

«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

А.А. Диденко

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ КАМЕР СГОРАНИЯ ВРД
Часть III. ТЕПЛОВОЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТЫ
КАМЕРА СГОРАНИЯ ГТД

САМАРА 2012

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЁВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

А.А. Диденко

ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ КАМЕР СГОРАНИЯ ВРД
Часть III. ТЕПЛОВОЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТЫ
КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия для курсового и дипломного проектирования*

САМАРА
Издательство СГАУ
2012

УДК СГАУ: 621.431.75(075)

ББК 39.55

Д 444

Рецензенты: д-р техн. наук, профессор Ю.И. Цыбизов,
канд. техн. наук, доцент А.М. Цыганов

Диденко А.А.

Д 444 **Теория и расчет камер сгорания ВРД. Часть III. Тепловой и гидравлический расчеты камеры сгорания ГТД: учеб. пособие для курсового и дипломного проектирования / А.А. Диденко.** – Самара: Изд-во СГАУ, 2012. – 62 с.

ISBN 978-5-7883-0865-4

Изложена методика теплового и гидравлического расчетов камеры сгорания ГТД, осуществляемых на стадии ее начального проектирования. Приведен пример распределения воздуха по длине жаровой трубы, назначения графика выгорания топлива, расчета среднemasсовой температуры газа по длине жаровой трубы, определения соотношений по расходам воздуха и топлива через форсунку. Производится оценка потребной величины среднего диаметра капель распыливаемого топлива.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 160301 – «Авиационные двигатели и энергетические установки» для курсового и дипломного проектирования. Может быть полезно аспирантам, инженерам и научным работникам.

УДК СГАУ: 621.431.75(075)

ББК 39.55

ISBN 978-5-7883-0865-4

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	5
Основные условные обозначения	7
1. Распределение масс воздуха и топлива по длине жаровой трубы	
1.1. Распределение общего количества воздуха по характерным внутрикамерным зонам	8
1.2. Назначение числа поясов подвода воздуха через стенки жаровой трубы и расположение расчетных сечений	9
1.3. Определение удельных расходов воздуха по сечениям жаровой трубы	10
1.4. Распределение воздуха струй	11
1.5. Распределение воздуха по ij -м участкам жаровой трубы	13
1.6. Определение графика выгорания топлива	14
1.7. Определение удельных расходов воздуха, участвующего в горении	15
1.8. Определение удельных расходов балластного воздуха	18
1.9. Определение значений средних коэффициентов избытка воздуха по участкам жаровой трубы	19
1.10. Составление сводной таблицы распределения топлива и воздуха	20
2. Расчет среднемассовой температуры газа по длине жаровой трубы	
2.1. Определение исходных теплофизических данных	24
2.2. Составление уравнения теплового баланса для определения $T_{жij}^*$	28
2.3. Расчет среднемассовой температуры газа по участкам жаровой трубы	34
3. Расчет среднемассовых скоростей движения w_{ij} и времени пребывания $\Delta\tau_{прij}$ газа по участкам жаровой трубы	
3.1. Расчет абсолютных значений расходов газа $G_{Гij}$	37
3.2. Расчет среднемассовых скоростей газа w_{ij}	38
3.3. Расчет времени пребывания газа в жаровой трубе	44

4. Расчет потребной величины среднего диаметра капель D_{320} распыленного топлива	
4.1. Определение времени жизни капель	45
4.2. Определение теплофизических характеристик газа и топлива и константы испарения капель	47
4.3. Определение среднего диаметра капель D_{320}	51
4.4. Определение параметров форсунки под требуемую величину D_{320}	53
Заключение	57
Список литературы	58

ТЕПЛОВОЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД

Введение

Тепловой и гидравлический расчеты камеры сгорания являются следующей расчетной частью за этапом её общего начального проектирования [4, 5, 7, 18], который рассматривается как Часть I. Тепловой и гидравлический расчеты с использованием данного пособия целесообразно также выполнять после оценки экологических показателей камеры сгорания [3], которая рассматривается как Часть II. В ходе теплового и гидравлического расчета камеры сгорания определяется изменение по длине жаровой трубы L следующих основных теплофизических и газодинамических характеристик потока:

G_B, G_T - расходы воздуха и топлива – суммарные их количества для каждого (i,j) -го участка жаровой трубы; определяются также их части, участвующие в горении непосредственно и участвующие лишь в процессах тепло-массообмена;

$T_{ж\ i,j}^*$ - среднемассовая температура газа;

$w_{T\ i,j}$ - скорость газа, средняя по поперечному сечению жаровой трубы;

$\Delta\tau_{pp\ i,j}$ - время пребывания газа на каждом (i,j) -м участке и суммарное время пребывания газа во всем объеме жаровой трубы τ_{pp} .

На завершающем этапе теплогидравлического расчета производится расчет величин средних диаметров капель $D_{i,j}$, которые гарантировано должны испариться до подхода к каждому рассматриваемому (i,j) -участку, чтобы соответствующее им количество топлива $\Delta G_T^{sup\ i,j}$ сгорело на этом участке. С использованием значений $D_{i,j}$ и $\Delta G_T^{sup\ i,j}$ производится расчет потребной величины среднего диаметра капель D_{32} для всей массы ежесекундно впрыскиваемого топлива, которую должна обеспечивать форсунка. Полученные данные по размерам капель и массам сгорающего топлива позволяют определить

форму функции распределения капель по размерам и, при необходимости, приступить к проектированию форсунки. Производится первоначальная оценка расходных соотношений для форсунки.

Результаты теплогидравлического расчета используются далее в следующих частях курсового проектирования – при расчете максимальной температуры стенки жаровой трубы (Часть IV), в выборе типа и конструкции форсунки (Часть V) и при расчете радиальной эпюры температуры газа на выходе из жаровой трубы камеры сгорания (Часть VI).

Студент, выполняющий теплогидравлический расчет камеры сгорания, знакомится с тремя важными задачами этого этапа проектирования:

- осуществление распределения воздуха по длине жаровой трубы (ЖТ) и назначение графика выгорания топлива;

- составление уравнений теплового баланса для произвольного (i,j) -участка ЖТ с учетом всех потоков массы рабочего тела и теплоты, которые используются для вычисления среднемассовой температуры газа $T_{жi,j}^*$;

- определение потребной величины мелкости распыливания топлива (значение D_{32}) для обеспечения назначенного графика выгорания топлива $\Delta G_T^{zop} (L)$ и изменения $T_{жi,j}^*$.

Расчеты выполняются с использованием газодинамических функций и теплофизических свойств рабочего тела.

В основе используемого уравнения теплового баланса лежит предположение, которое считается достаточно хорошо теоретически обоснованным, хорошо согласуется с экспериментальными данными и широко используется как методическая основа при выполнении детальных расчетов с использованием CFD-пакетов вычислительной газодинамики [1, 14]. Так предполагается, что вся масса топлива сгорает на стехиометрических площадках (микроучастках) с локальными коэффициентами избытка воздуха $\alpha_{i,j}^{zop} = 1$, совокупность которых образует некоторую зону химических реакций [1, 14]. Между этими участками находятся микрообъемы балластного воздуха, который в химических реакциях участия не принимает, но после их завершения быстро перемешивается с образовавшимися, так называемыми, «чистыми продуктами сгорания» [9].

Основные условные обозначения

(i,j) – обозначение участка жаровой трубы, i, j – номер сечения, соответственно, на входе в участок и на выходе из него;

D, D_{32} – диаметр отдельной капли и, соответственно средний диаметр ансамбля капель по-Заутеру, мкм (средний объемно-поверхностный диаметр капель);

F – площадь поперечного сечения отверстия или канала проточной части камеры сгорания, м^2 ;

G_B, G_T – расходы воздуха и топлива – суммарные их количества для всей камеры сгорания или для каждого (i,j) -го участка жаровой трубы, кг/с ;

$\Delta G'_T{}^{\text{гор}}, \Delta G'_B{}^{\text{гор}}$ – относительное количество топлива и, соответственно, воздуха, которые сгорают и принимают участие в горении на данном участке жаровой трубы;

$G'_B{}^{\text{бал}}$ – относительное количество балластного воздуха;

H_{U293} – низшая удельная теплота сгорания топлива, ккал/кг-топл ;

L – длины жаровой трубы, м ;

L_0 – стехиометрический коэффициент топлива;

T^* – температура воздуха или газа, К

α – коэффициент избытка воздуха;

λ – приведенная скорость воздуха или газа

η_{Γ} – коэффициент полноты сгорания топлива;

$\Delta \tau_{\text{пр}}, \tau_{\text{пр}}$ – время пребывания газа, соответственно, на участке жаровой трубы и во всем её объеме, с ;

w_{Γ} – скорость газа средняя по поперечному сечению жаровой трубы, м/с ;

$P(D)$ – вероятность присутствия в факеле или на участке жаровой трубы каплей с диаметром D ;

1. Распределение масс воздуха и топлива по длине жаровой трубы

1.1. Распределение общего количества воздуха по характерным внутрикамерным зонам

Часть I [4, 18] курсового (дипломного) проектирования камеры сгорания «Определение основных размеров и характеристик камеры сгорания ГТД» заканчивается выполнением компоновочного чертежа проектируемой камеры сгорания. При этом её облик по основным геометрическим параметрам сопоставляется с камерой сгорания - прототипом и, при необходимости, уточняется при последующей проработке проекта. Из Части I становятся также известными основные продольные и диаметральные размеры проточной части камеры сгорания, а также протяженности зоны горения, зоны смешения и относительные площади отверстий характерных зон для прохода воздуха внутрь жаровой трубы: $F_{\phi p}$ - суммарная площадь всех отверстий во фронтальном устройстве, F_{O3r} - суммарная площадь основных отверстий зоны горения, F_{3c} - суммарная площадь основных отверстий зоны смешения и $F_{Oxл}$ - суммарная площадь отверстий системы охлаждения жаровой трубы. Сумма этих площадей составляет величину суммарной площади всех отверстий в жаровой трубе для прохода воздуха ΣF_0 . Для рассматриваемого в этой части курсового проекта примера, соответственно, имеем:

$F_{\phi p} / \Sigma F_0 = 0,25$ - относительная площадь отверстий для прохода воздуха через фронтальное устройство;

$F_{O3r} / \Sigma F_0 = 0,4038$ - относительная площадь отверстий для прохода воздуха в зону горения;

$F_{3c} / \Sigma F_0 = 0,0962$ - относительная площадь отверстий для прохода воздуха в зону смешения;

$F_{Oxл} / \Sigma F_0 = 0,25$ - относительная площадь отверстий для прохода воздуха системы охлаждения жаровой трубы.

Пренебрегая различием соответствующих коэффициентов расхода отверстий μ , принимаем, что указанные относительные площади отверстий будут равны соответствующим относительным величинам расхода воздуха через них, т.е.: $\Delta G'_{\phi p} = 0,25$; $\Delta G'_{O3r} = 0,4038$; $\Delta G'_{3c} = 0,0962$ и $\Delta G'_{Oxл} = 0,25$.

Проверкой принятого распределения воздуха является выполнение условия $\sum \Delta G'_{z_c} = 1$. Для нашего распределения это условие выполняется, так как $\Delta G'_{\text{ФР}} + \Delta G'_{\text{ОЗГ}} + \Delta G'_{z_c} + \Delta G'_{\text{ОХЛ}} = 0,25 + 0,4038 + 0,0962 + 0,25 = 1$.

1.2. Назначение числа поясов подвода воздуха через стенки жаровой трубы и расположение расчетных сечений

Число поясов подвода воздуха назначается на основе изучения конструкции, в первую очередь, камеры сгорания – прототипа, а также на основе изучения конструкций лучших образцов камер сгорания и с учетом тенденций их развития. В первом приближении будем руководствоваться следующими соображениями.

Для формирования эпюры выходного поля температур назначаем пока один ряд крупных отверстий, $z_{z_c} = 1$. В дальнейшем, при расчете радиальной эпюры температур, это количество уточнится.

Для подачи воздуха в первичную зону горения назначаем два ряда крупных отверстий. Первый ряд струй будет взаимодействовать с задней полусферой зоны обратных токов (ЗОТ), участвовать в создании благоприятных условий для начального смесеобразования и выгорания первых порций топлива и вместе с ЗОТ отвечать за стабилизацию пламени. Второй ряд обеспечивает подвод воздуха для сгорания основной части топлива. Таким образом, принимаем $z_{\text{ПЗГ}} = 2$.

Во вторичной зоне будут догорать остатки топлива. Принимаем, что для обеспечения воздухом завершающих стадий горения, а также для перемешивания продуктов сгорания и балластного воздуха с целью выравнивания поля температур достаточно будет одного ряда крупных отверстий. Таким образом, $z_{\text{ВЗГ}} = 1$.

Принимаем, что в промежутках между поясами расположения крупных отверстий будет располагаться по одному поясу подвода воздуха для охлаждения стенок самой жаровой трубы (ЖТ). Поэтому $z_{\text{ОХЛ}} = 5$.

Итого в сумме имеется 9 поясов подвода воздуха через стенки жаровой трубы: 4 пояса – это ряды крупных отверстий и ещё 5 поясов – для подачи воздуха системы охлаждения ЖТ.

Примем следующую схему расположения расчетных сечений (Рис. 1).

В плоскости среза сопла форсунки будет располагаться сечение 1. Поток воздуха через фронтное устройство ЖТ состоит в основном из воздуха, который поступает внутрь ЖТ через воздушные завихрители форсунок, и воздуха, поступающего через систему соседних мелких отверстий. Принимаем, что весь этот воздух будет втекать через сечение 1.

Далее по длине жаровой трубы, для упрощения расчетов чередуясь, располагаются сечения подвода воздуха системы охлаждения (четные сечения 2, 4, 6, 8 и 10) и сечения с рядами крупных отверстий (нечетные сечения 3, 5, 7 и 9). Выходное сечение 11 совпадает с плоскостью входа в 1-ый сопловой аппарат турбины. Сечение 12 (в расчетной схеме, в общем случае, может отсутствовать) располагается либо в горловине межлопаточного канала 1 СА турбины, либо совпадает с сечением входа в межлопаточный канал рабочего колеса.

Далее вычерчивается принципиальная схема жаровой трубы (Рис. 1, а) с указанием намеченных сечений подвода воздуха и основных его потоков. На схеме также указываются характерные зоны в жаровой трубе – первичная и вторичная зоны горения и зона смешения.

1.3. Определение удельных расходов воздуха по сечениям жаровой трубы

В первом приближении принимаем, что воздух системы охлаждения и воздух зоны горения по соответствующим сечениям подвода распределяется равновеликими порциями. А именно (цифра или число в нижнем индексе – номер сечения):

- через фронтное устройство $\Delta G'_{B1} = \Delta G'_{ФР} = 0,25$;

- в сечениях подвода охлаждающего воздуха

$$\Delta G'_{B2} = \Delta G'_{B4} = \Delta G'_{B6} = \Delta G'_{B8} = \Delta G'_{B10} = \Delta G'_{ОХЛ} / z_{ОХЛ} = 0,25/5 = 0,5;$$

- в сечениях ввода поперечных струй в зоне горения

$$\Delta G'_{B3} = \Delta G'_{B5} = \Delta G'_{B7} = \Delta G'_{ОЗГ} / z_{ОЗГ} = 0,4038/3 = 0,1346;$$

- для сечения 9 поперечных струй зоны смешения

$$\Delta G'_{B9} = \Delta G'_{ЗС} / z_{ЗС} = 0,0962/1 = 0,962;$$

- в выходном сечении $\Delta G'_{B11} = 0$.

Впоследствии, после завершения всех расчетов, назначенные здесь расходы воздуха по сечениям $\Delta G'_B$, могут быть изменены. То есть, может быть выполнено перераспределение воздуха по длине жаровой трубы, например, с целью снижения эпорной неравномерности выходного поля температур или, например, с целью улучшения теплового состояния жаровой трубы (снижение температуры стенки), если они окажутся неудовлетворительными.

1.4. Распределение воздуха струй

Приступаем к разработке схемы распределения потоков воздуха по длине жаровой трубы (Рис. 1, в).

Для учета участия втекающего в жаровую трубу воздуха в процессах перемешивания поток воздуха каждой струи распределяется на две-три части и намечается очередность (порядок) их внедрения в сносящий основной поток на каждом i, j -ом участке жаровой трубы.

Воздух, вводимый через щелевые отверстия для заградительного охлаждения внутренней поверхности стенки жаровой трубы, распространяется вдоль её стенок в виде пелены полуограниченных струй. Постепенно он вовлекается в основной поток горячего газа. Частично это происходит за счет турбулентного массообмена между пеленой охлаждения и потоком горячего газа непосредственно, а также в значительной степени за счет увлечения поперечными струями втекающего воздуха с последующим перемешиванием всех потоков воздуха и горячего газа между собой. С точки зрения участия в процессах перемешивания воздух из поперечных струй крупных отверстий называют также активным воздухом.

При втекании поперечных струй активного воздуха в сносящий поток горячего газа на внешних границах струй образуется слой смешения с горячим газом. По мере продвижения струи масса газа в слое смешения постепенно увеличивается, слой расширяется, а ядро струи постепенно уменьшается в своем поперечном размере, утоньшается и постепенно исчезает.

Принятая схема взаимодействия струй полностью основывается на результатах многочисленных экспериментальных исследований, которые можно найти в учебной литературе [9, 10, 17]. Естественно, для внутрикамерного пространства она весьма приближенно отражает действительный ход процес-

сов втекания струй и их перемешивания со сносящим потоком горячего газа. Однако, на начальной стадии проектирования камеры сгорания использовать более детальные подходы не рационально.

