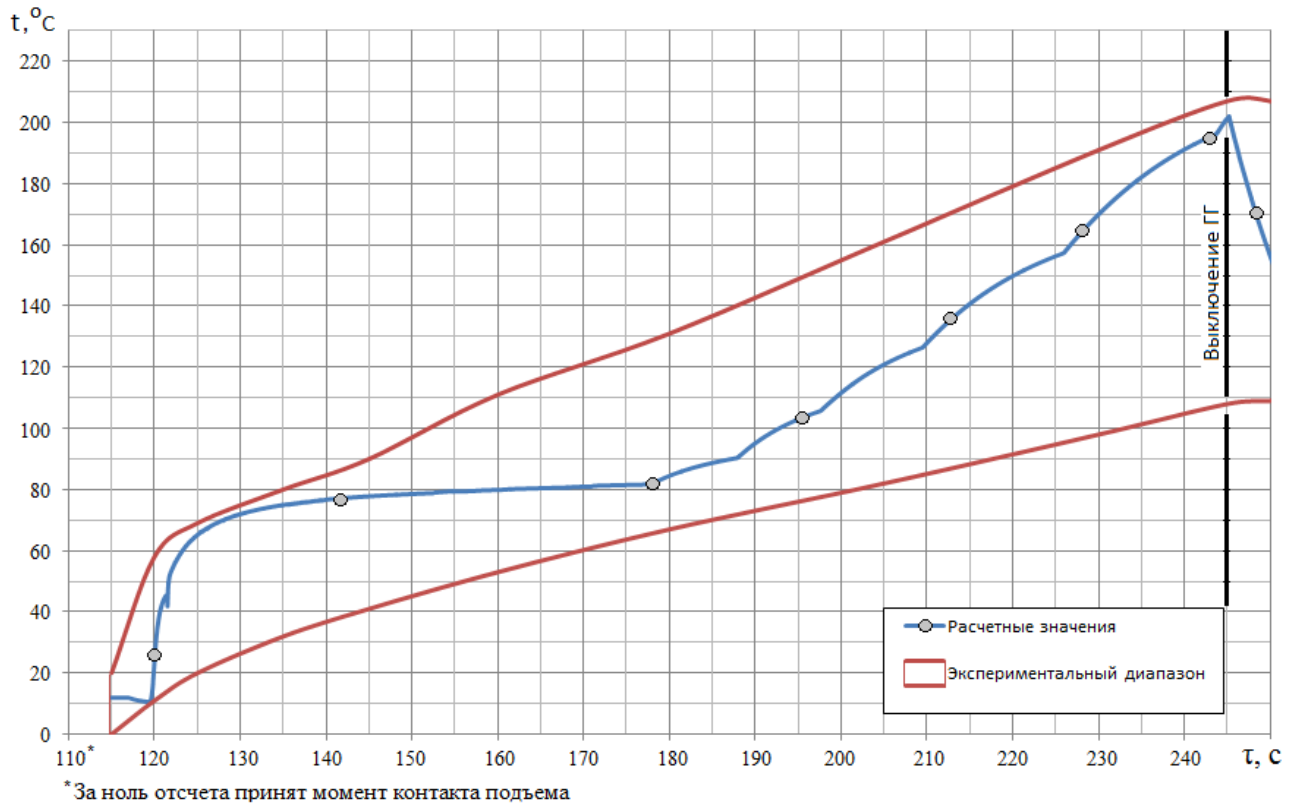


Рис. 4. Максимальная температура газа в баке (область верхнего днища)

