

ким образом, к. п. д. идеального цикла совпадает с термическим к. п. д. η_t , введенным ранее при установлении систем к. п. д. двигателя.

Для идеального цикла величина к. п. д. может быть записана в виде отношения работы цикла к количеству тепла, затрачиваемого на получение этой работы, т. е. ко всему теплу, подведенному к рабочему телу

$$\eta_t = \frac{AL_{\text{ц}}}{Q_{\text{подв}}} \quad (\text{IV. 16})$$

По закону сохранения энергии

$$AL_{\text{ц}} = Q_{\text{подв}} - Q_{\text{отв}}, \quad (\text{IV. 17})$$

где $Q_{\text{отв}}$ — количество тепла, отводимого от газа в процессе совершения цикла.

Тогда выражение для термического к. п. д. примет вид

$$\eta_t = \frac{Q_{\text{подв}} - Q_{\text{отв}}}{Q_{\text{подв}}} = 1 - \frac{Q_{\text{отв}}}{Q_{\text{подв}}} \quad (\text{IV. 18})$$

Выразим количество подведенного и отведенного тепла через температуры характерных точек идеального цикла (см. фиг. 47) и теплоемкости, которые будем считать постоянными и не зависящими от температуры.

Тепло от рабочего тела в идеальном цикле отводится в двух процессах $3d$ и de .

Процесс $3d$ протекает при постоянном объеме, и тепло Q_1 , отводимое в этом случае, будет равно $c_v(T_3 - T_d)$. Другая часть тепла Q_2 отводится при постоянном давлении и составит $c_p(T_d - T_1)$.

Тогда

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{отв}} &= Q_1 + Q_2 = c_v(T_3 - T_d) + c_p(T_d - T_1); \\ Q_{\text{подв}} &= c_p(T_2 - T_1). \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV. 19})$$

Так как в идеальном цикле T_e и T_1 равны нулю, то

$$Q_{\text{отв}} = c_v(T_3 - T_d) + c_p T_d, \quad Q_{\text{подв}} = c_p T_2. \quad (\text{IV. 20})$$

Температуры, входящие в эти соотношения, выразим через температуру в камере T_2 по уравнениям адиабатического и изохорического процессов

$$\left. \begin{aligned} T_3 &= T_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \\ T_d &= \frac{p_H T_3}{p_3} = \frac{p_H}{p_3} T_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV. 21})$$

Подставив указанные значения температур в выражение для термического к. п. д. (IV. 18), получим

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2 \left[c_v \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - c_v \frac{p_H}{p_3} \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} + c_p \frac{p_H}{p_3} \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}{c_p T_2}. \quad (\text{IV. 22})$$

Введя отношение $\frac{c_p}{c_v} = k$ и обозначив

$$\frac{p_3}{p_2} = \delta \text{ и } \frac{p_H}{p_2} = \varepsilon, \quad (\text{IV. 23})$$

после сокращения на T_2 и несложных преобразований получим

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{k} \delta^{\frac{k-1}{k}} \left[(k-1) \frac{\varepsilon}{\delta} + 1 \right]. \quad (\text{IV. 24})$$

Величину $\frac{p_3}{p_2} = \delta$ будем называть *степенью расширения газа в сопле*, так как она характеризует количественно перепад давлений в процессе расширения. Величина $\frac{p_H}{p_2} = \varepsilon$ определяет предел возможного расширения газа в двигателе; назовем ее *степенью возможного расширения*.

Полученное выражение для термического к. п. д. показывает, что величина его зависит от трех параметров: степени расширения в сопле δ , степени возможного расширения ε и показателя адиабаты продуктов сгорания k .

Термический к. п. д. цикла двигателя, работающего на расчетном режиме

Расчетным режимом работы двигателя называется такой режим, когда давление на срезе сопла p_3 равно давлению в атмосфере p_H .

$$p_3 = p_H.$$

При этом в соответствии с формулами (IV. 23) степень возможного расширения ε равна степени расширения в сопле δ , а выражение для термического к. п. д. на расчетном режиме $\eta_{t \text{ расч}}$ за счет того, что $\varepsilon = \delta$, примет более простой вид,

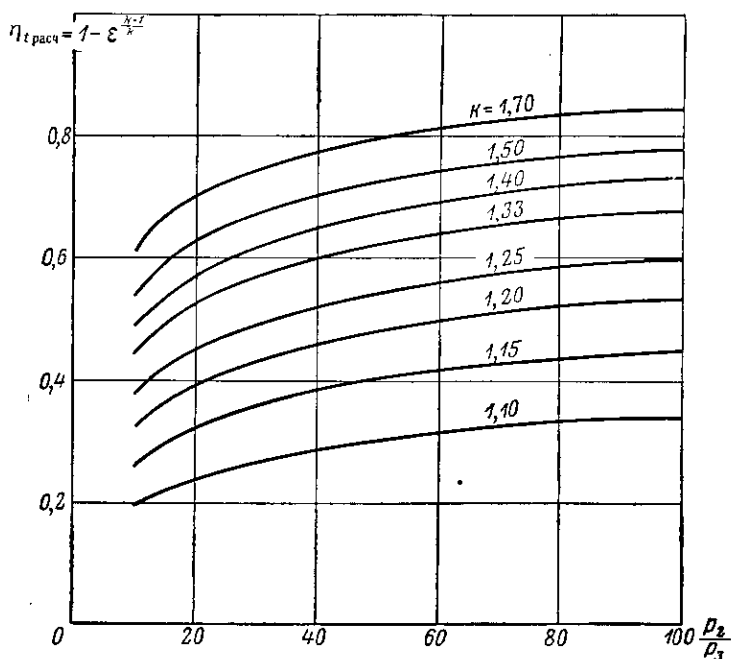
$$\eta_{t \text{ расч}} = 1 - \delta^{\frac{k-1}{k}} = 1 - \varepsilon^{\frac{k-1}{k}}. \quad (\text{IV. 25})$$

Изменение термического к. п. д. двигателя, работающего на расчетном режиме, в зависимости от величины δ или обратной ей величины отношения давлений $\frac{p_2}{p_3} = \frac{1}{\delta}$, а также от величины показателя адиабаты расширения k приведено на фиг. 49.

Данные этого графика показывают, что термический к. п. д. может изменяться в широких пределах от нуля до единицы, быстро возрастая при малых значениях отношения $\frac{P_2}{P_3}$ и затем все более медленно приближаясь к значению $\eta_t = 1$ при дальнейшем увеличении этого отношения.

Термический к. п. д. зависит также от величины показателя адиабаты продуктов сгорания k . Большие значения k дают больший термический к. п. д. двигателя, особенно при значительных отношениях давления в камере к давлению на срезе (см. фиг. 49).

Как известно, величина k зависит от состава продуктов сгорания, а значение ее увеличивается для одноатомных и легких газов, поэтому применение продуктов сгорания, состоящих из одноатомных или вообще легких газов, увеличивает при прочих равных условиях термический к. п. д.



Фиг. 49. Зависимость термического к. п. д. двигателя, работающего на расчетном режиме $\eta_{t \text{ расч}}$ от отношения $\frac{P_2}{P_3}$ и k .

Как показывает соотношение (III.65) и графики на фиг. 45, величина степени расширения в сопле δ зависит в основном от отношения площадей выходного и критического сечений сопла. Поэтому стремление получить высокие значения термического к. п. д. и удельной тяги двигателя путем уменьшения величины $\delta = \frac{P_2}{P_3}$

приводит к увеличению отношения $\frac{f_3}{f_{кр}}$. Таким образом, конструкция сопла камеры двигателя ставит предел возможности уменьшения δ .

Известные двигатели не имеют значений δ , меньших чем $\frac{1}{40}$.

Прежде чем перейти к анализу изменения η_i при нерасчетных режимах работы двигателя, рассмотрим, как возникают эти нерасчетные режимы.

§ 21. НЕРАСЧЕТНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЖРД

Возможность возникновения нерасчетных режимов работы двигателя

Большинство современных ЖРД имеет так называемое *постоянное сопло*, т. е. сопло с постоянными величинами критического и выходного сечений, а следовательно, и с постоянным их отношением $\frac{f_3}{f_{кр}}$. Для таких сопел характерны следующие основные особенности.

Из формулы (III. 65) видно, что при $\frac{f_3}{f_{кр}} = \text{const}$ и при неизменном показателе адиабаты расширения k (т. е. при неизменном топливе) степень расширения в сопле $\delta = \frac{p_3}{p_2}$ остается неизменной.

Таким образом, независимо от расхода топлива, давлений в камере сгорания p_2 и окружающей среде p_H , температуры на входе в сопло T_2 , отношение $\frac{p_3}{p_2}$ остается постоянным.

В соответствии с уравнениями (III. 13) и (IV. 23) скорость на выходе из сопла w_3 будет равна

$$w_3 = \sqrt{2g \frac{k}{k-1} RT_2 \left(1 - \delta^{\frac{k-1}{k}}\right)}. \quad (\text{IV. 26})$$

Итак, при неизменном составе продуктов в камере сгорания (т. е. при постоянных температуре и показателе адиабаты) скорость на выходе из сопла остается неизменной независимо от давления в камере сгорания, расхода топлива и давления окружающей среды (т. е. высоты работы ЖРД).

Так как при работе ЖРД степень расширения $\delta = \frac{p_3}{p_2}$ остается неизменной, то при постоянном сопле давление на срезе сопла p_3 зависит только от давления в камере сгорания p_2 и не зависит от давления окружающей среды p_H .

В зависимости от давления в камере сгорания p_2 и от давления окружающей среды p_H (т. е. от высоты полета) возможны три случая работы сопла ЖРД.

1) $p_3 = p_H$, т. е. давление на срезе сопла равно давлению окружающей среды. Это *расчетный режим* работы двигателя.

2) $p_3 > p_H$, т. е. продукты сгорания расширяются в сопле не до давления окружающей среды p_H , а только до давления p_3 , большего, чем давление p_H . Такой режим работы называется *режимом недорасширения*.

3) $p_3 < p_H$, т. е. продукты сгорания расширяются в сопле до давления, меньшего, чем давлении окружающей среды. Такой режим называется *режимом перерасширения*.

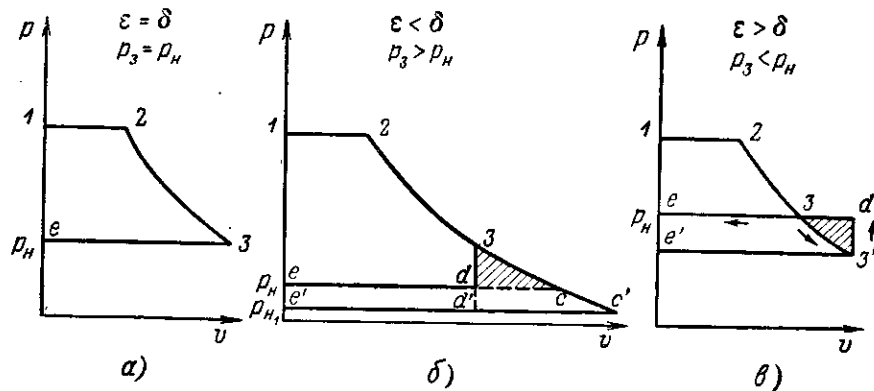
Как будет показано ниже, такой режим часто наблюдается при работе ЖРД.

Режимы перерасширения и недорасширения возникают при изменении высоты работы двигателя и при регулировании его тяги.

Рассмотрим оба эти случая.

Возникновение нерасчетных режимов при изменении высоты работы двигателя

Рассмотрим, как возникают нерасчетные режимы при работе двигателя с постоянным соплом, если расход топлива G и его состав (т. е. величина H_u) остаются постоянными, а изменяется только высота работы двигателя H .