Примем, что для составляемой схемы перемешивания все струи активного воздуха можно разбить на следующие части:

- для струи сечения 3:

$$\Delta g_{3,1} = 0,2, \quad \Delta g_{3,2} = 0,2, \quad \Delta g_{3,3} = 0,6;$$

- для струй сечений 5, 7 и 9:

$$\Delta g_{5,1} = 0,4, \quad \Delta g_{5,2} = 0,6;$$

$$\Delta g_{7,1} = 0,4, \quad \Delta g_{7,2} = 0,6;$$

$$\Delta g_{9,1} = 0,4, \quad \Delta g_{9,2} = 0,6.$$

Таким образом, будем иметь следующие величины удельных расходов активного воздуха:

$$\Delta G'_{3,1} = \Delta g_{3,1} \cdot \Delta G'_{B3} = 0,2 \cdot 0,1346 = 0,02692,$$

$$\Delta G'_{3,2} = \Delta g_{3,2} \cdot \Delta G'_{B3} = 0,2 \cdot 0,1346 = 0,02692,$$

$$\Delta G'_{3,3} = \Delta g_{3,3} \cdot \Delta G'_{B3} = 0,6 \cdot 0,1346 = 0,08076;$$

$$\Delta G'_{5,1} = \Delta g_{5,1} \cdot \Delta G'_{B5} = 0,4 \cdot 0,1346 = 0,05384,$$

$$\Delta G'_{5,2} = \Delta g_{5,2} \cdot \Delta G'_{B5} = 0,6 \cdot 0,1346 = 0,08076;$$

$$\Delta G'_{7,1} = \Delta g_{7,1} \cdot \Delta G'_{B7} = 0,4 \cdot 0,1346 = 0,05384,$$

$$\Delta G'_{7,2} = \Delta g_{7,2} \cdot \Delta G'_{B7} = 0,6 \cdot 0,1346 = 0,08076;$$

$$\Delta G'_{9,1} = \Delta g_{9,1} \cdot \Delta G'_{B9} = 0,4 \cdot 0,0962 = 0,03848,$$

$$\Delta G'_{9,2} = \Delta g_{9,2} \cdot \Delta G'_{B9} = 0,6 \cdot 0,0962 = 0,05772.$$

Струи охлаждающего воздуха разобьем на следующие части:

$$\Delta g_{2,1} = \Delta g_{4,1} = \Delta g_{6,1} = \Delta g_{8,1} = \Delta g_{10,1} = 0,4,$$

$$\Delta g_{2,2} = \Delta g_{4,2} = \Delta g_{6,2} = \Delta g_{8,2} = \Delta g_{10,2} = 0,6.$$

Таким образом, будем иметь следующие величины удельных расходов охлаждающего воздуха:

$$\Delta G'_{2,1} = \Delta g_{2,1} \cdot \Delta G'_{B2} = 0,4 \cdot 0,05 = 0,02,$$

$$\Delta G'_{2,2} = \Delta g_{2,2} \cdot \Delta G'_{B2} = 0,6 \cdot 0,05 = 0,03;$$

$$\Delta G'_{4,1} = \Delta g_{4,1} \cdot \Delta G'_{B4} = 0,4 \cdot 0,05 = 0,02,$$

$$\Delta G'_{4,2} = \Delta g_{4,2} \cdot \Delta G'_{B4} = 0,6 \cdot 0,05 = 0,03;$$

$$\Delta G'_{6,1} = \Delta g_{6,1} \cdot \Delta G'_{B6} = 0,4 \cdot 0,05 = 0,02,$$

$$\Delta G'_{6,2} = \Delta g_{6,2} \cdot \Delta G'_{B6} = 0,6 \cdot 0,05 = 0,03;$$

$$\Delta G'_{8,1} = \Delta g_{8,1} \cdot \Delta G'_{B8} = 0,4 \cdot 0,05 = 0,02,$$

$$\Delta G'_{8,2} = \Delta g_{8,2} \cdot \Delta G'_{B8} = 0,6 \cdot 0,05 = 0,03;$$

$$\Delta G'_{10,1} = \Delta g_{10,1} \cdot \Delta G'_{B10} = 0,4 \cdot 0,05 = 0,02,$$

$$\Delta G'_{10,2} = \Delta g_{10,2} \cdot \Delta G'_{B10} = 0,6 \cdot 0,05 = 0,03.$$

1.5. Распределение воздуха по i,j -м участкам жаровой трубы

Подсчитаем удельные величины расходов воздуха, которые в сумме будут получаться для каждого i,j -го участка жаровой трубы. Будем условно их называть как «суммарные расходы воздуха»:

$$G'_{B1,2}{}^{\Sigma} = \Delta G'_{B1} = 0,25;$$

$$G'_{B2,3}{}^{\Sigma} = G'_{B1,2}{}^{\Sigma} + \Delta G'_{3,1} + \Delta G'_{2,1} = 0,25 + 0,02692 + 0,02 = 0,29692;$$

$$G'_{B3,4}{}^{\Sigma} = G'_{B2,3}{}^{\Sigma} + \Delta G'_{3,2} + \Delta G'_{2,2} = 0,29692 + 0,02692 + 0,03 = 0,35384;$$

$$G'_{B4,5}{}^{\Sigma} = G'_{B3,4}{}^{\Sigma} + \Delta G'_{3,3} + \Delta G'_{4,1} = 0,35384 + 0,08076 + 0,02 = 0,4546;$$

$$G'_{B5,6}{}^{\Sigma} = G'_{B4,5}{}^{\Sigma} + \Delta G'_{5,1} + \Delta G'_{4,2} = 0,4546 + 0,05384 + 0,03 = 0,53844;$$

$$G'_{B6,7}{}^{\Sigma} = G'_{B5,6}{}^{\Sigma} + \Delta G'_{5,2} + \Delta G'_{6,1} = 0,53844 + 0,08076 + 0,02 = 0,6392;$$

$$G'_{B7,8}{}^{\Sigma} = G'_{B6,7}{}^{\Sigma} + \Delta G'_{7,1} + \Delta G'_{6,2} = 0,6392 + 0,05384 + 0,03 = 0,72304;$$

$$G'_{B8,9}{}^{\Sigma} = G'_{B7,8}{}^{\Sigma} + \Delta G'_{7,2} + \Delta G'_{8,1} = 0,72304 + 0,08076 + 0,02 = 0,8238;$$

$$G'_{B9,10}{}^{\Sigma} = G'_{B8,9}{}^{\Sigma} + \Delta G'_{9,1} + \Delta G'_{8,2} = 0,8238 + 0,03848 + 0,03 = 0,89228;$$

$$G'_{B10,11}{}^{\Sigma} = G'_{B9,10}{}^{\Sigma} + \Delta G'_{9,2} + \Delta G'_{10,1} = 0,89228 + 0,05772 + 0,02 = 0,97;$$

$$G'_{B11,12}{}^{\Sigma} = G'_{B10,11}{}^{\Sigma} + \Delta G'_{10,2} = 0,97 + 0,03 = 1,0.$$

1.6. Определение графика выгорания топлива

График выгорания топлива по длине жаровой трубы представляется в двух формах – в интегральной [7, 9] и в дифференциальной.

Интегральная форма – это изменение по длине жаровой трубы относительной величины текущего значения суммарной массы топлива, сгоревшего в сумме к концу рассматриваемого i, j -ого участка жаровой трубы:

$$G_T^{i, \text{гор}\Sigma}_{1-j} = G_T^{\text{гор}\Sigma}_{1-j} / G_T = f(L) \quad (\text{Рис. 1, б}).$$

Для более ясного понимания можно сказать так – для каждого i, j -ого участка это топливо складывается из двух частей – из топлива, которое в сумме сгорело на всех предыдущих участках, и топлива, которое сгорит на рассматриваемом i, j -ом участке. Значения

$$G_T^{i, \text{гор}\Sigma}_{1-j}$$

заносятся в сводную таблицу (см. п.п. 1.10). График $G_T^{i, \text{гор}\Sigma}_{1-j}(L)$ или, иначе, кривая выгорания топлива обычно имеет, как показывают экспериментальные исследования и детальные расчеты [7], S-образную форму. Это связано со следующим. На начальных участках сгорают первые порции топлива, которые к началу этих участков успевают испариться, перемешаться с воздухом и подготовиться к горению. Эти порции топлива дают самые мелкие капли, которые создаются форсункой при впрыске. На последних 1-2 участках зоны горения также выгорает малая масса топлива. Это последние порции выгорающего топлива. Их дают самые крупные капли, которые образуются при впрыске топлива в жаровую трубу. Основная масса топлива – это капли средних размеров – постепенно сгорает где-то на средних участках зоны горения, между участками начала и окончания горения. К подходу к зоне смешения горение должно завершиться полностью. Отсюда и получается, что интегральная кривая выгорания имеет примерно S-образную форму [7, 9, 17].

Для нашего примера имеем следующие значения относительной величины суммарной массы сгоревшего топлива:

$$\begin{aligned} G_T^{i, \text{гор}\Sigma}_{1-2} &= 0, & G_T^{i, \text{гор}\Sigma}_{1-3} &= 0,06, & G_T^{i, \text{гор}\Sigma}_{1-4} &= 0,24, & G_T^{i, \text{гор}\Sigma}_{1-5} &= 0,455, \\ G_T^{i, \text{гор}\Sigma}_{1-6} &= 0,7, & G_T^{i, \text{гор}\Sigma}_{1-7} &= 0,87, & G_T^{i, \text{гор}\Sigma}_{1-8} &= 0,975, & G_T^{i, \text{гор}\Sigma}_{1-9} &= 1,0, \\ G_T^{i, \text{гор}\Sigma}_{1-10} &= 1,0, & G_T^{i, \text{гор}\Sigma}_{1-11} &= 1,0, & G_T^{i, \text{гор}\Sigma}_{1-12} &= 1,0. \end{aligned}$$

К сечению 9 топливо сгорает полностью, поэтому, выйдя к этому сечению на уровень 1,0, кривая выгорания сохраняет далее этот уровень.

Используя данные по интегральной кривой выгорания (столбец 3 сводной таблицы 1) подсчитываются относительные массы топлива $\Delta G_T^{i, j}$, сгорающего на каждом в отдельности i, j -ом участке зоны горения:

$$\Delta G_T^{i, j} = 0 \text{ (горения на этом участке нет);}$$

$$\Delta G_T^{2,3} = G_T^{i, 2} - G_T^{i, 1} = 0,06 - 0 = 0,06;$$

$$\Delta G_T^{3,4} = G_T^{i, 3} - G_T^{i, 2} = 0,24 - 0,06 = 0,18;$$

$$\Delta G_T^{4,5} = G_T^{i, 4} - G_T^{i, 3} = 0,455 - 0,24 = 0,215;$$

$$\Delta G_T^{5,6} = G_T^{i, 5} - G_T^{i, 4} = 0,7 - 0,455 = 0,245;$$

$$\Delta G_T^{6,7} = G_T^{i, 6} - G_T^{i, 5} = 0,87 - 0,7 = 0,17;$$

$$\Delta G_T^{7,8} = G_T^{i, 7} - G_T^{i, 6} = 0,975 - 0,87 = 0,105;$$

$$\Delta G_T^{8,9} = G_T^{i, 8} - G_T^{i, 7} = 1,0 - 0,975 = 0,025;$$

$$\Delta G_T^{9,10} = G_T^{i, 9} - G_T^{i, 8} = 1,0 - 1,0 = 0.$$

Для общности также запишем

$$\Delta G_T^{10,11} = G_T^{i, 10} - G_T^{i, 9} = 1,0 - 1,0 = 0;$$

$$\Delta G_T^{11,12} = G_T^{i, 11} - G_T^{i, 10} = 1,0 - 1,0 = 0.$$

На участках (9,10), (10,11) и (11,12) горения нет.

По этим данным строится дифференциальная кривая выгорания топлива, она получается в виде гистограммы (Рис. 1, б). Значения $\Delta G_T^{i, j}$ заносятся в сводную таблицу данных (п. 1.10, столбец 4 таблицы 1). Как видно из рис. 1, б, гистограмма имеет характерную выпуклую форму, похожую на кривую логарифмически-нормального закона распределения.

1.7. Определение удельных расходов воздуха, участвующего в горении

Удельные массовые расходы воздуха, который участвует в горении на каждом i, j -ом участке зоны горения, определяются из преобразованной формулы для местного коэффициента избытка воздуха

$$\alpha_{i,j}^{zop} = \frac{\Delta G_B^{zop}{}_{i,j}}{\Delta G_T^{zop}{}_{i,j} \cdot L_0} = \frac{\Delta G_B^{zop}{}_{i,j} \cdot G_{Bк}}{\Delta G_T^{zop}{}_{i,j} \cdot G_T \cdot L_0} = \frac{\Delta G_B^{zop}{}_{i,j}}{\Delta G_T^{zop}{}_{i,j}} \cdot \alpha_K \quad (1)$$

Так как по условиям горения для модельной схемы «чистых продуктов сгорания», т.е. горения на стехиометрических площадках, местные коэффициенты избытка воздуха $\alpha_{i,j}^{zop} = 1$ по определению, то из (1) получаем следующую формулу для подсчета количества сгорающего воздуха

$$\Delta G_B^{zop}{}_{i,j} = \frac{\Delta G_T^{zop}{}_{i,j}}{\alpha_K} \quad (2)$$

Соответственно, суммарное количество воздуха, которое примет участие в горении

$$G_B^{zop\Sigma} = \frac{G_T^{zop}}{\alpha_K} = \frac{1}{2,6} = 0,38462.$$

Таким образом, для нашего примера будем иметь:

$$\Delta G_B^{zop}{}_{1,2} = 0 \text{ (горения на этом участке нет);}$$

$$\Delta G_B^{zop}{}_{2,3} = \frac{\Delta G_T^{zop}{}_{2,3}}{\alpha_K} = \frac{0,06}{2,6} = 0,02308;$$

$$\Delta G_B^{zop}{}_{3,4} = \frac{\Delta G_T^{zop}{}_{3,4}}{\alpha_K} = \frac{0,18}{2,6} = 0,06923;$$

$$\Delta G_B^{zop}{}_{4,5} = \frac{\Delta G_T^{zop}{}_{4,5}}{\alpha_K} = \frac{0,215}{2,6} = 0,08269;$$

$$\Delta G_B^{zop}{}_{5,6} = \frac{\Delta G_T^{zop}{}_{5,6}}{\alpha_K} = \frac{0,245}{2,6} = 0,09423;$$

$$\Delta G_B^{zop}{}_{6,7} = \frac{\Delta G_T^{zop}{}_{6,7}}{\alpha_K} = \frac{0,17}{2,6} = 0,065385;$$

$$\Delta G_B^{zop}{}_{7,8} = \frac{\Delta G_T^{zop}{}_{7,8}}{\alpha_K} = \frac{0,105}{2,6} = 0,0404;$$

$$\Delta G_B^{zop}{}_{8,9} = \frac{\Delta G_T^{zop}{}_{8,9}}{\alpha_K} = \frac{0,025}{2,6} = 0,009615;$$

$$\Delta G_B^{1zop}{}_{9,10} = \frac{\Delta G_T^{1zop}{}_{9,10}}{\alpha_K} = \frac{0,0}{2,6} = 0.$$

Наконец, $\Delta G_B^{1zop}{}_{10,11} = \Delta G_B^{1zop}{}_{11,12} = 0$, так как горения на этих участках нет.

Проверкой отсутствия ошибок в вычисленных значениях $\Delta G_B^{1zop}{}_{i,j}$ является подсчет суммы всех этих количеств воздуха, участвующего в горении, которая в нашем примере равна $\sum_{k=1}^{11} \Delta G_B^{1zop}{}_{k-(k+1)} = 0 + 0,02308 + 0,06923 + 0,08269 + 0,09423 + 0,065385 + 0,0404 + 0,009615 + 0 + 0 + 0 = 0,38463$. Здесь k – номер участка.

Значения $\Delta G_B^{1zop}{}_{i,j}$ заносим в столбец 5 сводной таблицы 1 (см. 1.10). Далее подсчитываем с нарастанием суммарную массу воздуха, участвующего в горении, включая его количество на всех предыдущих участках и на рассматриваемом i,j -ом участке жаровой трубы. Эти значения заносим в столбец 6 сводной таблицы 1. Для нашего примера будем иметь:

$$G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-2} = 0;$$

$$G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-3} = G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-2} + \Delta G_B^{1zop}{}_{2,3} = 0 + 0,02308;$$

$$G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-4} = G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-3} + \Delta G_B^{1zop}{}_{3,4} = 0,02308 + 0,06923 = 0,0923;$$

$$G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-5} = G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-4} + \Delta G_B^{1zop}{}_{4,5} = 0,09231 + 0,08269 = 0,175;$$

$$G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-6} = G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-5} + \Delta G_B^{1zop}{}_{5,6} = 0,175 + 0,09423 = 0,26923;$$

$$G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-7} = G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-6} + \Delta G_B^{1zop}{}_{6,7} = 0,26923 + 0,065385 = 0,334615;$$

$$G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-8} = G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-7} + \Delta G_B^{1zop}{}_{7,8} = 0,334615 + 0,0404 = 0,375015;$$

$$G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-9} = G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-8} + \Delta G_B^{1zop}{}_{8,9} = 0,375015 + 0,009615 = 0,38463;$$

$$G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-10} = G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-9} + \Delta G_B^{1zop}{}_{9,10} = 0,38463 + 0,0 = 0,38463;$$

$$G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-11} = G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-10} + \Delta G_B^{1zop}{}_{10,11} = 0,38463 + 0,0 = 0,38463;$$

$$G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-12} = G_B^{1zop\Sigma}{}_{1-11} + \Delta G_B^{1zop}{}_{11,12} = 0,38463 + 0,0 = 0,38463.$$

1.8. Определение удельных расходов балластного воздуха

Принимается следующая схема участия балластного воздуха в тепло-массообменных процессах. Непосредственного участия в горении данный воздух не принимает, а лишь присутствует при протекании горения поблизости на соседних участках. После завершения горения балластный воздух, имеющий температуру T_K^* , перемешивается полностью с образовавшимися «чистыми продуктами сгорания», имеющими некоторую температуру $T_{ПС}^*$, близкую к адиабатической температуре пламени. При этом выделившееся при горении тепло равномерно и полностью распределяется по общей - суммарной массе балластного воздуха и продуктов сгорания до установления полного теплового равновесия между ними и общей температуры смеси на данном i,j -ом участке жаровой трубы $T_{Жi,j}^*$ (см. [9]).

