

## ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 536.27

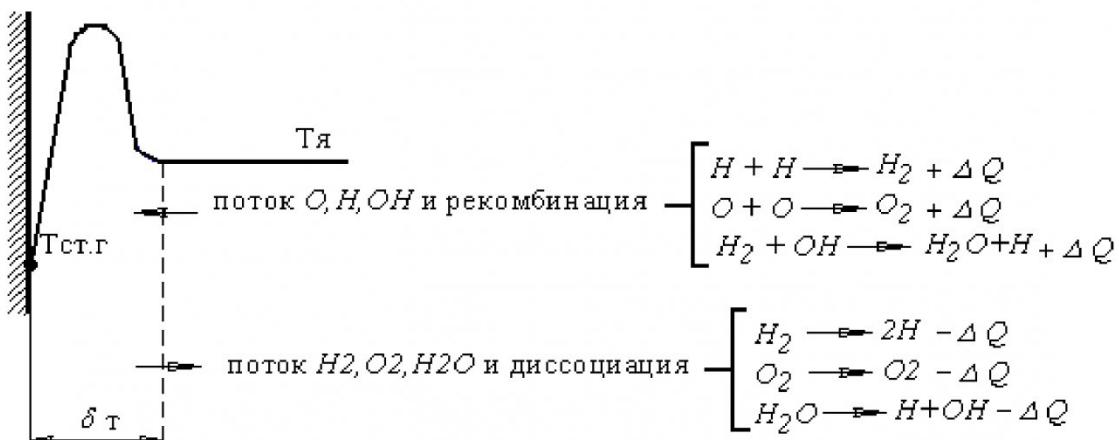
О.Б.Барышева

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК

Рассматриваемый расчет возникает в различных исследованиях в области термодинамики, тепломассообмена, газодинамики, в частности при исследовании процессов переноса в химически реагирующих газовых смесях. В представленной на рис.1 системе координат теплового пограничного слоя его толщина  $\delta_T$  имеет своё физическое объяснение - представляет собой условное расстояние, на которое надо отодвинуть стенку, чтобы расход и распределение давления вдоль

оказывающие существенное влияние на теплофизические свойства продуктов сгорания и процессы тепло- и массообмена.

На рис.2 представлены значения диффузионных потоков для продуктов сгорания топлива кислород + керосин для давления в камере сгорания 15 МПа. Значения даны по отношению к максимальному потоку для данного топлива в диапазоне температур ~1000...3000К для условий соотношения компонентов с коэффициентами избытка



*Rис.1. Система координат пограничного слоя*

поверхности при течении невязкой жидкости были такими же, как при обтекании истинного контура вязкой жидкостью [1].

Для процессов, протекающих в камере сгорания высокотемпературных энергоустановок, характерны высокие температуры горения применяемых высокоэнергетичных топлив. Образующиеся продукты сгорания сильно диссоциированы. При этом температуры продуктов сгорания у стенок камеры сгорания энергоустановки (~800..1000К) значительно меньше температуры в области ядра потока (~2500..4000К). Поэтому диссоциация продуктов сгорания у стенок конструкции практически отсутствует. Для области, ограниченной температурами ядра потока и стени камеры, характерна различная степень диссоциации продуктов сгорания. В связи с градиентами концентраций индивидуальных веществ возникают соответствующие им массовые потоки,

окислителя АТ  $\alpha = 0.9$  (отрицательные значения обратны направлению градиента температур).

Интересно, что при стехиометрическом соотношении компонентов рис.3 практически не существует диффузионных потоков, чего не скажешь о потоках при соотношениях компонентов при коэффициенте избытка окислителя, например,  $\alpha=0.9$  рис.2.

На рис.4, 5 представлены значения коэффициентов бинарной и обобщенной диффузии того же топлива  $p = 15$  МПа,  $\alpha=0.9$  для топлива кислород + керосин и кислород + водород соответственно. На этих рисунках приведено сравнение результатов расчетов коэффициентов обобщенной диффузии  $\bar{D}_{H_2O-H_2}$  (линия 1),  $\bar{D}_{H_2-H_2O}$  (линия 2) и бинарной диффузии  $D_{H_2-H_2O}$  (линия 3) при  $p=15$  МПа. Коэффициент бинарной диффузии не