Фиг. 50. Работа двигателя на различных высотах.

а — расчетная высота; б — высота больше расчетной (недорасширение); в — высота меньше расчетной (перерасширение).

В этом случае давление в камере сгорания p_2 , независимо от изменения давления окружающей среды, будет оставаться постоянным. Это легко показать, воспользовавшись уравнением (III. 63).

$$p_2 = \frac{G}{f_{кр}} \frac{\sqrt{RT_2}}{A_n} = \text{const.}$$

Так как для смеси постоянного состава ($H_u = \text{const}$) температура T_2 и состав продуктов сгорания R неизменны, то и давление p_2 в этом случае останется неизменным.

Так как $\delta = \text{const}$, то и давление на срезе сопла $p_3 = \delta p_2 = \text{const}$. Таким образом, давление на срезе сопла не зависит от высоты

работы двигателя и может быть как больше, так и меньше давления в окружающей среде в зависимости от того, как выбран расчетный режим двигателя.

На фиг. 50 показаны циклы двигателя, работающего на расчетном и нерасчетных режимах.

При работе на земле этот двигатель будет работать с перерасширением, а на высотах, больших, чем расчетные, с недорасширением.

Увеличение высоты работы двигателя приводит в этом случае к постоянному возрастанию абсолютной силы тяги за счет увеличения статической составляющей ее $f_3(p_3 - p_H)$.

Но на высотах, меньших расчетной, и на высотах, больших расчетной, двигатель с постоянным соплом не дает максимальной тяги, возможной для данных условий работы его.

Пределы изменения степени возможного расширения для двигателя с постоянным расходом изменяются от наибольшего значения, которую степень возможного расширения имеет на земле,

т. е. $\epsilon_{\max} = \frac{p_0}{p_2}$, до нуля при работе в пустоте, где $p_H \rightarrow 0$, а следовательно, и $\epsilon \rightarrow 0$.

Возникновение нерасчетных режимов при регулировании тяги ЖРД

Условия работы двигателя на некоторых летательных аппаратах, например на самолетах и зенитных ракетах, требуют изменения тяги двигателя при полете. Так, для самолетных ЖРД требуется изменять величину тяги двигателя в 8—10 раз.

Воспользовавшись уравнениями (IV. 10) и (IV. 5), связывающими удельную тягу с работой цикла, мы можем написать, что полная тяга двигателя равна (в случае идеального цикла $\eta_{\text{ц}} = \eta_i$)

$$P = P_{\text{уд}} G = G \sqrt{\frac{2}{gA} H_{\text{и}} \eta_{\text{ц}}}. \quad (\text{IV. 27})$$

Это выражение показывает, что для получения той или иной тяги двигателя (данного или вновь проектируемого) можно идти двумя путями: изменением теплотворной способности топлива $H_{\text{и}}$ и изменением секундного расхода его G .

Изменение теплотворной способности $H_{\text{и}}$ данного топлива, на котором работает двигатель, можно проводить изменением соотношения компонентов. Изменение теплотворной способности топлива в этом случае происходит только в сторону уменьшения ее, в результате отклонения от такого соотношения компонентов, которое необходимо для полного сгорания топлива.

Такой путь изменения теплотворной способности является нерациональным, так как приводит к уменьшению удельной тяги двигателя за счет худшего преобразования химической энергии в тепловую. Изменять тягу ЖРД следует путем изменения секундного расхода топлива при постоянном $H_{\text{и}}$. Учитывать изменение

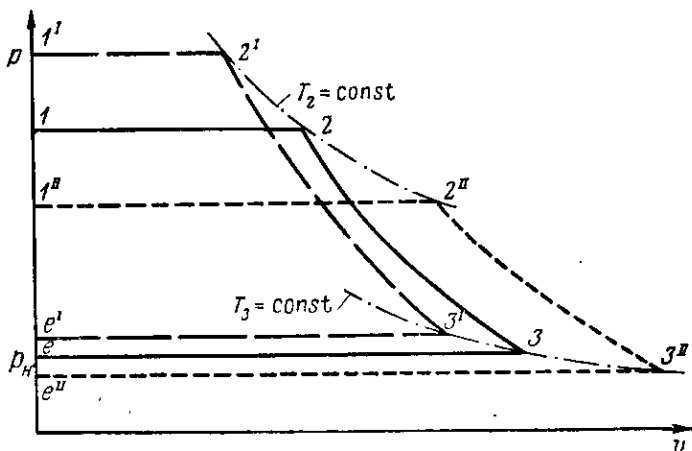
величины H_u следует при рассмотрении двигателей, работающих на различных топливах.

Установить влияние изменения расхода на работу ЖРД проще всего по формуле (III. 63).

$$p_2 = \frac{G}{f_{кр}} \frac{\sqrt{RT_2}}{A_n}$$

Так как температура сгорания данного топлива и состав продуктов сгорания, определяющий величину газовой постоянной R , остаются неизменными, то давление в камере сгорания прямо пропорционально расходу топлива.

Так, например, при уменьшении тяги P авиационного ЖРД в 10 раз расход топлива G уменьшится также примерно в 10 раз,



Фиг. 51. Изменение цикла двигателя с постоянным соплом при изменении расхода топлива.

123e — исходный цикл; 1^I 2^I 3^I e^I — увеличенный расход топлива; 1^{II} 2^{II} 3^{II} e^{II} — уменьшенный расход топлива.

а следовательно, по формуле (III. 63) давление в камере p_2 уменьшится тоже в 10 раз.

В двигателе с постоянным соплом ($\delta = const$) давление на срезе сопла, равное $p_3 = \delta p_2$, будет уменьшаться так же, как и давление в камере, т. е. прямо пропорционально уменьшению расхода, и в нашем примере также уменьшится в 10 раз.

Следовательно, при изменении расхода G , если высота работы двигателя остается постоянной, возможен случай возникновения режима перерасширения $p_3 < p_H$ при уменьшении расхода топлива и режима недорасширения $p_3 > p_H$ при увеличении его.

При изменении расхода изменяется также и вид идеального цикла ЖРД.

На фиг. 51 приведено изменение основного цикла 123e при увеличении расхода на 25% — цикл 1^I2^I3^Ie^I и при уменьшении

расхода на 25% — цикл $1'' 2'' 3'' e''$. Так как температура $T_2 = \frac{H_u}{c_p}$ в идеальном цикле не зависит от давления, то точки 2 для всех циклов лежат на одной изотерме T_2 .

При постоянном сопле $\delta = \text{const}$, а следовательно, и температура на срезе $T_3 = T_2 \delta^{\frac{k-1}{k}}$ остается постоянной и все точки 3, 3^I и 3^I также лежат на одной изотерме T_3 .

Скорость истечения во всех трех случаях остается неизменной (так как двигатель имеет постоянное сопло), а удельная тяга двигателя изменяется только за счет изменения давления p_3 на срезе сопла.

Одновременно с изменением давления в камере p_2 изменится и степень возможного расширения. Величина максимальной степени возможного расширения $\varepsilon = \frac{p_H}{p_2}$ получится при минимальном расходе топлива, когда давление в камере p_2 будет иметь наименьшее значение.

Наименьшее значение степень возможного расширения имеет при максимально возможном для данного двигателя расходе топлива. Разность между наибольшим и наименьшим значениями ε определяется пределами регулирования расхода.

Возможность существования режима перерасширения

Возможность работы двигателя на режиме недорасширения $p_3 > p_H$ является очевидной. В то же время возможность истечения газа из сопла в среду с давлением, большим, чем давление в потоке на срезе сопла, не является очевидной.

Действительно, на ранней стадии развития науки об истечении из сверхзвуковых сопел считалось, что на нерасчетном режиме, когда давление на срезе сопла должно быть меньшим, чем давление в окружающей среде, поток газа отрывается от стенок сопла в том сечении его, где давление в потоке становится равным атмосферному. Оставшаяся часть сопла перестает работать и может влиять на поток только в том смысле, что она благоприятствует образованию вихрей. Таким образом, считалось, что сопло на этих режимах является саморегулирующимся.

Однако, как показали более поздние эксперименты на соплах турбин и опыты на соплах жидкостных ракетных двигателей, в действительности поток, текущий по сверхзвуковому соплу, продолжает расширяться, не отрываясь от стенок и до давлений, меньших, чем давление окружающей среды. Только после входа в атмосферу с повышенным давлением сверхзвуковой поток скачком или системой скачков переходит в дозвуковой поток с соответствующим изменением давления в нем. В этом проявляются особенности сверхзвукового течения, описанные в § 16.

Возможность работы двигателя на режиме перерасширения можно установить не только экспериментально, но и исходя из основных свойств сверхзвукового потока.

Представим себе мысленно следующий опыт. Газ из сопла вытекает в полость, где разрежение создается насосом. С уменьшением производительности насоса давление в полости за соплом будет увеличиваться. Однако изменение давления за соплом не может привести к изменению характера течения газа в сверхзвуковом сопле. Возмущение (увеличение давления) за соплом может распространяться по газу, текущему по соплу только со звуковой скоростью, а сам он движется со сверхзвуковой скоростью. Следовательно, повышение давления за соплом не сможет повлиять на течение газа.

Рассмотренный нами пример работы двигателя совершенно аналогичен изменению высоты, на которой работает двигатель. Он объясняет и то кажущееся на первый взгляд несколько странным явление, что давление в камере сгорания не зависит от давления в окружающей среде. Отметим только, что этот вывод действителен исключительно для звуковых и сверхзвуковых сопел.

Экспериментальные исследования работы сопла в условиях перерасширения показали, однако, что работа сопла на этом режиме возможна только до определенных минимальных давлений на срезе сопла. Считают, что при падении давления на срезе сопла до величины, меньшей, чем $0,4 \div 0,2$ от давления в окружающей среде, нормальный режим перерасширения нарушается, происходит отрыв потока от стенок сопла и часть сопла становится неработающей. Естественно, что все наши формулы, выведенные из условий, что работает все сопло, перестают быть с этого момента годными, так как становится неопределенным сечение сопла, в котором происходит отрыв потока.

§ 22. ТЕРМИЧЕСКИЙ К. П. Д. ЖРД С ПОСТОЯННЫМ СОПЛОМ НА НЕРАСЧЕТНЫХ РЕЖИМАХ

Потеря работы при нерасчетных режимах

Как было показано выше, двигатель может работать на нерасчетных режимах двух типов: на режиме недорасширения, когда давление на срезе сопла больше давления в окружающей среде, т. е. $p_3 > p_H$, и на режиме перерасширения, когда давление на срезе сопла меньше давления в окружающей среде, т. е. $p_3 < p_H$.

Работа двигателя на нерасчетных режимах иллюстрируется рисунками на фиг. 50, относящимися к работе двигателя при одних и тех же начальных условиях на входе в сопло.

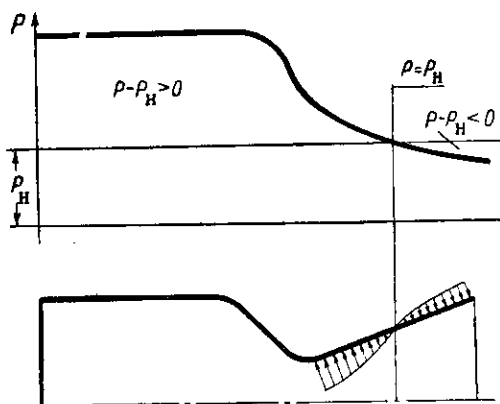
При недорасширении из-за малого выходного сечения сопла не используется возможность расширения продуктов сгорания от давления в камере до давления в атмосфере, и цикл, соответствующий данному случаю, получит вид, представленный на фиг. 50,б. При этом работа цикла при недорасширении будет меньше, чем она была бы при расширении до давления, равного давлению окружающей среды, на величину площади Zcd , которая и выражает собой потерю на недорасширение.

