

# РАСЧЕТ ТЕПЛОЗАЩИТЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЗАВЕСЫ

**А.Л. Куранов, А.М. Михайлов**

*Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем ХК «Ленинец»,  
Санкт-Петербург, Россия*

В последнее десятилетие в ведущих странах Запада при проведении исследований в области новых видов авиационно-космической техники большое внимание уделяется разработке ключевых технологий создания гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА), особенно гиперзвуковых крылатых ракет со скоростью  $M = 6-8$ .

Чтобы ГЛА удовлетворяли предъявляемым к ним требованиям, разрабатываемые для них силовые установки должны обладать высокими тягово-экономическими характеристиками при относительно малой массе конструкции. В качестве основных силовых установок на современном этапе рассматриваются гиперзвуковые прямоточные воздушно-реактивные двигатели со сверхзвуковой скоростью потока в камере сгорания, имеющие наибольшее значение удельного импульса в требуемом диапазоне скоростей и использующие углеводородное топливо.

Среди технологий, разрабатываемых для гиперзвуковых полетов, методы теплозащиты являются одними из самых важных. Невозможность использования традиционных для космических аппаратов методов обусловлена необходимостью длительного полета в плотных слоях атмосферы.

## Обозначения

$P$  - давление, МПа;

$T$  - температура, К;

$Z$  - массовая доля конденсированных продуктов в смеси продуктов реакции;

$X_i$  - мольная доля продукта в смеси продуктов реакции

$\Delta H$  - теплота нагрева охладителя, кДж/кг.

## Индексы

нагр - нагрев

$H_2$  – водород

Ств – углерод в твердой фазе (сажа)

В качестве охлаждающих жидкостей были рассмотрены вода, керосин Т1, смеси керосина и воды. Равновесные термодинамические расчеты проводились по

программе для ПЭВМ, составленной во ФГУП «РНЦ «Прикладная химия»» на основе методики, изложенной в [1,2], с использованием термодинамических функций из банка ИВТАНТЕРМО [3] и дополнительного банка данных, созданного в ФГУП «РНЦ «Прикладная химия»».

Хотя в пристеночном слое происходит постепенное перемешивание и химическое взаимодействие охлаждающей жидкости с ядром потока продуктов реакции, при сравнительных расчетах тепловых затрат на нагрев охлаждающих жидкостей, подаваемых в завесу, было сделано/допущение, что:

-завеса не смешивается с основным потоком продуктов сгорания,

-нагрев, испарение и разложение материала завесы происходит за счет тепла, отдаваемого ядром потока.

Расчеты составов продуктов разложения при нагреве и потребное количества тепла для нагрева были проведены при давлении 0,2542МПа(2,5ата) для серии температур нагрева до 1373,15К( 1000°C) (допустимая температура стенки).

Расчеты были выполнены для большого количества температур. В таблице 1 приведены результаты только для температур 700, 1000 и 1373,15К.

Вода является достаточно устойчивым соединением и при нагреве даже до 1373,15 К практически мало разлагается и находится в паровой фазе в смеси с ничтожным количеством водорода  $H_2$  (0,0042 объемных %). При этом чуть меньше половины энергии нагрева тратится на ее испарение.

При нагреве керосина Т1, состоящего из смеси различных углеводородов, уже при температуре 700К в продуктах разложения содержится до 9,3 мольных % водорода, а при 1373,15К - до 48 мольных %  $H_2$ . Наличие в продуктах разложения горючего Т1 большого количества газообразного  $H_2$ , имеющего огромную теплоемкость по сравнению с теплоемкостью газообразного  $H_2O$ , приводит к тому, что при температуре 1373,15К затраты тепла на нагрев и разложение керосина выше, чем для воды (для Т1 - 5415,3 кДж/кг, для  $H_2O$  - 4818,4 кДж/кг). При более низких температурах нагрева затраты тепла на нагрев и разложение жидкости

больше для  $H_2O$  (например, при 700К для Т1 затраты тепла составляют 472, : кДж/кг, а для воды- 3251,7 кДж/кг).

