

УДК 621.454.2

## **Математические модели для расчета соотношения компонентов топлива в пристеночном слое камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги**

**Богачева Д. Ю.\*, Боровик И. Н.\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: [bogachulya@mail.ru](mailto:bogachulya@mail.ru)*

*\*\*e-mail: [borra2000@mail.ru](mailto:borra2000@mail.ru)*

### **Аннотация**

Обзор математических моделей, используемых для расчета соотношения компонентов топлива в пристеночном слое камеры сгорания жидкостного ракетного двигателя малой тяги (ЖРДМТ). Приведены расчеты по методикам, разработанным в ведущих научных организациях ракетно-космической промышленности: Lewis Research Center, Исследовательский центр имени М. В. Келдыша, БГТУ "Военмех" им. Д. Ф. Устинова, МАИ. Анализ результатов расчетов показал, что при соответствующей корректировке некоторые из моделей могут быть применимы к ЖРДМТ, работающим на газообразных компонентах топлива.

**Ключевые слова:** жидкостной ракетный двигатель малой тяги, внутреннее завесное охлаждение, соотношение компонентов в пристеночном слое.

### **Введение**

В настоящее время в ракетном двигателестроении большой интерес проявляется к экологически чистым топливам, таким как керосин+O<sub>2</sub>,

керосин+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>+O<sub>2</sub>, которые обладают высокими энергетическими характеристиками.

### **Завесное охлаждение**

При этом создание объединенной двигательной установки (ОДУ) на этих компонентах топлива (КТ) требует разработки надежных и высокоэффективных исполнительных органов реактивной системы управления (РСУ) - жидкостных ракетных двигателей малых тяг (ЖРДМТ), работающих на той же топливной паре, что и основной двигатель.

Одной из основных проблем создания таких двигателей является обеспечение удовлетворительного теплового состояния стенки камеры сгорания (КС). В связи с особенностями режимов работы ЖРДМТ, такими как:

- многократные кратковременные включения, что означает неэффективность использования регенеративного охлаждения;

- небольшие геометрические размеры КС, обязывающие организовать быстрое перемешивание и сгорание КТ;

- предварительная газификация КТ для организации качественного перемешивания

практически единственным способом обеспечить надежное охлаждение стенки КС ЖРДМТ на газообразных КТ является внутреннее завесное охлаждение одним из компонентов топлива.

Внутреннее завесное охлаждение осуществляется путем создания вблизи стенки низкотемпературного пристеночного слоя газа (рис. 1).

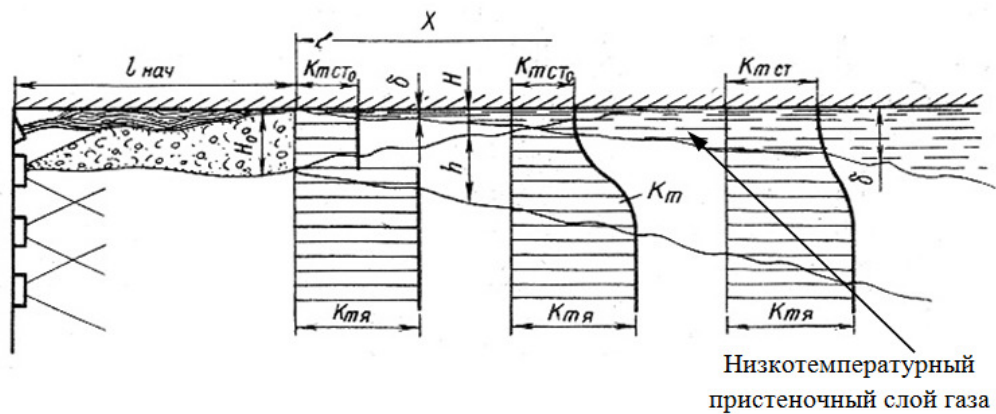
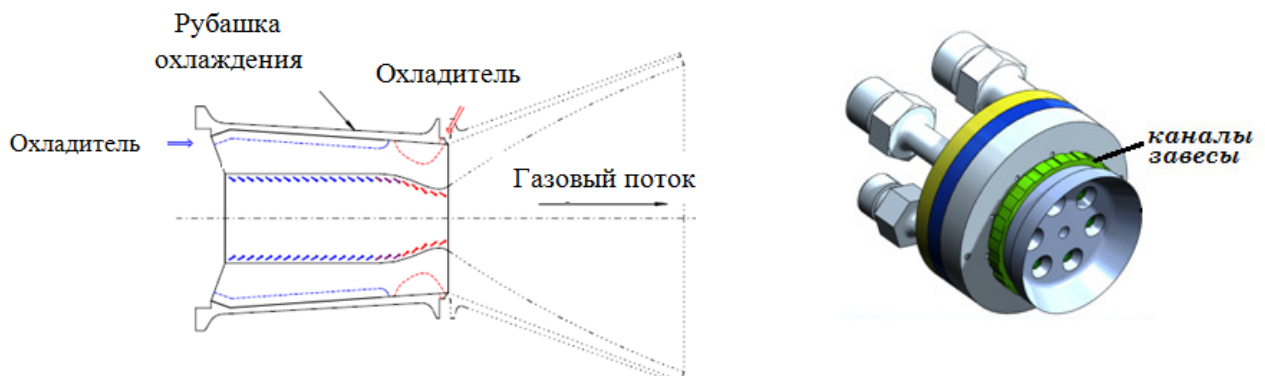


Рис. 1. Схема образования низкотемпературного пристеночного слоя [1].

Его можно организовать одним из двух способов:

1) с помощью поясов завес, когда компонент на охлаждение подается на внутреннюю поверхность стенки через специальные щели, выполненные в этой стенке (рис. 2, а)

2) или впрыском топлива через специальные форсунки или щели, располагаемые по периферии смесительной головки (рис. 2, б).



а) подача охладителя через пояс завесы

б) подача охладителя с помощью смесительной головки

Рис. 2. Способы организации завесного охлаждения.

Наибольшее воздействие завеса охлаждения оказывает на конвективный тепловой поток. Состав и температура газа вблизи стенки будет определяться только

соответствующими соотношениями компонентов при условии, что скорость химических реакций, протекающих в КС, много больше скорости турбулентного перемешивания. Поэтому для расчета теплового состояния КС и сопла двигателя (в частности, для расчета конвективных тепловых потоков) необходимо знать изменение соотношения компонентов вдоль стенки КС.

Явление турбулентного перемешивания газовых потоков применительно к рабочему процессу в ЖРДМТ изучено недостаточно. Однако, провести оценочный расчет газофазного смешения основного потока и охладителя оказывается возможным.

Ниже будут рассмотрены инженерные методики, описывающие алгоритмы расчета соотношения КТ вдоль стенки КС, применяемые в ракетной-космической промышленности разных стран.