Ухудшится при этом и термический к. п. д. идеального цикла η_i , равный $\frac{AL_{ц}}{H_u}$.

При увеличении недорасширения, например при понижении давления окружающей среды до p_{H1} , работа цикла увеличится, но и потеря за счет недорасширения увеличится и будет определяться площадью $3c'd'$.

При этом термический к. п. д. идеального цикла η_i^{II} возрастет по сравнению с η_i^I , но будет меньше, чем он был бы при полном расширении до $p=p_H$.

Цикл при условиях перерасширения приведен на фиг. 50, в. Как видно из диаграммы этого цикла, в случае перерасширения возникает отрицательная работа цикла, выражаемая площадью $ee'3'd$, которая вычитается из положительной площади цикла $123'e'$. При этом работа цикла в случае перерасширения меньше работы цикла на расчетном режиме на величину площади $33'd$.



Фиг. 52. Влияние перерасширения на тягу двигателя.

Отрицательное влияние перерасширения на работу ракетного двигателя, приводящее к уменьшению удельной тяги, легко показать также следующим образом.

На фиг. 52 приведен график распределения разности внутреннего давления p и наружного (постоянного) давления p_H по длине сопла двигателя.

Как легко видеть, при возникновении режима перерасширения разность давлений за сечением, где $p=p_H$, становится отрицательной, т. е. дает составляющую, направленную против силы тяги. Это и приводит к уменьшению тяги и удельной тяги.

Термический к. п. д. идеального цикла, равный $\frac{AL_{ц}}{H_u}$, при этом будет меньше, чем он получился бы при расширении до давления в окружающей среде.

Так как работа цикла и при недорасширении и при перерасширении меньше, чем работа его на соответствующем расчетном режиме, то всегда наиболее выгодной будет работа двигателя на расчетном режиме.

При этом термический к. п. д., являющийся отношением $AL_{ц}$ к одной и той же для всех рассматриваемых случаев величине H_u ,

будет также иметь наибольшую величину при работе двигателя на соответствующем расчетном режиме. Поэтому для получения максимальной величины удельной тяги желательнее, чтобы двигатель всегда работал на расчетных режимах.

Изменение η_t двигателя с постоянным соплом при изменении ϵ

Раньше было показано, что при изменении высоты и при изменении расхода топлива происходит изменение степени возможного расширения ϵ без изменения степени расширения в сопле δ . Поэтому следует рассмотреть изменение η_t двигателя именно при этих условиях. С этой целью преобразуем формулу (IV. 24)

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{k} \delta^{\frac{k-1}{k}} \left[(k-1) \frac{\epsilon}{\delta} + 1 \right]$$

к следующему виду:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{k} \delta^{\frac{k-1}{k}} - \delta^{-\frac{1}{k}} \frac{k-1}{k} \epsilon = A - B\epsilon, \quad (\text{IV. 28})$$

где

$$\left. \begin{aligned} A &= 1 - \frac{1}{k} \delta^{\frac{k-1}{k}}; \\ B &= \delta^{-\frac{1}{k}} \frac{k-1}{k}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{IV. 29})$$

Полученное соотношение свидетельствует о том, что зависимость η_t от ϵ для двигателя с постоянным соплом является линейной. Максимальное значение к. п. д. будет иметь место при $\epsilon \rightarrow 0$, т. е. на больших высотах. Это максимальное значение к. п. д. возрастает с уменьшением степени расширения в сопле. Однако уменьшение δ приводит к более резкой зависимости термического к. п. д. от величины ϵ , так как при этом возрастает значение коэффициента B . Такое сопло будет, очевидно, более чувствительным к изменению величины ϵ (высоты или расхода топлива).

В качестве примера влияния степени расширения сопла на зависимость термического к. п. д. от ϵ рассмотрим два случая: пусть сопло *I* имеет $\delta^I = 0,02$; сопло *II* имеет $\delta^{II} = 0,10$; соответствующие формулы для термического к. п. д. при $k=1,25$ примут вид

$$\eta_t^I = 0,635 - 4,5\epsilon;$$

$$\eta_t^{II} = 0,495 - 1,26\epsilon.$$

Значения η_t , вычисленные по этим формулам, приведены на графиках фиг. 53.

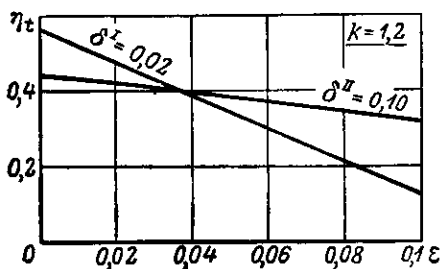
Из фиг. 53 мы видим, что линия $\eta_t = f(\varepsilon)$ сопла с $\delta = 0,02$ проходит более круто, чем η_t сопла с $\delta = 0,10$, т. е. сопло I, имеющее меньшую степень расширения, более чувствительно к изменению ε .

Выявленная здесь зависимость η_t от параметров работы двигателя свидетельствует о необходимости внимательного выбора степени расширения сопла, если параметры работы двигателя (расход, высота работы) будут переменными.

При этом сопла с малыми степенями расширения δ , т. е. с большим отношением $\frac{f_3}{f_{кр}}$, являются более чувствительными

к изменению условий работы двигателя и выбор размеров таких сопел в зависимости от условий работы следует производить наиболее тщательно.

Так как время работы на различных режимах по тяге и высоте зависит в основном от траектории полета того или иного реактивного аппарата, то выбор размеров постоянного сопла можно производить только для конкретного реактивного аппарата.



Фиг. 53. Зависимость термического к. п. д. η_t от степени возможного расширения ε и степени расширения в сопле δ .

§ 23. РЕГУЛИРОВАНИЕ СОПЛА ЖРД

Раньше было показано, что жидкостный ракетный двигатель легко попадает в нерасчетные условия работы, что приводит к ухудшению использования энергии в двигателе. В связи с этим возникает вопрос о способах регулирования сопла двигателя с целью сохранения при всех условиях его работы расчетного режима или, во всяком случае, обеспечения возможно большего приближения действительного режима сопла к расчетному.

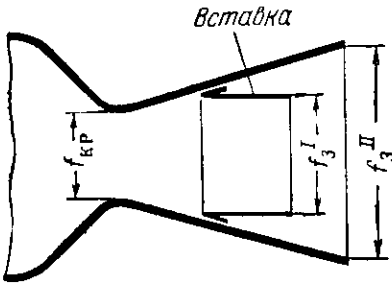
При изменении высоты и при изменении тяги двигателя путем изменения расхода топлива требуются различные способы регулирования сопла.

Регулирование сопла при изменении высоты

Если двигатель работает при постоянном расходе топлива, но на различных высотах, то регулированию подлежит только выходное сечение сопла, с целью сохранения на всех высотах давления на срезе сопла, равного давлению окружающей атмосферы. При этом с подъемом на высоту выходное сечение должно увеличиваться. Такая механизация сопла в ЖРД чрезвычайно затруднена, так как при высоких температурах стенок сопла трудно обеспечить работу подвижных механических деталей, которые можно было бы использовать для изменения выходного сечения.

Значительно проще выполнить сопло, имеющее две степени расширения, по схеме, приведенной на фиг. 54.

При работе на малых высотах поток газа выбрасывается через цилиндрическую вставку с площадью $f_3^I < f_3^{II}$, которая обеспечивает небольшой перепад давлений, соответствующий относительно высокому давлению в окружающей среде. По мере подъема на высоту двигатель со вставкой будет работать в условиях все возрастающего недорасширения, и когда, наконец, это недорасширение станет невыгодным, вставка выбрасывается и сопло начинает работать с использованием всего выходного сечения f_3^{II} .



Фиг. 54. Схема сопла со вставкой.

Высота, на которой необходимо выбросить вставку, легко может быть найдена, если воспользоваться графиком зависимости термического к. п. д. от высоты. При заданном давлении в камере увеличение высоты соответствует уменьшению ϵ . Высота выброса вставки определится той высотой, на которой происходит пересечение кривых изменения η_t для двигателей с двумя значениями δ^I и δ^{II} , соответствующими f_3^I и f_3^{II} .

Регулирование сопла при изменении тяги двигателя путем изменения расхода

Двигатели, работающие с переменной тягой на одной высоте полета, требуют другого способа регулирования. Первая задача регулирования таких двигателей состоит в том, чтобы поддерживать более или менее постоянным давление в камере, так как значительное понижение давления в ней приводит к ухудшению процесса сгорания и возможности возникновения неустойчивого режима сгорания и даже затуханию камеры.

Поэтому, если двигатель работает при переменном расходе топлива, то для поддержания постоянного давления в камере надо соответственно расходу изменять величину критического сечения. Изменение критического сечения можно производить при помощи профилированной иглы, перемещающейся в сопле вдоль оси двигателя (фиг. 55).

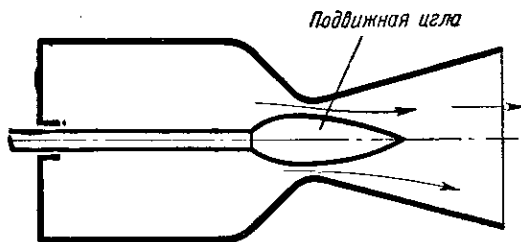
Если регулирующая игла не доходит до выходного сечения, то изменяется только величина критического сечения, а выходное сечение остается прежним, вследствие чего резкому колебанию подвержена степень уширения сопла. При работе двигателя на постоянной высоте это приводит к перерасширению в сопле.

Отсюда возникает вторая задача такого регулирования сопла двигателя, при котором одновременно с изменением критического сечения изменяется и выходное сечение. Они изменяются так, что уширение сопла остается постоянным.

Для одновременного изменения критического и выходного сечений сопла необходимо делать иглу большей длины, но и в этом случае профилированием ее трудно получить постоянное отношение $\frac{f_3}{f_{кр}}$.

Осуществить сопло с регулируемым критическим сечением оказалось очень сложно, так как много затруднений возникает из-за необходимости интенсивно охлаждать иглу и ее направляющие. При вводе иглы через головку камеры трудно осуществить надежное ее уплотнение.

Регулирование критического сечения сопла в настоящее время осуществляют, применяя многокамерные двигатели. Они имеют несколько камер сгорания, которые можно выключать, если надо уменьшить тягу и расход топлива. Во многих авиационных двигателях применяется двухкамерная конструкция. Известны также и четырехкамерные двигатели. Применение большего числа камер затрудняется вследствие значительного усложнения двигателя.



Фиг. 55. Схема регулирования площади критического сечения профилированной иглой.

Кроме того, при большом числе камер трудно осуществить надежную работу двигателя в момент включения или выключения камер.

§ 24. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖРД

Под характеристикой какой-либо машины подразумевается зависимость показателей ее работы от условий, в которых она работает. Обычно при этом меняется только один какой-либо параметр, а остальные величины, характеризующие условия работы машины, остаются постоянными.

Для ЖРД наиболее важными являются характеристики, показывающие зависимость тяги, удельной тяги, давления в камере от расхода топлива при постоянной высоте работы двигателя и от высоты при постоянном расходе.

Зависимость тяги и удельной тяги двигателя от расхода топлива при постоянной высоте работы его называется *расходной, или дроссельной, характеристикой*.

Зависимость тяги и удельной тяги двигателя от высоты при постоянном расходе называется *высотной характеристикой*.

Для идеального двигателя этим и исчерпывается перечень возможных характеристик, а на реальном двигателе можно снять и некоторые другие, например, зависимость указанных выше величин (P ; $P_{уд}$; p_2) от состава топлива, от типа головки и т. д.