В керосине во всем рассмотренном интервале температур содержится до 51-52 мольных % сажи (50-85 массовых %), что исключает использование в чистом виде горючего Т1 в качестве завесы. Однако, образование сажи в керосине можно исключить, если добавить в него в большом количестве воду, которая приведет к конверсии продуктов разложения керосина с образованием газообразных продуктов разложения без сажи ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ).

Добавление воды в керосин в определенном количестве позволит увеличить содержание водорода в продуктах разложения на 5-15 и более мольных % в зависимости от содержания воды в керосине и температуры нагрева. Это приведет к увеличению затрат тепла на нагрев и разложение смеси керосина с водой по сравнению с чистой водой при высоких температурах нагрева.

Доля воды в керосине должна быть такова, чтобы во всем температурном интервале нагрева не образовывалось сажи в продуктах разложения.

В таблице 1 выделены жирным шрифтом варианты составов и температур нагрева, при которых в продуктах разложения отсутствует сажа.

Максимальные затраты тепла на нагрев смеси керосина и воды, как правило, имеют место при максимальном образовании водорода в смеси продуктов разложения. Например, при  $T=1373,15K$  из всех рассмотренных смесей керосина и воды состав (43,5861%Т1+56,4139%  $H_2O$ ) (основными продуктами разложения для состава с этим количеством воды при 1373Д5К являются  $H_2$  и  $CO$ ) дает наибольшее содержание водорода в смеси продуктов разложения, что обеспечивает наибольшую затрату тепла на нагрев -9258,1 кДж/кг при отсутствии сажи, а для воды эта величина составляет всего 4818,4 кДж/кг. Следует однако заметить, что при более низких температурах нагрева этот состав дает сажу при разложении в пристеночном слое (без взаимодействия с ядром потока основных продуктов сгорания).

Для исключения образования сажи в широком интервале температур содержание воды в керосине должно быть большим 56,4139%.

Расчеты показали, что для исключения образования сажи при разложении охлаждающей смеси содержание воды в смеси с керосином должно быть не менее 70-80%. Это приведет к некоторому снижению затрат тепла, а, следовательно, к снижению охлаждающего эффекта смеси. Тем не менее даже при содержании 80% воды в керосине при нагреве смеси до 1000К и выше затраты тепла будут больше, чем при нагреве воды: при  $T=1000\text{K}$   $\Delta H_{\text{нагр}}$  составляет 5544,9 кДж/кг для смеси 20%Т1+80% Н<sub>2</sub>О и 3910,6кДж/кг для воды, при 1373,15К, соответственно, 7842,8 и 4818,4 кДж/кг. Данные оценки затрат тепла на нагрев и разложение охлаждающих жидкостей и их смесей являются предельными, т.к. в действительности происходит не только процессы нагрева, испарения и разложения материала завесы, но и перемешивание, и химическое взаимодействие завесы с основным потоком продуктов сгорания. По этой причине разница в охлаждающей способности воды и смеси керосина с водой будет меньше.

Кроме того, при оценке охлаждающей способности жидкостей необходимо учитывать их теплоемкость, вязкость и теплопроводность, влияющие на параметры теплообмена и тепловой поток в стенку двигателя.

Таблица 1- Затраты тепла на нагрев и разложение охлаждающей жидкости в зависимости от температуры нагрева

NN п/п	Завеса	Т <sub>нагр</sub> =700К		Т <sub>нагр</sub> =1000К		Т <sub>нагр</sub> =1373,15К	
		X <sub>H<sub>2</sub></sub> /X <sub>ств</sub>	ΔH	X <sub>H<sub>2</sub></sub> /X <sub>ств</sub>	ΔH	X <sub>H<sub>2</sub></sub> /X <sub>ств</sub>	ΔH
1	H <sub>2</sub> O	<b>0</b> <b>0</b>	<b>3251,7</b>	<b>0</b> <b>0</b>	<b>3910,6</b>	<b>0,0000424</b> <b>0</b>	<b>4818,4</b>
2	T1	0,09322 0,52429	472,5	0,40443 0,51596	3236,3	0,48014 0,51393	5415,3
3	70%T130% H <sub>2</sub> O	0,09623 0,37801	1401,7	0,44548 0,33306	4689,7	0,55487 0,29292	7461,1
4	50%T150% H <sub>2</sub> O	0,10345 0,22429	2039,5	0,49404 0,15485	5638,0	0,62606 0,08190	8823,6
5	43,5861%T156,41 39% H <sub>2</sub> O	0,10696 0,16000	2246,6	0,51449 0,08307	5940,1	<b>0,65450</b> <b>0</b>	<b>9258,1</b>
6	40%T160% <b>H<sub>2</sub>O</b>	0,10925 0,11986	2362,9	0,52722 0,03890	6108,7	<b>0,63618</b> <b>0</b>	<b>8939,9</b>
7	30%T170% H <sub>2</sub> O	<b>0,11749</b> <b>0</b>	<b>2688,7</b>	<b>0,53574</b> <b>0</b>	<b>6111,7</b>	<b>0,55496</b> <b>0</b>	<b>7842,8</b>
8	20%T180% H <sub>2</sub> O	<b>0,126821</b> <b>0</b>	<b>3005,9</b>	<b>0,46874</b> <b>0</b>	<b>5544,9</b>	<b>0,44238</b> <b>0</b>	<b>6768,3</b>