### **Объект исследования**

Объектом исследования является экспериментальный жидкостной ракетный двигатель тягой 200 Н, работающий на газообразных КТ:  $\text{CH}_4 + \text{O}_2$  (рис. 3). На форсуночной головке расположено шесть струйно-центробежных форсунок по периферии, в центральной части – система воспламенения с электроискровым источником зажигания. Предусмотрен отдельный подвод компонента для завесного охлаждения стенок камеры сгорания. В качестве охладителя используется газообразный кислород. Завеса выполнена фрезерованием 20 каналов на нижней распределительной пластине.

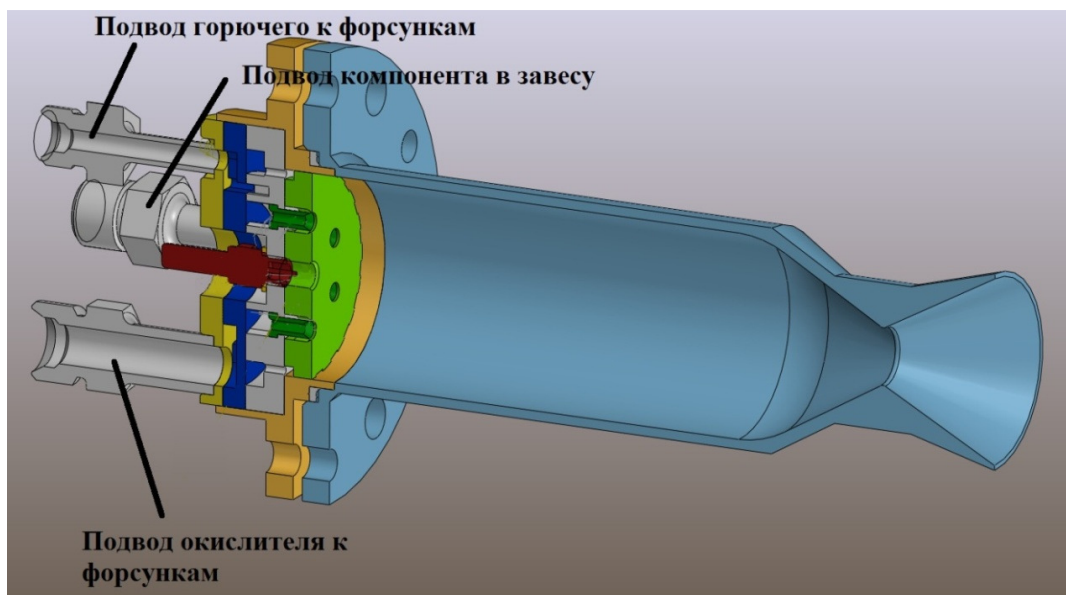


Рис. 3. ЖРДМТ 200 Н, работающий на газообразном кислороде и газообразном метане.

### Определение соотношения компонентов топлива $K_m$ по длине камеры сгорания с использованием различных инженерных методик расчета

1. В отечественном ракетостроении широкое распространение получила методика, разработанная Курпатенковым В. Д. и опубликованная в [1]. Согласно данной методике, при движении газообразной завесы вдоль стенки КС в результате ее турбулентного перемешивания с продуктами сгорания основного потока среднее соотношение компонентов в пристеночном слое  $K_m$  будет постепенно изменяться от начального  $K_{m0}$  до предельного  $K'_m$ , которое соответствует полному перемешиванию завесы с пристеночным слоем (рис. 4).

В то же время соотношение компонентов  $K_{m \text{ расч}}$  непосредственно возле стенки, т. е. в зоне пограничного слоя, определяющего конвективный теплообмен, будет соответственно изменяться от  $K_{m \text{ расч}} = 0$  (в случае использования завесы

горючего) или от  $K_{m \text{ расч}} = \infty$  (в случае использования завесы окислителя) до предельного значения  $K_{m \text{ расч}} = K'_m$ .

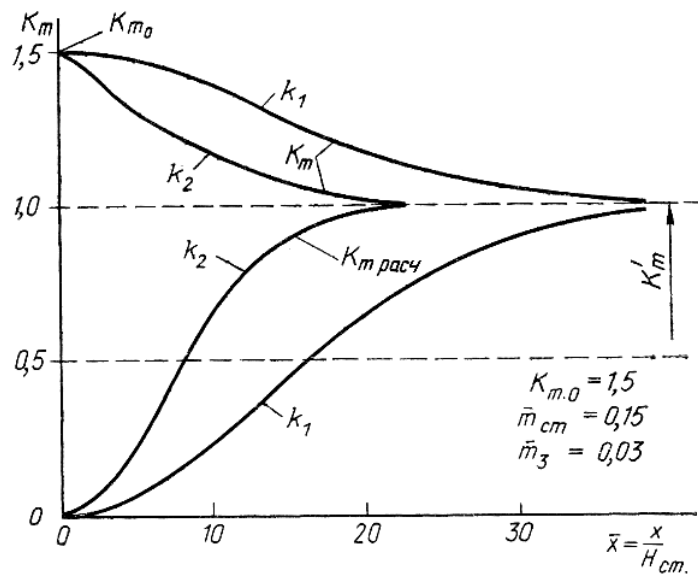


Рис. 4. Изменение  $K_m$  и  $K_{m \text{ расч}}$  по длине стенки [1].

На рис. 4 приведены кривые изменения  $K_m$  и  $K_{m \text{ расч}}$  от  $\bar{x}$ , иллюстрирующие процесс перемешивания завесы с пристеночным слоем и ход изменения соотношения компонентов в среднем по пристеночному слою  $K_m$  и непосредственно возле стенки  $K_{m \text{ расч}}$  при следующих исходных данных:  $\bar{m}_{ст} = 0.15$ ,  $\bar{m}_з = 0.03$ ,  $K_{m0} = 1.5$ ,  $K_1 = 0.05 \cdot 10^{-2}$ ,  $K_2 = 0.2 \cdot 10^{-2}$ ,

где

$\bar{x}$  - относительная осевая координата;

$\bar{m}_{ст}$  - относительный расход топлива в пристеночном слое;

$\bar{m}_з$  - относительный расход топлива на завесу;

$K_{m0}$  - начальное соотношение компонентов в пристеночном слое:

$K$  - постоянная, отражающая факторы, влияющие на интенсивность турбулентности в пристеночном слое.

Как видно из рис. 4 полнота турбулентного перемешивания существенно зависит от постоянной  $K$ : при  $K_1 = 0.05 \cdot 10^{-2}$  полное перемешивание завесы с пристеночным слоем завершается на расстоянии  $\bar{x} = 40$ , а при  $K_2 = 0.2 \cdot 10^{-2}$  это расстояние сокращается вдвое:  $\bar{x} = 20$ .