Кроме того, вследствие затруднений, связанных с точным определением и поддержанием постоянного расхода при испытаниях двигателя, часто для расходной характеристики в качестве переменной величины принимают не расход, а пропорциональную ему величину давления в камере.

Расходная характеристика

Уравнение расходной (дроссельной) характеристики жидкостного ракетного двигателя можно получить из уравнения тяги, если считать, что скорость на срезе сопла не зависит от величины расхода. Такое предположение для идеального двигателя является вполне справедливым; в реальном двигателе скорость истечения может зависеть от расхода в основном за счет изменения давления в камере и связанных с изменением давления: качеством распыла, степенью диссоциации и другими менее существенными причинами.

При этом предположении формулу тяги (I. 9)

$$P = G \frac{w_3}{g} + f_3(p_3 - p_H) \quad (\text{IV. 30})$$

можно преобразовать, воспользовавшись тем, что

$$p_3 = \delta p_2 \text{ и } p_2 = \frac{G \sqrt{RT_2}}{f_{кр} A_n}.$$

Для данного сопла давление на срезе его пропорционально расходу газа

$$p_3 = \delta \frac{G \sqrt{RT_2}}{f_{кр} A_n}. \quad (\text{IV. 31})$$

Подставив (IV. 31) в (IV. 30) и объединив коэффициенты перед G , получим

$$P = G \left(\frac{w_3}{g} + \frac{f_3}{f_{кр}} \delta \sqrt{RT_2} \frac{1}{A_n} \right) - f_3 p_H. \quad (\text{IV. 32})$$

Величина, заключенная в скобки, не зависит от секундного расхода, так же как и произведение $f_3 p_H$, поэтому уравнение характеристики имеет вид

$$P = AG - B. \quad (\text{IV. 33})$$

Это уравнение является уравнением прямой линии, наклон которой к оси абсцисс определяется коэффициентом

$$A = \frac{w_3}{g} + \frac{f_3}{f_{кр}} \delta \frac{\sqrt{RT_2}}{A_n} = \frac{w_3}{g} + f_3 B, \quad (\text{IV. 34})$$

где

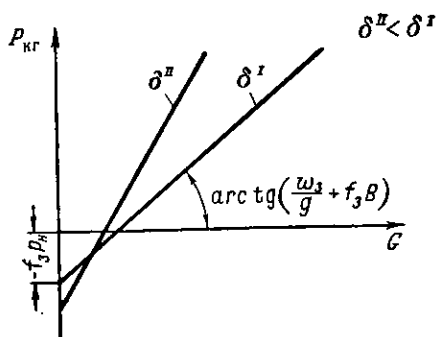
$$B = \frac{1}{f_{кр}} \delta \frac{\sqrt{RT_2}}{A_n} = \text{const.}$$

Значение A тем больше, чем больше величина w_3 и отношение $\frac{f_3}{f_{кр}}$.

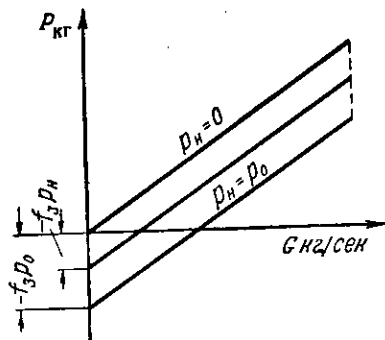
Эта линия пересекает ось $G=0$ на расстоянии $-f_3 p_H$ от начала координат (фиг. 56).

При изменении сопла, например при увеличении $\frac{f_3}{f_{кр}}$, возрастает величина w_3 , а также и $\frac{f_3}{f_{кр}} \delta$ так, что коэффициент A увеличивается и линия внешней характеристики проходит более круто, отрезая на оси $G=0$ больший отрезок $-f_3 p_H$.

Расходные характеристики двигателя с постоянным соплом на разных высотах будут представлять собой семейство параллельных прямых, отсекающих на оси $G=0$ отрицательный отрезок $-f_3 p_H$.



Фиг. 56. Расходные характеристики ЖРД с различными степенями расширения δ .



Фиг. 57. Расходные характеристики ЖРД, работающих на различных высотах.

Расходная характеристика двигателя, работающего в безвоздушном пространстве, пройдет через начало координат (фиг. 57).

Расходная характеристика двигателя, работающего на земле, отсечет на оси $G=0$ отрезок $-f_3 p_0$, где p_0 — давление атмосферы на земле.

Следует напомнить, что расчетная формула, лежащая в основе уравнения характеристики, справедлива в некоторых пределах, так как при значительном уменьшении расхода, по сравнению с расходом на расчетном режиме двигателя, сопло станет работать в условиях, когда скачок войдет внутрь его и используемые формулы не будут справедливы.

Расходная характеристика, как было указано, может быть построена и по величине давления в камере.

Высотная характеристика

Высотная характеристика описывается уравнением силы тяги, в котором давление в окружающей среде p_H будет переменным, а следовательно, и тяга двигателя станет переменной по высоте.

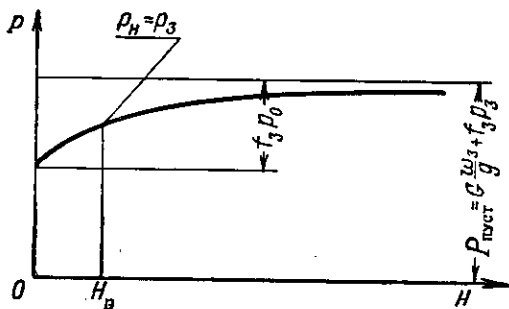
Так как изменение внешних условий не влияет на сверхзвуковой поток, то скорость истечения w_3 остается неизменной и в уравнении силы тяги

$$P = G \frac{w_3}{g} + f_3(p_3 - p_H) \quad (\text{IV. 35})$$

единственной переменной будет величина p_H .

Уравнение (IV. 35) и есть уравнение высотной характеристики.

Высотная характеристика ЖРД с постоянным соплом показана на фиг. 58.



Фиг. 58. Высотная характеристика ЖРД с постоянным соплом.

На больших высотах тяга (и удельная тяга) стремится к своему пределу — тяге в пустоте $P_{пуст}$, которая получается, если в формуле (IV. 35) принять $p_H = 0$

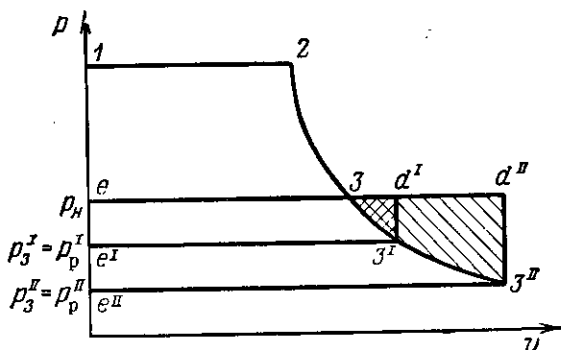
$$P_{пуст} = G \frac{w_3}{g} + f_3 p_3. \quad (\text{IV. 36})$$

На меньших высотах тяга уменьшается за счет уменьшения статической составляющей, которая может стать отрицательной, если расчетная высота больше нуля.

Разность между тягой на земле и тягой в пустоте определяется величиной $f_3 p_0$. Эта разница будет тем большей, чем больше выходное сечение сопла, т. е. больше у двигателей, имеющих меньшее δ при всех остальных одинаковых условиях. Численно величина изменения тяги от земли до пустоты составляет от 10 до 20% тяги на земле.

Интересно проследить, как расположатся высотные характеристики двух двигателей, отличающихся только различными степенями расширения δ . Если сравнить два таких двигателя, из которых второй имеет меньшую степень расширения, чем первый, то в уравнении силы тяги изменится при всех прочих неизменных параметрах величина скорости истечения: она будет больше во втором двигателе. Одновременно будет большим и выходное сечение. Вследствие этого на расчетной высоте и на высотах, больших расчетной, тяга у второго двигателя будет больше, чем у первого.

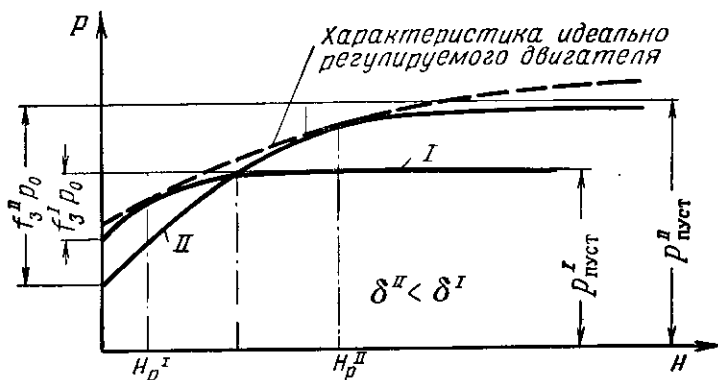
Однако уравнение характеристики не позволяет сделать заключение, как будут протекать ветви высотных характеристик этих двигателей на высотах, меньших расчетных, так как не известно, будет ли компенсироваться возрастание отрицательной статической составляющей силы тяги второго двигателя увеличением кинетической составляющей ее.



Фиг. 59. Потеря работы цикла для двух ЖРД с различными степенями расширения в соплах δ .

Для решения этого вопроса рассмотрим фиг. 59, на которой изображены идеальные циклы этих двигателей.

На фигуре видно, что второй двигатель на высотах, меньших расчетной, будет иметь большую потерю работы за счет перерас-



Фиг. 60. Высотные характеристики двух ЖРД с различными степенями расширения в соплах δ .

ширения (для второго двигателя она определяется площадью $33^{II}d^{II}$; для первого $33^{I}d^{I}$). Этот же результат легко можно получить, рассмотрев фигуру, на которой приведено изменение η : от величины ϵ (см. фиг. 53). Таким образом, тяга второго двигателя на земле будет меньше, чем тяга первого двигателя.

В соответствии с приведенными выше рассуждениями характеристики этих двигателей пройдут так, как изображено на фиг. 60.

На расчетных высотах оба двигателя будут обладать наиболее высокой удельной тягой, соответствующей их расчетным режимам. Через эти точки пройдет высотная характеристика идеально регулируемого двигателя, в котором сопло изменяется так, что давление на срезе сопла все время остается равным давлению в окружающей среде.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ И ЗАДАЧИ

1. Что такое термодинамический цикл?
 2. Из каких процессов состоит идеальный цикл?
 3. Каковы особенности сжатия топлива в ЖРД?
 4. Объясните, как протекал бы процесс расширения в ЖРД в случае полного сгорания?
 5. Каково соотношение между работой цикла при наличии и при отсутствии рекомбинации?
 6. Напишите формулу, связывающую удельную тягу с работой цикла, и объясните ее.
 7. На какие части следует разделить потери в процессе сгорания. Как они учитываются?
 8. Какие потери учитывает коэффициент сопла η_c ?
 9. Какова связь между соответственным энергетическим и импульсным коэффициентами?
 10. Как изменяется удельная тяга двигателя с постоянным соплом при изменении высоты, на которой работает двигатель? Чему равна тяга двигателя в пустоте?
 11. Как изменяется работа двигателя с постоянным соплом при изменении расхода топлива.
 12. В каких случаях надо регулировать сопло изменением величины выходного сечения?
 13. В каких случаях надо регулировать сопло изменением величины критического сечения? Как реально выполняется такое регулирование?
 14. Что называется расходной характеристикой двигателя?
 15. Что называется высотной характеристикой двигателя?
 16. Как располагаются расходные характеристики двух двигателей, имеющих различные степени расширения в сопле?
 17. Как располагаются высотные характеристики двух двигателей, имеющих различные степени расширения в сопле?
-

Глава V

ТОПЛИВА ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

§ 25. ТРЕБОВАНИЯ К ТОПЛИВАМ

Топливом называется совокупность двух веществ: *горючего и окислителя*, используемых в ЖРД для создания силы тяги.