Для оценки эффективности охлаждения смесями, чьи теплофизические характеристики были получены, были рассчитаны максимальное время эффективной защиты и температурные профили при условии равномерного нагрева. Для проведения расчета были взяты следующие параметры зоны охлаждения

- Зона охлаждения по длине  $l=1400$  мм, ширина зоны  $b=640$  мм;
- Тепловой поток  $q=1.9$  МВт/м<sup>2</sup>;
- Температура охлаждающей жидкости – 20°С;
- Располагаемая масса охлаждающей жидкости – 10 кг.

Для оценки времени, в течении которого могут эффективно снимать тепло исследованные методами термодинамики смеси можно воспользовались формулой:

$$t_{\text{охл}} = \frac{\Delta H}{S_{\text{покр}} q} m$$

Где  $t_{\text{охл}}$  – максимальной эффективное время работы охладителя [с]

$\Delta H$  – теплота нагрева охладителя [Дж/кг]

$m$  – располагаемая масса охлаждающей жидкости [кг]

$S_{\text{покр}}$  – площадь охлаждаемого покрытия [м<sup>2</sup>]

$q$  – удельный тепловой поток [Вт/м<sup>2</sup>]

По данным этого расчета были построены аппроксимирующие графики (рис.1).

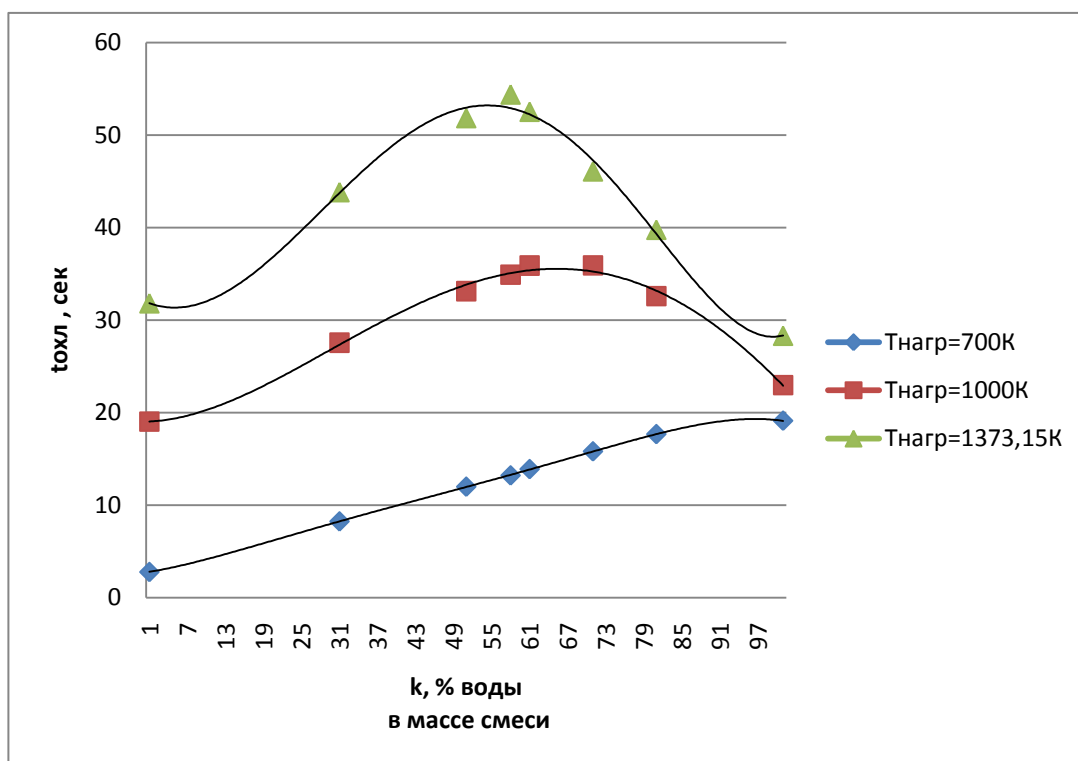


Рисунок 1 График зависимости времени эффективной теплозащиты от соотношения компонентов при нагреве до 700К, 1000К и 1373,15К при длине охлаждаемой части КС 1,4 м.

Наибольшее время эффективного охлаждения достигается при подаче чистой воды для температуры нагрева 700К и оно равно 19,1 с. Для температуры нагрева 1000К наиболее эффективной является смесь 30% керосина и 70%. Время её эффективной работы 35,9с. Если нагревать смесь до температуры 1372,15К наиболее эффективной оказывается смесь 43,5% керосина и 56,5% воды, при этом время её работы 54,3с.

Поскольку энтальпия смеси растет линейно по времени, так как тепловой поток постоянен, интересной может оказаться неравномерность роста температур по длине КС вследствие протекающих в охлаждающем слое эндотермических процессов.