Расчет турбулентного перемешивания для выбранного объекта исследования проводился при следующих допущениях:

1. Начальная толщина пристеночного слоя определяется как среднее по периметру расстояние от последнего ряда форсунок до стенки КС [1]. В рассматриваемом объекте имеется всего один ряд форсунок, поэтому начальная толщина пристеночного слоя считается равной расстоянию от оси форсунок до стенки КС.

2. В пристеночный слой попадает половина расхода окислителя и половина расхода горючего от последнего периферийного ряда форсунок, т. е. применительно к объекту исследования половина расхода, идущего на форсунки.

3. Постоянная  $K$  изменяет свое значение:  $K \approx (0.05 \div 0.2) \cdot 10^{-2}$ .

Результаты расчета представлены в виде графиков изменения соотношения компонентов в пристеночном слое и непосредственно вблизи стенки КС (рис. 5).

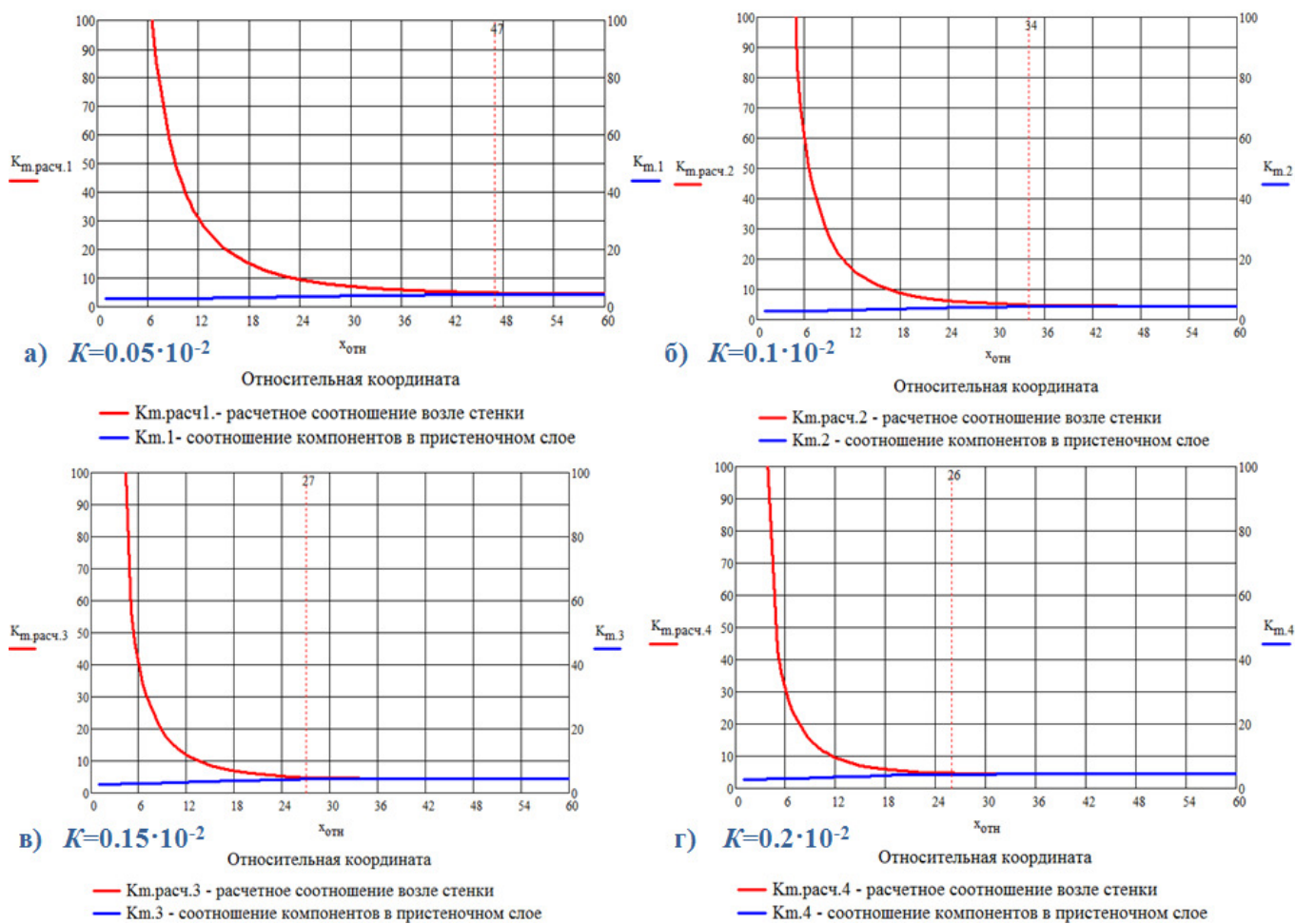


Рис. 5. Изменение соотношения компонентов по длине КС в пристеночном слое и непосредственно возле стенки для значений постоянной  $K$ :

1)  $K_1 = 0.05 \cdot 10^{-2}$ , 2)  $K_2 = 0.10 \cdot 10^{-2}$ , 3)  $K_3 = 0.15 \cdot 10^{-2}$ , 4)  $K_4 = 0.2 \cdot 10^{-2}$ .

Согласно результатам расчета, полное перемешивание завесы с пристеночным слоем в зависимости от значения постоянной  $K$  произойдет на расстоянии  $\bar{x} \approx 50..25$ . Учитывая реальные размеры КС и сопла (длина КС с соплом составляет  $x_a=0.138$  м или в относительных координатах  $\bar{x}_a=13.8$ ), можно сделать вывод о том, что полного перемешивания завесы с продуктами сгорания пристеночного слоя не произойдет.



2. Особый интерес также вызывает работа [2], в которой содержится так называемая аналитическая модель вовлечения, рекомендованная для анализа завесного охлаждения в КС ЖРД.

Согласно данной методике адиабатическая температура стенки зависит от соотношения компонентов вблизи стенки, которое получается в результате перемешивания потока охладителя с центральным потоком, образованным форсунками. Для того, чтобы найти это соотношение компонентов предлагается найти ту часть основного потока, которая вовлекается в пристеночный слой, содержащий весь расход охладителя:

$$\frac{W_E}{W_c} = \frac{W - W_c}{W_c} \left[ 2 \frac{\psi_r \bar{x}}{r_i - s_i} - \left( \frac{\psi_r \bar{x}}{r_i - s_i} \right)^2 \right] \quad (1)$$

где

$W_E$  - вовлекаемый расход, кг/с - расход газа, вовлекаемого в пристеночный слой в результате турбулентного перемешивания основного потока и охладителя;

$W_c$  - расход охладителя, подаваемого в завесу, кг/с;

$W$  - суммарный расход топлива через камеру сгорания, кг/с;

$\psi_r$  - коэффициент доли вовлекаемого расхода, безразмерная величина - эмпирический параметр, описывающий уровень турбулентности, конфигурацию щели подачи охладителя, эффекты центробежных форсунок, а также повороты и ускорение потока. Вычисляется по формуле (2).