К топливам, используемым для работы ЖРД, можно предъявить очень много, часто взаимоисключающих требований.

По смыслу их можно разбить на следующие группы:

1. Основные требования, предъявляемые к топливам ЖРД.
2. Конструктивные требования.
3. Эксплуатационные требования.

Основные требования к топливам

Эти требования к топливам относятся к величине запаса энергии, которым оно обладает, а также к термодинамическим свойствам продуктов сгорания топлива.

Первое из основных требований, предъявляемых к топливу ЖРД, состоит в том, что весовая единица топлива должна обладать возможно большим запасом энергии. Большой запас энергии в топливе позволяет получить более высокую удельную тягу ЖРД. Повышение удельной тяги является наиболее существенной мерой, позволяющей увеличить дальность полета ракет при данном совершенстве конструктивного выполнения ее.

Запас энергии топлива определяется двумя составляющими: *тепловой энергией*, которой обладают компоненты топлива, и *химической энергией*.

Количественно запас энергии в топливе определяется величиной полного теплосодержания. Основной составляющей полного теплосодержания топлива является химическая энергия.

Химическая энергия топлива определяется также теплотворной способностью его H_u .

В обычных теплотехнических установках, где в качестве окислителя используется воздух, забираемый из атмосферы, запас химической энергии (или теплотворная способность) условно относится только к весу горючего.

В ЖРД и горючее, и окислитель представляют одинаковую ценность, так как оба размещаются на борту реактивного аппара-

та. Поэтому запас химической энергии в ракетных топливах относят к весу всего топлива.

Второе основное требование к топливу заключается в том, что удельный вес компонентов, а значит и всего топлива, должен быть возможно большим.

При повышении удельного веса компонентов уменьшается объем запаса горючего и окислителя данного веса. Это приводит не только к уменьшению объема и веса баков и веса средств подачи топлива в двигатель, но и к уменьшению всех размеров ракеты. Последнее значительно уменьшает (при данной степени конструктивного совершенства ракеты) соотношение между весами конструкции и топлива (μ_k), что улучшает свойства ракеты, т. е. использование жидкостного ракетного двигателя. С указанной точки зрения весьма важным параметром является теплотворная способность топлива, приходящаяся на литр объема; она определяется произведением $H_u \gamma_T$, где γ_T — удельный вес топлива. Эта величина иногда называется теплоплотностью¹.

Третье основное требование к топливу заключается в том, что продукты сгорания его должны иметь возможно меньший молекулярный вес.

Раскроем смысл этого требования. Температуру в камере сгорания ЖРД можно выразить так:

$$T_2 = \frac{H_u}{c_p}.$$

Как легко видеть, при одинаковой теплотворной способности топлива H_u , т. е. при одинаковом запасе энергии в нем, температура в камере сгорания будет тем меньше, чем больше теплоемкость продуктов сгорания, выраженная в $\text{ккал/кг}^\circ\text{C}$. Низкие температуры в камере очень облегчают выполнение надежной конструкции двигателя.

Из гл. II нам известно, что теплоемкость продуктов сгорания, отнесенная к 1 граммолю, меняется в довольно узких пределах.

Для перевода теплоемкости продуктов сгорания из $\text{ккал/граммоль}^\circ\text{C}$ в $\text{ккал/кг}^\circ\text{C}$ служит простое соотношение, аналогичное (II. 21)

$$c_p \text{ ккал/кг}^\circ\text{C} = c_p \text{ ккал/граммоль}^\circ\text{C} \frac{1000}{\mu}.$$

Отсюда видно, что уменьшение молекулярного веса продуктов сгорания будет приводить к увеличению весовой теплоемкости и к уменьшению температуры сгорания. Следовательно, для получения низких температур в камере при большом запасе энергии продукты сгорания должны иметь возможно меньший молекулярный вес. Заметим также, что газовая постоянная R связана с молекулярным весом соотношением

$$R = \frac{848}{\mu}, \quad (\text{V. 1})$$

¹ Г. Ф. Кнорре, Топочные процессы, Госэнергоиздат, 1951.

поэтому величина газовой постоянной будет тем больше, чем меньше молекулярный вес продуктов сгорания. Таким образом, можно сказать, что продукты сгорания должны обладать возможно большей газовой постоянной.

Иногда это требование формулируют по-другому. Для продуктов сгорания уравнение состояния имеет вид

$$pv = RT,$$

или

$$v = \frac{T}{p} R \quad (V. 2)$$

т. е. мы видим, что при неизменных давлении p и температуре T величина удельного объема продуктов сгорания v пропорциональна газовой постоянной R .

Величина удельного объема v продуктов сгорания топлива при нормальных условиях называется *газообразованием* и обозначается V_r . Чем больше газовая постоянная, тем, видимо, больше газообразование.

Поэтому третье основное требование часто формулируют и как требование возможно большего газообразования.

Наконец, четвертое основное требование к топливам ракетных двигателей относится к их физическому состоянию в камере сгорания и сопле двигателя.

Процесс расширения, приводящий к быстрому превращению тепловой энергии в механическую работу, совершается только в газообразных телах.

Использование тепловой энергии жидких и твердых веществ и превращение ее в работу расширения возможно только путем отдачи этой энергии расширяющемуся газу. Однако процессы теплообмена, необходимые при таком использовании тепловой энергии, протекают значительно более медленно. Поэтому наилучшее физическое состояние продуктов сгорания в камере сгорания и в сопле — газообразное. Во всяком случае, хотя бы часть продуктов сгорания в двигателе должна находиться в газообразном состоянии.

Таким образом, четвертое основное требование к ракетным топливам состоит в том, что продукты сгорания их должны иметь возможно более низкую температуру испарения.

Конструктивные требования к топливам

Кроме перечисленных выше основных требований, к компонентам ЖРД предъявляется ряд условий, необходимых для упрощения конструкции и достижения надежной работы двигателя. Перечислим важнейшие из этих требований.

1. Требования, вытекающие из условий охлаждения двигателя.

Для того, чтобы осуществить надежное охлаждение двигателя, по крайней мере один из компонентов топлива должен иметь следующие свойства:

- а) высокую температуру кипения $t_{\text{кип}} \text{ } ^\circ\text{C}$;
- б) большую величину теплоемкости $c \text{ ккал/кг } ^\circ\text{C}$.

При выполнении этих условий увеличивается количество тепла, которое до начала кипения может воспринять один килограмм компонента. Это количество тепла называется *тепловосприимчивостью жидкости* и равно $c(t_{\text{кип}} - t_0)$, где t_0 — температура входа компонента в охлаждающую рубашку двигателя.

Кроме того, компонент, используемый для охлаждения, не должен при перегреве разлагаться или давать нагар, так как в противном случае ухудшаются условия отвода тепла к жидкости и может произойти прогар стенки камеры и сопла.

2. Требования, вытекающие из условий подачи компонентов в камеру и из условий смесеобразования:

а) вязкость компонентов должна быть возможно меньшей, так как при этом уменьшается гидравлическое сопротивление системы подачи и затрата энергии на осуществление подачи;

б) изменение вязкости компонентов с температурой должно быть минимальным и по возможности одинаковым для обоих компонентов.

При выполнении этого требования облегчаются условия работы системы подачи двигателя и обеспечивается сохранение режима двигателя при различных температурных условиях;

в) объемные расходы обоих компонентов должны быть по возможности близки друг к другу. Этим облегчается создание головки двигателя.

3. Требования, вытекающие из условий воспламенения и сгорания.

Топлива ЖРД могут быть самовоспламеняющимися, т. е. воспламеняющимися при соприкосновении, и несамовоспламеняющимися, т. е. требующими постороннего источника зажигания.

Требования к ним несколько различны.

Для несамовоспламеняющихся топлив необходимы:

— малый период задержки воспламенения, т. е. малый период, протекающий от момента поджигания смеси до ее воспламенения;

— возможно более низкая температура воспламенения.

Для самовоспламеняющихся топлив:

— малый период задержки самовоспламенения, т. е. малый период времени, протекающего от момента соприкосновения жидких компонентов до их самовоспламенения.

Выполнение этого требования облегчает условия запуска двигателя, препятствуя накоплению в камере сгорания взрывоопасной, хорошо подготовленной к сгоранию смеси компонентов топлива.

Эксплуатационные требования к топливам

Условия эксплуатации ЖРД также предъявляют к компонентам топлива ряд требований.

Основные из этих требований перечислены ниже:

1. Химическая и физическая стойкость компонентов, позволяющая хранить их продолжительное время без особых предосторожностей.

2. Отсутствие опасности взрыва.
3. Отсутствие ядовитых свойств.
4. Слабое воздействие на конструктивные материалы.
5. Низкая температура застывания и высокая температура кипения.

Кроме того, компоненты топлива должны быть дешевы, их изготовление должно быть обеспечено широкой сырьевой и промышленной базой.

Как видно, к компонентам топлива предъявляются многочисленные и разнообразные требования. Создать такие компоненты, которые удовлетворяют сразу всем требованиям, в настоящее время еще не удалось, хотя в литературе проводился анализ почти всех элементов периодической системы Менделеева и их соединений, с точки зрения возможности использования в качестве горючих или окислителей ЖРД.

В современных ЖРД нашли применение исключительно углеводородные горючие, в которые входят в общем случае углерод, водород, азот и кислород и кислородные окислители. Кроме чистого кислорода, в качестве окислителей применяются жидкие при нормальной температуре вещества, в которых кислород связан посредством азота, а иногда также посредством водорода и углерода. Таким образом, при изучении топлив мы должны исходить из того, что в них входят четыре элемента: водород H, углерод C, кислород O и азот N.

§ 26. ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЮЧЕГО, ОКИСЛИТЕЛЯ И ТОПЛИВА

Для расчета рабочего процесса жидкостного ракетного двигателя необходимо знать ряд величин, характеризующих топливо, поступающее в двигатель. К этим величинам относятся весовой состав топлива и запас химической и тепловой энергии его — так называемые *термохимические характеристики*.

Термохимические характеристики топлива в свою очередь определяются термохимическими характеристиками горючего и окислителя, поэтому расчет термохимических характеристик топлива надо начинать с расчета этих величин для горючего и окислителя.

Весовой состав горючего и окислителя

Состав горючего и окислителя мы будем определять в весовых долях данного элемента.

Обозначим через g_i — весовую долю i -го элемента в горючем или окислителе. Для конкретного элемента весовые доли будут обозначаться символом этого элемента с индексом, указывающим, в каком именно компоненте определяется содержание этого элемента; поэтому, например, H_r и H_o представляют собой соответственно весовую долю водорода в горючем и окислителе. Следует

отметить, что сумма весовых долей по всем элементам, имеющимся в компоненте, равна единице

$$\sum_i g_i = 1. \quad (V.3)$$

Это соотношение следует использовать при проверке расчетов.

При определении весового состава горючего и окислителя нужно различать два случая.

Если горючее или окислитель являются индивидуальным химическим веществом, то для расчета весовых долей соответствующих элементов в данном соединении используется формула

$$g_i = \frac{A_i z_i}{\sum_i A_i z_i} = \frac{A_i z_i}{\mu}, \quad (V.4)$$

где g_i — весовая доля i -того элемента;
 A_i — атомный вес i -того элемента;
 z_i — число атомов i -того элемента в молекуле индивидуального химического вещества;
 $\mu = \sum_i A_i z_i$ — молекулярный вес данного соединения.

Если данное горючее или окислитель представляют собой смесь различных индивидуальных химических веществ, то их элементарный весовой состав может быть вычислен или по условной химической формуле, приводимой иногда для многокомпонентных смесей, состоящих из большого числа индивидуальных веществ (например, керосин), по уже приведенному соотношению (V.4) или по весовой доле данного индивидуального вещества, входящего в состав горючего или окислителя.

