

ОХЛАЖДЕНИЕ ГОРЯЧЕГО ГАЗА ТВЁРДЫМИ ОХЛАДИТЕЛЯМИ

В.В. Кириллов

г. Челябинск, ЮУрГУ

COOLING HOT GAS WITH SOLID COOLANTS

V.V. Kirillov

Chelyabinsk, South Ural State University

Представлен метод расчёта процессов тепло- и массообмена в газогенераторе с твёрдым охладителем для производства охлаждённого газа.

Ключевые слова: математическое моделирование, камера сгорания, камера охлаждения, охладитель, разностная схема.

This paper presents a method for calculating the heat and mass transfer in a gas generator with a solid cooler for the production of cooled gas.

Keywords: mathematical modeling, combustion chamber, cooling chamber, a cooler, the difference scheme.

Газ как рабочее тело применяется в различных областях техники. Одной из таких областей является использование газа для заполнения различного рода понтонов при подводных работах, автомобильных подушек безопасности, плавающих платформ разного назначения и т. п. [1]. Применение газобаллонных систем для этих целей требует наличия баллонов с сжатым газом высокого давления, что не всегда оправданно с точки зрения габаритов и массы.

С этой точки зрения более выгодно использовать твёрдое топливо, продукты сгорания которого можно использовать в вышеуказанных системах. Однако для этого необходимо снизить температуру газа до 350...450 К. Одним из методов охлаждения горячего газа является пропускание его через слой твёрдого охладителя, разлагающегося с поглощением тепла. В качестве охладителей применяются составы, продукты разложения которых не содержат агрессивных газов, например, углекислый аммоний.

На рис. 1 изображена принципиальная схема низкотемпературного газогенератора (НТГГ). Продукты сгорания топлива из камеры сгорания (КС) поступают в камеру охлаждения (КО), в которой находится твёрдый охладитель в виде гранул.

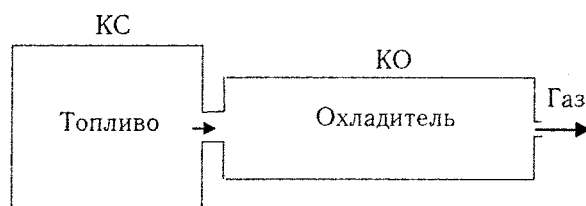


Рис. 1. Принципиальная схема НТГГ

Температура горения топлива составляет 1600...2000 К. Рабочие процессы в КС описываются обычно нульмерной математической моделью, поскольку температура и давление по длине КС меняется незначительно. В КО температура меняется от температуры горения топлива в среднем до 400 К. В широком диапазоне изменяются также плотность и давление. Кроме того, как показывают экспериментальные исследования [2], скорость разложения охладителя сильно зависит от температуры газа и существенно изменяется по длине КО. Обычно подобные аппараты обладают осевой симметрией, поэтому для описания процессов гидродинамики и тепло- и массообмена применяются одномерные математические модели. Применение двумерных и трёхмерных математических моделей требует описания движения газа в каналах сложной формы, образованных разлагающимися гранулами. А поскольку заполнение КО гранулами производится засыпкой, расположение гранул и форма каналов имеют случайный характер. Кроме того, нужно описывать движение каждой гранулы. Количество гранул в КО составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч. Подобные задачи в настоящее время практически не реализуемы даже на суперкомпьютерах. Поэтому движение газа через слой гранул целесообразно описывать как течение через пористый слой некоторой начальной пористости. По данным [3] при свободной засыпке средняя пористость находится в диапазоне 0,32...0,39.

Газовая смесь в КО состоит из неконденсирующихся продуктов сгорания топлива (НК газы

ПСТ), таких как, например, углекислый газ и т. п., неконденсирующихся продуктов разложения охладителя (НК газы ПРО), таких как углекислый газ, аммиак и т.п., и водяного пара. Состояние НК газов в КС и КО и пара в КС подчиняется уравнению состояния идеального газа. Состояние водяного пара в КО определяется согласно [4].