Общая масса балластного воздуха на i,j -ом участке $G_B^{i\delta a \Sigma}_{i,j}$ подсчитывается путем вычитания из общей массы воздуха $G_{Bi,j}^{i\Sigma}$, имеющейся на этом участке, суммарной массы воздуха, который уже участвовал в горении на предыдущих участках и будет участвовать в горении на рассматриваемом участке:

$$G_B^{i\delta a \Sigma}_{i,j} = G_{Bi,j}^{i\Sigma} - G_B^{i\text{гор}\Sigma}_{1-j}. \quad (3)$$

Таким образом, для нашего примера получим:

$$G_B^{i\delta a \Sigma}_{1,2} = G_{B,1,2}^{i\Sigma} - G_B^{i\text{гор}\Sigma}_{1-2} = 0,025 - 0,0 = 0,025;$$

$$G_B^{i\delta a \Sigma}_{2,3} = G_{B,2,3}^{i\Sigma} - G_B^{i\text{гор}\Sigma}_{1-3} = 0,29692 - 0,02308 = 0,27384;$$

$$G_B^{i\delta a \Sigma}_{3,4} = G_{B,3,4}^{i\Sigma} - G_B^{i\text{гор}\Sigma}_{1-4} = 0,35384 - 0,09231 = 0,26153;$$

$$G_B^{i\delta a \Sigma}_{4,5} = G_{B,4,5}^{i\Sigma} - G_B^{i\text{гор}\Sigma}_{1-5} = 0,4546 - 0,175 = 0,2796;$$

$$G_B^{i\delta a \Sigma}_{5,6} = G_{B,5,6}^{i\Sigma} - G_B^{i\text{гор}\Sigma}_{1-6} = 0,53844 - 0,26923 = 0,26921;$$

$$G_B^{i\delta a \Sigma}_{6,7} = G_{B,6,7}^{i\Sigma} - G_B^{i\text{гор}\Sigma}_{1-7} = 0,6392 - 0,334615 = 0,304585;$$

$$G_B^{i\delta a \Sigma}_{7,8} = G_{B,7,8}^{i\Sigma} - G_B^{i\text{гор}\Sigma}_{1-8} = 0,72304 - 0,375015 = 0,348025;$$

$$G_B^{i\delta a \Sigma}_{8,9} = G_{B,8,9}^{i\Sigma} - G_B^{i\text{гор}\Sigma}_{1-9} = 0,8238 - 0,38463 = 0,43917;$$

$$G_B^{\prime\text{баз}\Sigma}_{9,10} = G_B^{\prime\Sigma}_{9,10} - G_B^{\prime\text{зоп}\Sigma}_{1-10} = 0,89228 - 0,38463 = 0,50765;$$

$$G_B^{\prime\text{баз}\Sigma}_{10,11} = G_B^{\prime\Sigma}_{10,11} - G_B^{\prime\text{зоп}\Sigma}_{1-11} = 0,97 - 0,38463 = 0,58537;$$

$$G_B^{\prime\text{баз}\Sigma}_{11,12} = G_B^{\prime\Sigma}_{11,12} - G_B^{\prime\text{зоп}\Sigma}_{1-12} = 1,0 - 0,38463 = 0,61537.$$

1.9. Определение значений средних коэффициентов избытка воздуха по участкам жаровой трубы

Значения средних коэффициентов избытка воздуха $\alpha_{i,j}$ на участках жаровой трубы подсчитываются по величинам общих массовых расходов воздуха $G_{B_{i,j}}$ и топлива $G_{T_{i,j}}$, которые имеются на рассматриваемом i,j -ом участке.

По мере продвижения воздуха по жаровой трубе массовый его расход от участка к участку непрерывно изменяется (увеличивается) из-за втекания свежих его порций через отверстия в стенках жаровой трубы, а массовый расход топлива остается неизменным. Таким образом

$$\alpha_{i,j} = \frac{G_{B_{i,j}}^{\Sigma}}{G_{T_{i,j}} \cdot L_0} = \frac{G_{B_{i,j}}^{\prime\Sigma} \cdot G_{BK}}{G_T \cdot L_0} = \alpha_K \cdot G_{B_{i,j}}^{\prime\Sigma}. \quad (4)$$

Для нашего примера будем иметь следующие значения $\alpha_{i,j}$:

$$\alpha_{1,2} = \alpha_K \cdot G_{B_{1,2}}^{\prime\Sigma} = 2,6 \cdot 0,25 = 0,65;$$

$$\alpha_{2,3} = \alpha_K \cdot G_{B_{2,3}}^{\prime\Sigma} = 2,6 \cdot 0,29692 = 0,772;$$

$$\alpha_{3,4} = \alpha_K \cdot G_{B_{3,4}}^{\prime\Sigma} = 2,6 \cdot 0,0,35384 = 0,92;$$

$$\alpha_{4,5} = \alpha_K \cdot G_{B_{4,5}}^{\prime\Sigma} = 2,6 \cdot 0,4546 = 1,182;$$

$$\alpha_{5,6} = \alpha_K \cdot G_{B_{5,6}}^{\prime\Sigma} = 2,6 \cdot 0,53844 = 1,4;$$

$$\alpha_{6,7} = \alpha_K \cdot G_{B_{6,7}}^{\prime\Sigma} = 2,6 \cdot 0,6392 = 1,662;$$

$$\alpha_{7,8} = \alpha_K \cdot G_{B_{7,8}}^{\prime\Sigma} = 2,6 \cdot 0,72304 = 1,88;$$

$$\alpha_{8,9} = \alpha_K \cdot G_{B_{8,9}}^{\prime\Sigma} = 2,6 \cdot 0,8238 = 2,1419;$$

$$\alpha_{9,10} = \alpha_K \cdot G_{B_{9,10}}^{\prime\Sigma} = 2,6 \cdot 0,89228 = 2,32;$$

$$\alpha_{10,11} = \alpha_K \cdot G_{B_{10,11}}^{\prime\Sigma} = 2,6 \cdot 0,97 = 2,522;$$

$$\alpha_{11,12} = \alpha_K \cdot G'_{B11,12} = 2,6 \cdot 1,0 = 2,6.$$

Необходимо отметить, что на последнем участке перед выходом из первичной зоны горения будем иметь среднее значение коэффициента избытка воздуха $\alpha_{6,7} \approx 1,66$. Это значение $\alpha_{i,j}$, как и все другие, приведенные выше, подсчитаны в предположении полного испарения назначенного количества топлива и его перемешивания с окружающим воздухом, то есть соответствуют гомогенной однородной горючей смеси [9, 17]. Причем значение $\alpha_{6,7} \approx 1,66$ близко к бедной границе распространения пламени в такой смеси, но вполне является допустимым при сжигании двухфазной топливно-воздушной смеси [9, 10, 17].

На выходном участке из вторичной зоны горения $\alpha_{8,9} \approx 2,14$. Это значение близко к бедному пределу устойчивого горения двухфазной ТВС, но находится ещё внутри диапазона устойчивого горения. В соответствии с принятым законом выгорания топлива во вторичной зоне горения будут сжигаться последние 13 % топлива, причем возможно, что значительная его часть будет присутствовать в форме самых крупных капель, многие из которых будут догорать в форме гетерогенного горения. Поэтому значение $\alpha_{8,9} \approx 2,14$ будем рассматривать как вполне приемлемое. Для повышения уверенности в полном выгорании остатков топлива во вторичной зоне, проектировщик может перераспределить массы воздуха и топлива таким образом, чтобы уменьшить последние две порции топлива до уровня 6...8 % с сохранением $\alpha_{8,9}$ на уровне 2,2...2,3.

1.10. Составление сводной таблицы распределения топлива и воздуха

В сводную таблицу 1 сведены все рассчитанные значения массовых расходов топлива и воздуха. В последней строке таблицы указаны номера разделов данного учебно-методического пособия, в которых приведенные величины расходов рассчитывались.

Предпоследний столбец содержит значения относительной величины суммарного расхода балластного топлива. Для каждого участка жаровой трубы это такое топливо, которое пока ещё не вступило в горение, но присутст-

вует на рассматриваемом участке. Значения удельных массовых расходов балластного топлива подсчитывались по формуле

$$G_T^{'бав\Sigma}_{K,K+1} = G_T' - G_T^{'зоп\Sigma}_{1-(K+1)}, \quad (5)$$

где K - номер участка (номер левого сечения для участка).

Для нашего примера имеем (столбец 9 таблицы 1):

$$\begin{aligned} G_T^{'бав\Sigma}_{1,2} &= G_T' - G_T^{'зоп\Sigma}_{1-2} = 1,0 - 0 = 1,0; \\ G_T^{'бав\Sigma}_{2,3} &= G_T' - G_T^{'зоп\Sigma}_{1-3} = 1,0 - 0,06 = 0,94; \\ G_T^{'бав\Sigma}_{3,4} &= G_T' - G_T^{'зоп\Sigma}_{1-4} = 1,0 - 0,24 = 0,76; \\ G_T^{'бав\Sigma}_{4,5} &= G_T' - G_T^{'зоп\Sigma}_{1-5} = 1,0 - 0,455 = 0,545; \\ G_T^{'бав\Sigma}_{5,6} &= G_T' - G_T^{'зоп\Sigma}_{1-6} = 1,0 - 0,7 = 0,3; \\ G_T^{'бав\Sigma}_{6,7} &= G_T' - G_T^{'зоп\Sigma}_{1-7} = 1,0 - 0,87 = 0,13; \\ G_T^{'бав\Sigma}_{7,8} &= G_T' - G_T^{'зоп\Sigma}_{1-8} = 1,0 - 0,975 = 0,025; \\ G_T^{'бав\Sigma}_{8,9} &= G_T' - G_T^{'зоп\Sigma}_{1-9} = 1,0 - 1,00 = 0,0; \\ G_T^{'бав\Sigma}_{9,10} &= G_T^{'бав\Sigma}_{10,11} = G_T^{'бав\Sigma}_{11,12} = 0,0. \end{aligned}$$

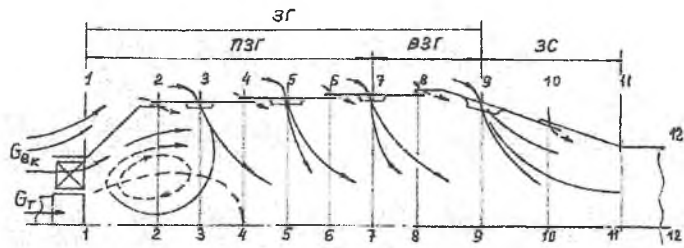
На последнем участке (11-12) жаровой трубы (строка 22 таблицы 1) значение удельного расхода суммарного количества воздуха, который принимал участие в горении, $G_B^{'зоп\Sigma}_{1-12} = 0,38463$, а значение суммарного количества балластного воздуха $G_B^{'бав\Sigma}_{11,12} = 0,61537$. Их сумма – это величина общего количества воздуха и она равна, естественно, единице: $G_B^{'зоп\Sigma}_{1-12} + G_B^{'бав\Sigma}_{11,12} = 0,38463 + 0,61537 = 1$.

Так как в основу расчетов положены соотношения для глобальной кинетической схемы «чистые продукты сгорания – горение при местных $\alpha = 1$ » [9, 13], то удельные количества выше названных расходов воздуха проконтролировать легко по значению суммарного для камеры сгорания коэффициента избытка воздуха α_K . Так как горение протекает при местных $\alpha_{i,j} = 1$, то

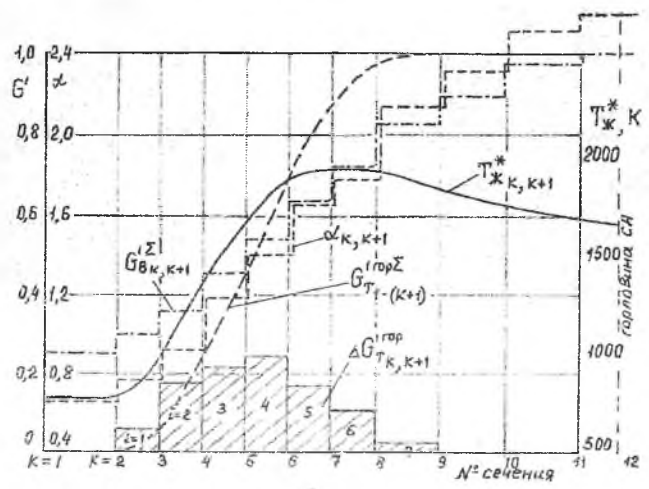
$$G_B^{'зоп\Sigma}_{1-12} = 1/2,6 = 0,38462, \quad G_B^{'бав\Sigma}_{11,12} = (\alpha_K - 1)/\alpha_K = 0,61538. \quad (6)$$

Таблица 1. Распределение воздуха и топлива по длине жаровой трубы

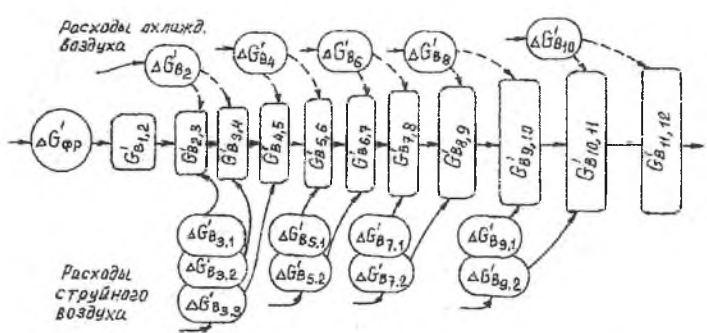
№ п/п	№ Сеч.	№ уч-ка	$G_{T-1(K+1)}^{Tопл}$	$\Delta G_{T-1(K+1)}^{Tопл}$	$\Delta G_{T-1(K+1)}^{Tопл}$	$\Delta G_{T-1(K+1)}^{Tопл}$	$G_{8 K, K+1}^{Tопл}$	$G_{T-1(K+1)}^{Tопл}$	$G_{T-1(K+1)}^{Tопл}$	$G_{T-1(K+1)}^{Tопл}$	$G_{T-1(K+1)}^{Tопл}$	$T_{ж.г.}^*$ К	№ уч-ка
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
1	1		0										
2	2	(1-2)	0	0	0	0,25	0	0,25	1,0	793,15	(1-2)		
3	3		0										
4	4	(2-3)	0,06	0,06	0,02308	0,29692	0,02308	0,27384	0,94	973,0	(2-3)		
5	5		0,06										
6	6	(3-4)	0,24	0,18	0,06923	0,35384	0,09231	0,26153	0,76	1373,01	(3-4)		
7	7												
8	8	(4-5)	0,455	0,215	0,08269	0,4546	0,175	0,2796	0,545	1649,5	(4-5)		
9	9												
10	10	(5-6)	0,7	0,245	0,09423	0,53814	0,26923	0,26921	0,3	1884,59	(5-6)		
11	11												
12	12	(6-7)	0,87	0,17	0,065385	0,6392	0,334615	0,304585	0,13	1933,06	(6-7)		
13	13												
14	14	(7-8)	0,975	0,105	0,0404	0,72304	0,375015	0,348025	0,025	1924,5	(7-8)		
15	15												
16	16	(8-9)	1,0	0,025	0,009615	0,8238	0,38463	0,43917	0	1821,8	(8-9)		
17	17												
18	18	(9-10)	1,0	0	0	0,89228	0,38463	0,51765	0	1749,12	(9-10)		
19	19												
20	20	(10-11)	1,0	0	0	0,97	0,38463	0,58537	0	1677,93	(10-11)		
21	21												
22	22	(11-12)	1,0	0	0	1,0	0,38463	0,61537	0	1633,17	(11-12)		
23	23												
24	24	Раздел РТЗ	4,16	4,16	4,17	4,15	4,17	4,18	4,110	4,2-3			



а)



б)



в)

Рис. 1. Распределение воздуха и топлива по длине жаровой трубы

а) схема подводов воздуха и топлива, расположение поперечных сечений и характерных зон в жаровой трубе; б) графики изменения характеристик по длине жаровой трубы; в) схема распределения воздуха системы охлаждения жаровой трубы и втекающего через крупные отверстия.

Замечание. Представленный расчет распределения воздуха и топлива по длине жаровой трубы, основанный на допущении, что горение на каждом локальном участке, а, следовательно, и во всей зоне горения, протекает при местных $\alpha_{i,j} = 1$ может быть модернизирован на случай горения при фактических величинах местных $\alpha_{i,j}$. Это потребует введения некоторой функции распределения $g_T(\alpha_{i,j})$ для локальных зон горения, которая будет показывать, какое относительное количество топлива на данном участке жаровой трубы сгорает при том или ином местном $\alpha_{i,j}$. Вполне очевидно, что в результате объем и трудоемкость расчетов сильно увеличатся, однако появится возможность учесть неравномерность распределения топлива по зоне горения и на каждом её участке в отдельности, а также учесть динамику изменения этой неравномерности под действием массообменных процессов струйного и турбулентного перемешивания. Впоследствии можно будет рассмотреть влияние неравномерности топливно-воздушной смеси по составу на уровень образования вредных компонентов при горении, например окислов азота (при дипломном проектировании) и другие задачи.

В предпоследнем столбце 10 таблицы 1 помещены значения среднемассовой температуры газа $T_{ж,i,j}^*$, которая рассчитывается из уравнения теплового баланса (см. следующий раздел 2.)

2. Расчет среднемассовой температуры газа по длине жаровой трубы

2.1. Определение исходных теплофизических данных

1) Расчет величины теплового эффекта горения $Hu(T_K^*)$ и коэффициента полноты тепловыделения

$Hu(T_K^*)$ - это такой тепловой эффект, когда исходные компоненты горючей смеси – топливо и воздух – находятся при начальной температуре T_K^* и получающиеся продукты сгорания приводятся («охлаждаются») к этой же температуре T_K^* [13]. Для нашего примера заданы:

$T_K^* = 793,15$ К – температура воздуха на входе в камеру сгорания;

$T_T^* = 1653,15$ К – среднemasсовая температура газа на выходе из камеры сгорания;

$Hu_{293} = 10250$ ккал/кг-топл. – удельная массовая низшая теплота сгорания топлива.