В последнем случае расчет ведется по формуле

$$g_i = \sum_k g_{ik} g_k, \quad (V.5)$$

где g_i — весовая доля i -того элемента в горючем или окислителе;
 g_k — весовая доля k -того компонента (индивидуального химического вещества) в горючем или окислителе;
 g_{ik} — весовая доля i -того элемента в k -том компоненте; она рассчитывается по формуле (V.4).

Пример 1. Рассчитать элементарный состав горючего, состоящего из 60% триметиламина $(\text{CH}_3)_3\text{N}$ и 40% ксилидина $(\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$.

Решение:

По формуле (V.4) находим весовой состав триметиламина и ксилидина. Для триметиламина

$$\mu = \sum_i A_i z_i = 12 \times 3 + 1 \times 9 + 14 \times 1 = 59.$$

По формуле (V.4) весовые доли C, H и N триметиламина соответственно равны

$$C = \frac{12 \times 3}{59} = 0,610;$$

$$H = \frac{9 \times 1}{59} = 0,153;$$

$$N = \frac{14 \times 1}{59} = 0,237.$$

Для ксиллидина

$$\mu = \sum_i A_i z_i = 12 \times 8 + 1 \times 11 + 14 \times 1 = 121.$$

По формуле (V.4) определяем весовые доли элементов в ксиллидине

$$C = \frac{12 \times 8}{121} = 0,793; \quad H = \frac{1 \times 11}{121} = 0,091;$$

$$N = \frac{14 \times 1}{121} = 0,116.$$

Зная весовые доли элементов каждого из составляющих компонентов и зная долю каждого компонента g_k находим по формуле (V.5)

$$C_r = 0,6 \cdot 0,61 + 0,4 \cdot 0,793 = 0,683;$$

$$H_r = 0,6 \cdot 0,153 + 0,4 \cdot 0,091 = 0,128;$$

$$N_r = 0,6 \cdot 0,237 + 0,4 \cdot 0,116 = 0,189.$$

Проверка. Проверку проводим по формуле (V.3). В применении к нашему горючему эта формула имеет вид

$$C_r + H_r + N_r = 1.$$

После подстановки

$$\sum g_i = 0,683 + 0,128 + 0,189 = 1,000.$$

Состав горючего определен правильно.

В некоторых горючих и окислителях возможно присутствие в качестве балласта каких-либо дополнительных веществ, чаще всего воды (например вода добавляется в азотную кислоту, перекись водорода или спирт). Для всех последующих расчетов целесообразно сразу учитывать элементы, входящие в балласт, внося их в весовые доли соответствующих компонентов. При обычных расчетах незначительным содержанием в топливе каких-либо элементов, кроме основных (например, железом или серой в различных азотнокислотных окислителях, медью в горючем для двигателя на основе перекиси водорода и т. д.), пренебрегают.

Пример 2. Рассчитать состав окислителя, состоящего из 96%-ной HNO_3 и 4% воды.

Определяем весовой состав HNO_3 по формуле (V.4)

$$\mu_{HNO_3} = \sum A_i z_i = 1 \cdot 1 + 14 \cdot 1 + 16 \cdot 3 = 63.$$

$$H = \frac{1}{63} = 0,016;$$

$$O = \frac{16 \cdot 3}{63} = 0,762;$$

$$N = \frac{14 \cdot 1}{63} = 0,222.$$

Определяем весовой состав воды по формуле (V. 4)

$$\mu_{H_2O} = \sum A_i z_i = 1 \cdot 2 + 16 \cdot 1 = 18;$$

$$H = \frac{2}{18} = 0,111;$$

$$O = \frac{16}{18} = 0,889.$$

Определяем весовой состав окислителя по формуле (V. 5)

$$H_o = 0,96 \cdot 0,016 + 0,04 \cdot 0,11 = 0,020;$$

$$O_o = 0,96 \cdot 0,762 + 0,04 \cdot 0,889 = 0,767;$$

$$N_o = 0,96 \cdot 0,222 = 0,213.$$

Проверка. Формула (V. 3) для проверки в применении к данному окислителю имеет вид

$$H_o + O_o + N_o = 0,020 + 0,767 + 0,213 = 1,000.$$

Состав окислителя определен правильно.

Теоретически необходимое количество окислителя

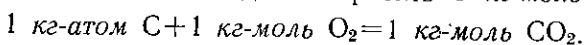
По известному весовому составу горючего и окислителя можно вычислить наименьшее количество окислителя, необходимое для полного окисления одного килограмма горючего. Эта величина называется *теоретически необходимым количеством окислителя* и обозначается γ_o . Для освоения методики расчета этой величины рассмотрим реакции полного окисления горючих элементов.

Реакция окисления углерода запишется в виде

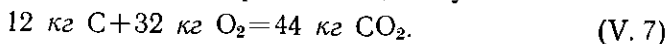


Запишем теперь количественные соотношения, определяющие данную реакцию.

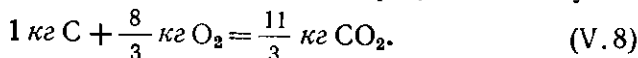
Непосредственно из записи реакции можно установить, что для окисления 1 кг-атома углерода в продукт полного сгорания — углекислый газ CO_2 — необходимо затратить 1 кг-моль кислорода.



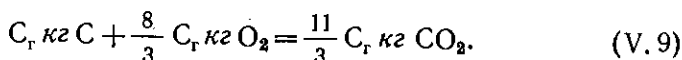
Переходя к весовым единицам и учитывая, что 1 кг-атом углерода весит 12 кг, а кг-моль кислорода 32 кг, получим



Рассчитаем теперь весовые соотношения между элементами, если в реакцию вступает не 12 кг углерода, а 1 кг. Для этого мы должны разделить уравнение (V. 7) на 12. В результате получим

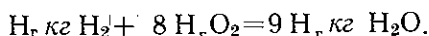
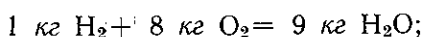
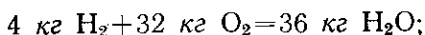
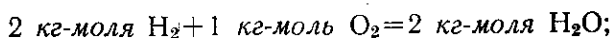


Так как в горючем находится не один килограмм углерода, а C_r кг его, то для 1 кг горючего уравнение сгорания углерода примет вид



Следовательно, на сгорание C_r килограмм углерода, находящегося в 1 кг горючего, потребуется $\frac{8}{3} C_r$ килограмм кислорода.

Аналогично можно записать и реакцию полного окисления другого топливного элемента — водорода



Отсюда следует, что для полного окисления H_r килограмм водорода необходимо $8 H_r$ килограмм кислорода.

При подсчете количества кислорода, необходимого для полного окисления 1 кг горючего, состоящего из углерода, водорода, азота и кислорода, следует учесть также кислород, входящий в само горючее, и иметь в виду, что азот вовсе не вступает в реакцию окисления. Тогда к 1 кг горючего из окислителя необходимо подвести следующее количество килограмм кислорода:

$$\frac{8}{3} C_r + 8 H_r - O_r. \quad (V. 11)$$

Подсчитаем теперь количество кислорода в окислителе, которое может быть использовано для сжигания горючего. Для общности учтем в составе окислителя, кроме кислорода, также водород, азот и углерод, что очень часто имеет место в действительности.

Количество кислорода определяется весовой долей кислорода в окислителе O_o , но из нее надо вычесть количество кислорода, потребное для окисления водорода и углерода, входящего в окислитель. Это количество кислорода определяется так же, как и количество кислорода, необходимое для окисления углерода и водорода в горючем. Так количество кислорода, необходимое для окисления углерода окислителя, составит

$$\frac{8}{3} C_o,$$

а для окисления водорода окислителя:

$$8 H_o.$$

Таким образом, количество свободного кислорода в одном килограмме окислителя составит:

$$O_o - \frac{8}{3} C_o - 8 H_o. \quad (V. 12)$$

Определим далее наименьшее количество килограмм окислителя, необходимое для полного окисления 1 кг горючего, т. е. величину γ_o .

Так как для окисления 1 кг горючего необходимо $\frac{8}{3} C_r + 8H_r - O_r$ — O_r кг кислорода, а в одном килограмме окислителя имеется $O_o - \frac{8}{3} C_o - 8H_o$ килограмм свободного кислорода, то для полного окисления 1 кг горючего необходимо

$$\frac{\frac{8}{3} C_r + 8H_r - O_r}{O_o - \frac{8}{3} C_o - 8H_o}$$

килограмм окислителя¹.

Это и есть *теоретически необходимое количество окислителя* ν_o .

Таким образом,

$$\nu_o = \frac{\frac{8}{3} C_r + 8H_r - O_r}{O_o - \frac{8}{3} C_o - 8H_o} \quad (V. 13)$$

Пример 3. Определить теоретически необходимое количество окислителя 96%-ной азотной кислоты (96% $HNO_3 + 4\%$ H_2O) для сжигания в ней керосина состава $C_r = 0,86$; $H_r = 0,13$; $O_r = 0,01$.

Состав окислителя берем из примера 2.

$$H_o = 0,020; O_o = 0,767; N_o = 0,213.$$

Теоретически необходимое количество окислителя составит

$$\nu_o = \frac{\frac{8}{3} 0,86 + 8 \cdot 0,13 - 0,01}{0,767 - 8 \cdot 0,020} = \frac{3,23}{0,607} = 5,45.$$

Таким образом, для полного сгорания 1 кг керосина необходимо 5,45 кг 96%-ной азотной кислоты.

Коэффициент избытка окислителя

При работе ЖРД не всегда сохраняется точное соответствие количества окислителя количеству поступающего горючего. На каждый килограмм поступающего горючего может поступить окислителя больше или меньше, чем теоретически необходимо для его сжигания. В этих случаях говорят, что двигатель работает с **избытком** или **недостатком** окислителя.

Топливо, в котором имеет место теоретическое соотношение между горючим и окислителем, называют *стехиометрическим топливом*.

Топливо, в котором имеет место избыток горючего, называется *богатым*, а где имеется недостаток горючего и избыток окислителя — *бедным*.

¹ А. П. Ваничев и Г. Ф. Кнорре, *Обобщенные расчетные формулы газового анализа*, Изд. ВНТ, 1946.

Обозначим через ν действительное отношение окислителя к горючему в топливе. Его можно выразить, как отношение расходов:

$$\nu = \frac{G_o}{G_r}, \quad (V. 14)$$

где G_o — расход окислителя в кг/сек;
 G_r — расход горючего в кг/сек.

Используя выражение (V. 14) для действительного отношения расходов окислителя и горючего, можно определить секундный расход каждого из компонентов, если задан только общий расход G

$$G = G_d + G_o = G_r + \nu G_r,$$

откуда

$$\left. \begin{aligned} G_r &= \frac{G}{1+\nu}; \\ G_o &= \frac{\nu}{1+\nu} G. \end{aligned} \right\} \quad (V. 14')$$

Если разделить действительное отношение компонентов ν на теоретически необходимое ν_o , то величина $\frac{\nu}{\nu_o}$ будет характеризовать избыток или недостаток кислорода в топливе.

Так, например, если действительное отношение компонентов $\nu = 4$, а теоретически необходимое $\nu_o = 6$, то это значит, что $\frac{\nu}{\nu_o} < 1$ и мы имеем недостаток окислителя или избыток горючего — богатое топливо.

Рассуждая аналогично, можно показать, что при $\frac{\nu}{\nu_o} > 1$ мы имеем избыток окислителя — бедное топливо, а при $\frac{\nu}{\nu_o} = 1$ имеем как раз теоретически необходимое количество окислителя, т. е. стехиометрическое топливо.