Рабочие процессы в КС описываются следующей системой уравнений:

$$\frac{d\rho_{\text{КС}} V_{\text{КС}}}{d\tau} = \rho_{\text{Т}} u_{\text{Т}} F_{\text{Т}} - G_{\text{КС}}; \quad (1)$$

$$\frac{d\rho_{\text{КС}} V_{\text{КС}} c_{\text{вк}} T_{\text{КС}}}{d\tau} = \rho_{\text{Т}} u_{\text{Т}} h_{\text{Т}} F_{\text{Т}} - G_{\text{КС}} h_{\text{КС}} - Q_{\text{КС}}; \quad (2)$$

$$\frac{d\rho_{\text{КС}} g_{\text{п,КС}} V_{\text{КС}}}{d\tau} = \rho_{\text{Т}} u_{\text{Т}} F_{\text{Т}} \beta_{\text{п}} - G_{\text{КС}} g_{\text{п,КС}}; \quad (3)$$

$$\frac{d\rho_{\text{КС}} g_{\text{т,КС}} V_{\text{КС}}}{d\tau} = \rho_{\text{Т}} u_{\text{Т}} F_{\text{Т}} (1 - \beta_{\text{п}}) - G_{\text{КС}} g_{\text{т,КС}}; \quad (4)$$

$$c_w \rho_w V_w \frac{dT_{w,\text{КС}}}{d\tau} = \alpha_{\text{КС}} (T_{\text{КС}} - T_{w,\text{КС}}) F_{w,\text{КС}}; \quad (5)$$

$$p_{\text{КС}} = \rho_{\text{КС}} R_{\text{КС}} T_{\text{КС}}; \quad (6)$$

$$R_{\text{КС}} = R_{\text{Т}} g_{\text{Т}} + R_{\text{п}} g_{\text{п}} + R_{\text{а}} g_{\text{а}};$$

$$c_{\text{вк}} = c_{\text{вТ}} g_{\text{Т}} + c_{\text{вп}} g_{\text{п}} + c_{\text{ва}} g_{\text{а}}. \quad (7)$$

Здесь ρ – плотность; G – расход; p – давление; T – температура; h – энтальпия; F – площадь поверхности; V – объём; Q – тепловой поток; R – газовая постоянная; α – коэффициент теплоотдачи; c_v – удельная теплоёмкость при постоянном объёме; c – удельная теплоёмкость; g – массовая доля компонента газовой смеси; τ – время; $\beta_{\text{п}}$ – массовая доля водяного пара в продуктах сгорания топлива; индексы: w – стенка; Т – топливо; а – воздух; КС – камера сгорания.

Движение газа в КО описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} + \frac{\partial \Psi}{\partial x} = F, \quad (8)$$

$$\text{где } \Phi = \begin{bmatrix} \rho S \\ G \\ \rho e S \end{bmatrix}; \quad \Psi = \begin{bmatrix} G \\ Gw + pS \\ Ge + pwS \end{bmatrix};$$

$$F = \begin{bmatrix} J_m \\ -\xi \frac{G^2 \Pi_{\text{ЭКВ}}}{8S^2 \rho} \\ -\Pi_w q_w + Q_m \end{bmatrix};$$

$$e = c_v T + \frac{w^2}{2}; \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho S g_i}{\partial \tau} + \frac{\partial G g_i}{\partial x} = J_{m,i}, \quad i = \text{п, т, х}. \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_w}{\partial \tau} = \frac{a_w}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_w}{\partial r} \right); \quad (11)$$

$$p = \rho R T; \quad (12)$$

$$\rho_{\text{п}} = \rho(p_{\text{п}}, T_{\text{п}}); \quad (13)$$

$$S = S_0 \varepsilon; \quad R = \sum_i R_i g_i; \quad c_v = \sum_i c_{vi} g_i; \quad i = \text{т, х, а}.$$

Здесь J_m – поток массы продуктов разложения охладителя в КО; $J_{m,i}$ – поток массы i -го компонента; x – продольная координата; r – радиальная координата; a – коэффициент температуропроводности; $\Pi_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный периметр гранул; Q_m – сток тепла из-за разложения охладителя; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; q_w – плотность теплового потока; ε – пористость; S_0 – площадь сечения КО без охладителя; w – скорость; индексы: х – охладитель.