Значение $Hu(T_K^*)$ будем определять по формуле ((19) из [11])

$$Hu(T_K^*) = Hu_{293} - (1 + L_0) \cdot \Delta i_{п.с}^* \Big|_{293}^{T_K^*} + L_0 \cdot \Delta i_B^* \Big|_{293}^{T_K^*} + \Delta i_T^* \Big|_{293}^{T_T^*}, \quad (7)$$

где последнее слагаемое в правой части (7) допускается принимать по величине 15...20 ккал/кг. По рис.9 из [13] при $T_K^* = 793$ К и без учета Δi_T^* получается значение $Hu(T_K^*) \approx 9958$ ккал/кг. По таблицам 12.3 и 12.5 из [13] определяем:

- для продуктов сгорания при $\alpha = 1$

$$i_{Г(К)}^* = i_{п.с}^*(T_K^*) = 207,259 \text{ ккал/кг},$$

$$i_{Г(0)}^* = i_{п.с}^*(293,15) = 72,35 \text{ ккал/кг},$$

тогда $\Delta i_{п.с}^* \Big|_{293}^{T_K^*} = i_{п.с}^*(T_K^*) - i_{п.с}^*(293,15) = 207,259 - 72,35 = 134,909$ ккал/кг.

- аналогично для воздуха

$$i_{B(К)}^* = i_B^*(T_K^*) = 194,5 \text{ ккал/кг},$$

$$i_{B(0)}^* = i_B^*(293,15) = 70,055 \text{ ккал/кг},$$

тогда $\Delta i_B^* \Big|_{293}^{T_K^*} = i_B^*(T_K^*) - i_B^*(293,15) = 194,5 - 70,055 = 124,445$ ккал/кг.

Подсчитаем по (7) величину теплового эффекта горения $Hu(T_K^*)$:

$$Hu(T_K^*) = 10250 - 15,78 \cdot 134,909 + 14,78 \cdot 124,445 + 20 = 9980,443 \text{ ккал/кг-топл.}$$

Это значение $Hu(T_K^*)$, вычисленное без учета $\Delta i_T^* = 20$ ккал/кг, очень хорошо совпадает с вышеприведенным значением, полученном по графику из [13].

Теперь можно подсчитать коэффициент полноты тепловыделения $\eta_{Гср,z}$, который учитывает влияние изменения концентраций основных компонентов продуктов сгорания стандартного их состава (CO_2 , H_2O , O_2 , N_2 , Ar) по

сравнению с их концентрациями в воздухе, а также различие в теплоемкостях продуктов сгорания и горючей смеси:

$$\eta_{ГCp,z} = \frac{Nu(T_K^*)}{Nu_{293}} = \frac{9980,433}{10250} = 0,9737. \quad (8)$$

Принятый в термогазодинамическом расчете коэффициент полноты сгорания топлива $\eta_G = 0,995$ учитывает влияние несовершенства физико-химических процессов, в том числе отличие фактического состава продуктов сгорания от стандартного набора компонентов. Таким образом, суммарная - фактическая величина коэффициента полноты тепловыделения $\eta_{Г\Sigma}$ для нашего примера может составить

$$\eta_{Г\Sigma} = \eta_{ГCp,z} \cdot \eta_G = 0,9737 \cdot 0,995 \approx 0,969. \quad (9)$$

2) Определение средних величин теплоемкостей воздуха и продуктов сгорания

В расчетах $T_{ж,i,j}^*$ используются средние значения теплоемкостей для характерного в примере диапазона температур.

Определим теплоемкость воздуха \bar{C}_{PB} для заданного выше диапазона температур ($T_G^* - T_K^*$):

$$\begin{aligned} \bar{C}_{PB} \Big|_{T_K^*}^{T_G^*} &= \frac{\Delta i_B \Big|_{T_K^*}^{T_G^*}}{T_G^* - T_K^*} = \frac{(435,24 - 194,5) \cdot 10^3}{1653,15 - 793,15} = 0,27993 \text{ ккал}/(\text{кг}\cdot\text{К}) = \\ &= 1172,07 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}). \end{aligned} \quad (10)$$

Оценим значение теплоемкости продуктов сгорания \bar{C}_{PG} . Примем, что

$$\bar{C}_{PG} \Big|_{293}^{T_{G,\max}^*} \approx \bar{C}_{PG} \Big|_{T_K^*}^{T_G^*}, \quad (11)$$

где $T_{G,\max}^*$ - адиабатическая температура пламени при $\alpha = 1$. Из уравнения теплового баланса для последнего участка (11-12) можно получить следующее выражение для коэффициента избытка воздуха:

$$\alpha_K = 1 + \frac{1 + L_0}{L_0} \cdot \frac{\Delta i_{п.с}^* \Big|_{T_{ж1,2}^*}^{T_{г.макс}^*}}{\Delta i_B^* \Big|_{T_K^*}^{T_{ж1,2}^*}} = 1 + \frac{1 + L_0}{L_0} \cdot \frac{Hu(T_K^*) \cdot \eta_{г.} - \Delta i_{п.с}^* \Big|_{T_K^*}^{T_{ж1,2}^*}}{\Delta i_B^* \Big|_{T_K^*}^{T_{ж1,2}^*}}, \quad (12)$$

где $T_{ж1,2}^* = T_g^*$ - среднemasсовой температуре газа на выходе из камеры сгорания, которая задана по условию проектирования. Представляя в (12) изменения энтальпии продуктов сгорания и воздуха через произведение их средних теплоемкостей и соответствующие диапазоны температур, получим

$$\begin{aligned} \bar{C}_{пг} \Big|_{T_K^*}^{T_{ж1,2}^*} &= \frac{(\alpha_K - 1) \cdot L_0}{1 + L_0} \cdot \left[\frac{Hu(T_K^*) \cdot \eta_{г.}}{(\alpha_K - 1) \cdot L_0 \cdot (T_g^* - T_K^*)} - \bar{C}_{пв} \right] = \frac{(2,6 - 1) \cdot 14,78}{15,78} \times \\ &\times \left[\frac{9980,433 \cdot 0,995}{1,6 \cdot 14,78 \cdot (1653,15 - 793,15)} - 1172,07 \right] = 0,31225 \text{ ккал/кг} \cdot \text{К} = \\ &= 1307,4 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}. \end{aligned}$$

Примечания:

а) Такой прием определения теплоемкости $\bar{C}_{пг}$ принят по следующим соображениям. При известном составе продуктов сгорания теплоемкость зависит в основном от температуры. Температура же продуктов сгорания на каждом из участков жаровой трубы с горением изменяется в широком диапазоне – от T_K^* до $T_{г.макс}^*$. Поэтому для проектировочных расчетов целесообразно принять какое-то среднее значение теплоемкости. Чтобы рассчитанная для выходного сечения жаровой трубы температура $T_{ж1,2}^*$ хорошо совпадала с назначенной по условиям T_g^* , значение $\bar{C}_{пг}$ определяется из уравнения теплового баланса для последнего перед выходным сечением участка (11-12). При этом, конечно, будут дополнительные погрешности в значениях температур на других участках $T_{жi,j}^*$, но с этим можно будет согласиться.

б) В правой части выражения (12) имеется дробь, в числителе которой стоит изменение энтальпии «чистых продуктов сгорания» $\Delta i_{п.с}^* \Big|_{T_{ж1,2}^*}^{T_{г.макс}^*}$, для подсчета которого требуется знать либо $T_{г.макс}^*$ и $\bar{C}_{пг}(T_{г.макс}^*)$, либо найти по таблицам сразу значение энтальпии $i_{п.с}^*(T_{г.макс}^*)$. В любом случае требуется

заранее знать адиабатическую температуру пламени. Если её определение не входит в задание на курсовое проектирование, то удобно определять $\Delta i_{П.С}^* \Big|_{T_{ж1,2}^*}^{T_{Г.МАХ}^*}$ из уравнения теплового баланса для зоны химического реагирования при местном $\alpha = 1$ и образованием «чистых продуктов сгорания», что и сделано в окончательном варианте выражения (12). Необходимость использования для этого $Hu(T_K^*)$ не вносит затруднений и является корректным, так как с этой величиной теплового эффекта используется в качестве КПД коэффициент полноты сгорания η_r , равный, в частности, для нашего примера 0,995.

3.2.2. Составление уравнения теплового баланса

для определения $T_{жi,j}^*$

Последовательно рассмотрим каждый из участков и получим общую формулу для произвольного случая.

1) Участок (1-2), $\kappa = 1$. Горения на этом участке нет, $T_{ж1,2}^* = T_K^* = 793,15\text{K}$.

2) Участок (2-3), $\kappa = 2$. Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$\Delta G_{B\ 2,3}^{г\text{оп}} \cdot G_{BK} \cdot \Delta i_B^* \Big|_{293}^{T_K^*} + \Delta G_{T\ 2,3}^{г\text{оп}} \cdot G_T \cdot \Delta i_T^* \Big|_{293}^{T_7^*} + \Delta G_{T\ 2,3}^{г\text{оп}} \cdot G_T \cdot Hu_{293} \cdot \eta_r +$$

(1)
(2)
(3)

$$+ G_B^{г\text{ан}\Sigma\ 2,3} \cdot G_{BK} \cdot \Delta i_B^* \Big|_{293}^{T_K^*} + G_T^{г\text{ан}\Sigma\ 2,3} \cdot G_T \cdot \Delta i_T^* \Big|_{293}^{T_7^*} =$$

(4)
(5)
(13, а)

$$(\Delta G_{B\ 2,3}^{г\text{оп}} \cdot G_{BK} + \Delta G_{T\ 2,3}^{г\text{оп}} \cdot G_T) \cdot \Delta i_{П.С}^* \Big|_{293}^{T_{Г.МАХ}^*} + G_B^{г\text{ан}\Sigma\ 2,3} \cdot G_{BK} \cdot \Delta i_B^* \Big|_{293}^{T_K^*} +$$

(6)
(7)

$$+ G_T^{г\text{ан}\Sigma\ 2,3} \cdot G_T \cdot \Delta i_T^* \Big|_{293}^{T_7^*} =$$

(8)
(13, б)

$$= (\Delta G_{B\ 2,3}^{г\text{оп}} \cdot G_{BK} + \Delta G_{T\ 2,3}^{г\text{оп}} \cdot G_T) \cdot \Delta i_{П.С}^* \Big|_{293}^{T_{ж2,3}^*} + G_B^{г\text{ан}\Sigma\ 2,3} \cdot G_{BK} \cdot \Delta i_B^* \Big|_{293}^{T_{ж2,3}^*} +$$

(9)
(10)

$$+ G_T^{ball\Sigma} \cdot G_T \cdot \Delta i_T^* |_{293}^{T^*} \cdot \quad (13, в)$$

(11)

Для удобства рассмотрения все слагаемые в (13, а) – (13, в) помечены номерами снизу. Поясним их смысл здесь подробнее, так как подобные слагаемые будут встречаться на последующих участках. Итак, в левой части уравнения (13, а) имеются:

(1) – термодинамическая часть полного теплосодержания воздуха, который участвует в горении и которое вносится этим воздухом на участок (2-3);

(2) - термодинамическая часть полного теплосодержания той части топлива, которая участвует в горении и которое вносится этим количеством топлива на участок (2-3);

(3) – теплота, которая выделяется на участке (2-3) при сгорании $\Delta G_T^{гор} \cdot G_T$ количества топлива. Выделяющаяся теплота складывается из суммы химических частей полного теплосодержания воздуха и топлива за вычетом химической части полного теплосодержания образующихся продуктов сгорания. Из этой суммы вычитаются затраты теплоты на скрытые фазовые переходы; вода как продукт реакции находится в парообразном состоянии, поэтому удельная теплота сгорания представлена величиной Hu_{293} - нижней теплоты сгорания, а не высшей Hh_{293} . Из этой суммы также вычитаются потери теплоты из-за несовершенства и незавершенности физико-химических процессов, поэтому в (13, а) в слагаемом (3) есть умножение на коэффициент полноты сгорания η_T .

(4) - термодинамическая часть полного теплосодержания балластного воздуха, который не участвует в горении, но которое этим воздухом также вносится на участок (2-3);

(5) - термодинамическая часть полного теплосодержания балластного топлива, которое не участвует в горении, но которое этим топливом также вносится на участок (2-3).

На момент только что произошедшего сгорания на участке (2-3) $\Delta G_T^{гор} \cdot G_T$ количества топлива сумма теплосодержаний (1)...(5) превращается (13, б) в суммарное теплосодержание продуктов сгорания, балластного воздуха и балластного топлива. [Химическая часть полного теплосодержания,

которая остается у балластного топлива и поэтому не выделяется при горении на участке (2-3), в левой части (13, а) и правой части (13, б) опущена] На момент только что произошедшего сгорания каждый из перечисленных слагаемых правой части «находится некоторое короткое время» каждый при своей температуре: продукты сгорания (6) – при некоторой температуре пламени $T_{г.макс}^*$; неореагировавший балластный воздух (7) – при температуре T_K^* ; неореагировавшее балластное топливо (8) – при температуре T_T^* . Таким образом:

(6) – термодинамическая часть полного теплосодержания горячих «чистых продуктов сгорания», которые только что образовались и кратковременно находятся при высокой температуре пламени $T_{г.макс}^*$;

(7) – термодинамическая часть полного теплосодержания балластного воздуха, который не участвует в горении, но находится рядом с образовавшимися «чистыми продуктами сгорания» и кратковременно имеет пока температуру T_K^* . Слагаемое (7) абсолютно тождественно (4);

(8) – термодинамическая часть полного теплосодержания балластного топлива, которое не участвует в горении, но также находится рядом с образовавшимися «чистыми продуктами сгорания» и кратковременно имеет пока температуру T_T^* . Слагаемое (8) абсолютно тождественно (5).

Последняя часть (13, в) уравнения теплового баланса соответствует моменту завершения полного теплообмена между всеми составляющими (6), (7) и (8). В результате температура «чистых продуктов сгорания» равномерно понижается до среднemasсовой температуры $T_{ж2,3}^*$, а температура балластного воздуха, наоборот, равномерно повышается с уровня T_K^* также до уровня общей температуры $T_{ж2,3}^*$. В результате получаются слагаемые (9), (10) и (11). При этом принимаем упрощающее условие, что балластное топливо в этом теплообмене не участвует, поэтому слагаемые (5) и (7) и, соответственно (11), могут быть взаимно сокращены. В методическом отношении такое условие не вносит дополнительной ошибки, так как затраты теплоты на нагрев топлива до температуры кипения, на его испарение и на нагрев до температуры самовоспламенения уже учтены в величине Hu_{293} .

Сократим левую – (13, а) и правую – (13, в) части уравнения теплового баланса на G_T и учтем, что $G_{BK}/G_T = \alpha_K \cdot L_0$. Выразим также все изменения энтальпии через теплоемкости \bar{C}_{PI} и \bar{C}_{PB} и соответствующие разницы температур, примем равным $\Delta i_T^* \Big|_{293}^{T_T^*} \approx 20$ ккал/кг. Тогда получим.

Будем подсчитывать отдельно левые и правые части уравнения (13). Представим их в следующем виде и вычислим. Левая часть – (13, а):

$$\begin{aligned} P_{2,3} &= \Delta G_B^{1zop}{}_{2,3} \cdot \alpha_K L_0 \cdot \bar{C}_{PB} \cdot (T_K^* - 293,15) + \\ &+ \Delta G_T^{1zop}{}_{2,3} \cdot (\Delta i_T^* \Big|_{293}^{T_T^*} + Hu_{293} \cdot \eta_T) + G_B^{1ban\Sigma}{}_{2,3} \cdot \alpha_K L_0 \cdot \bar{C}_{PB} \cdot (T_K^* - 293,15) = \\ &= 0,02308 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 1172,07 \cdot (793,15 - 293,15) + \\ &+ 0,06 \cdot (20 + 10250 \cdot 0,995) \cdot 4,187 \cdot 10^3 + 0,27384 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 1172,07 \cdot (793,15 - \\ &- 293,15) = 9\,253\,838,198 \text{ Дж/кг} (\approx 2\,210,136 \text{ ккал/кг}). \end{aligned}$$

Правая часть – (13, в):

$$\begin{aligned} P_{2,3} &= (\Delta G_B^{1zop}{}_{2,3} \cdot \alpha_K L_0 + \Delta G_T^{1zop}{}_{2,3}) \cdot \bar{C}_{PI} + G_B^{1ban\Sigma}{}_{2,3} \cdot \alpha_K L_0 \cdot \bar{C}_{PB} = \\ &= (0,02308 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 0,06) \cdot 1307,4 + 0,27384 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 1172,07 = \\ &= 13\,571,838 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)} (\approx 3,2414 \text{ ккал/(кг} \cdot \text{K)}) \end{aligned}$$

Найдем $T_{Ж2,3}^*$ по соотношению:

$$T_{Ж2,3}^* = 293,15 + \frac{P_{2,3}}{P_{2,3}} = 293,15 + \frac{9\,253\,838,198}{13\,571,838} = 974,992 \text{ K} \approx 975 \text{ K}.$$

3) Составим уравнение теплового баланса для участка (3-4), $\kappa = 3$. Каждую его часть сразу поделим на G_T и учтем, что $G_{BK}/G_T = \alpha_K \cdot L_0$. Тогда

$$\begin{aligned} &(\Delta G_B^{1zop}{}_{2,3} \cdot \alpha_K L_0 + \Delta G_T^{1zop}{}_{2,3}) \cdot \Delta i_{П.С}^* \Big|_{293}^{T_{Ж3,4}^*} + \Delta G_B^{1zop}{}_{3,4} \cdot \alpha_K L_0 \cdot \Delta i_B^* \Big|_{293}^{T_K^*} + \\ &(11) \\ &+ \Delta G_T^{1zop}{}_{3,4} \cdot \Delta i_T^* \Big|_{293}^{T_T^*} + \Delta G_T^{1zop}{}_{3,4} \cdot (\Delta i_T^* \Big|_{293}^{T_T^*} + Hu_{293} \cdot \eta_T) + G_B^{1ban\Sigma}{}_{3,4} \cdot \alpha_K L_0 \cdot \Delta i_B^* \Big|_{293}^{T_K^*} = \\ &(14) \\ &= \left[(\Delta G_B^{1zop}{}_{2,3} + \Delta G_B^{1zop}{}_{3,4}) \cdot \alpha_K L_0 + (\Delta G_T^{1zop}{}_{2,3} + \Delta G_T^{1zop}{}_{3,4}) \right] \cdot \Delta i_{П.С}^* \Big|_{293}^{T_{Ж3,4}^*} + \\ &(12) \qquad \qquad \qquad + G_B^{1ban\Sigma}{}_{3,4} \cdot \alpha_K L_0 \cdot \Delta i_B^* \Big|_{293}^{T_{Ж3,4}^*}. \end{aligned}$$

Слагаемое (11) в левой части уравнения (14) представляет собой теплоту, приносимую на участок (3-4) продуктами сгорания, образовавшимися на предыдущем участке (2-3). Слагаемое (12) в правой части – теплота, содержащаяся в суммарной массе продуктов сгорания, которые находятся на участке (3-4).