Для расчета распределения температур по длине КС в первую очередь необходимо оценить длину зоны выкипания воды и керосина в смеси. Для этого согласно методике рассмотренной в [4] необходимо рассмотреть длину участков нагрева до температуры кипения воды, длину участка выкипания воды, длину участка нагрева до среднемассовой температуры кипения керосина, длину участка выкипания керосина.

В случае однокомпонентной охлаждающей жидкости формула длины участка нагрева до температуры кипения при постоянном тепловом потоке имеет следующий вид[4]:

$$l_{жид} = \frac{c_{жс} G \Delta T}{qb}$$

Где  $c_{ж}$  - усредненная по температуре теплоемкость жидкости при заданном давлении, [Дж/кгК]

$\Delta T$  - перепад температур [К]

$G$  - расход охлаждающей смеси [кг/с],  $G = \frac{m}{t_{охл}}$

Модифицируя формулу определения длины участка нагрева до температуры испарения воды для смеси воды и керосина получили следующее выражение:

$$l_{жид} = \frac{(c_{кер} k + c_{жH_2O} (1 - k)) G (T_{кипенияH_2O} - T_{нач})}{qb} \quad (1)$$

Где  $c_{кер}$  - усредненная по температуре теплоемкость керосина при заданном давлении, в данном случае равна 1,9 кДж/кгК [5];

$c_{жH_2O}$  - усредненная по температуре удельная теплоемкость жидкой воды при заданном давлении, в данном случае равна 4,2 кДж/кгК [6];

$T_{нач}$  - температура смеси при впрыске на стенку КС, во всех расчетах принята равной 293,15К;

$T_{кипенияH_2O}$  - температура смеси при впрыске на стенку КС, для заданного давления равна 127°C [6].

Далее необходимо рассчитать длину участка испарения воды по следующей формуле:

$$l_{ИспH_2O} = \frac{(1 - k) c_{ИспH_2O} G}{qb}$$

Где  $l_{ИспH_2O}$  - длина участка испарения воды, [м];

$c_{ИспH_2O}$  - теплота испарения для заданного давления, в данном случае 2180 кДж/кг [6].

Аналогично расчету длины разогрева смеси до температуры кипения воды можно рассчитать разогрев смеси до среднемассовой температуры выкипания керосина:

$$l_{Двуфаз} = \frac{(c_{кер} k + c_{гH_2O} (1 - k)) G (190 - 127)}{qb} \quad (2)$$

Где  $l_{двуфаз}$  - длина зоны разогрева до среднемассовой температуры выкипания керосина;

$c_{гH_2O}$  - удельная теплоемкость водяного пара, усредненная для данного интервала температур и в заданных условиях равная 2,2 кДж/кгК [6].