Начальные и граничные условия системы уравнений (1)–(5), (8)–(11) записываются следующим образом:

$$p_{\text{КС}}(0) = p_0; \quad T_{\text{КС}}(0) = T_0; \quad T_w(0) = T_0; \quad g_{i,\text{КС}}(0) = 0. \quad (14)$$

$$p(0, x) = p_0; \quad T(0, x) = T_0; \quad G(0, x) = 0; \quad (15)$$

$$T_w(0, r) = T_0; \quad g_i(0, x) = 0.$$

На входе в КО граничные условия задаются в виде:

$$\frac{k}{k-1} R_{\text{КС}} T_{\text{КС}} = \frac{k}{k-1} \frac{p(\tau, 0)}{\rho_{\text{КС}}(\tau)} + \frac{w^2(\tau, 0)}{2}; \quad (16)$$

$$p_{\text{КС}}(\tau) = p(\tau, 0) + \rho(\tau, 0) w^2(\tau, 0); \quad (17)$$

$$g_{\text{Т}}(\tau, 0) = g_{\text{Т,КС}}(\tau); \quad g_{\text{п}}(\tau, 0) = g_{\text{п,КС}}(\tau); \quad (18)$$

$$g_{\text{х}}(\tau, 0) = 0,$$

где k – показатель адиабаты. На выходе из КО граничное условие записывается следующим образом:

$$\text{при } \frac{p_{\text{н}}}{p} > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$G(\tau, l) = \mu S_{\text{ВЫХ}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \rho p \left[\left(\frac{p_{\text{н}}}{p} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{\text{н}}}{p} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]};$$

$$\text{при } \frac{p_{\text{н}}}{p} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$G(\tau, l) = \mu S_{\text{ВЫХ}} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \rho p}. \quad (19)$$

Здесь p – давление на выходе из КО, $p_{\text{н}}$ – давление у потребителя; μ – коэффициент расхода; $S_{\text{ВЫХ}}$ – площадь выходного отверстия. Для уравнения теплопроводности (11) задаются граничные условия III рода.

Уравнения (1)–(5) решаются методом Рунге–Кутты 4-го порядка [5]. Для решения уравнений (8)–(11) применяется метод конечных разностей. Уравнения (8) аппроксимируются неявной разностной схемой на равномерной разностной сетке:

$$\frac{\Phi_n^{m+1} - \Phi_n^m}{\Delta\tau} + \frac{\Psi_n^{m+1} - \Psi_{n-1}^{m+1}}{\Delta x} = F_n^{m+1}, n=2...N. \quad (20)$$

Здесь n – номер узла разностной сетки по длине КО; m – номер момента времени; $\Delta x, \Delta\tau$ – шаги разностной схемы по координате x и времени соответственно. Векторы $\Phi_n^{m+1}, \Psi_n^{m+1}, F_n^{m+1}$ раскладываются в ряд Тейлора с сохранением первых членов ряда:

$$\Phi_n^{m+1} = \Phi_n^{\overline{m+1}} + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial Y} \right)_n^{\overline{m+1}} \left(Y_n^{m+1} - Y_n^{\overline{m+1}} \right);$$

$$\Psi_n^{m+1} = \Psi_n^{\overline{m+1}} + \left(\frac{\partial \Psi}{\partial Y} \right)_n^{\overline{m+1}} \left(Y_n^{m+1} - Y_n^{\overline{m+1}} \right);$$