$\bar{x}$  - эффективная длина контура, м. Представляет собой полуэмпирическую величину, рассчитанную с учетом кривизны камеры сгорания, а также эффектов

двумерных течений и турбулентности, вызванных форсунками. Вычисляется по формуле (3).

$r_i$  - радиус камеры сгорания в точке подачи охладителя, м;

$s_i$  - высота слоя перемешивания в точке подачи охладителя, м. Определяется как среднее по периметру расстояние от последнего ряда форсунок до стенки камеры сгорания.

Коэффициент доли вовлекаемого расхода  $\psi_r$ :

$$\psi_r = \frac{0.1 \frac{u_c}{u_e}}{\left(\frac{\rho_c}{\rho_e}\right)^{0.15} \left(\frac{\rho_c u_c s_i}{\mu_c}\right)^{0.25} f} \quad (2)$$

Эффективная длина контура  $\bar{x}$ :

$$\bar{x} = \int_{x_i}^x \frac{(\rho_e u_e r)_x}{(\rho_e u_e r)_{x_i}} dx \quad (3)$$

где

$u_c$  - осевая скорость охладителя, переменная по длине КС, м/с

$u_e$  - осевая скорость основного потока, переменная по длине КС, м/с

$\rho_c$  - плотность охладителя, переменная по длине КС, кг/м<sup>3</sup>

$\rho_e$  - плотность основного потока, переменная по длине КС, кг/м<sup>3</sup>

$r$  - радиус камеры сгорания, переменный в зависимости от  $x$ , м

$\mu_c$  - динамическая вязкость охладителя, Па·с

$x$  - осевая координата, м

$f = f\left(\frac{u_c}{u_g}\right)$  - корреляционная функция, зависящая от отношения скорости

охладителя к скорости основного потока (рис. 6).

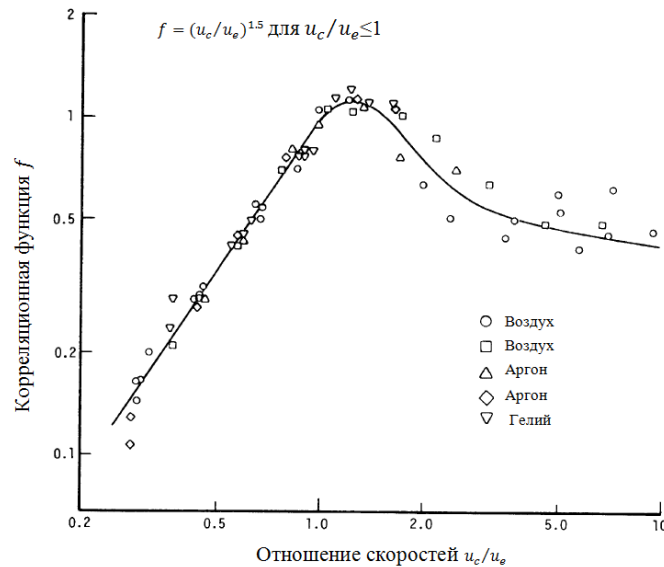


Рис. 6. Функция  $f$  в зависимости от отношения скоростей  $\frac{u_c}{u_g}$  [2].

Далее в зависимости от отношения скорости охладителя к скорости основного потока  $\frac{u_c}{u_g}$  графически определяется эффективность завесного охлаждения (рис. 7) и

соотношение компонентов вблизи стенки камеры сгорания по формуле (4).

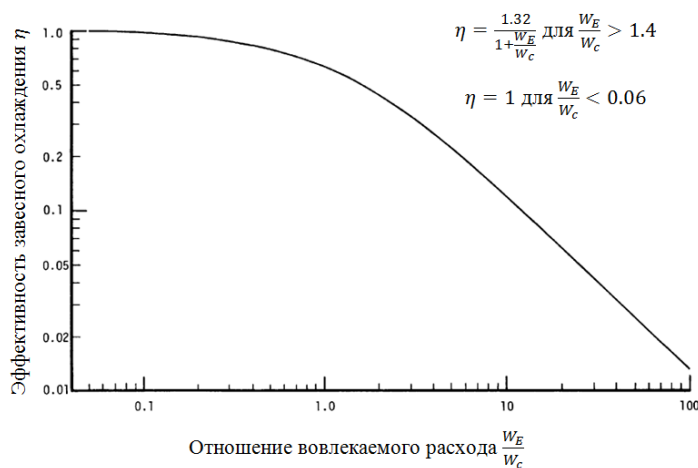


Рис. 7. Эффективность завесного охлаждения  $\eta$  как функция от отношения вовлекаемого расхода [2].

Соотношение компонентов вблизи стенки камеры сгорания:

$$(MR)_w = \frac{1 + (MR)_g}{1 + \eta \left( \frac{1 + (MR)_g}{1 + (MR)_c} - 1 \right)} - 1 \quad (4)$$

где

$(MR)_g$  - соотношение компонентов основного потока, т.е. соотношение компонентов, образованное форсунками, безразмерная величина;

$(MR)_c$  - соотношение компонентов потока охладителя, безразмерная величина.

Для определения  $(MR)_w$  по формуле (8) необходимо задаться соотношением компонентов потока охладителя  $(MR)_c$ . Это имеет смысл, если в качестве охладителя используется смесь горючего и окислителя. Если же охладителем является чистый окислитель, то можно предположить, что соотношение компонентов в завесе будет стремиться к бесконечности. Для расчета условимся, что эта величина принимает значение на порядки большие, чем соотношение компонентов основного потока и рассчитаем  $(MR)_w$  для следующих значений  $(MR)_c$ :

1.  $(MR)_{c1} = 100$ ;
2.  $(MR)_{c2} = 200$ ;
3.  $(MR)_{c3} = 300$ ;
4.  $(MR)_{c4} = 500$ ;
5.  $(MR)_{c5} = 1000$ .

Результаты расчета представлены в виде графиков изменения соотношения компонентов вблизи стенки КС (рис. 8).