Также, аналогично длине участка испарения воды, можно найти длину участка выкипания керосина:

$$l_{\text{Исп.Кер.}} = \frac{kc_{\text{ИспКер}}G}{qb}$$

Где  $l_{\text{Исп.Кер.}}$  -длина зоны выкипания керосина;  
 $c_{\text{ГН2O}}$  -удельная теплота выкипания керосина в заданных условиях равная 230 кДж/кг [5],[7].

Изменения температуры на полученных участках происходит по разному. На первом за счет постоянного теплового потока и незначительно меняющейся теплопроводности компонентов температура растет равномерно и определяется обратным пересчетом по формуле (1). На втором участке рост температуры сдерживается скрытой теплотой парообразования воды. На третьем также наблюдается равномерный рост, рассчитываемый из (2). На четвертом участке имеет место более сдержанный рост за счет разной температуры выкипания фракций керосина.

Основываясь на этом можно построить профили температур по длине КС. Профили температур при нагреве до 700К, 1000К и 1372,15К представлены соответственно на рисунках 2,3,4. Следует учитывать, что протяженность участков с жидкой фазой рассчитывалась без учета съема тепла газообразной фазой [5][8]. Таким образом, они являются асимптотами температурных профилей.

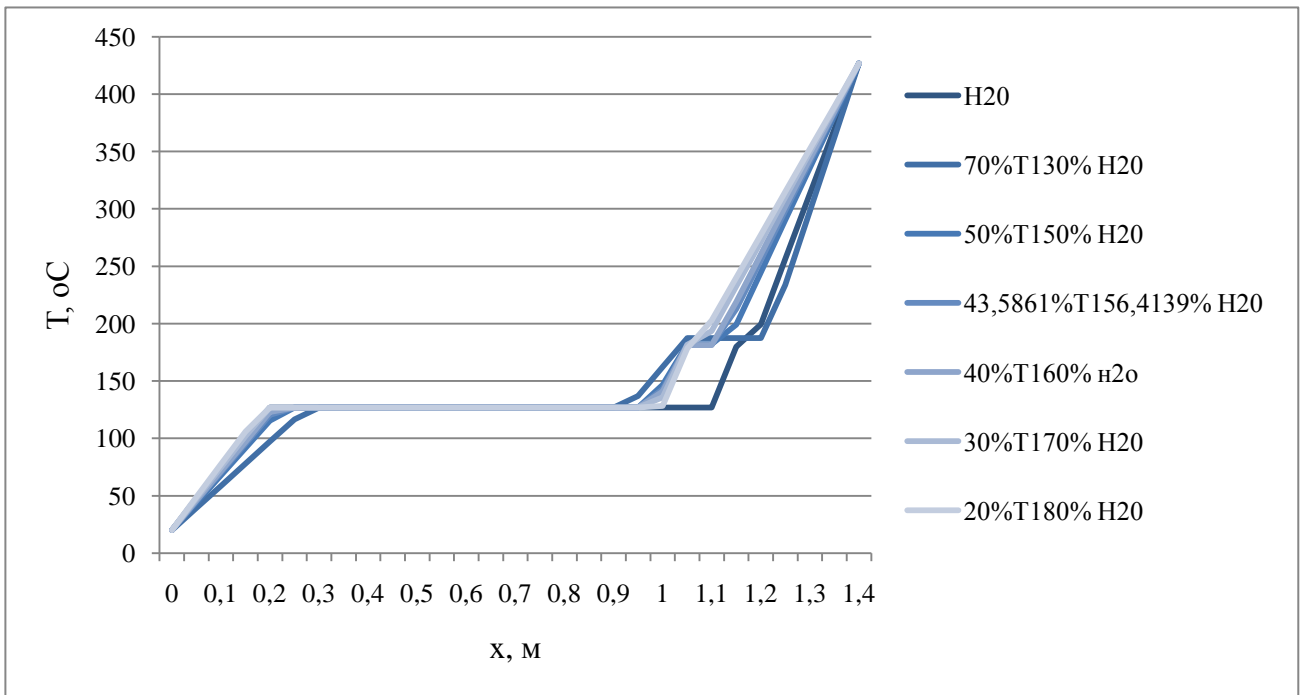


Рисунок 2 График распределения температуры по длине КС при  $T_{нагр}=700K$

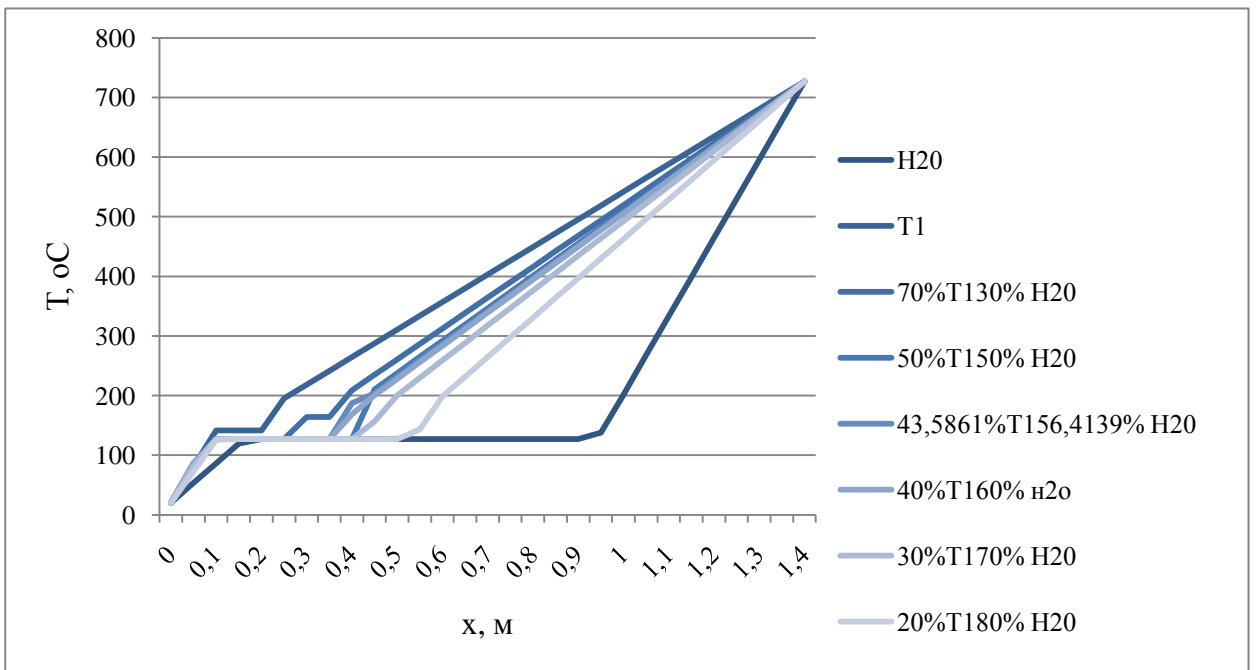
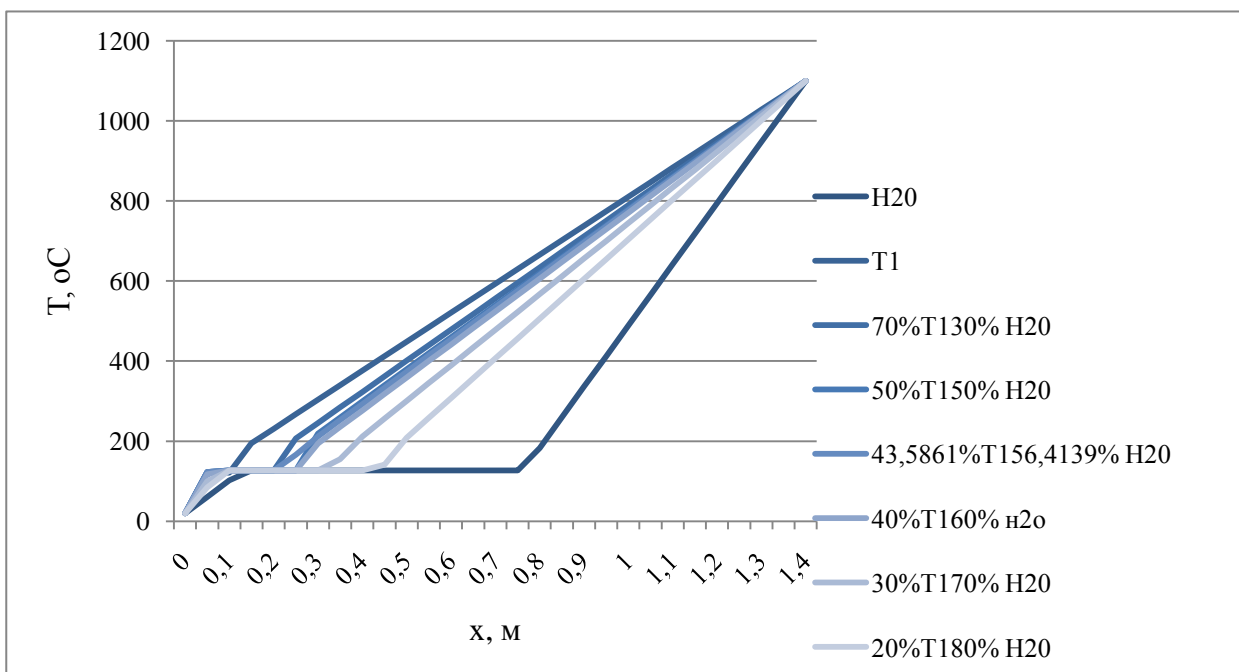