Значение множителя $\Delta i_{п.с}^* \Big|_{293}^{T_{Г,MAX}^*}$ вычислим отдельно и заранее, так как он будет встречаться во всех последующих уравнениях теплового баланса. Его удобно вычислить, используя выражение для теплового эффекта сгорания $Hu(T_K^*)$.

$$\begin{aligned} \Delta i_{п.с}^* \Big|_{293}^{T_{Г,MAX}^*} &= \Delta i_{п.с}^* \Big|_{T_K^*}^{T_{Г,MAX}^*} + \Delta i_{п.с}^* \Big|_{293}^{T_K^*} = \frac{Hu(T_K^*) \cdot \eta_{Г}}{1 + L_0} + \Delta i_{п.с}^* \Big|_{293}^{T_K^*} = \\ &= \frac{9980,433 \cdot 0,995}{15,78} \cdot 10^3 \cdot 4,187 + 1307,4 \cdot 500 = \\ &= 3\,288\,626,021 \text{ Дж/кг (785,437 ккал/кг)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Также как и для других участков будем вычислять левую и правую части уравнения теплового баланса отдельно.

$$\begin{aligned} \Pi_{3,4} &= (0,02308 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 0,06) \cdot 785,437 + 0,06923 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 \cdot 500 + \\ &+ 0,18 \cdot (20 + 10250 \cdot 0,995) + 0,26153 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 \cdot 500 = \\ &= 4\,315,0109 \text{ ккал/кг}; \quad (16, \text{ а}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{3,4} &= [(0,02308 + 0,06923) \cdot 2,6 \cdot 14,78 + (0,06 + 0,18)] \cdot 0,31225 + \\ &+ 0,26153 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 = 3,9959 \text{ ккал/(кг·К)}; \quad (16, \text{ б}) \end{aligned}$$

$$T_{Ж,3,4}^* = 293,15 + \frac{\Pi_{3,4}}{\Pi_{3,4}} = 293,15 + \frac{4\,513,0109}{3,9959} = 1373,01 \text{ К}. \quad (16, \text{ в})$$

4) Составим уравнение теплового баланса для участка (4-5), $\kappa = 4$.

$$\begin{aligned} &[(\Delta G_B^{1,2оп}{}_{2,3} + \Delta G_B^{1,2оп}{}_{3,4}) \cdot \alpha_{\kappa} L_0 + (\Delta G_T^{1,2оп}{}_{2,3} + \Delta G_T^{1,2оп}{}_{3,4})] \cdot \Delta i_{п.с}^* \Big|_{293}^{T_{Г,MAX}^*} + \\ &+ \Delta G_B^{1,2оп}{}_{4,5} \cdot \alpha_{\kappa} L_0 \cdot \Delta i_B^* \Big|_{293}^{T_K^*} + \\ &+ \Delta G_T^{1,2оп}{}_{4,5} \cdot (\Delta i_T^* \Big|_{293}^{T_{Г,MAX}^*} + Hu_{293} \cdot \eta_{Г}) + G_B^{1,2оп}{}_{4,5} \cdot \alpha_{\kappa} L_0 \cdot \Delta i_B^* \Big|_{293}^{T_K^*} = \end{aligned} \quad (17, \text{ а})$$

$$\begin{aligned}
&= \left[(\Delta G_B^{'zop}{}_{2,3} + \Delta G_B^{'zop}{}_{3,4} + \Delta G_B^{'zop}{}_{4,5}) \cdot \alpha_K L_0 + \right. \\
&\quad \left. + (\Delta G_T^{'zop}{}_{2,3} + \Delta G_T^{'zop}{}_{3,4} + \Delta G_T^{'zop}{}_{4,5}) \right] \cdot \Delta i_{\Pi C}^* \Big|_{293}^{T_{Ж4,5}^*} + \\
&\quad + G_B^{'бал\Sigma}{}_{4,5} \cdot \alpha_K L_0 \cdot \Delta i_B^* \Big|_{293}^{T_{Ж4,5}^*}. \quad (17, б)
\end{aligned}$$

Вычислим левую и правую части уравнения (17).

$$\begin{aligned}
L_{4,5} &= [(0,02308 + 0,06923) \cdot 2,6 \cdot 14,78 + (0,06 + 0,18)] \cdot 785,437 + \\
&\quad + 0,08269 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 \cdot 500 + 0,215 \cdot (20 + 10250 \cdot 0,995) + \\
&\quad + 0,2796 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 \cdot 500 = 7\,120,3119 \text{ ккал/кг}; \quad (18, а)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Pi_{4,5} &= [(0,02308 + 0,06923 + 0,08269) \cdot 2,6 \cdot 14,78 + (0,06 + 0,18 + 0,215)] \times \\
&\quad \times 0,31225 + 0,2796 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 = 5,2496 \text{ ккал/(кг}\cdot\text{К)}; \quad (18, б)
\end{aligned}$$

$$T_{Ж4,5}^* = 293,15 + \frac{L_{4,5}}{\Pi_{4,5}} = 293,15 + \frac{7\,120,3119}{5,2496} = 1649,5 \text{ К}. \quad (18, в)$$

Рассмотренные примеры составления уравнения теплового баланса, а также расчеты левых и правых их частей для последующего вычисления температуры позволяют записать названные уравнения и выражения для самого общего случая. Для произвольного участка $(\kappa-1)$ - κ они будут иметь вид.

а) уравнение теплового баланса:

$$\begin{aligned}
&\left[(G_B^{'zop\Sigma}{}_{1-(\kappa-1)} \cdot \alpha_K L_0 + G_T^{'zop\Sigma}{}_{1-(\kappa-1)}) \right] \cdot \Delta i_{\Pi C}^* \Big|_{293}^{T_{Г,МЛX}^*} + \\
&\quad + (\Delta G_B^{'zop}{}_{(\kappa-1),\kappa} + G_B^{'бал\Sigma}{}_{(\kappa-1),\kappa}) \cdot \alpha_K L_0 \cdot \Delta i_B^* \Big|_{293}^{T_{Ж}^*} + \\
&\quad + \Delta G_T^{'zop}{}_{(\kappa-1),\kappa} \cdot (\Delta i_T^* \Big|_{293}^{T_{Г}^*} + Hu_{293} \cdot \eta_T) = \quad (19, а) \\
&= \left[(G_B^{'zop\Sigma}{}_{1-\kappa} \cdot \alpha_K L_0 + G_T^{'zop\Sigma}{}_{1-\kappa}) \right] \cdot \Delta i_{\Pi C}^* \Big|_{293}^{T_{Ж(\kappa-1),\kappa}^*} + G_B^{'бал\Sigma}{}_{(\kappa-1),\kappa} \cdot \alpha_K L_0 \cdot \Delta i_B^* \Big|_{293}^{T_{Ж(\kappa-1),\kappa}^*}.
\end{aligned}$$

б) выражение для левой части уравнения теплового баланса:

$$\begin{aligned}
L_{(\kappa-1),\kappa} &= \left[(G_B^{'zop\Sigma}{}_{1-(\kappa-1)} \cdot \alpha_K L_0 + G_T^{'zop\Sigma}{}_{1-(\kappa-1)}) \right] \cdot \Delta i_{\Pi C}^* \Big|_{293}^{T_{Г,МЛX}^*} + \\
&\quad + (\Delta G_B^{'zop}{}_{(\kappa-1),\kappa} + G_B^{'бал\Sigma}{}_{(\kappa-1),\kappa}) \cdot \alpha_K L_0 \cdot \bar{C}_{PB} \cdot (T_{Ж}^* - 293,15) +
\end{aligned}$$

$$+ \Delta G_T^{*top}{}_{(K-1),K} \cdot (\Delta i_T^* \Big|_{293}^{T_T^*} + H u_{293} \cdot \eta_T) . \quad (19, б)$$

в) выражение для правой части уравнения теплового баланса:

$$\begin{aligned} \Pi_{(K-1),K} = & \left[(G_B^{*top\Sigma}{}_{1-K} \cdot \alpha_K L_0 + G_T^{*top\Sigma}{}_{1-K}) \right] \cdot \bar{C}_{PT} + \\ & + G_B^{*bas\Sigma}{}_{(K-1),K} \cdot \alpha_K L_0 \cdot \bar{C}_{PB} . \quad (19, в) \end{aligned}$$

г) формула для подсчета среднemasовой температуры на $(\kappa-1)$, κ -ом участке:

$$T_{Ж(K-1),K}^* = 293,15 + \frac{\Pi_{(K-1),K}}{\Pi_{(K-1),K}} . \quad (19, г)$$

Выражения (19, а) - (19, г) позволяют выполнить расчеты по определению среднemasовой температуры газа $T_{Ж(K-1),K}^*$ на любом участке жаровой трубы.

3.2.3. Расчет среднemasовой температуры газа по участкам жаровой трубы

Продолжим начатые в предыдущем разделе вычисления значений температур, используя выражения (19, а) - (19, г).

5) Участок (5-6), $\kappa = 5$.

$$\begin{aligned} \Pi_{5,6} = & [0,175 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 0,455] \cdot 785,437 + (0,09423 + \\ & + 0,26921) \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 \cdot 500 + \\ & + 0,245 \cdot (20 + 10250 \cdot 0,995) = 10\,097,7422 \text{ ккал/кг} \quad (20, а) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Pi_{5,6} = & (0,26923 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 0,7) \cdot 0,31225 + 0,26921 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 = \\ & = 6,34504 \text{ ккал/(кг·К)} ; \quad (20, б) \end{aligned}$$

$$T_{Ж5,6}^* = 293,15 + \frac{\Pi_{5,6}}{\Pi_{5,6}} = 293,15 + \frac{10\,097,7422}{6,34504} = 1884,59 \text{ К} . \quad (20, в)$$

6) Участок (6-7), $\kappa = 6$.

$$\begin{aligned} \Pi_{6,7} = & [0,26923 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 0,7] \cdot 785,437 + (0,065385 + \\ & + 0,304585) \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 \cdot 500 + \\ & + 0,17 \cdot (20 + 10250 \cdot 0,995) = 12\,403,0128 \text{ ккал/кг} ; \quad (21, а) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Pi_{6,7} &= (0,334615 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 0,87) \cdot 0,31225 + 0,304585 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 = \\
 &= 7,56322 \text{ ккал/(кг}\cdot\text{К)}; \quad (21, б)
 \end{aligned}$$

$$T_{ж6,7}^* = 293,15 + \frac{\Pi_{6,7}}{\Pi_{6,7}} = 293,15 + \frac{12\,403,0128}{7,56322} = 1933,06 \text{ К}. \quad (21, в)$$

7) Участок (7-8), $\kappa = 7$.

$$\begin{aligned}
 \Pi_{7,8} &= [0,334615 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 0,87] \cdot 785,437 + (0,0404 + \\
 &\quad + 0,348025) \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 \cdot 500 + \\
 &\quad + 0,105 \cdot (20 + 10250 \cdot 0,995) = 13\,945,0805 \text{ ккал/кг}; \quad (22, а)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Pi_{7,8} &= (0,375015 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 0,975) \cdot 0,31225 + 0,348025 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 = \\
 &= 8,54806 \text{ ккал/(кг}\cdot\text{К)}; \quad (22, б)
 \end{aligned}$$

$$T_{ж7,8}^* = 293,15 + \frac{\Pi_{7,8}}{\Pi_{7,8}} = 293,15 + \frac{13\,945,0805}{8,54806} \approx 1924,5 \text{ К}. \quad (22, в)$$

8) Участок (8-9), $\kappa = 8$.

$$\begin{aligned}
 \Pi_{8,9} &= [0,375015 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 0,975] \cdot 785,437 + (0,009615 + \\
 &\quad + 0,43917) \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 \cdot 500 + \\
 &\quad + 0,025 \cdot (20 + 10250 \cdot 0,995) = 14\,754,0863 \text{ ккал/кг}; \quad (23, а)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Pi_{8,9} &= (0,38463 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 1,0) \cdot 0,31225 + 0,43917 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 = \\
 &= 9,6517 \text{ ккал/(кг}\cdot\text{К)}; \quad (23, б)
 \end{aligned}$$

$$T_{ж8,9}^* = 293,15 + \frac{\Pi_{8,9}}{\Pi_{8,9}} = 293,15 + \frac{14\,754,0863}{9,6517} = 1821,8 \text{ К}. \quad (23, в)$$

9) Участок (9-10), $\kappa = 9$.

$$\begin{aligned}
 \Pi_{9,10} &= [0,38463 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 1,0] \cdot 785,437 + \\
 &\quad + (0,0 + 0,50765) \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 \cdot 500 + \\
 &\quad + 0,0 \cdot (20 + 10250 \cdot 0,995) = 15\,125,0706 \text{ ккал/кг}; \quad (24, а)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \Pi_{9,10} &= (0,38463 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 1,0) \cdot 0,31225 + 0,50765 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 = \\
 &= 10,38835 \text{ ккал/(кг}\cdot\text{К)}; \quad (24, б)
 \end{aligned}$$

$$T_{ж9,10}^* = 293,15 + \frac{\Pi_{9,10}}{\Pi_{9,10}} = 293,15 + \frac{15\,125,0706}{10,38835} = 1749,12 \text{ К}. \quad (24, в)$$

10) Участок (10-11), $\kappa = 10$.

$$\begin{aligned} L_{10,11} &= [0,38463 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 1,0] \cdot 785,437 + \\ &+ (0,0 + 0,58537) \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 \cdot 500 + \\ &+ 0,0 \cdot (20 + 10250 \cdot 0,995) = 15\,543,0935 \text{ ккал/кг}; \end{aligned} \quad (25, \text{ а})$$

$$\begin{aligned} \Pi_{10,11} &= (0,38463 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 1,0) \cdot 0,31225 + 0,58537 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 = \\ &= 11,22422 \text{ ккал/(кг} \cdot \text{К)}; \end{aligned} \quad (25, \text{ б})$$

$$T_{\text{ж}10,11}^* = 293,15 + \frac{L_{10,11}}{\Pi_{10,11}} = 293,15 + \frac{15\,543,0935}{11,22422} = 1677,93 \text{ К}. \quad (25, \text{ в})$$

11) Участок (11-12), $\kappa = 11$.

$$\begin{aligned} L_{11,12} &= [0,38463 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 1,0] \cdot 785,437 + \\ &+ (0,0 + 0,61537) \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 \cdot 500 + \\ &+ 0,0 \cdot (20 + 10250 \cdot 0,995) = 15\,704,0096 \text{ ккал/кг}; \end{aligned} \quad (26, \text{ а})$$

$$\begin{aligned} \Pi_{11,12} &= (0,38463 \cdot 2,6 \cdot 14,78 + 1,0) \cdot 0,31225 + 0,61537 \cdot 2,6 \cdot 14,78 \cdot 0,27993 = \\ &= 11,54693 \text{ ккал/(кг} \cdot \text{К)}; \end{aligned} \quad (26, \text{ б})$$

$$\begin{aligned} T_{\text{ж}11,12}^* &= 293,15 + \frac{L_{11,12}}{\Pi_{11,12}} = 293,15 + \frac{15\,704,0096}{11,54693} = 1653,1655 \text{ К} \approx \\ &\approx 1653,17 \text{ К}. \end{aligned} \quad (26, \text{ в})$$

Полученное для последнего участка значение температуры $T_{\text{ж}11,12}^*$ всего лишь на 0,001 % превышает значение температуры T_r^* на выходе из камеры сгорания, которая задана как проектный параметр.

Рассчитанные значения среднемассовых температур $T_{\text{ж}i,j}^*$ внесены в столбец 10 сводной таблицы 1, стр.21.

3.3. Расчет среднемассовых скоростей движения $w_{i,j}$ и времени пребывания $\Delta\tau_{\text{ПРi,j}}$ газа по участкам жаровой трубы

3.3.1. Расчет абсолютных значений расходов газа $G_{\Gamma i,j}$

Определим абсолютное значение суммарного расхода топлива через жаровую трубу (ЖТ)

$$G_T = \frac{G_{BK}}{\alpha_K L_0} = \frac{89 \text{ кг/с}}{2,6 \cdot 14,78} = 2,316 \text{ кг/с}. \quad (27)$$

С использованием определяющей формулы (4) выразим суммарный расход газа для каждого (i,j) -участка ЖТ через общие расход воздуха и относительный расход топлива через камеру сгорания

$$G_{\Gamma i,j} = G_{B i,j} + G_T = G_{B i,j}^{\Sigma} \cdot G_{BK} + G_T = G_{BK} \cdot (G_{B i,j}^{\Sigma} + 1/\alpha_K L_0), \quad (28)$$

где $1/\alpha_K L_0 = q_T = 1/(2,6 \cdot 14,78) = 0,02602$. Тогда получим:

$$\begin{aligned} G_{\Gamma 1,2} &= G_{BK} \cdot (G_{B 1,2}^{\Sigma} + q_T) = 89 \cdot (0,25 + 0,02602) = 24,566 \text{ кг/с}; \\ G_{\Gamma 2,3} &= G_{BK} \cdot (G_{B 2,3}^{\Sigma} + q_T) = 89 \cdot (0,29692 + 0,02602) = 28,742 \text{ кг/с}; \\ G_{\Gamma 3,4} &= G_{BK} \cdot (G_{B 3,4}^{\Sigma} + q_T) = 89 \cdot (0,35384 + 0,02602) = 33,808 \text{ кг/с}; \\ G_{\Gamma 4,5} &= G_{BK} \cdot (G_{B 4,5}^{\Sigma} + q_T) = 89 \cdot (0,4546 + 0,02602) = 42,775 \text{ кг/с}; \\ G_{\Gamma 5,6} &= G_{BK} \cdot (G_{B 5,6}^{\Sigma} + q_T) = 89 \cdot (0,53844 + 0,02602) = 50,237 \text{ кг/с}; \\ G_{\Gamma 6,7} &= G_{BK} \cdot (G_{B 6,7}^{\Sigma} + q_T) = 89 \cdot (0,6392 + 0,02602) = 59,205 \text{ кг/с}; \\ G_{\Gamma 7,8} &= G_{BK} \cdot (G_{B 7,8}^{\Sigma} + q_T) = 89 \cdot (0,72304 + 0,02602) = 66,666 \text{ кг/с}; \\ G_{\Gamma 8,9} &= G_{BK} \cdot (G_{B 8,9}^{\Sigma} + q_T) = 89 \cdot (0,8238 + 0,02602) = 75,634 \text{ кг/с}; \\ G_{\Gamma 9,10} &= G_{BK} \cdot (G_{B 9,10}^{\Sigma} + q_T) = 89 \cdot (0,89228 + 0,02602) = 81,729 \text{ кг/с}; \\ G_{\Gamma 10,11} &= G_{BK} \cdot (G_{B 10,11}^{\Sigma} + q_T) = 89 \cdot (0,97 + 0,02602) = 88,646 \text{ кг/с}; \\ G_{\Gamma 11,12} &= G_{BK} \cdot (G_{B 11,12}^{\Sigma} + q_T) = 89 \cdot (1,0 + 0,02602) = 91,316 \text{ кг/с}. \end{aligned}$$

3.3.2. Расчет среднемассовых скоростей газа $w_{i,j}$

Для последующих расчетов необходимо подготовить компоновочный чертеж проектируемой камеры сгорания. Выполним его на основе полученных в Части I курсового проекта продольных и диаметральных размеров проектируемой камеры сгорания, а также с использованием камеры сгорания-прототипа. Чертеж представлен на рисунке 2.