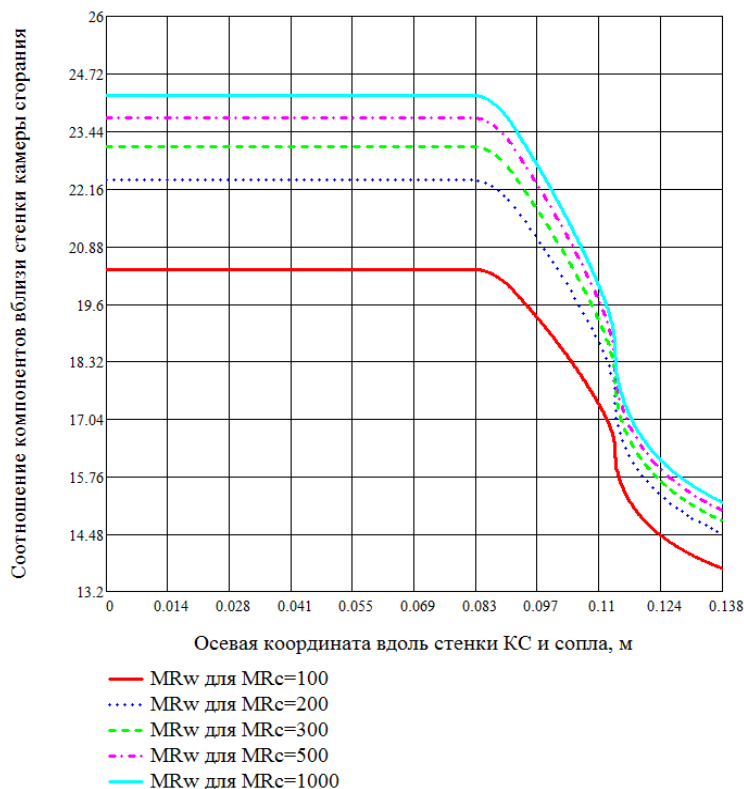


Рис. 8. Изменение соотношения компонентов вблизи стенки КС для различных значений  $(MR)_c$ .

3. Также простая теоретическая модель турбулентного перемешивания в ЖРД представлена в [3]. Она основывается на уравнениях, описывающих подвод газа из точечных источников в однородный турбулентный газовый поток без химических реакций.

Предполагается, что степень перемешивания определяется только расстоянием от точечного источника и интенсивностью перемешивания, и рассчитывается как отношение  $\psi$  максимальной и минимальной концентраций газообразных компонентов в плоскости, нормальной к направлению потока.

Значение  $\psi$  равно единице для полного перемешивания и нулю при отсутствии перемешивания.

Для оценки турбулентности используется параметр смешения  $\alpha$ , вычисляемый по формуле:

$$\alpha = T \frac{L}{S} \quad (5)$$

где

$T$  - интенсивность турбулентности основного потока;

$L$  - длина камеры сгорания, м;

$S$  - межосевое расстояние между форсунками, м.

Стоит отметить, что информации о значениях турбулентности в камерах сгорания ракетных двигателей немного. Однако, согласно результатам работы [4], количественно интенсивность турбулентности меняется от 10% у форсуночной головки до уровня 2% на расстоянии 200 мм от нее.

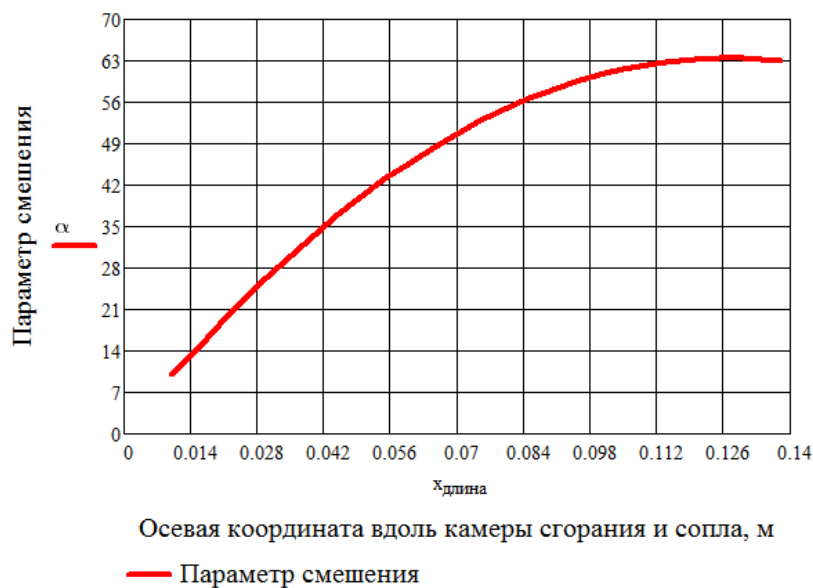


Рис. 9. Изменение параметра смешения вдоль КС и сопла.

Далее находится степень перемешивания по формуле:

$$\psi = 10^{0.497 - \frac{1210}{\alpha^2}} \quad (6)$$

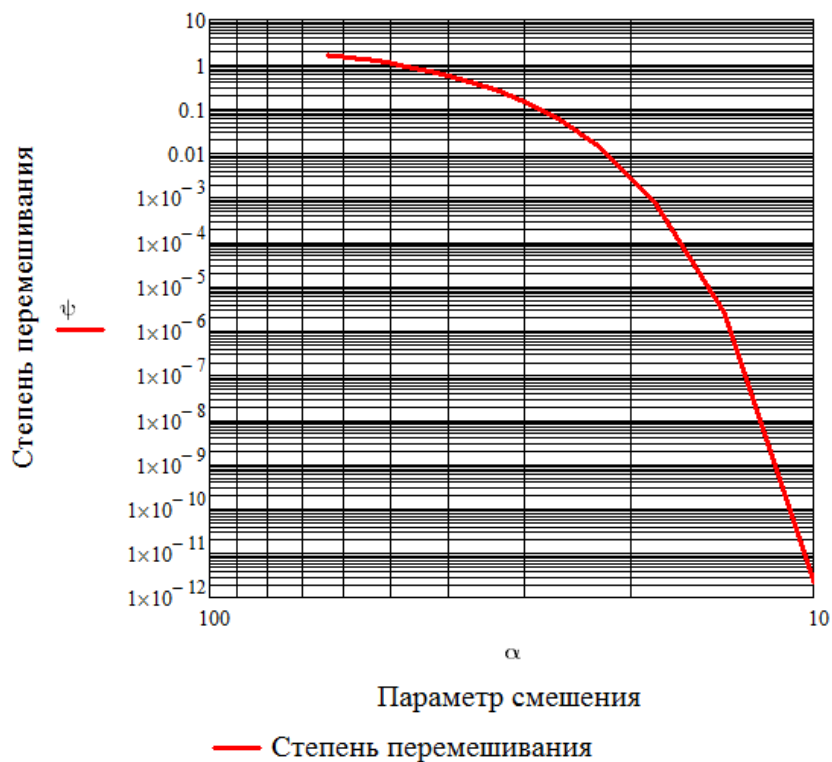


Рис. 10. Степень перемешивания  $\psi$  как функция от параметра смешения  $\alpha$ .

В случае использования окислительной завесы соотношение компонентов на форсунках будет минимальным. И распределение соотношения компонентов, согласно [4], можно вычислить по следующей формуле:

$$K_m = K_{m\_нач} \psi^{-r'^2} \quad (7)$$

где

$K_{m\_нач}$  - соотношение компонентов на форсунках:

$r'$  - безразмерный радиус, определяемый как:

$$r' = \frac{r}{S/2} \quad (8)$$

где

$r$  - текущий радиус КС, м;

$S$  - межжосевое расстояние между форсунками.