Рисунок 3 График распределения температуры по длине КС при  $T_{нагр}=1000K$



**Рисунок 4** График распределения температуры по длине КС при  $T_{нагр}=1372,15\text{K}$

Для более точного расчета необходимо иметь сведения о составе набегающего потока, о характере теплообмена, о способе и характере смесеобразования керосина и воды, о теплоемкости стенки КС[5][9].

Размещение форсунок в начале участка охлаждения является оптимальным, если обеспечить достаточно высокое качество впрыска и рассредоточение по поверхности охлаждающей жидкости. В [5] приводятся рекомендации к снижению скорости подачи смеси через форсунки и к переходу к продавливанию охлаждающей жидкости через пористую структуру.

Полученные термодинамические оценки хладоресурса позволяют оценить оптимальный состав смесей воды и керосина T1 при нагреве до разных температур. Определение распределения температуры по длине охлаждаемого участка позволяет судить о характере происходящих в каждой зоне процессов.

### Список использованных источников.

1. Китаин М.М., Катин Е.И. Об определении равновесных составов продуктов сгорания. «Физика горения и взрыва», 1984, № 2.
2. Молчанов О.Н., Китаин М.М., Суховицкая Е.А., Земцева Ж.Т. Теоретический метод расчета энергетических и основных физико-химических параметров потока. ГИПХ. Л., 1989, инв. № 85-89.
3. Автоматизированная система ИВТАНТЕРМО, ИВТ АН СССР, М., 1985.
4. Основы теории и расчета жидкостных ракетных двигателей. Васильев А.П., Кудрявцев В.М, Кузнецов В.А. и др. Под ред В.М. Кудрявцева – 3-е изд., испр. И доп. М.: Высш. Школа, 1983. – 703с., ил.
5. Григорьев Б.А., Богатое Г.Ф., Герасимов А.А. Теплофизические свойства нефти, нефтепродуктов, газовых конденсатов и их фракций / Под редакцией Б.А. Григорьева. — М: Издательство МЭИ, 1999. — 372 с: ил.
6. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. Рек. Гос. службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98 — М: Издательство МЭИ. 1999. — 168 с; ил.
7. Варгафтик Н.Б., Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.:Наука, 1972 г. 720с.
8. Полежаев Ю. В. и Юревич Ф. Б. Тепловая защита. Под ред. А. В. Лыкова. М., «Энергия», 1976. 392 с. с ил.
9. В.С. Авдуевский, Б.М. Галицейский, Г.А. Глебов и др.; Под общ. Ред. В.С. Авдуевского. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: Учебник авиационных специальностей вузов. 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1992 – 528с.:ил.