Отношение $\frac{\nu}{\nu_o}$ обозначается через α и называется *коэффициентом избытка окислителя*.

$$\alpha = \frac{\nu}{\nu_o}. \quad (V. 15)$$

Следует отметить, что, как правило, ракетные двигатели работают на топливах с $\alpha < 1$, т. е. на богатых топливах.

Пример 4. Определить коэффициент избытка окислителя для топлива 96%-ная азотная кислота и керосин, если расход азотной кислоты $G_o = 12,4$ кг/сек, а расход керосина $G_r = 2,6$ кг/сек.

Теоретически необходимое количество окислителя для этой смеси равно (см. пример 3) $\nu_o = 5,45$.

Находим действительное соотношение компонентов. По формуле (V. 14)

$$\nu = \frac{G_o}{G_r} = \frac{12,6}{2,6} = 4,8.$$

Коэффициент избытка окислителя α равен

$$\alpha = \frac{\nu}{\nu_0} = \frac{4,8}{5,45} = 0,88.$$

Таким образом, в данном топливе имеется избыток горючего (богатое топливо).

Весовой состав топлива

Зная состав горючего, окислителя и действительное весовое соотношение компонентов $\nu = \alpha \nu_0$, легко вычислить весовой состав топлива. Для этого служит следующая формула:

$$g_{i\tau} = \frac{g_{i\gamma} + \alpha \nu_0 g_{i0}}{1 + \alpha \nu_0} = \frac{g_{i\gamma} + \nu g_{i0}}{1 + \nu}, \quad (V. 16)$$

где $g_{i\tau}$ — весовая доля i -того элемента в топливе;
 $g_{i\gamma}$, g_{i0} — весовые доли i -того элемента в горючем и окислителе;
 $1 + \alpha \nu_0$ — количество кг топлива, приходящегося на 1 кг горючего.

Таким образом, в 1 кг топлива будут входить следующие количества углерода, водорода, кислорода и азота:

$$\left. \begin{aligned} C_{\tau} &= \frac{C_{\gamma} + \nu C_0}{1 + \nu}; & H_{\tau} &= \frac{H_{\gamma} + \nu H_0}{1 + \nu}; \\ O_{\tau} &= \frac{O_{\gamma} + \nu O_0}{1 + \nu}; & N_{\tau} &= \frac{N_{\gamma} + \nu N_0}{1 + \nu}. \end{aligned} \right\} \quad (V. 17)$$

Следовательно, для определения состава топлива необходимо знать состав горючего, окислителя и коэффициент избытка окислителя α или действительное соотношение компонентов в смеси ν .

Пример 5. Определить состав топлива: окислитель — 96%-ная азотная кислота (96% HNO_3 + 4% H_2O), горючее — керосин (состав см. пример 3). Коэффициент избытка окислителя $\alpha = 0,8$.

Находим действительное отношение окислителя к горючему ν (ν_0 берем из примера 3)

$$\nu = \alpha \nu_0 = 0,8 \cdot 5,45 = 4,36.$$

По формулам (V. 17) находим состав топлива (состав окислителя берем из примера 3)

$$\begin{aligned} C_{\tau} &= \frac{C_{\gamma} + \nu C_0}{1 + \nu} = \frac{0,86}{5,36} = 0,161; \\ H_{\tau} &= \frac{H_{\gamma} + \nu H_0}{1 + \nu} = \frac{0,13 + 4,36 \cdot 0,02}{5,36} = 0,039; \\ O_{\tau} &= \frac{O_{\gamma} + \nu O_0}{1 + \nu} = \frac{0,01 + 4,36 \cdot 0,767}{5,36} = 0,626; \\ N_{\tau} &= \frac{N_{\gamma} + \nu N_0}{1 + \nu} = \frac{4,36 \cdot 0,213}{5,36} = 0,174. \end{aligned}$$

Проверка. Для проверки используем уравнение $\sum g_i = 1$. В нашем примере $C_{\tau} + H_{\tau} + O_{\tau} + N_{\tau} = 0,161 + 0,039 + 0,626 + 0,174 = 1,000$.

Таким образом, состав топлива определен правильно.

§ 27. ТЕПЛОСОДЕРЖАНИЕ ТОПЛИВА

Для оценки запаса энергии в рабочем теле ЖРД мы будем использовать величину полного теплосодержания. Оно включает в себя тепловую энергию, оцениваемую величиной физического теплосодержания $\int_{T_0}^T c_p dT$, и химическую энергию.

Физическое теплосодержание топлива

Физическое теплосодержание представляет собой то количество тепла, которое затрачивается на нагрев данного (химически неизменного) вещества от выбранной начальной температуры T_0 до той температуры T , при которой оно используется в двигателе. В простейшем случае при постоянной теплоемкости вещества $c_p = \text{const}$ физическое теплосодержание I можно записать в виде

$$I = c_p(T - T_0). \quad (\text{V. 18})$$

Это отношение указывает, что:

- 1) численная величина физического теплосодержания данного вещества зависит от выбранной начальной температуры;
- 2) с увеличением температуры T физическое теплосодержание увеличивается;
- 3) физическое теплосодержание может быть отрицательным, если температура вещества ниже выбранной начальной температуры T_0 .

Для жидких и твердых веществ теплоемкость неизменяется при любых условиях нагрева и обозначается «с».

Химическая энергия и теплота образования

Химическая энергия вещества представляет собой энергию, которая выделяется или поглощается при образовании данного вещества из элементов, взятых в стандартном состоянии.

Стандартными состояниями элементов, используемых в топливах ЖРД, принимаются следующие состояния: углерод в форме твердого графита, кислород, водород и азот в виде молекулярных газов O_2 , H_2 и N_2 .

Так, например, для образования окиси азота NO по уравнению



необходимо затратить некоторую энергию.

Таким образом, можно сказать, что окись азота обладает некоторым запасом энергии по сравнению с простой механической смесью N_2 и O_2 , потраченной на ее образование. Эта энергия и есть химическая энергия.

Химическая энергия вещества может быть и отрицательной. Так, например, при образовании воды по уравнению



происходит выделение энергии. В данном случае (если учесть принятые нами значения химической энергии элементов) вода обладает меньшим запасом энергии, чем механическая смесь H_2 и O_2 , т. е. отрицательной химической энергией. Эта энергия выделилась при образовании воды.

В указанных выше примерах поглощение или выделение энергии происходит потому, что при перестройке молекул и атомов исходных веществ для получения молекулы данного вещества (NO или H_2O) увеличивается или уменьшается запас энергии в них.

Это изменение запаса энергии зависит только от строения исходных и конечных молекул, поэтому оно не зависит ни от давления, ни от температуры, при которых совершается необходимое для получения новой молекулы преобразование.

Величину химической энергии определяют исходя из экспериментально подсчитанной теплоты образования вещества.

Теплотой образования вещества называется действительная теплота, выделяющаяся или затрачиваемая на образование данного вещества из элементов, взятых в стандартном состоянии.

Теплота образования и химическая энергия не равны друг другу, но их величины связаны между собой.

Разница в величинах теплоты образования вещества и его химической энергии происходит от того, что в процессе образования вещества при любой температуре, отличной от абсолютного нуля, всегда происходит изменение физического теплосодержания. Последнее определяется тем, что благодаря различному строению, вещества, вступившие в реакцию, и вещества, получившиеся в результате ее, имеют различные значения теплоемкостей. Только при $T=0$ в процессе химической реакции не происходит изменение физического теплосодержания и теплота образования в точности равна химической энергии. Таким образом, химическая энергия равна теплоте образования вещества при абсолютном нуле.

Обычно теплота образования определяется при нормальных (стандартных) условиях (например при температуре $20^\circ C$ и давлении 1 атм).

В этом случае величина химической энергии отличается от теплоты образования вещества очень незначительно и, кроме того, путем соответствующего выбора температуры начала отсчета физических теплосодержаний формально можно свести эту разницу к нулю.

Таким образом, практически можно считать, что химическая энергия данного вещества равна теплоте образования его.

Знак теплоты образования и химической энергии мы будем определять исходя из следующего правила. Если система, вступившая в реакцию, потеряла тепло и, следовательно, на соответствующую величину уменьшился запас энергии в ней, то теплота образования, а также химическая энергия отрицательны. Таким образом, теплота образования и химическая энергия продуктов сгорания всегда отрицательны.

Теплота образования, а следовательно, и химическая энергия таких веществ, как OH , NO или атомарные газы, положительна, так как для образования их из стандартных газов в молекулярной форме необходимо затрачивать тепло.

Следует отметить, что в некоторой части литературы, особенно в химической, знак теплоты образования определяется как раз из противоположных соображений. Если на образование данного продукта тепло затрачивается, то теплота образования его считается отрицательной и, наоборот, если тепло выделяется, то теплота образования считается положительной. Поэтому при использовании справочных данных по теплотам образования необходимо обращать внимание на то, в каком смысле употребляется знак теплоты образования.

Величина теплоты образования обычно приводится в *ккал/граммоль*.

Система отсчета полных теплосодержаний

Численное значение величины полного теплосодержания зависит от принятой системы отсчета теплосодержания.

В литературе, посвященной расчетам ЖРД и вообще расчетам температур и состава продуктов сгорания, встречается большое число различных способов отсчета теплосодержаний.

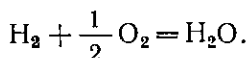
Системы отсчета полных теплосодержаний различаются по двум основным признакам:

1. Принимается различная начальная температура отсчета физических теплосодержаний T_0 .

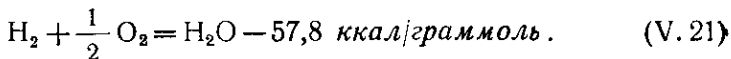
2. В разных системах условию химическую энергию относят к различным веществам. Ее можно относить или к горючим элементам, или к окислительным элементам, или к образовавшемуся веществу. Кроме того, химической энергии может быть, как мы уже говорили, присвоен различный знак.

Поясним сказанное примером.

Образование воды происходит по известному уравнению



При этом выделяется энергия, равная — 57,8 *ккал/граммоль*, и уравнение (V. 20) имеет вид



Выделившуюся энергию можно отнести к горючему элементу, т. е. водороду, и если мы дадим ей положительный знак, то получим так называемую теплотворную способность водорода¹. В этом случае химические энергии кислорода O_2 и воды H_2O будут равны нулю.

¹ Я. Б. Зельдович и А. И. Полярный, Расчеты тепловых процессов при высокой температуре, Изд. БНТ, 1947.

Точно так же выделившуюся энергию можно отнести к окислительному элементу — кислороду O_2 или к образовавшемуся веществу H_2O , считая химическую энергию соответствующих двух других компонентов равной нулю. Наиболее логично относить выделившуюся энергию к образовавшемуся веществу.

При проведении тепловых расчетов выбор той или иной системы теплосодержаний не является существенным. Необходимо только весь расчет проводить в одной системе отсчета полных теплосодержаний. В дальнейшем изложении мы будем использовать систему отсчета теплосодержаний, предложенную А. П. Ваничевым.

В этой системе химическая энергия, или теплота образования данного вещества, относится к образовавшемуся веществу.

За нуль отсчета принята температура $20^\circ C$, т. е. $293,16^\circ$ абс.