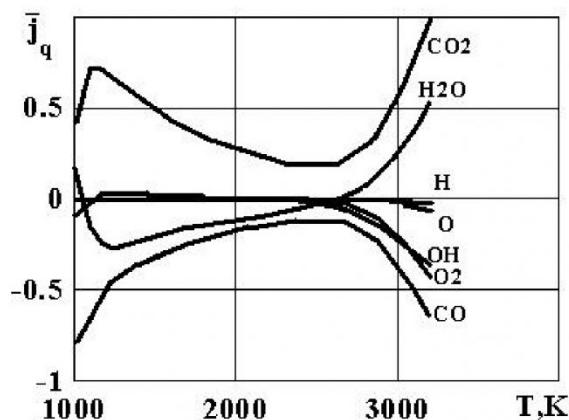


Рис.2. Зависимость диффузионных потоков веществ от изменения температуры: топливо кислород + керосин,  $\alpha=0,9$ ,  $p=15$  МПа

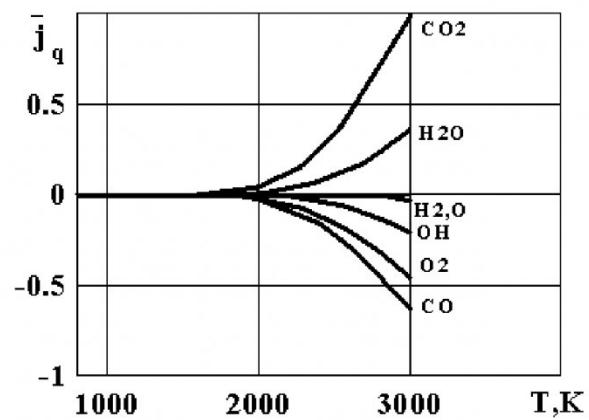


Рис.3. Зависимость диффузионных потоков веществ от изменения температуры: топливо кислород + керосин,  $\alpha=1,0$ ,  $p=15$  МПа

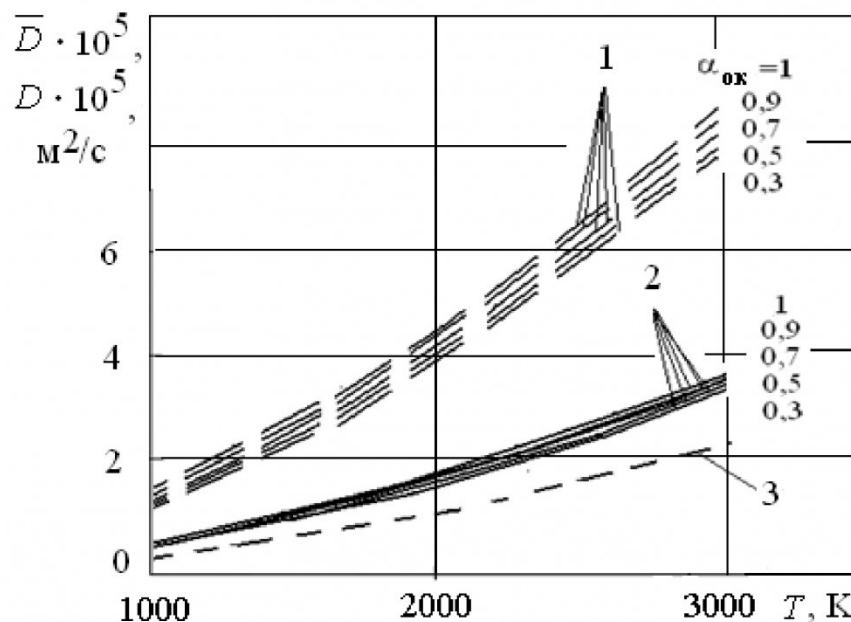


Рис.4. Зависимость коэффициентов обобщенной диффузии многокомпонентной газовой смеси от изменения температуры: топливо – кислород + керосин,  $p = 15$  МПа.,  $\alpha=0,9$

зависит от содержания индивидуальных веществ в смеси. Коэффициент обобщенной диффузии, начиная с температуры более 1000 К, когда проявляется, согласно термодинамическому расчету, распад высокомолекулярных углеводородов на низкомолекулярные углеводороды и углеводородные радикалы и смесь перестает быть бинарной из-за диссоциации, все в большей мере отличается от коэффициента бинарной диффузии. Это отличие зависит не только от температуры, но и коэффициента избытка окислителя  $\alpha$ .

Очевидно, расслоение смеси по всему диапазону температур для всех углеводородных топливных композиций, чего не скажешь, о кислород - водородном топливе (рис.5). Для данного топлива применим принцип Онсагера лишь до темпера-

туры  $\sim 1700\ldots 1800$  К, а далее также – «расслоение» смеси.