$$F_n^{m+1} = F_n^{\overline{m+1}} + \left(\frac{\partial F}{\partial Y} \right)_n^{\overline{m+1}} \left(Y_n^{m+1} - Y_n^{\overline{m+1}} \right);$$

$$Y^t = |p, T, G|.$$

В результате разностное уравнение (20) приводится к виду

$$A_n Y_n^{m+1} - B_{n-1} Y_{n-1}^{m+1} = C_n, n=2...N, \quad (21)$$

где A и B – матрицы 3×3 , C – вектор размерности 3;

$$A_n = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial Y} \right)_n^{\overline{m+1}} + \frac{\Delta\tau}{\Delta x} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial Y} \right)_n^{\overline{m+1}} - \Delta\tau \left(\frac{\partial F}{\partial Y} \right)_n^{\overline{m+1}};$$

$$B_{n-1} = \frac{\Delta\tau}{\Delta x} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial Y} \right)_{n-1}^{\overline{m+1}};$$

$$C_n = -\Phi_n^m + \Phi_n^{\overline{m+1}} - \frac{\Delta\tau}{\Delta x} \left(\Psi_n^{\overline{m+1}} - \Psi_{n-1}^{\overline{m+1}} \right) + \Delta\tau F_n^{\overline{m+1}} + A_n Y_n^{\overline{m+1}} - B_{n-1} Y_{n-1}^{\overline{m+1}}.$$

Индекс $\overline{m+1}$ означает параметр на предыдущей итерации ($m+1$)-го слоя по времени.

Уравнения (10) аппроксимируются неявной разностной схемой

$$\frac{(\rho S g_i)_n^{m+1} - (\rho S g_i)_n^m}{\Delta\tau} + \frac{(G g_i)_n^{m+1} - (G g_i)_{n-1}^{m+1}}{\Delta x} = (J_{m,i})_n^{m+1}, \quad (22)$$

из которой находятся массовые доли компонентов газовой смеси.

Граничные условия (16), (17) преобразуются к виду

$$A_1 Y_1^{m+1} = C_1, \quad (23)$$

где A_1 – матрица 2×3 , C_1 – вектор размерности 2.

Граничное условие (19) преобразуется к виду

$$B_N Y_N^{m+1} = C_N, \quad (24)$$

где B_N – вектор размерности 3, C_N – скаляр.

Краевая задача (21), (23), (24) решается методом ортогональной прогонки [6, 7].

Уравнение теплопроводности (11) аппроксимируется неявной разностной схемой и приводит-

ся к трёхточечному разностному уравнению. Решение разностного уравнения выполняется трёхточечной скалярной прогонкой [6].

Результаты расчёта представлены на рис. 2–4.

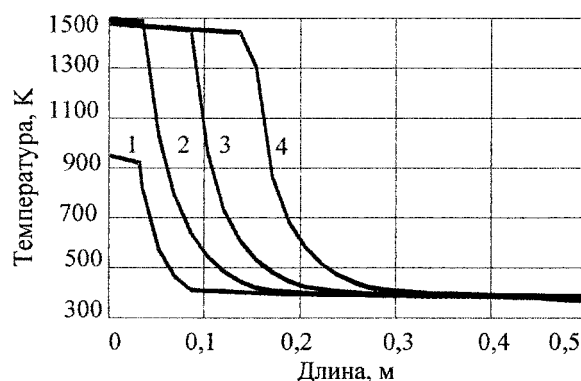


Рис. 2. Изменение температуры по длине КО: 1 – $\tau=0,02$ с; 2 – $\tau=0,2$ с; 3 – $\tau=2,0$ с; 4 – $\tau=4,0$ с