Пренебрегая небольшим изменением полного давления $p_{i,j}^*$ по длине жаровой трубы, примем, что $p_{i,j}^* \cong \sigma_{КС} \cdot p_K^* = \text{const}$, то есть $p_{i,j}^* = 0,938 \cdot 25,4 \cdot 10^5$ Па $\cong 23,825 \cdot 10^5$ Па.

Для определение величин скоростей движения газа из формулы для расхода газа необходимо знать площади поперечного сечения проточной части $F_{Ж_{i,j}}$ на каждом (i,j) -участке ЖТ. Площади определим по компоновочному чертежу камеры сгорания (рис. 2). Необходимые данные сведены в таблицу 2, стр. 28.

По компоновочному чертежу камеры сгорания определяем следующие геометрические размеры проточной части:

а) Отсчет длины жаровой трубы начинаем от сечения 1, соответственно протяженность жаровой трубы до этого сечения равна $L_1 = 0$ м. Далее определяем удаление каждого j -го сечения от сечения 1, это будет L_j , и занесим эти значения в столбец 3 таблицы 2.

б) Вычисляем протяженность каждого участка, $\Delta L_{i,j}$, например:

$$\Delta L_{1,2} = L_2 - L_1 = 0,026 - 0 = 0,026 \text{ м};$$

$$\Delta L_{2,3} = L_3 - L_2 = 0,052 - 0,026 = 0,026 \text{ м};$$

$$\Delta L_{3,4} = L_4 - L_3 = 0,068 - 0,052 = 0,016 \text{ м};$$

$$\Delta L_{4,5} = L_5 - L_4 = 0,086 - 0,068 = 0,018 \text{ м};$$

и т.д. Значения $\Delta L_{i,j}$ занесены в столбец 4 таблицы 2, стр.39.

в) Высоты жаровой трубы $h_{i,j}$ определяем по срединной линии каждого участка (см. компоновочный чертеж, рис. 2). Заносим значения $h_{i,j}$ в столбец 5 таблицы 2.

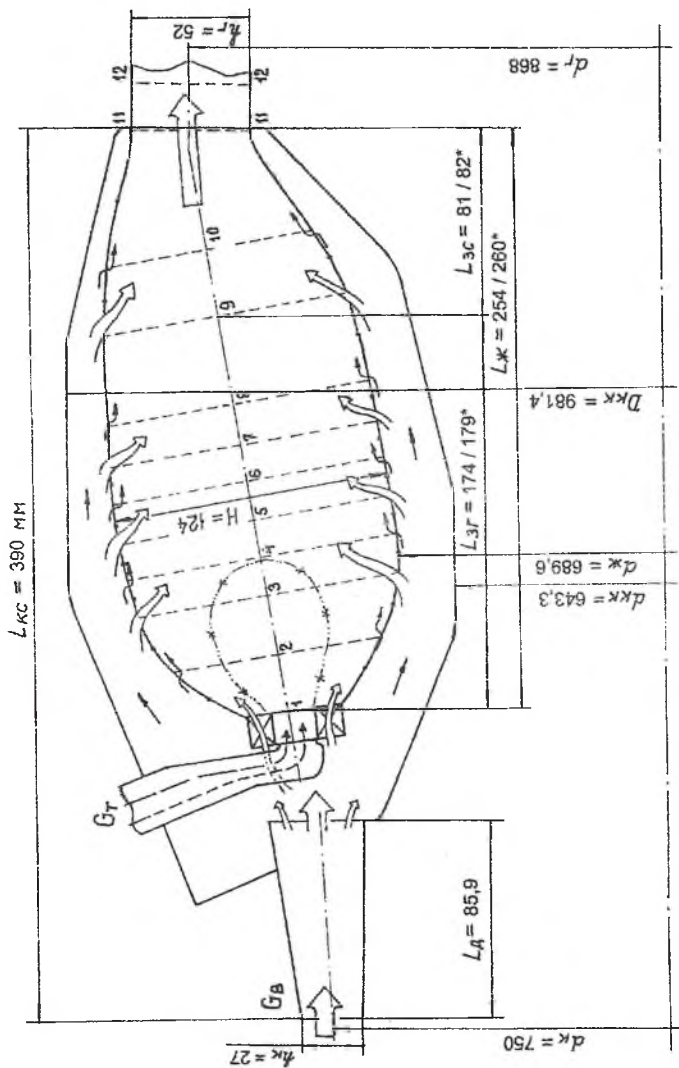


Рис. 2. Компонвочный чертж проектируемой камеры сгорания

Таблицы 2. Протяженности участков жаровой трубы и площади их поперечных сечений

№ п/п	$L_j, \text{ м}$	№ (i,j) - участка	$\Delta L_{i,j}, \text{ м}$	$h_{i,j}, \text{ м}$	$d_{cp,i,j}, \text{ м}$	$F_{жi,j}, \text{ м}^2$
1	3	2	4	5	6	7
1	0	1,2	0,026	0,064 / 0,032*	0,79	0,0794
2	0,026	2,3	0,026	0,092 / 0,051*	0,802	0,1033
3	0,052	3,4	0,016	0,120 / 0,034*	0,81	0,2188
4	0,068	4,5	0,018	0,122	0,818	0,3135
5	0,086	5,6	0,018	0,122	0,822	0,3151
6	0,104	6,7	0,016	0,120	0,824	0,3106
7	0,120	7,8	0,018	0,118	0,83	0,3077
8	0,138	8,9	0,040	0,115	0,834	0,3013
9	0,178	9,10	0,029	0,102	0,842	0,2698
10	0,207	10,11	0,053	0,068	0,866	0,185
11	0,260	11,12	0,019	0,053	0,866	0,1442
12	0,279	12,13	-	-	-	-

г) Аналогичным образом определяем средние диаметры проточной части жаровой трубы $d_{cp,i,j}$, заносим их значения в столбец 6.

д) Площади проточной части $F_{жi,j}$ вычисляем по формуле

$$F_{жi,j} = \pi \cdot d_{cp,i,j} \cdot h_{i,j}, \quad (29)$$

например: $F_{ж9,10} = \pi \cdot d_{cp9,10} \cdot h_{9,10} = \pi \cdot 0,842 \cdot 0,102 = 0,2698 \text{ м}^2$;

$$F_{ж10,11} = \pi \cdot d_{cp10,11} \cdot h_{10,11} = \pi \cdot 0,866 \cdot 0,068 = 0,185 \text{ м}^2$$
;

и т.д. На тех участках, где имеется зона обратных токов, за величину $F_{жi,j}$ принимаем площадь проточной части для прямого тока, например:

$$F_{ж1,2} = \pi \cdot d_{cp1,2} \cdot (h_{1,2} - h_{1,2}^*) = \pi \cdot 0,79 \cdot (0,064 - 0,032) = 0,0794 \text{ м}^2$$
;

и т.п. Заносим значение площадей в столбец 7 таблицы 2.

Далее для каждого участка проточной части вычисляем газодинамическую функцию $q(\lambda_{i,j})$ из формулы для расхода газа, по её значению путем решения нелинейного уравнения с использованием математического пакета MathCAD [8] определяем приведенную скорость $\lambda_{i,j}$ и по ней – скорость газового потока $w_{i,j}$. Получим следующие значения перечисленных величин для каждого (i,j) -участка ЖТ.

$$q(\lambda_{1,2}) = \frac{G_{\Gamma 1,2} \sqrt{T_{Ж1,2}^*}}{m_{\Gamma} \cdot p_{Ж}^* \cdot F_{Ж1,2}} = \frac{24,566 \cdot \sqrt{793,15}}{0,0396 \cdot 23,825 \cdot 10^5 \cdot 0,0794} = 0,09236 ,$$

$$\rightarrow \lambda_{1,2} = 0,05823 ,$$

$$a_{KP1,2} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} RT_{Ж1,2}^*} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,33}{2,33}} 288 \cdot \sqrt{793,15} = 510,67 \text{ м/с} ,$$

$$w_{1,2} = \lambda_{1,2} \cdot a_{KP1,2} = 0,05823 \cdot 510,67 = 29,74 \text{ м/с} ;$$

$$q(\lambda_{2,3}) = \frac{G_{\Gamma 2,3} \sqrt{T_{Ж2,3}^*}}{m_{\Gamma} \cdot p_{Ж}^* \cdot F_{Ж2,3}} = \frac{28,742 \cdot \sqrt{975}}{0,0396 \cdot 23,825 \cdot 10^5 \cdot 0,1033} = 0,0921 ,$$

$$\rightarrow \lambda_{2,3} = 0,05806 ,$$

$$a_{KP2,3} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} RT_{Ж2,3}^*} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,33}{2,33}} 288 \cdot \sqrt{975} = 566,19 \text{ м/с} ,$$

$$w_{2,3} = \lambda_{2,3} \cdot a_{KP2,3} = 0,05806 \cdot 566,19 = 32,873 \text{ м/с} ;$$

$$q(\lambda_{3,4}) = \frac{G_{\Gamma 3,4} \sqrt{T_{Ж3,4}^*}}{m_{\Gamma} \cdot p_{Ж}^* \cdot F_{Ж3,4}} = \frac{33,808 \cdot \sqrt{1373,01}}{0,0396 \cdot 23,825 \cdot 10^5 \cdot 0,2188} = 0,06069 ,$$

$$\rightarrow \lambda_{3,4} = 0,03823 ,$$

$$a_{KP3,4} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} RT_{Ж3,4}^*} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,33}{2,33}} 288 \cdot \sqrt{1373,01} = 671,89 \text{ м/с} ,$$

$$w_{3,4} = \lambda_{3,4} \cdot a_{KP3,4} = 0,03823 \cdot 671,89 = 25,69 \text{ м/с} ;$$

$$q(\lambda_{4,5}) = \frac{G_{\Gamma 4,5} \sqrt{T_{Ж4,5}^*}}{m_{\Gamma} \cdot p_{Ж}^* \cdot F_{Ж4,5}} = \frac{42,775 \cdot \sqrt{1649,5}}{0,0396 \cdot 23,825 \cdot 10^5 \cdot 0,3135} = 0,05874 ,$$

$$\rightarrow \lambda_{4,5} = 0,037 ,$$

$$a_{KP4,5} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} RT_{Ж4,5}^*} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,33}{2,33} 288 \cdot 1649,5} = 736,44 \text{ м/с} ,$$

$$w_{4,5} = \lambda_{4,5} \cdot a_{KP4,5} = 0,037 \cdot 736,44 = 27,25 \text{ м/с} ;$$

$$q(\lambda_{5,6}) = \frac{G_{\Gamma 5,6} \sqrt{T_{Ж5,6}^*}}{m_{\Gamma} \cdot p_{Ж}^* \cdot F_{Ж5,6}} = \frac{50,237 \cdot \sqrt{1884,59}}{0,0396 \cdot 23,825 \cdot 10^5 \cdot 0,3151} = 0,07336 ,$$

$$\rightarrow \lambda_{5,6} = 0,04622 ,$$

$$a_{KP5,6} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} RT_{Ж5,6}^*} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,33}{2,33} 288 \cdot 1884,59} = 787,168 \text{ м/с} ,$$

$$w_{5,6} = \lambda_{5,6} \cdot a_{KP5,6} = 0,04622 \cdot 787,168 = 36,38 \text{ м/с} ;$$

$$q(\lambda_{6,7}) = \frac{G_{\Gamma 6,7} \sqrt{T_{Ж6,7}^*}}{m_{\Gamma} \cdot p_{Ж}^* \cdot F_{Ж6,7}} = \frac{59,205 \cdot \sqrt{1933,06}}{0,0396 \cdot 23,825 \cdot 10^5 \cdot 0,3106} = 0,08883 ,$$

$$\rightarrow \lambda_{6,7} = 0,056 ,$$

$$a_{KP6,7} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} RT_{Ж6,7}^*} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,33}{2,33} 288 \cdot 1933,06} = 797,23 \text{ м/с} ,$$

$$w_{6,7} = \lambda_{6,7} \cdot a_{KP6,7} = 0,056 \cdot 797,23 = 44,64 \text{ м/с} ;$$

$$q(\lambda_{7,8}) = \frac{G_{\Gamma 7,8} \sqrt{T_{Ж7,8}^*}}{m_{\Gamma} \cdot p_{Ж}^* \cdot F_{Ж7,8}} = \frac{66,666 \cdot \sqrt{1924,5}}{0,0396 \cdot 23,825 \cdot 10^5 \cdot 0,3077} = 0,10074 ,$$

$$\rightarrow \lambda_{7,8} = 0,06353 ,$$

$$a_{KP7,8} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} RT_{Ж7,8}^*} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,33}{2,33} 288 \cdot 1924,5} = 795,46 \text{ м/с} ,$$

$$w_{7,8} = \lambda_{7,8} \cdot a_{KP7,8} = 0,06353 \cdot 795,46 = 50,54 \text{ м/с} ;$$

$$q(\lambda_{8,9}) = \frac{G_{\Gamma 8,9} \sqrt{T_{Ж8,9}^*}}{m_{\Gamma} \cdot p_{Ж}^* \cdot F_{Ж8,9}} = \frac{76,634 \cdot \sqrt{1821,8}}{0,0396 \cdot 23,825 \cdot 10^5 \cdot 0,3013} = 0,1151 ,$$

$$\rightarrow \lambda_{8,9} = 0,07262 ,$$

$$a_{KP8,9} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} RT_{Ж8,9}^*} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,33}{2,33} 288 \cdot 1821,8} = 773,96 \text{ м/с} ,$$

$$w_{8,9} = \lambda_{8,9} \cdot a_{KP8,9} = 0,07262 \cdot 773,96 = 56,2 \text{ м/с} ;$$

$$q(\lambda_{9,10}) = \frac{G_{\Gamma 9,10} \sqrt{T_{Ж9,10}^*}}{m_{\Gamma} \cdot p_{Ж}^* \cdot F_{Ж9,10}} = \frac{81,729 \cdot \sqrt{1749,12}}{0,0396 \cdot 23,825 \cdot 10^5 \cdot 0,2698} = 0,1343 ,$$

$$\rightarrow \lambda_{9,10} = 0,08481 ,$$

$$a_{KP9,10} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} RT_{Ж9,10}^*} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,33}{2,33} 288 \cdot 1749,12} = 758,35 \text{ м/с} ,$$

$$w_{9,10} = \lambda_{9,10} \cdot a_{KP9,10} = 0,08481 \cdot 758,35 = 64,32 \text{ м/с} ;$$

$$q(\lambda_{10,11}) = \frac{G_{\Gamma 10,11} \sqrt{T_{Ж10,11}^*}}{m_{\Gamma} \cdot p_{Ж}^* \cdot F_{Ж10,11}} = \frac{88,646 \cdot \sqrt{1677,93}}{0,0396 \cdot 23,825 \cdot 10^5 \cdot 0,185} = 0,20804 ,$$

$$\rightarrow \lambda_{10,11} = 0,13195 ,$$

$$a_{KP10,11} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} RT_{Ж10,11}^*} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,33}{2,33} 288 \cdot 1677,93} = 742,76 \text{ м/с} ,$$

$$w_{10,11} = \lambda_{10,11} \cdot a_{KP10,11} = 0,13195 \cdot 742,76 = 98,01 \text{ м/с} ;$$

$$q(\lambda_{11,12}) = \frac{G_{\Gamma 11,12} \sqrt{T_{Ж11,12}^*}}{m_{\Gamma} \cdot p_{Ж}^* \cdot F_{Ж11,12}} = \frac{91,316 \cdot \sqrt{1653,17}}{0,0396 \cdot 23,825 \cdot 10^5 \cdot 0,1442} = 0,2729 ,$$

$$\rightarrow \lambda_{11,12} = 0,1741 ,$$

$$a_{KP11,12} = \sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa+1} RT_{Ж11,12}^*} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,33}{2,33} 288 \cdot 1653,15} = 737,26 \text{ м/с} ,$$

$$w_{11,12} = \lambda_{11,12} \cdot a_{KP11,12} = 0,1741 \cdot 737,26 = 128,36 \text{ м/с} .$$

3.3.3. Расчет времени пребывания газа в жаровой трубе

Подсчитаем время пребывания газа на каждом (i,j) -участке ЖТ по формуле

$$\Delta\tau_{PP_{i,j}} = \frac{\Delta L_{i,j}}{w_{i,j}} . \quad (30)$$

Получим:

$$\Delta\tau_{PP_{1,2}} = \Delta L_{1,2}/w_{1,2} = 0,026/29,74 = 0,0008742 = 0,8742 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\Delta\tau_{PP_{2,3}} = \Delta L_{2,3}/w_{2,3} = 0,026/32,87 = 0,000791 = 0,8742 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\Delta\tau_{PP_{3,4}} = \Delta L_{3,4}/w_{3,4} = 0,016/25,69 = 0,0006228 = 0,6228 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\Delta\tau_{PP_{4,5}} = \Delta L_{4,5}/w_{4,5} = 0,018/27,25 = 0,0006606 = 0,6606 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\Delta\tau_{PP_{5,6}} = \Delta L_{5,6}/w_{5,6} = 0,018/36,38 = 0,0004948 = 0,4948 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\Delta\tau_{PP_{6,7}} = \Delta L_{6,7}/w_{6,7} = 0,016/44,64 = 0,0003584 = 0,3584 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\Delta\tau_{PP_{7,8}} = \Delta L_{7,8}/w_{7,8} = 0,018/50,54 = 0,0003562 = 0,3562 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\Delta\tau_{PP_{8,9}} = \Delta L_{8,9}/w_{8,9} = 0,040/56,2 = 0,0007117 = 0,7117 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\Delta\tau_{PP_{9,10}} = \Delta L_{9,10}/w_{9,10} = 0,054/64,32 = 0,0008396 = 0,8396 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\Delta\tau_{PP_{10,11}} = \Delta L_{10,11}/w_{10,11} = 0,054/98,01 = 0,000551 = 0,551 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\Delta\tau_{PP_{11,12}} = \Delta L_{11,12}/w_{11,12} = 0,019/128,36 = 0,000148 = 0,148 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Суммарное время пребывания газа во всей жаровой трубе подсчитаем как сумму времен пребывания на всех участках, получим

$$\tau_{PP} = \sum_{k=1}^{k=10} \Delta\tau_{PP_{k,(k+1)}} = 6,2603 \cdot 10^{-3} \cong 6,26 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

Таким образом, время пребывания газа в жаровой трубе составляет $\tau_{PP} \cong 6,26 \cdot 10^{-3}$ с. Оно сопоставимо с временем пребывания для двигателей типа *T56*, *JT9D*, *CF6-50C*, *CFM.56* и др., которое у них составляет на взлетном режиме порядка $(6...8) \cdot 10^{-3}$ с.