Известно множество методик расчета состава равновесной газовой смеси и ее теплофизических и термодинамических свойств, но наиболее актуальной в наше время является методика, изложенная в справочнике [2], где базовыми уравнениями вычисления параметров и свойств газовой смеси являются: уравнения диссоциации, сохранения вещества и закона Дальтона для случая  $p, T = \text{const}$ :

$$\ln x_j - \sum_i a_{ij} \ln x_i + \\ + \ln K_{pj} + (1 - \sum_i a_{ij}) \ln p = 0,$$

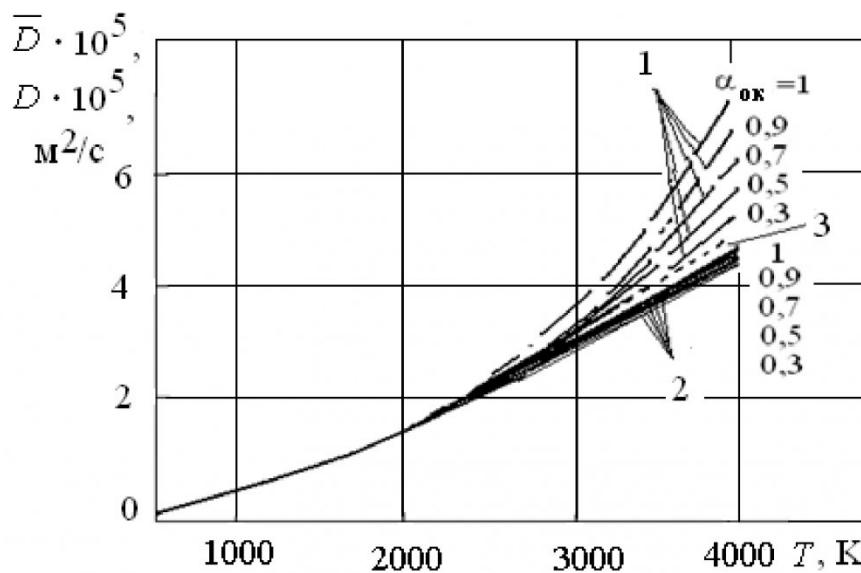


Рис.5. Зависимость коэффициентов обобщенной диффузии многокомпонентной газовой смеси от изменения температуры: топливо – кислород + водород,  $p = 15 \text{ МПа}$ ,  $\alpha=0,9$

$$\ln \left( \sum_j a_{ij} x_j + x_i \right) + \ln N - \ln b_{i\text{T}} = 0,$$

$$\ln \sum_q x_q = 0,$$

где  $a_{ij}$  - стехиометрический коэффициент,  $x$  - мольные доли,  $N$  - суммарное число молей,  $b_{i\text{T}}$  - число атомов в условной молекуле топлива,  $\ln K_{pj}$  - логарифм константы равновесия,  $p$  - давление.

При вычислении частных производных состава по температуре (давлению) обычно эти уравнения дифференцируют

$$\frac{1}{x_j} \left( \frac{\partial x_j}{\partial T} \right)_p - \sum_{i=1}^m \frac{a_{ij}}{x_i} \left( \frac{\partial x_i}{\partial T} \right)_p = - \frac{\Delta H_j}{R_0 T^2},$$

$$\sum_{j=1}^l a_{ij} \left( \frac{\partial x_j}{\partial T} \right)_p + \left( \frac{\partial x_i}{\partial T} \right)_p + \frac{b_{i\text{T}}}{N^2} \left( \frac{\partial N}{\partial T} \right)_p = 0$$

$$\sum_{q=1}^{l+m} \left( \frac{\partial x_q}{\partial T} \right)_p = 0,$$

где  $R_0$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура,  $\Delta H$  - тепловой эффект реакции.

Полученные частные производные используются для расчета теплоемкости, скорости звука, термических коэффициентов.

В работе Льюиса [3] была выявлена зависимость составляющей коэффициента теплопровод-

ности газовой смеси и составляющей теплоемкости, учитывающей тепловой эффект химических реакций. Здесь частные производные в формулах для расчета присутствовали в неявном виде. Для расчета составляющей коэффициента теплопроводности использовалась система уравнений

$$\ln x_j - \sum_i a_{ij} \ln x_i +$$

$$+ \ln K_{pj} + (1 - \sum_i a_{ij}) \ln p = 0,$$

$$\sum_j a_{ij} \mathbf{W}_j + \mathbf{W}_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

где  $W_q$  - мольный диффузионный поток.

Полученные из этой системы уравнений частные производные используются для расчета теплофизических свойств, в частности, коэффициента теплопроводности.

Однако частные производные по температуре (давлению), вычисленные разными подходами, дают противоречивые результаты, следовательно, зависимость, полученная Льюисом, имеет смысл для ограниченного диапазона температур и топливных композиций.