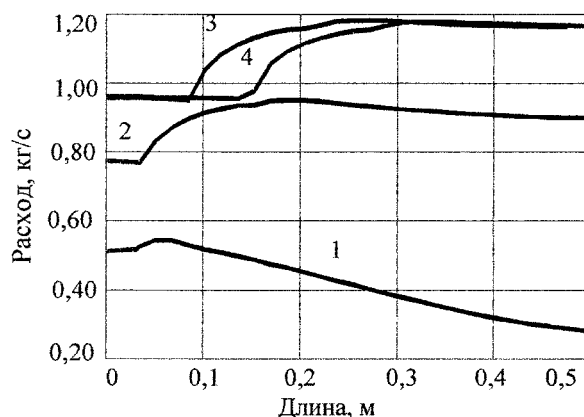


Рис. 3. Изменение расхода по длине КО

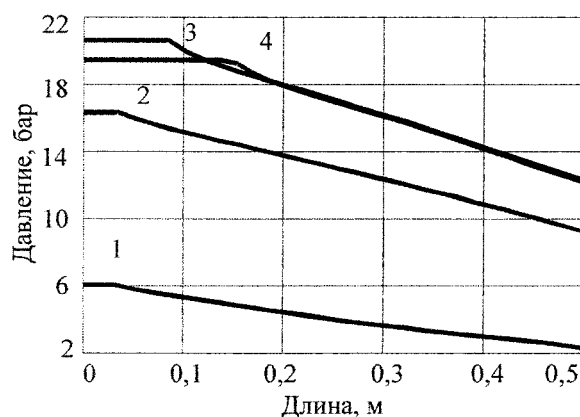


Рис. 4. Изменение давления по длине КО

На рис. 2 показано изменение температуры по длине КО в различные моменты времени. На рис. 3 показано изменение расхода по длине КО, а на рис. 4 – изменение давления по длине КО. Температура продуктов сгорания на входе в КО составляет 1500 К.

С течением времени из-за разложения гранул фронт горячего газа перемещается в глубь КО. Однако температура на выходе из КО находится на уровне 400 К. Изменение расхода и давления на входе в КО связано с горением топлива в КС и вследствие этого изменением давления в КС. Истечение из КС в КО происходит при критическом перепаде давления, поэтому процессы, происходящие в КО, не влияют на характер изменения параметров в КС.

Как следует из рис. 4, слой гранул представляет довольно большое гидравлическое сопротивление, вследствие чего изменение давления по длине КО составляет от 4 до 8 бар.

Литература

1. Теоретическое и экспериментальное исследование низкотемпературных газогенераторов: монография / Д.Д. Аксёненко, С.Д. Ваулин, В.Г. Зезин и др. – Ижевск, ИПМ УрО РАН, 2008. – 255 с.

2. Кириллов, В.В. Скорость разложения твёрдых охладителей / В.В. Кириллов // Вестник ИжГТУ. – 2008. – № 4(40). – С. 42–43.

3. Аэров, М.Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем: гидравлические и тепловые основы работы / М.Э. Аэров, О.М. Тодес, Д.А. Наринский. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.

4. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам жидкостей и газов / Н.Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

5. Калиткин, Н.Н. Численные методы / Н.Н. Калиткин. – М.: Наука, 1978. – 512 с.

6. Самарский, А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. – М.: Наука, 1978. – 589 с.

7. Кириллов, В.В. Расчет переходных процессов в обогреваемых каналах ортогональной прогонкой / В.В. Кириллов // Вопросы атомной науки и техники. Физика и техника ядерных реакторов. – 1990. – Вып. 5. – С. 16–21.

Поступила в редакцию 15.01.2011 г.

Кириллов Валерий Владимирович. Кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск. Область научных интересов – математическое моделирование гидродинамики и тепло- и массообмена в энергетических установках. Контактный телефон: 8 (351) 267-93-95.

Kirillov Valery. Candidate of Science (Engineering), an associate professor of the Industrial Heat Power Engineering of South Ural State University, Chelyabinsk. Research interests: mathematical simulation of hydrodynamics and heat and mass transfer in power generating systems. Tel: 8 (351) 267-93-95.