Результаты расчета представлены на рис. 11.

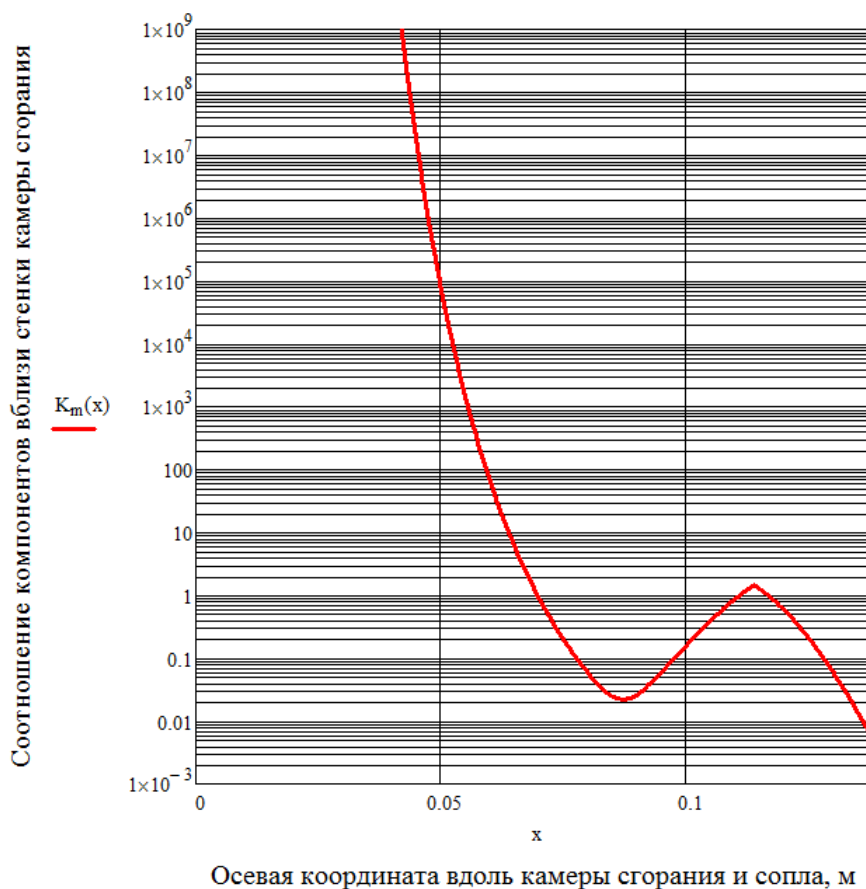


Рис. 11. Распределение соотношения компонентов вблизи стенки КС.

4. Еще одна модель перемешивания основного потока и завесного охладителя разработана в Исследовательском центре имени М. В. Келдыша и опубликована в [5]. Для расчета соотношения компонентов на стенке  $K_{CT}$  предлагается найти так называемую концентрацию охладителя  $c$  в точке слоя смешения завесы. Слой



смешения завесы представляет собой смесь вещества, поданного в завесу, и вещества, внесенного в завесу из набегающего потока.

Вокруг некой точки внутри слоя завесы выделяют малый объем. Тогда концентрация охладителя  $c$  есть отношение массы содержащегося в этом объеме вещества охладителя к общей массе содержащегося там вещества при стягивании объема в точку:

$$c = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_\Sigma} \quad (9)$$

Изменение концентрации охладителя вдоль оси КС описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = - \frac{v' l'_3}{2W_x} \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \quad (10)$$

где

$v'$  - осредненная абсолютная величина скорости турбулентных пульсаций в направлении оси  $y$ ;

$l'_3$  - некоторый средний по толщине слой завесы;

$W_x$  - средняя скорость охладителя.

Далее по полученной зависимости  $c_{ст} = f(x)$  рассчитываются локальные значения соотношения компонентов на стенке  $K_{ст} = f(x)$ . Так, в случае подачи завесы из чистого горючего

$$K_{ст} = \frac{K_{н.п}}{1 + c_{ст}(1 + K_{н.п})/(1 - c_{ст})} \quad (11)$$

и при подачи завесы из чистого окислителя:

$$K_{ст} = K_{н.п} + c_{ст}(1 + K_{н.п}) \quad (12)$$

где

$c_{ст}$  - концентрация охладителя на стенке;

$K_{н.п}$  - соотношение компонентов в набегающем потоке.

Т. к. точные значения скорости турбулентных пульсаций в направлении оси  $y$  для КС ЖРД трудноопределимы, в расчете принимались следующие значения  $v'$ :

1.  $v'_1=50$  м/с;

2.  $v'_2=40$  м/с;

3.  $v'_3=30$  м/с;

4.  $v'_4=20$  м/с;

5.  $v'_5=10$  м/с.

Результаты расчета концентрации охладителя  $c_{ст}$  и соотношения компонентов вблизи стенки КС представлены на рис. 12 и 13 соответственно.

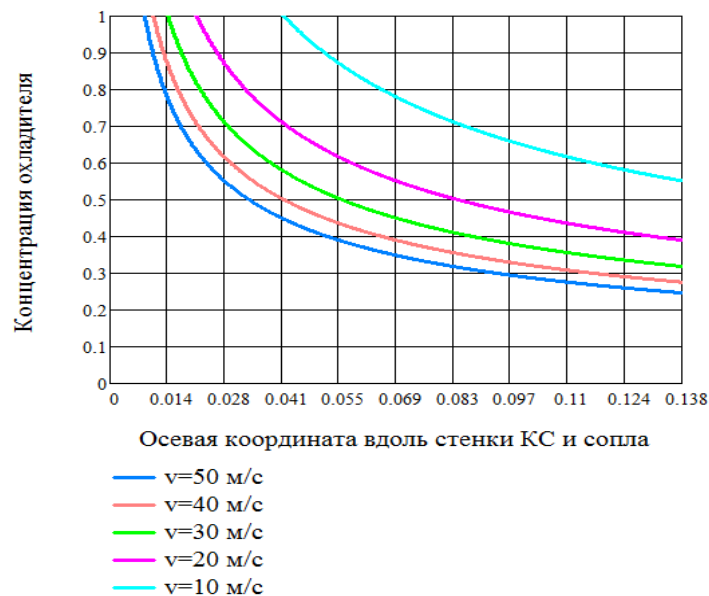


Рис. 12. Изменение концентрации охладителя  $c_{ст}$  вдоль стенки КС.