На рис. 6 показаны противоречия, выявленные при расчете частных производных состава по температуре, разными методами для преобладающих компонентов, например, для топлива кислород + керосин и кислород + водород.

Отклонения достигают в некоторых случаях до 70%, что несомненно сказывается на расчетах теплофизических свойств.

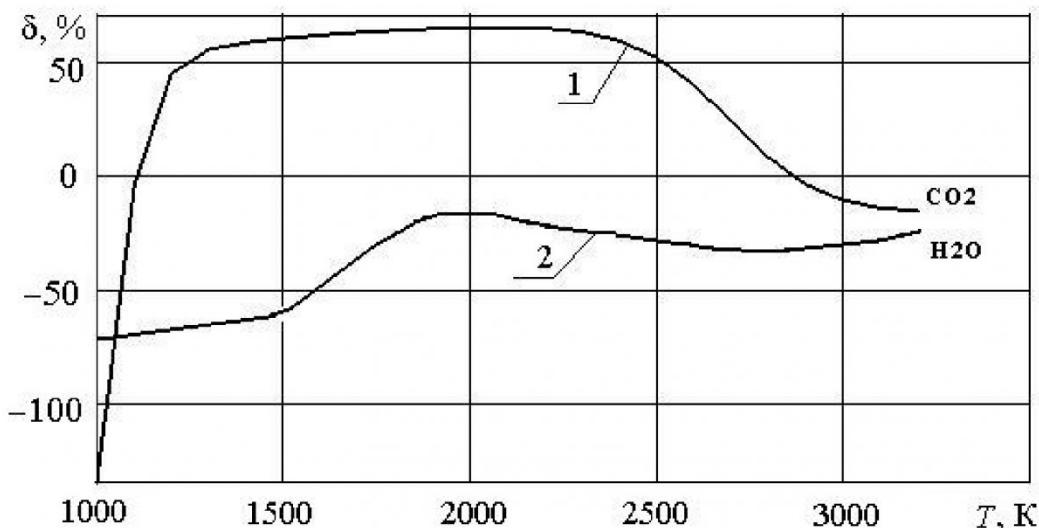


Рис. 6. Отклонения частных производных преобладающих веществ: 1 – топливо: кислород + керосин,  $p = 15 \text{ МПа}$ ,  $\alpha=0,9$ ; 2 – топливо: кислород + водород,  $p = 25 \text{ МПа}$ ,  $\alpha=0,9$

Предложен новый подход для вычисления составляющей коэффициента теплопроводности газовой смеси

$$\lambda_R = \frac{\tilde{D} C_{pR} p}{R_0 T} = \frac{\tilde{D} c_{pR} N \mu p}{R_0 T} = \tilde{D} c_{pR} N \rho, \quad (1)$$

$$\tilde{D} = \frac{\sum_i \sum_j \bar{D}_{ij}}{k};$$

$$k = S^3 \left( \frac{\alpha_{\text{ок}}}{6} (S-4) - \frac{7}{45} S + \frac{1}{360} S^2 + \frac{289}{360} \right)$$

где  $k$  – коэффициент, полученный обработкой многочисленных точных расчетов составляющей  $\lambda_R$ ,  $S$  – число учитываемых в расчете компонен-

тов смеси,  $C_{pR}$  – удельная теплоемкость,  $p$  – давление,  $\bar{D}_{ij}$  – коэффициент обобщенной диффузии [4].

Проведенные расчеты указывают на возможность применения нового метода определения коэффициента теплопроводности с учетом теплоты химических превращений для различных топливных композиций. Исследование показало, что погрешность расчета коэффициента теплопроводности альтернативным методом составляет ~0,5% и не более 3% (для давлений выше 1 МПа и температур от ~1000К до ~3000К соответственно).

Формулу (1) можно рекомендовать при расчете коэффициента теплопроводности, учитывающего теплоту химических реакций, реагирующей смеси газов, находящейся в условиях химического равновесия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей. - М.: Машиностроение, 1989, 464 с.
- Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания. / Справочник. В 10 т. // Под ред. В.П.Глушко. - М.: АН СССР-ВИНИТИ, 1971, 266с.
- Brokaw R.S., Svela R.A. J. Heat Capacity and Lewis Number of a Reacting Gas. // Chem. Phys. 1966. V.44. p.4643.
- Гирифельдер Дж., Кертис Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей. - М.: ИЛ, 1961, 930 с.

□ Автор статьи:

Барышева  
Ольга Борисовна  
- канд.техн.наук, доцент  
каф.теплогазоснабжения и вентиляции  
Казанского государственного  
архитектурно-строительного университета  
e-mail: [obbars@mail.ru](mailto:obbars@mail.ru)