3.4. Расчет потребной величины среднего диаметра капель D_{320} распыленного топлива

В условиях высокотемпературного и высокотурбулентного потока боковая поверхность капель быстро достигает температуры кипения для данного жидкого топлива так, что часто оказывается возможным пренебречь временем прогрева капель по сравнению с временем их активного испарения и считать последнее, в первом приближении, временем жизни капель. Зависимость диаметра испаряющейся капли D от времени пребывания её в зоне высоких температур можно определить по, так называемому, D^2 -закону Срезневского [1, 10, 17], в соответствии с которым

$$D_i^2 = D_{0i}^2 - k_{испi} \cdot \tau_{прi}, \quad (31)$$

где: D_{0i} и D_i - начальный и, соответственно, текущий диаметр капли i -го типоразмера; $\tau_{прi}$ - время пребывания капли i -го типоразмера в зоне высоких температур; $k_{испi}$ - константа испарения капли i -го типоразмера, зависящая от свойств топлива и воздуха.

Если заранее определить величины $\tau_{прi}$ и $k_{испi}$ и принять, что на момент полного испарения капель их диаметр становится $D_i = 0$, то из формулы (31) можно определить начальные диаметры капель для каждого их типоразмера, а затем подсчитать средний диаметр капель для всей их совокупности в факеле распыла. Определим указанным способом названные параметры капели.

3.4.1. Определение времени жизни капель

В соответствии с назначенным графиком выгорания топлива (Рис. 1, б) примем следующую последовательность испарения капель и вступления испаренного топлива в горение. Будем считать, что после появления в сечении 1 капли каждого i -го типоразмера, то есть i -ой порции топлива, по мере своего продвижения в направлении к выходу из камеры сгорания, прогреваются, последовательно испаряются и перемешиваются с воздухом (для своего последующего горения) на всех предыдущих участках при подходе к некоторому (i, j)-участку своего сгорания. Таким образом, принимается условие, что

процесс горения лимитируется (сдерживается, определяется) скоростью поступления в пламя топливных паров, то есть процессами диффузии топлива [4, 6, 7, 9, 17]. В соответствии с принятой схемой и допущениями получим.

Капли 1-го типоразмера с начальным диаметром D_{01} после впрыска быстро прогреваются и полностью испаряются на подготовительном участке (1-2), а на участке (2-3) привнесенное ими топливо (топливо 1-ой порции) полностью выгорает. То есть время их пребывания до полного исчезновения перед сгоранием составит $\tau_{ПР1} = \Delta\tau_{ПР1,2} = 0,8742 \cdot 10^{-3}$ с.

Капли 2-го типоразмера с начальным диаметром D_{02} после впрыска также быстро прогреваются и полностью испаряются на подготовительном участке (1-2) + (2-3), а на участке (3-4) привнесенное ими топливо (топливо 2-ой порции) полностью выгорает. То есть время их пребывания до полного исчезновения перед сгоранием составит

$$\tau_{ПР2} = \Delta\tau_{ПР1,2} + \Delta\tau_{ПР2,3} = (0,8742 + 0,791) \cdot 10^{-3} = 1,6652 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Соответственно, капли 3-го типоразмера с начальным диаметром D_{03} после впрыска также быстро прогреваются и полностью испаряются на подготовительном участке (1-2) + (2-3) + (3-4), а на участке (4-5) привнесенное ими топливо (топливо 3-ой порции) полностью выгорает. То есть время их пребывания до полного исчезновения перед сгоранием составит

$$\tau_{ПР3} = \Delta\tau_{ПР1,2} + \Delta\tau_{ПР2,3} + \Delta\tau_{ПР3,4} = (1,6652 + 0,6228) \cdot 10^{-3} = 2,288 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

И т.д. Соответственно,

$$\tau_{ПР4} = \tau_{ПР3} + \Delta\tau_{ПР4,5} = (2,288 + 0,6606) \cdot 10^{-3} = 2,9486 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

$$\tau_{ПР5} = \tau_{ПР4} + \Delta\tau_{ПР5,6} = (2,9486 + 0,4948) \cdot 10^{-3} = 3,4434 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

$$\tau_{ПР6} = \tau_{ПР5} + \Delta\tau_{ПР6,7} = (3,4434 + 0,3584) \cdot 10^{-3} = 3,8018 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

$$\tau_{ПР7} = \tau_{ПР6} + \Delta\tau_{ПР7,8} = (3,8018 + 0,3562) \cdot 10^{-3} = 4,158 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

Времена жизни капель сведены в таблицу 3, столбец 4.

3.4.2. Определение теплофизических характеристик газа и топлива и константы испарения капель

Согласно [10, 17] константа испарения капель $k_{исп_i}$ при принятых допущениях может быть вычислена по формуле

$$k_{исп_i} = \frac{8\lambda_{Г_i}}{\rho_{Г_i} \cdot C_{p_{Г_i}}} \ln(1+B) \cdot \left[1 + 0,255 \left(\frac{\varepsilon \cdot W_i \cdot D_{0i}}{v_{Г_i} \cdot 2} \right)^{0,5} \right], \quad (32)$$

где: $\lambda_{Г_i}$, $v_{Г_i}$, $C_{p_{Г_i}}$ - коэффициенты теплопроводности, вязкости и, соответственно, изобарная теплоемкость газа, взятые для некоторых характерных температурных условий капли i -го типоразмера; ε - интенсивность турбулентности потока газа в жаровой трубе вблизи испаряющихся капель; W_i - некоторая средняя или характерная скорость газа, принимаем скорости газа и капель на основном их участке испарения одинаковыми; B - параметр теплообмена [8]: $B = 6,1$ - для изооктана, $B = 3,75$ - для керосина, $B = 2,8$ - дизельного топлива.

В таблице 3 помещены значения теплофизических характеристик газа (воздуха), соответствующие условиям для каждого (i, j)-го участка жаровой трубы, на которых происходит испарение и сгорание топлива. При этом в целях упрощения расчетов принимается, что эти характеристики близки к соответствующим для воздуха, то есть $\lambda_{Г_i} \approx \lambda_{В}$, $v_{Г_i} \approx v_{В}$ и $C_{p_{Г_i}} \approx C_{p_{В}}$. Однако, их значения брались из справочных таблиц [2, 13] с учетом интерполяции для соответствующих температур.

Как видно из таблицы 3, с продвижением газового потока в направлении к выходу из камеры сгорания, то есть вниз по потоку, среднemasсовая температура газа увеличивается примерно в два раза; на столько же примерно увеличивается коэффициент теплопроводности, примерно в четыре раза увеличивается коэффициент вязкости газа, а теплоемкость изменяется несущественно. Таким образом, при определении начальных диаметров капель из (31), (32) желательно как-то учитывать зависимость теплофизических характеристик газа от температуры. Будем использовать некоторые их средние за время пребывания значения и подсчитаем их по следующим очевидным формулам с использованием данных таблицы 3.

Таблицы 3. Теплофизические и газодинамические характеристики газа

№ п/п	№ уч-ка (i,j)	$T_{Жi,j}^*$, К	$\Delta\tau_{ПРi,j}$, 10^{-3} с	$\lambda_{Вi}$, Вт/(м·К)	$C_{PВi}$, ккал/(кг·К)	$v_{Вi}$, $\times 10^{-5}$ м ² /с	№ порции топлива	$w_{i,j}$, м/с
1	(1,2)	793,5	0,8742	0,05742	0,2619	8,1142	-	29,74
2	(2,3)	975	0,791	0,06639	0,2718	11,3	1	32,87
3	(3,4)	1373,01	0,6228	0,08764	0,2888	19,918	2	25,69
4	(4,5)	1649,5	0,6606	0,1025	0,3037	26,737	3	27,25
5	(5,6)	1884,59	0,4948	0,1161	0,33225	33,382	4	36,38
6	(6,7)	1933,06	0,35846	0,1193	0,3438	34,858	5	44,64
7	(7,8)	1924,5	0,3562	0,1187	0,3416	34,597	6	50,54
8	(8,9)	1821,8	0,7117	0,1123	0,3211	31,473	7	56,2

1) Для капли с D_{O_1}

$$\tilde{\lambda}_{Г1} = \lambda_{В1} = 0,05742 \text{ Вт/(м·К)}, \quad \tilde{v}_{Г1} = v_{В1} = 8,1142 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с},$$

$$\tilde{C}_{PГ1} = C_{PВ1} = 0,2619 \cdot 4187 = 1096,58 \text{ Дж/(кг·К)};$$

2) Для капли с D_{O_2}

$$\begin{aligned} \tilde{\lambda}_{Г2} &= \frac{\lambda_{В1} \cdot \Delta\tau_{ПР12} + \lambda_{В2} \cdot \Delta\tau_{ПР23}}{\tau_{ПР2}} = \\ &= \frac{0,05742 \cdot 0,8742 \cdot 10^{-3} + 0,06639 \cdot 0,791 \cdot 10^{-3}}{1,6652 \cdot 10^{-3}} = 0,06157 \text{ Вт/(м·К)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{v}_{Г2} &= \frac{v_{В1} \cdot \Delta\tau_{ПР12} + v_{В2} \cdot \Delta\tau_{ПР23}}{\tau_{ПР2}} = \\ &= \frac{8,1142 \cdot 10^{-5} \cdot 0,8742 \cdot 10^{-3} + 11,3 \cdot 10^{-5} \cdot 0,791 \cdot 10^{-3}}{1,6652 \cdot 10^{-3}} = 9,5787 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{C}_{PГ2} &= \frac{C_{PВ1} \cdot \Delta\tau_{ПР12} + C_{PВ2} \cdot \Delta\tau_{ПР23}}{\tau_{ПР2}} = \\ &= \frac{0,2619 \cdot 0,8742 \cdot 10^{-3} + 0,2718 \cdot 0,791 \cdot 10^{-3}}{1,6652 \cdot 10^{-3}} = 0,2662 \text{ ккал/(кг·К)} = \\ &= 1114,74 \text{ Дж/(кг·К)}. \end{aligned}$$

3) Для капли с D_{03}

$$\begin{aligned}\tilde{\lambda}_{r3} &= \frac{\lambda_{B1} \cdot \Delta\tau_{PP1,2} + \lambda_{B2} \cdot \Delta\tau_{PP2,3} + \lambda_{B3} \cdot \Delta\tau_{PP3,4}}{\tau_{PP3}} = \\ &= \frac{0,05742 \cdot 0,8742 \cdot 10^{-3} + 0,06639 \cdot 0,791 \cdot 10^{-3} + 0,08764 \cdot 0,6228 \cdot 10^{-3}}{2,288 \cdot 10^{-3}} = \\ &= 0,06865 \text{ Вт/(м·К)};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{v}_{r3} &= \frac{v_{B1} \cdot \Delta\tau_{PP1,2} + v_{B2} \cdot \Delta\tau_{PP2,3} + v_{B3} \cdot \Delta\tau_{PP3,4}}{\tau_{PP3}} = \\ &= \frac{(8,1142 \cdot 10^{-5} \cdot 0,8742 + 11,3 \cdot 10^{-5} \cdot 0,791 + 19,918 \cdot 10^{-5} \cdot 0,6228) \cdot 10^{-3}}{2,288 \cdot 10^{-3}} = \\ &= 12,362 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{C}_{Pr3} &= \frac{C_{PB1} \cdot \Delta\tau_{PP1,2} + C_{PB2} \cdot \Delta\tau_{PP2,3} + C_{PB3} \cdot \Delta\tau_{PP3,4}}{\tau_{PP3}} = \\ &= \frac{(0,2619 \cdot 0,8742 + 0,2718 \cdot 0,791 + 0,2888 \cdot 0,6228) \cdot 10^{-3}}{2,288 \cdot 10^{-3}} = \\ &= 0,2724 \text{ ккал/(кг·К)} = 1140,57 \text{ Дж/(кг·К)}.\end{aligned}$$

Аналогично определим средние значения теплофизических характеристик для капель остальных типоразмеров 4, 5, 6 и 7. Также подсчитаем среднemasовые скорости потока газа \tilde{w}_i , которые будем понимать как среднemasовые скорости за время жизни капель каждого типоразмера, по формуле:

$$\tilde{w}_i = \sum_{K=1}^{i+1} w_{K,(K+1)} \cdot \Delta\tau_{PPK,(K+1)} / \tau_{PPi} \quad (33)$$

Значения $\tilde{\lambda}_{r_i}$, \tilde{C}_{Pr_i} , \tilde{v}_{r_i} , \tilde{w}_i и τ_{PPi} представлены в таблице 4.

Вычислим значения начальных диаметров капель каждого i -го типоразмера из решения уравнения (31) с подстановкой (32). При этом учтем, что при завершении испарения капли её текущий диаметр оказывается равным нулю. Получающееся уравнение относительно D_{0i} (34) является нелинейным, поэтому значения D_{0i} придется определять методом последовательных приближений. Удобно это выполнять с использованием математического пакета

программ MathCAD, в котором имеется специальная для этих целей встроенная функция, например $root(, , ,)$ [8]. В круглых скобках проставляются параметры уравнения и указывается аргумент. Итак, имеем

$$D_{0i}^2 - \frac{8\lambda_{r_i}}{\rho_T \cdot C p_{r_i}} \cdot \ln(1 + B) \cdot \left[1 + 0,255 \left(\frac{\varepsilon \cdot W_i \cdot D_{0i}}{v_{r_i} \cdot 2} \right)^{0,5} \right] \cdot \tau_{pp_i} \cdot (1 - \Delta \bar{\tau}_{прогр}) = 0, \quad (34)$$

где $\Delta \bar{\tau}_{прогр} = 0,1 \dots 0,3$ - относительная величина времени прогрева капль в долях от суммарного времени пребывания до полного испарения τ_{pp_i} [10, 17].

Таблица 4. Средние значения теплофизических и газодинамических характеристик газового потока и капль

№ Порции топлива	$\tilde{\lambda}_{r_i}$, Вт/(м·К)	$\tilde{C}p_{r_i}$, Дж/(кг·К)	\tilde{v}_{r_i} , $\times 10^{-5}$ м ² /с	τ_{pp_i} , $\times 10^{-3}$ с	\tilde{w}_i , м/с	D_{0i} , $\times 10^{-6}$ м
1	0,05742	1096,58	8,1142	0,8742	29,74	30,79 / 26,44
2	0,06153	1114,74	9,579	1,6652	31,22	44,29 / 38,0
3	0,06857	1140,51	12,362	2,288	29,72	53,82 / 46,19
4	0,07586	1165,53	15,422	2,9486	29,166	63,27 / 54,31
5	0,0849	1184,32	17,807	3,4434	30,203	71,83 / 61,66
6	0,0928	1195,82	19,284	3,8018	31,56	78,81 / 67,63
7	0,09874	1205,09	20,472	4,158	33,19	85,03 / 72,95

Найденные таким образом значения начальных диаметров D_{0i} помещены в последний столбец 7 таблицы 4, причем, над чертой дроби – значения диаметров D_{0i} в пренебрежении временем прогрева капль, то есть при $\Delta \bar{\tau}_{прогр} = 0$; под чертой дроби – D_{0i}' - с учетом времени прогрева $\Delta \bar{\tau}_{прогр} = 0,25$. Ещё раз отметим, что D_{0i} это такие диаметры капль, которые должна создавать форсунка в момент впрыска топлива с тем, чтобы обеспечивался назначенный график выгорания топлива (рис. 1, б).