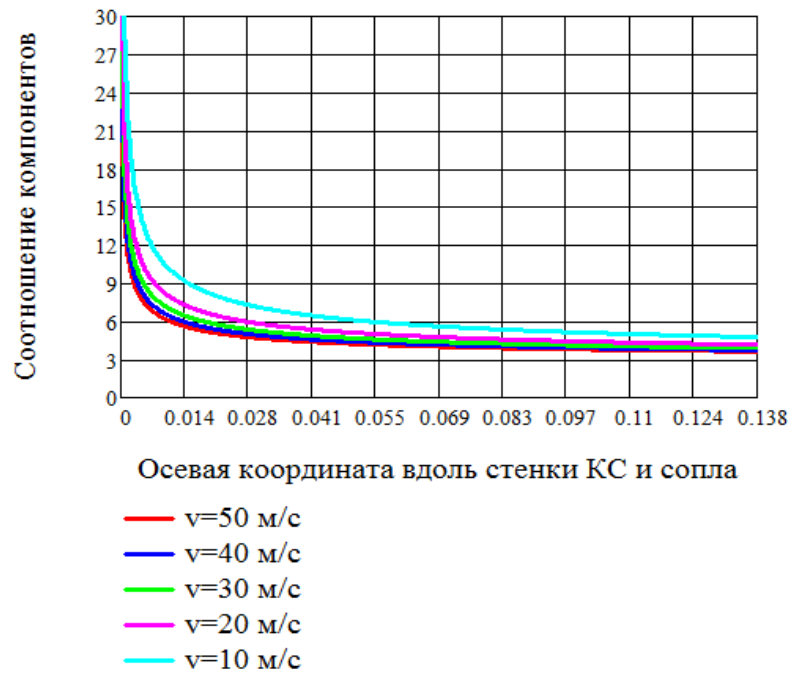


Рис. 13. Изменение соотношения компонентов вблизи стенки КС  $K_{ст}$ .

5. Модель перемешивания, основанная на стационарном процессе диффузии описана в [6]. Для расчета соотношения КТ необходимо найти концентрацию охладителя  $c_{охл}$ , используя дифференциальное уравнение диффузии, где щель является линейным источником массы с производительностью  $g$ :

$$g = \frac{G}{l} \quad (14)$$

где

$G$  - секундный расход охладителя через щель, кг/с;

$l$  - длина щели, м.

Предполагается, что продукты сгорания имеют постоянный коэффициент турбулентной диффузии  $K_d$  и движутся только вдоль оси  $x$  с постоянной скоростью

$w_x$ . Тогда стационарный процесс диффузии описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$w_x \frac{\partial c(x, y)}{\partial x} = K_d \frac{\partial^2 c(x, y)}{\partial y^2} \quad (15)$$

Решая дифференциальное уравнение (18), определяется концентрация охладителя. А далее по известным  $c_{\text{охл}}$  и  $p_k$ , используя уравнение состояния:

$$c_{\text{охл}} = \frac{k p_k}{(k + 1)(RT)_{\text{газ}}} \quad (16)$$

можно найти соотношение компонентов  $k$ . В этом случае вначале на основании термодинамического расчета горения топлива при различных  $k$  определяется  $(RT)_{\text{газ}}$ , а затем определяется само  $k$ , для которого выполняется равенство (16).

Концентрация охладителя существенно зависит от коэффициента турбулентной диффузии  $K_d$ . Его значение для КС ЖРД неизвестно. Поэтому расчет проводился для нескольких значений  $K_d$ :

1.  $K_{d1} = 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ;
2.  $K_{d2} = 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ;
3.  $K_{d3} = 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ ;
4.  $K_{d4} = 10^{-2} \text{ м}^2/\text{с}$ ;
5.  $K_{d5} = 10^{-1} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Результаты расчета соотношения КТ вблизи стенки КС по [6] представлены на рис. 14.

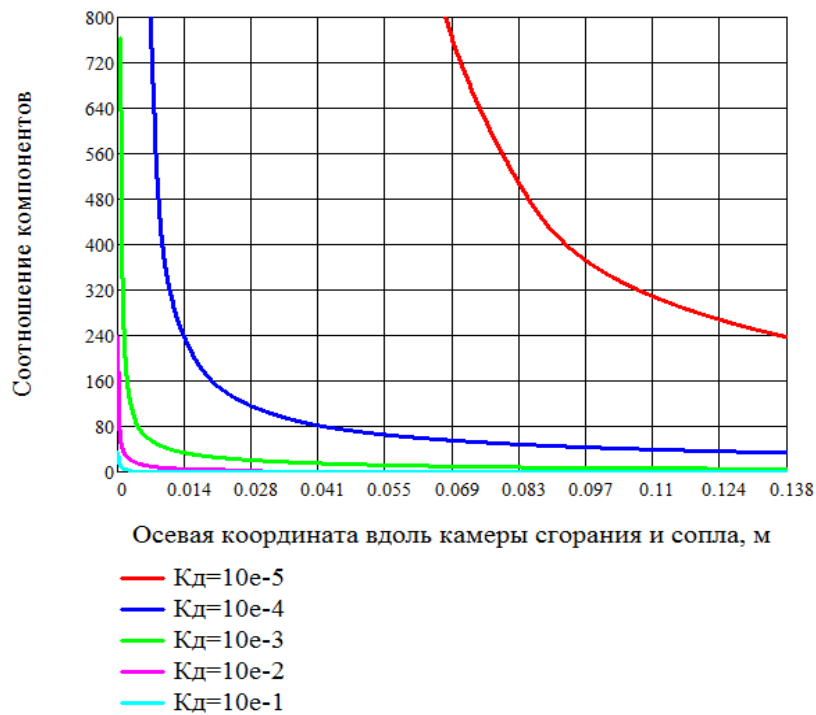


Рис. 14. Изменение соотношения КТ вдоль стенки КС.

Для проверки инженерных расчетов и выявления наиболее подходящей методики, предсказывающей изменение соотношения КТ, в программном комплексе ANSYS CFX было выполнено моделирование перемешивания основного потока и потока охладителя.

Численное моделирование проводилось при следующих граничных условиях:

1. Суммарный расход КТ через КС: 64 г/с.
2. Расход кислорода на завесное охлаждение составил 20% от суммарного расхода через КС: 13 г/с.
3. Соотношение КТ в основном потоке: 0.8.
4. Температура основного потока: 3317 К.
5. Температура кислорода в завесе: 300 К.

6. Для моделирования течения и перемешивания компонентов в камере сгорания был выбран рабочий объем, представленный на рис. 15.

7. Модель турбулентности SST.

8. Интенсивность турбулентности 5 %.

9. Соотношение КТ определялось как отношение массовой концентрации кислорода к массовой концентрации метана.

10. Расчетная область содержала около 35 000 элементов.