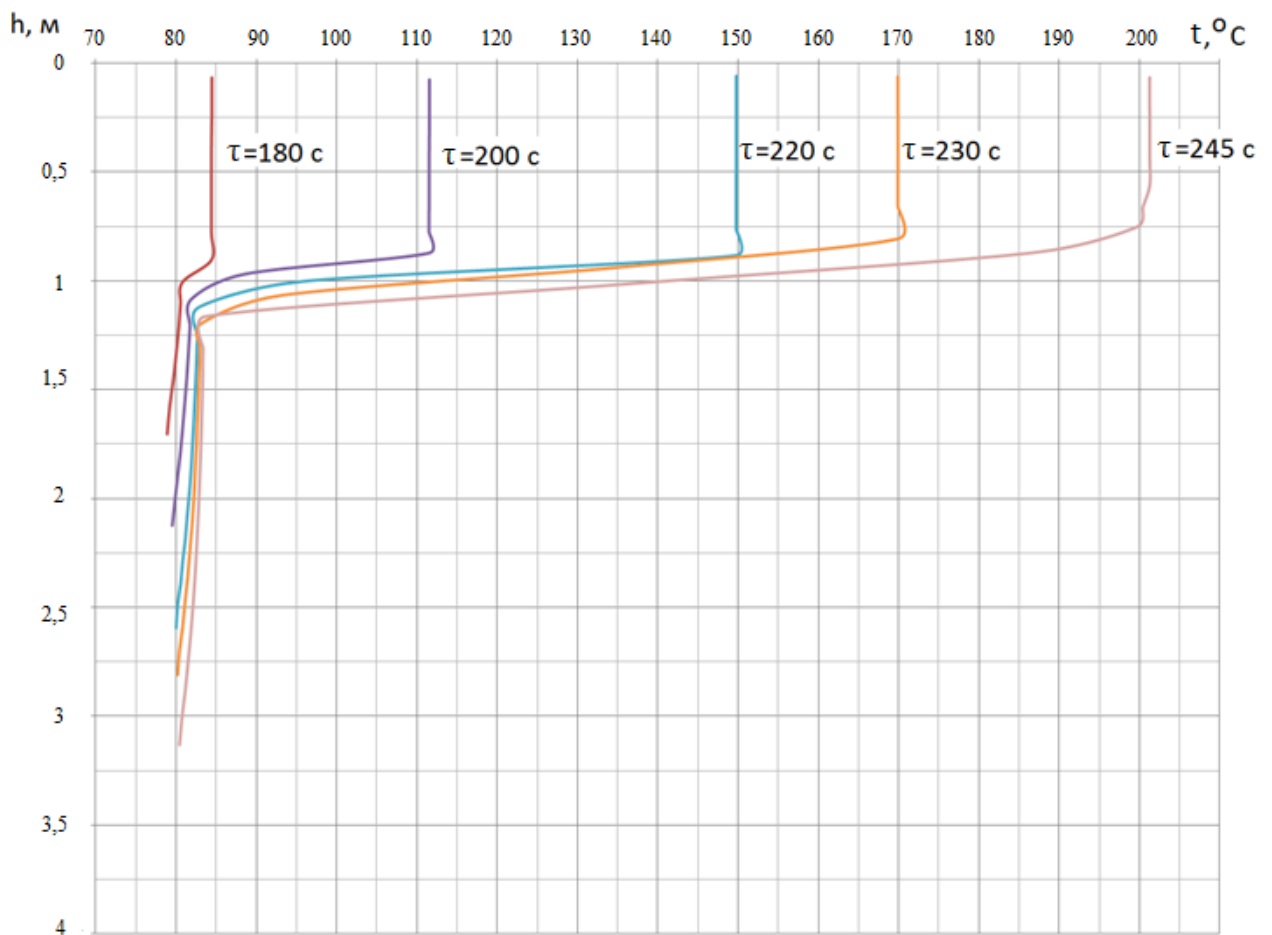


Рис. 5. Расчетный температурный профиль газа в баке

На рис. 4 приведено изменение максимальной температуры газа в баке (у верхнего днища) и вместе с ним – минимальные и максимальные значения этой температуры на основе экспериментальных данных, полученных при стендовых и летных испытаниях. На 118-й с начинается подача ПС в бак, до ~177 с влияние стратификации газа в баке отсутствует. После 177-й с зона интенсивного перемешивания перестает распространяться на весь газовый объем и горячий газ скапливается преимущественно у верхнего днища бака. Резкие изменения характера расчетной кривой связаны с особенностями разбиения свободного газового объема на малые объемы.

На рис. 5 приведено изменение по времени температурного профиля газа в баке в зависимости от его высоты. Ноль высоты вертикальной оси соответствует полюсу верхнего днища. На графике показаны температурные поля до моментов времени 180, 200, 220, 230 и 245 с (от момента отрыва РН от стартового стола). Можно наблюдать, как в верхней части бака формируется высокотемпературная, а в нижней – низкотемпературная «застойная» зоны.

По приведенным результатам расчета можно утверждать об их сходимости с экспериментальными значениями в расчетном промежутке времени.

### Выводы

Построенная модель работы СН позволяет оценить температурное расслоение газа по высоте бака. С учетом этого явления можно более достоверно моделировать влияние процессов тепломассообмена и химического превращения паров АТ в баке

при работе СН. Установлена зависимость параметров конструкции распылителя от процесса формирования температурного расслоения газа в баке, тем самым влияющая на параметры газа в баке. Достоверность методики подтверждена удовлетворительной сходимостью расчетных и экспериментальных данных.

Использование методики на этапе разработки СН позволяет сократить объем ее экспериментальной отработки и в итоге снизить стоимость разработки СН.

### Список использованной литературы

1. Антонов В. А., Логвиненко А. И., Мосейко В. А. и др. Расчет наддува горячими газами баков горючего (НДМГ) ракет дальнего действия // Оборонная техника. – 1967. – №10.
2. Беляев Н. М. Системы наддува топливных баков ракет-носителей. – М.: Машиностроение, 1974. – 336 с.
3. Испытательные комплексы и экспериментальная отработка жидкостных ракетных двигателей / А. Г. Галеев, К. П. Денисов, В. И. Ищенко, В. А. Лисейкин, Г. Г. Сайдов, А. Ю. Черкашин. – М.: Машиностроение, 2012. – 362 с.
4. Теплодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. Т. 4 / Под ред. акад. В. П. Глушко. – М.: АН СССР, 1974. – 263 с.
5. Термодинамические и переносные свойства химически реагирующих газовых систем. Ч. 1 / Под ред. А. К. Красина, В. Б. Нестеренко и др. – Минск: Наука и техника, 1967. – 206 с.

Статья поступила 30.06.2017