3.4.3. Определение среднего диаметра капель D_{320}

Средний диаметр капель по-Заутеру D_{320} (СДКЗ) будем определять по формуле [8]:

$$D_{320} = \frac{\sum_{i=1}^7 \Delta N_i \cdot D_{0i}^3}{\sum_{i=1}^7 \Delta N_i \cdot D_{0i}^3} = \frac{1}{\sum_{i=1}^7 \frac{\Delta G_T^{i,20p}}{D_{0i}}}_{(i+1),(i+2)}, \quad (35)$$

где $\Delta N_i = \Delta G_T^{i,20p}_{(i+1),(i+2)} \cdot G_T / (\rho_T \pi D_{0i}^3 / 6)$ - число капель в каждой порции топлива, которые, по принятому условию, сгорают на соответствующем (i,j) -ом участке жаровой трубы в соответствии с назначенным законом выгорания топлива. При подсчете D_{320} по формуле (35) величины удельного расхода сгорающего на каждом участке топлива $\Delta G_T^{i,20p}_{(i+1),(i+2)}$ берутся из столбца 4 таблицы 1, а значения D_{0i} - из столбца 7 таблицы 4. Для нашего примера имеем:

$$D_{320} = \left[\frac{0,06}{30,79} + \frac{0,18}{44,29} + \frac{0,215}{53,82} + \frac{0,245}{63,27} + \frac{0,17}{71,83} + \frac{0,105}{78,81} + \frac{0,025}{85,03} \right]^{-1} \cdot 10^{-6} \cong \\ \cong 56,0 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Таким образом, $D_{320} = 56,0$ мкм. С учетом времени прогрева капель, для которого можно принять относительную его величину, например $\Delta \bar{\tau}_{\text{прогр}} = 0,25$, значение СДКЗ получается на 14,3 % меньше и составляет $D'_{320} = 48,0$ мкм. Далее будем использовать данные по размерам капель с учетом времени их прогрева, то есть значения со штрихом сверху.

При изучении качества распыла топлива наряду с величиной среднего диаметра капель по-Заутеру (СДКЗ) используют данные о форме спектра распределения капель по размерам, а также иные по смыслу величины средних диаметров капель [10]. Определим названные характеристики.

Спектр распределения капель по размерам представляют в виде непрерывной функции или гистограммы зависимости относительного числа капель данного типа размера в факеле распыла $\Delta N_i / N$ от величины диаметров капель D_{0i} [10, 11]. Здесь N - суммарное число капель. Часто величину $\Delta N_i / N$ понимают как некоторую вероятность $P(D_i)$ присутствия в факеле распыла капель данного i -го типоразмера. Для принятой методики задания графика выгорания топлива названная вероятность или относительное число капель могут быть подсчитаны по формуле:

$$P(D_{0i}) = \frac{\Delta N_i}{\sum_i \Delta N_i} = \frac{\overline{\Delta N}}{\Delta N} = \frac{\Delta G_T^{i, \text{zop}}}{D_{0i}^3} \bigg/ \sum_{i=1}^7 \frac{\Delta G_T^{i, \text{zop}}}{D_{0i}^3}. \quad (36)$$

Для нашего примера имеем:

$$\begin{aligned} \Delta G_T^{i, \text{zop}} / D_{0i}^3 &= 0,06 / 26,44^3 = 3,2461 \cdot 10^{-6} \text{ 1/мкм}^3; \\ \Delta G_T^{i, \text{zop}} / D_{0i}^3 &= 0,18 / 38,0^3 = 3,2804 \cdot 10^{-6} \text{ 1/мкм}^3; \\ \Delta G_T^{i, \text{zop}} / D_{0i}^3 &= 0,215 / 46,19^3 = 2,1817 \cdot 10^{-6} \text{ 1/мкм}^3; \\ \Delta G_T^{i, \text{zop}} / D_{0i}^3 &= 0,245 / 54,31^3 = 1,5294 \cdot 10^{-6} \text{ 1/мкм}^3; \\ \Delta G_T^{i, \text{zop}} / D_{0i}^3 &= 0,17 / 61,66^3 = 0,7252 \cdot 10^{-6} \text{ 1/мкм}^3; \\ \Delta G_T^{i, \text{zop}} / D_{0i}^3 &= 0,105 / 67,63^3 = 0,3394 \cdot 10^{-6} \text{ 1/мкм}^3; \\ \Delta G_T^{i, \text{zop}} / D_{0i}^3 &= 0,025 / 72,95^3 = 0,0644 \cdot 10^{-6} \text{ 1/мкм}^3. \end{aligned}$$

Подсчитаем сумму этих значений, она составит

$$\sum_{i=1}^7 \Delta G_T^{i, \text{zop}} / D_{0i}^3 = 11,367 \cdot 10^{-6} \text{ 1/мкм}^3.$$

Тогда в соответствии с (36) значения функции распределения будут следующими:

$$\begin{aligned} P(D'_{01}) &= 0,2856, & P(D'_{02}) &= 0,2886, & P(D'_{03}) &= 0,1919, \\ P(D'_{04}) &= 0,1346, & P(D'_{05}) &= 0,0638, & P(D'_{06}) &= 0,0299, \end{aligned}$$

$$P(D'_{07}) = 0,00567.$$

Спектр распределения капель по размерам в виде гистограммы представлен на рисунке 3.

Подсчитаем величину среднеарифметического диаметра капель D'_{10} . Он соответствует диаметру таких капель, которых в факеле наибольшее количество.

$$D'_{10} = \sum_{i=1}^7 P(D'_{0i}) \cdot D'_{0i} = 41,06 \cdot 10^{-6} \text{ м.} \quad (37)$$

Таким образом, $D'_{10} = 41,1$ мкм (при $\Delta \bar{\tau}_{\text{прогр}} = 0,25$).

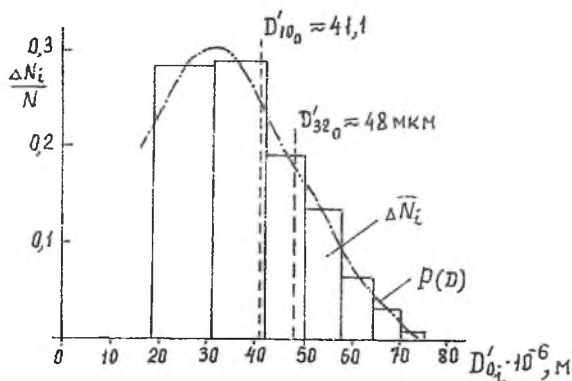


Рис. 3. Спектр распределения капель по диаметрам (предполагаемый) в факеле распыла форсунки проектируемой камеры сгорания

3.4.4. Определение параметров форсунки под требуемую величину D_{320}

Этот раздел не является разделом по проектированию форсунки. Здесь, с использованием полуэмпирической зависимости, будет произведена оценка значений только некоторых из возможных параметров и кратко рассмотрено их влияние на D_{320} .

Значение D_{320} можно оценить по обобщенной полуэмпирической зависимости из [10 - 12], подобранной для предполагаемого типа и конструкции форсунки проектируемой камеры сгорания. Предположим, что мы собираемся использовать пневматическую топливно-воздушную форсунку с предварительным созданием топливной пленки (Рис. 4). Такие форсунки были установлены на камерах сгорания гражданских ТРДД серии RB.211-22, RB.211-524 фирмы Роллс-Ройс и характеризовались высокой эффективностью. Для таких форсунок на основе обобщения большого количества экспериментальных данных получена следующая зависимость типичного вида [10 - 12]:

$$D_{32} = 3.33 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\sigma_T \rho_T D_p}{\rho_B \cdot w_B^2} \right)^{0.5} \cdot \left(1 + \frac{1}{AFR} \right) + 13 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{\mu_T^2}{\sigma_T \cdot \rho_T} \right)^{0.425} \cdot (D_p)^\chi \cdot \left(1 + \frac{1}{AFR} \right)^2, \quad (38)$$

где, соответственно: σ_T , ρ_T , μ_T - коэффициент поверхностного натяжения, плотность и коэффициент динамической вязкости топлива; ρ_B , w_B - плотность и скорость воздуха (скорость воздуха, участвующего в распыле топлива); $AFR = (G_B / G_T)_\phi$ - отношение массовых расходов воздуха, участвующего в распыле и топлива, которые проходят через форсунку; D_p - диаметр пленкообразующей поверхности - это диаметр, на котором располагается топливная пленка при выходе из форсунки на момент своего разрушения на капли.

Зависимости типа (38) встречаются в различных источниках [10 - 12], но они могут различаться в некоторых деталях и числовых коэффициентах. Поэтому перед их использованием требуется производить проверку их правильности путем сравнения рассчитываемых величин, например D_{32} , с экспериментально полученными. В частности, на основе такого анализа в данном пособии предлагается принять показатель степени χ отрицательным и определять по следующей регрессионной зависимости

$$\chi = -37,161 \cdot 10^{-3} \cdot w_B^2 + 9,481 \cdot 10^{-3} \cdot w_B - 0,7943. \quad (39)$$

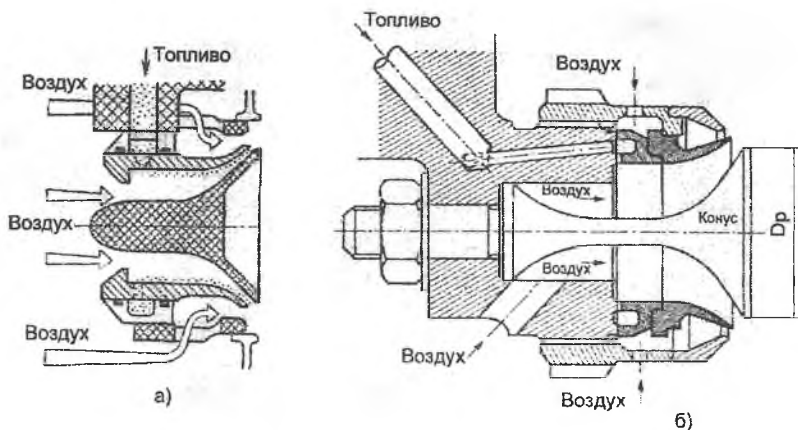


Рис. 4. Топливо-воздушная форсунка с предварительным образованием топливной пленки [11]:

а) топливная форсунка двигателей RB.211;

б) модельная форсунка для исследований качества распыла топлива.

Отрицательность значения χ отражает тот факт, что с увеличением диаметра пленкообразующей поверхности толщина топливной пленки перед разрушением должна уменьшаться, что должно приводить к уменьшению диаметров образующихся капель [10, 17].

Для керосина типа ТС-1 при его температуре поступления в камеру сгорания двигателя $t_T = +60^\circ\text{C}$ по справочнику [16] определим:

$$\sigma_T = 21,06 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}, \quad \rho_T = 784 \text{ кг/м}^3, \quad \mu_T = 0,602 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}.$$

Для воздуха из первой части курсового проекта имеем:

$$\rho_B = 10,9 \text{ кг/м}^3, \quad w_B = 90 \text{ м/с}.$$

Примем в первом приближении, что диаметр пленкообразующей поверхности составляет примерно 0,5 от шага между форсунками, то есть $D_p = 37,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Если предположить возможность предельного случая, что весь воздух, проходящий через фронтное устройство камеры сгорания активно участвует

в распыле топлива, то легко показать, что максимальная величина $AFR = \Delta G'_{\phi p} \cdot \alpha_K L_n$ для нашего случая составит 9,6. Однако, из опытных данных по пневматическому распылу топлива известно [10 - 12], что при увеличении AFR , начиная с $AFR = 4,5 \dots 5,5$, размеры капель практически не уменьшаются, то есть не целесообразно делать AFR больше указанных значений. Оставшийся воздух, проходящий через фронтное устройство, некоторой своей частью должен быть направлен на обеспечение перемешивания образующейся горячей смеси в первичной зоне горения.

Рассмотрим несколько примеров подбора перечисленных параметров форсунки.

Пример 1. Решая уравнение (38) относительно AFR с использованием принятых значений физических параметров, для заданной потребной величины $D'_{320} = 48,02$ мкм, получим $AFR = 3,265$, что лежит в отмеченном выше диапазоне.

Пример 2. (продолжение примера 1) В более широком диапазоне значений рассматривается влияние скорости активного воздуха w_B и диаметра пленкообразующей поверхности D_p на потребную величину отношения воздух/топливо AFR в форсунке. Полученные значения AFR для обеспечения, как и в примере 1, $D'_{320} = 48,02$ мкм представлены в таблице 5.

Таблица 5

Скорость воздуха w_B , м/с	$D_p = 30 \cdot 10^{-3}$ м	$D_p = 40 \cdot 10^{-3}$ м
100	1,834	1,8
80	2,65	2,555
60	6,24	5,596

Из данных таблицы 5 видно:

1) При уменьшении скорости активного воздуха w_B , участвующего в распыле топлива, со 100 м/с до 60 м/с потребное относительное его количество увеличивается, в частности при $D_p = 30 \cdot 10^{-3}$ м, с $AFR = 1,834$ до $AFR = 6,24$. Это объясняется тем, что с уменьшением скорости воздуха его

аэродинамическое воздействие ослабевает и для достижения той же мелкости капель требуется большее его количество.

2) Если увеличить диаметр пленкообразующей поверхности с $D_p = 30 \cdot 10^{-3}$ м до $40 \cdot 10^{-3}$ м, то при тех же условиях потребная величина AFR оказывается меньше. Это объясняется тем, что с увеличением диаметра пленкообразующей поверхности толщина топливной пленки на момент её разрушения воздухом оказывается меньше и потребное количество активного воздуха для получения таких же по диаметру капель снижается.

3) Из зависимости (39) видно, что с уменьшением скорости активного воздуха влияние изменения диаметра пленкообразующей поверхности на величину среднего диаметра капель усиливается.

На этом заканчивается Часть III курсового проектирования камеры сгорания ГТД.

В расчетно-пояснительной записке должны быть представлены расчеты и пояснения к ним в соответствии с изложенным содержанием данной части, а также необходимые рисунки 1-4 и таблицы 1-4. Дополнительные материалы и результаты по форсунке включаются в РПЗ по согласованию с руководителем задания.

Заключение

Разработанная методика позволяет на стадии начального проектирования камеры сгорания произвести её тепловой и гидравлический расчет. В результате становятся известными среднemasсовые температуры газа по длине жаровой трубы. Это может быть использовано на следующем этапе проектирования камеры с целью определения температуры стенки жаровой трубы. Результаты Части III могут быть также использованы для последующего расчета радиальной температуры на выходе из камеры сгорания.

Результаты произведенного расчета могут быть уточнены учетом неравномерности распределения топлива по участкам жаровой трубы путем введения в расчет специальной функции распределения топлива (см. комментарии в п. 1.10). Однако это приведет к существенному усложнению уравнений теплового баланса. Поэтому данный шаг может быть рекомендован только для дипломного проектирования камеры сгорания.

Произведенные оценки потребной величины D_{32} носят ориентировочный характер, так как при проектировании требуется учитывать большее число конструктивных и режимных факторов. Однако приведенный пример расчета для пневматической форсунки с предварительным образованием топливной пленки преследует методическую цель, так как позволяет уточнить распределение воздуха во фронтном устройстве жаровой трубы.

Выполненные расчеты могут быть использованы для сверки их с результатами численного моделирования рабочего процесса в камере сгорания ГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. / Пер. с англ. Г.Л.Агафонова. Под ред. П.А.Власова. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. -352с.
2. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. –М.: Госиздат. физ.-мат. лит-ры, 1963.-708с.
3. Диденко А.А. Теория и расчет камер сгорания ВРД. Часть II. Оценка экологических показателей камер сгорания ГТД. [Учебн. пособие] – Самара: Изд-во Самар. Гос. Аэрокосм. ун-та, 2010. -53с. (в печати)
4. Инженерные основы проектирования камер сгорания ГТД. [Учебн. пособие] / В.Е. Резник, В.П. Данильченко, Ю.Л. Ковылов, С.В. Лукачев. – Куйбышев: КуАИ, 1981. -80с.
5. Камеры сгорания. Глава 1 в кн.: Проектирование авиационных газотурбинных двигателей. / В.П. Данильченко, С.В. Лукачев, Ю.Л.Ковылов и др. –Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2008.–С.12-260.
6. Камеры сгорания. Глава 4 в кн.: Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. Кн. 1. Основы теории ГТД. Рабочий процесс и термогазодинамический анализ: [Учебн. по специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки»] / В.В. Кулагин. –М.: Машиностроение, 2002. -616с.
7. Камеры сгорания воздушно-реактивных двигателей. Глава 4 в кн.: Теория воздушно-реактивных двигателей. [Учебн. для вузов, 2-е изд.] / Под ред. С.М. Шляхтенко : –М.: Машиностроение, 1987. -568с.
8. Кирьянов Д.В. MathCAD 14. –СПб.: БХВ-Петербург, 2007. -704с.
9. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. –М.: Машиностроение, 1984. -280с.
10. Лефевр А.Х. Процессы в камерах сгорания ГТД: Пер. с англ. –М.: Мир, 1986.-566с.
11. Lefebvre A.H. Airblast atomization. // Progress in Enregy and Combustion Science. -1980. -Vol. 6. pp. 233-261.

12. Rizkalla A.A., Lefebvre A.H. Влияние свойств воздуха и жидкости на распыливание воздушным потоком. // Труды Американского общества инженеров-механиков. Сер.D.-1975.-№3.-С.134-138.

13. Термогазодинамический расчет газотурбинных силовых установок. /Дорофеев В.М., Маслов В.Г., Первышин И.В., Сватенко С.А., Фишбейн Б.Д. –М.: Машиностроение, 1973. -144с.

14. Турбулентные течения реагирующих газов. / Под ред. П.Либби, Ф.Вильямса // Перев. с англ. под ред. Г.А.Тирского. –М.: Мир, 1983. -461с.

15. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ. / Справочник.-М.: Атомиздат, 1979.-216с.

16. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив: Справочник /Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Сассур Ю.П., Федоров Е.П. –М.: Химия, 1985. -240с.

17. Физические основы рабочего процесса камер сгорания ВРД / Раушенбах Б.В., Белый С.А., Беспалый М.В. и др. Под ред. Б.В.Раушенбаха. –М.: Машиностроение, 1964.-526с.

18. Харитонов В.Ф. Определение основных размеров камеры сгорания ГТУ: Методические указания к курсовому и дипломному проектированию по специальности 130200 «Авиационные двигатели и энергетические установки». / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. –Уфа.: Изд-во УГАТУ, 1997. -30с.

Учебное издание

Диденко Алексей Александрович

**ТЕОРИЯ И РАСЧЕТ КАМЕР СГОРАНИЯ ВРД
Часть III. ТЕПЛОВОЙ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТЫ
КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТД**

Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования

Подписано в печать 02.02.2012. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 3,5.

Тираж 100 экз. Заказ 7.

Самарский государственный аэрокосмический
университет им. академика С.П. Королёва.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.