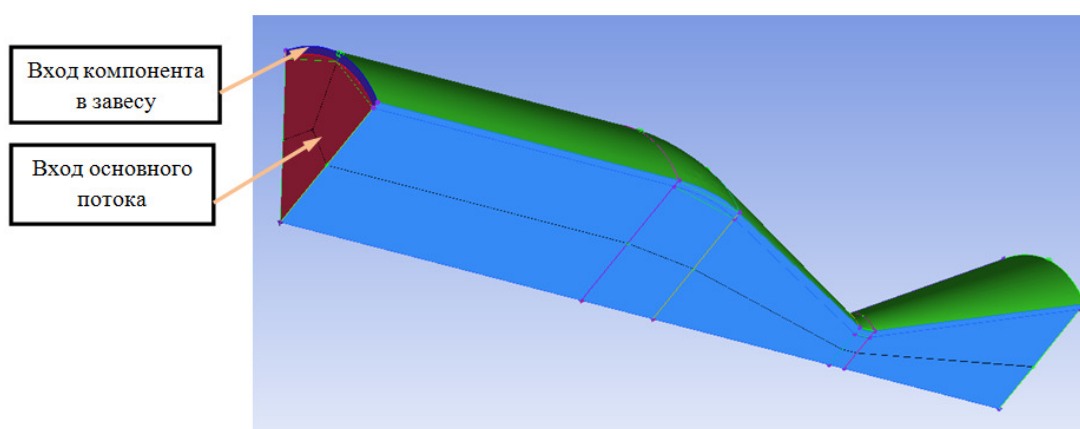


Рис. 15. Расчетный объем для численного моделирования рабочих процессов в камере сгорания ЖРДМТ 200Н.

Результаты моделирования изображены на рис. 16.

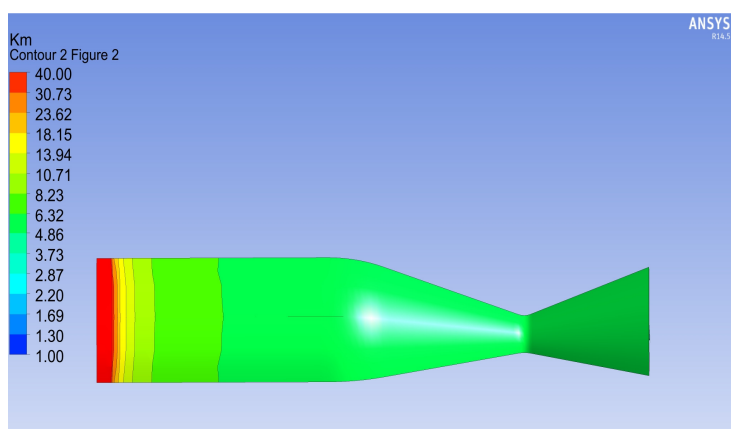


Рис. 16. Распределение соотношения компонентов непосредственно возле стенки.

## Выводы

1. Выполнен обзор математических моделей, описывающих изменение соотношения компонентов вблизи стенки КС.
2. Проведено численное моделирование внутрикамерного процесса перемешивания КТ с использованием коммерческого пакета вычислительной гидрогазодинамики ANSYS CFX.
3. Сравнение результатов трехмерного моделирования и инженерных расчетов показало, что при корректировке значения коэффициента турбулентной диффузии  $K_d$  ( $K_d=10^{-2.75}$  м<sup>2</sup>/с) [6] и скорости турбулентных пульсаций  $v'$  ( $v'=15$  м/с) [5], эти инженерные методики [5, 6] хорошо согласуются с результатами моделирования (рис. 17).

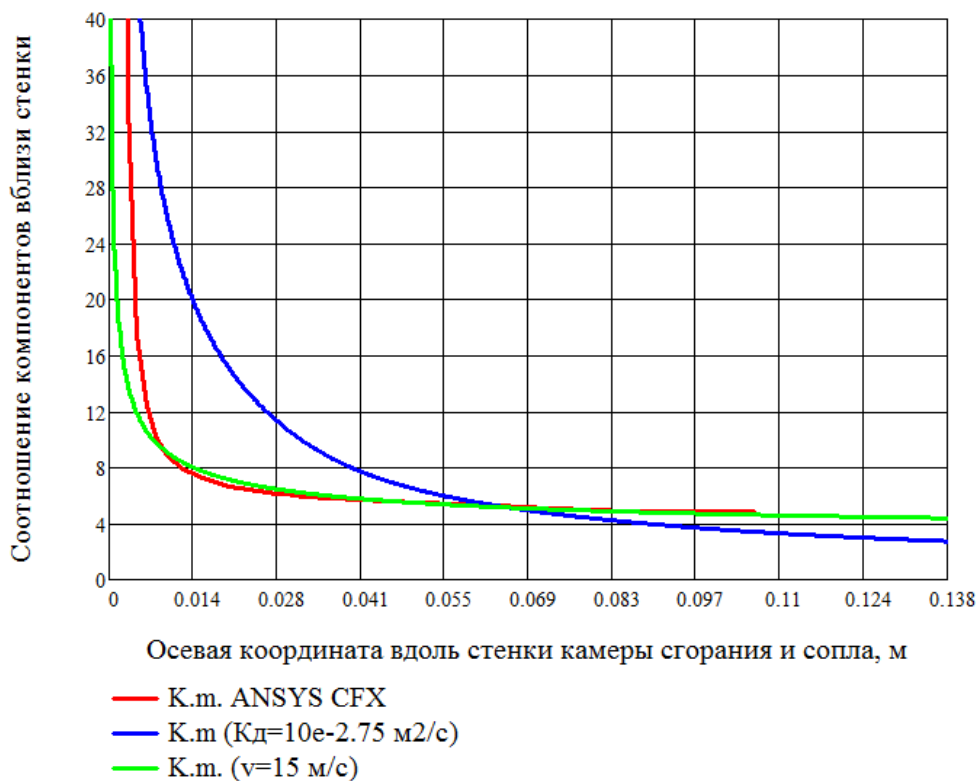


Рис. 17. Сравнение результатов моделирования и инженерных методик.

## **Библиографический список**

1. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. В 2 кн. Кн. 2. Учебн. для авиац. спец. вузов / А. П. Васильев, В. М. Кудрявцев, В. А. Кузнецов и др.; под ред. В. М. Кудрявцева. - М.: Высшая школа, 1993. - 368 с.
2. NASA SP-8124. Liquid rocket engine. Self-cooled combustion chambers, September 1977. - 126 p.
3. Martin Hersch. A mixing model for rocket engine combustion. NASA TN D-2881, June 1965. - 24 p.
4. Martin Hersh. Experimental method of measuring intensity of turbulence in a rocket chamber. ARS J., vol. 31, no. 1, Jan. 1961. - pp. 39-45.
5. Рабочие процессы в жидкостном ракетном двигателе и их моделирование / В. Е. Лебединский, Г. П. Калмыков, С. В. Мосолов и др.; под ред. академика РАН А. С. Коротева. - М.: Машиностроение, 2008. - 512 с.
6. Волков Е. Б., Головков Л. Г., Сырицын Т. А. Жидкостные ракетные двигатели. - М.: Воениздат, 1970. - 592 с.