Таблица 2

Химическая энергия (теплота образования при $20^\circ C$ или $293,16^\circ$ абс.) горючих элементов, окислительных элементов и продуктов сгорания

Вещество	Состояние вещества	Химическая формула	Химическая энергия в ккал/грам-моль	Химическая энергия в ккал/кг
Углерод	Твердый графит	C	0	0
Водород	Газ	H_2	0	0
Кислород	Газ	O_2	0	0
Азот	Газ	N_2	0	0
Углекислый газ	Газ	CO_2	-94,05	-2140
Вода	Газ	H_2O	-57,73	-3210
Оксид углерода	Газ	CO	-26,42	-945
Гидроксильная группа	Газ	ОН	+10,06	+595
Оксид азота	Газ	NO	+21,60	+720
Атомарный водород	Газ	H	+52,12	+52120
Атомарный кислород	Газ	O	+59,18	+3700
Атомарный азот	Газ	N	+84,59	+6040

В связи с такими условиями при температуре $293,16^\circ$ абс. все вещества обладают только химической энергией. Элементы, взятые в стандартном состоянии, не обладают химической энергией. Так как их физическое теплосодержание равно нулю, то и полное теплосодержание элементов при этой температуре равно нулю.

Химические энергии продуктов, которые могут образоваться в камере сгорания (CO_2 ; H_2O ; CO ; OH ; NO ; H ; O ; N), равны теплотам образования этих веществ. При этом химическая энергия продуктов сгорания (CO_2 , H_2O и CO) отрицательна, а других газов положительна.

Величина химических энергий (теплот образования при 20°C или $293,16^\circ$ абс.) горючих и окислительных элементов и продуктов сгорания в принятой системе приведена в табл. 2.

Подсчет полных теплосодержаний горючего, окислителя и топлива

В соответствии со сказанным выше в данной системе отсчета полное теплосодержание горючего или окислителя (индивидуального химического вещества) складывается из:

1. Химической энергии, т. е. теплоты образования данного вещества из стандартных элементов.

2. Если температура, при которой данное вещество используется в двигателе, не совпадает с температурой, при которой дана его теплота образования, то в полное теплосодержание надо включить тепло, потребное для нагревания или охлаждения вещества от температуры образования до температуры, при которой это вещество применяется.

3. Если теплота образования относится не к тому агрегатному состоянию, в котором данное вещество применяется в двигателе, то необходимо учесть с соответствующим знаком теплоту перехода из одного агрегатного состояния в другое.

Расчет теплосодержания индивидуальных химических веществ производится в *ккал/граммоль*.

Так как в 1 кг вещества входит $\frac{1000}{\mu}$ граммелей его (где μ — молекулярный вес данного индивидуального химического вещества), то пересчет теплосодержания вещества, данного в *ккал/граммоль*, в *ккал/кг* производят по формуле

$$I_{\text{п}} \text{ ккал/кг} = I_{\text{п}} \text{ ккал/граммоль} \frac{1000}{\mu}. \quad (\text{V. 22})$$

Для пояснения сказанного выше рассмотрим несколько примеров.

Пример 6. Рассчитать полное теплосодержание азотной кислоты 100%-ной концентрации.

Теплота образования жидкой азотной кислоты при 20°C и 1 *ата* из газообразных элементов (H_2 , O_2 и N_2) в молекулярной форме, т. е. из стандартных элементов, составляет — 41,66 *ккал/граммоль*.

Так как в системе А. П. Ваничева химическая энергия элементов равна нулю, то полное теплосодержание жидкой азотной кислоты $I_{п\text{HNO}_3}$ составляется при 20°С только теплотой образования ее

$$[I_{п\text{HNO}_3}]_{ж}^{20^\circ\text{C}} = \Delta I_{обр} = -41,66 \text{ ккал/граммоль};$$

$$[I_{п\text{HNO}_3}]_{ж}^{20^\circ\text{C}} = -41,66 \frac{1000}{63} = -660 \text{ ккал/кг}.$$

Пример 7. Рассчитать полное теплосодержание жидкой воды при температуре 20°С.

Полное теплосодержание жидкой воды составляется из:

а) химического теплосодержания (теплоты образования) газообразной воды из элементов

$$\Delta I = I_{хим} = -57,73 \text{ ккал/граммоль};$$

б) теплоты перехода $\Delta I_{пер}$ из газообразного состояния в жидкое; при 1 ата и 20°С она равна $-10,57 \text{ ккал/граммоль}$.

Таким образом, полное теплосодержание жидкой воды при 20°С составит

$$[I_{п\text{H}_2\text{O}}]_{ж}^{20^\circ\text{C}} = I_{хим} + \Delta I_{пер} = -57,73 - 10,57 = -68,30 \text{ ккал/граммоль}$$

или в ккал/кг

$$[I_{п\text{H}_2\text{O}}]_{ж}^{20^\circ\text{C}} = -68,30 \frac{1000}{18} = -3795 \text{ ккал/кг}.$$

Пример 8. Рассчитать полное теплосодержание жидкого кислорода при температуре кипения (90° абс.).

Полное теплосодержание жидкого кислорода в соответствии со сказанным выше будет составлять из:

1) Количество тепла, которое надо отвести от газообразного кислорода, чтобы охладить его при постоянном давлении от температуры 293° абс. до 90° абс.

Оно равно

$$\Delta I_{охл} = c_p (90 - 293),$$

где c_p — теплоемкость газообразного кислорода. Для двухатомных газов при низких температурах теплоемкость c_p равна (см. § 9)

$$c_p = \frac{7}{2} AR = \frac{7}{2} 1,986 \approx 7 \text{ ккал/кгмоль}.$$

Теплоемкость, отнесенная к граммолу, будет, очевидно, в тысячу раз меньше

$$c_p = 0,007 \text{ ккал/граммоль}.$$

Тогда

$$\Delta I_{охл} = 0,007 (90 - 293) = -1,42 \text{ ккал/граммоль}.$$

Знак минус означает, что тепло от кислорода отводится.

2) Теплоты перехода газообразного кислорода в жидкое состояние. Она равна при температуре 90° абс. и атмосферном давлении $-1,63 \text{ ккал/граммоль}$.

Считаем, что это тепло перехода остается постоянным при любых давлениях, в том числе и для давления, под которым жидкий кислород подается в камеру сгорания. Это предположение, конечно, неверно, но учет зависимости теплоты перехода от давления привел бы нас к тому, что свойства топлива зависели бы от конструктивных параметров двигателя. Такая потеря общности расчета тепловых параметров компонентов топлива не компенсируется незначительным повышением точности расчета.

Таким образом, для жидкого кислорода при 90° абс. полное теплосодержание составит

$$[I_{п\text{O}_2}]_{ж}^{90^\circ\text{абс.}} = \Delta I_{охл} + \Delta I_{пер} = -1,42 - 1,63 = -3,05 \text{ ккал/граммоль}$$

или в ккал/кг

$$[I_{п\text{O}_2}]_{ж}^{90^\circ\text{абс.}} = -3,05 \frac{1000}{32} = \frac{1000}{32} (-3,05) = -96 \text{ ккал/кг}.$$

Теплосодержание горючего или окислителя, составленных несколькими индивидуальными химическими веществами, вычисляется по формуле

$$I_{\text{п}} = \sum_k I_{\text{п}k} g_k + \Delta I_{\text{раств}}, \quad (\text{V. 23})$$

где $I_{\text{п}k}$ — теплосодержание k -того компонента в топливе или окислителе в ккал/кг ;

g_k — весовая доля k -того компонента в топливе или окислителе;

$\Delta I_{\text{раств}}$ — теплота растворения одного вещества в другом.

Теплота растворения обычно дается в ккал на единицу веса или на граммоль растворяемого вещества.

Пример 9. Определить полное теплосодержание азотной кислоты 96%-ной концентрации с добавкой 4% воды при 20°C .

Теплота растворения воды в азотной кислоте составляет — $280 \text{ ккал/кг H}_2\text{O}$.

Воспользовавшись формулой (V. 23) и вычисленными выше значениями полных теплосодержаний воды и азотной кислоты, получим

$$[I_{\text{п HNO}_3}]_{96\%}^{20^\circ\text{C}} = 0,96 I_{\text{HNO}_3} + 0,04 I_{\text{H}_2\text{O}} + 0,04 \Delta I_{\text{раств}} = 0,96 (-660) + 0,04 (-3795) + 0,04 (-280) = -795 \text{ ккал/кг.}$$

Пример 10. Определить полное теплосодержание керосина, если при полном сгорании его с газообразным кислородом в углекислый газ CO_2 и в пары воды H_2O выделяется 10170 ккал/кг .

Состав керосина: $C_r = 0,858$; $H_r = 0,135$; $O_r = 0,007$.

Чтобы составить уравнение сгорания керосина, определим теоретически необходимое количество кислорода для сгорания керосина данного состава.

По формуле (V. 13)

$$\nu_o = \frac{\frac{8}{3} \cdot 0,858 + 8 \cdot 0,135 - 0,007}{1,0} = 3,35.$$

При полном сгорании керосина в кислороде продуктами сгорания его будут только углекислый газ CO_2 и вода H_2O .

Воспользовавшись уравнениями сгорания (V. 9) и (V. 10), найдем, что при сгорании керосина количество образовавшегося углекислого газа составит:

$$\frac{11}{3} \cdot 0,858 = 3,14 \text{ кг; количество образовавшихся водяных паров: } 9 \cdot 0,135 = 1,21 \text{ кг.}$$

Тогда уравнение сгорания керосина примет вид

$$1 \text{ кг керосина} + 3,35 \text{ кг O}_2 = 3,14 \text{ кг CO}_2 + 1,21 \text{ кг H}_2\text{O} + 10170 \text{ ккал.}$$

Зная уравнение сгорания керосина, по закону сохранения энергии (уравнению баланса энергии) будем иметь:

$$I_{\text{п керосина}} + 3,35 I_{\text{п O}_2} = 3,14 I_{\text{п CO}_2} + 1,21 I_{\text{п H}_2\text{O}} + 10170. \quad (\text{V. 24})$$

Полное теплосодержание газообразного кислорода при 20°C в принятой системе равно нулю.

Полное теплосодержание $I_{\text{п CO}_2}$ и $I_{\text{п H}_2\text{O}}$ при 20°C равно (см. табл. 2)

$$I_{\text{п CO}_2} = -94,05 \frac{1000}{44} = -2140 \text{ ккал/кг.}$$

$$I_{\text{п H}_2\text{O}} = -57,73 \frac{1000}{18} = -3210 \text{ ккал/кг.}$$

Подставляя значения теплосодержаний в уравнение баланса (VI.24), получим

$$I_{п \text{ керосина}} = 3,14(-2140) + 1,21(-3210) + 10170 = -440 \text{ ккал/кг.}$$

(Полное теплосодержание топлива составляется теплосодержанием горючего и окислителя, входящих в него.

На 1 кг горючего приходится $1 + \nu$ кг топлива.

На это количество топлива горючим вносится полное теплосодержание, равное $I_{пг}$; окислителем же вносится $\nu I_{пo}$. Поэтому полное теплосодержание 1 кг топлива $I_{пт}$ в ккал/кг составит

$$I_{пт} = \frac{I_{пг} + \nu I_{пo}}{1 + \nu}. \quad (\text{V. 25})$$

Пример 11. Определить полное теплосодержание топлива: 96%-ая азотная кислота + керосин; $\nu = 4,2$, при 20°C .

В примерах 9 и 10 были найдены полные теплосодержания азотной кислоты и керосина.

Они равны

$$[I_{п \text{ HNO}_3}]_{96\%}^{20^\circ \text{C}} = -795 \text{ ккал/кг;}$$

$$[I_{п \text{ кер}}] = -440 \text{ ккал/кг.}$$

По формуле (VI.25) находим полное теплосодержание топлива.

$$I_{пт} = \frac{I_{пг} + I_{пo}}{1 + \nu} = \frac{-440 + 4,2(-795)}{1 + 4,2} = -727 \text{ ккал/кг.}$$

Полное теплосодержание продуктов сгорания топлива

Как уже указывалось, продукты сгорания углеводородов при высоких температурах представляют собой смесь газообразных компонентов: CO_2 , H_2O , CO , OH , NO , H_2 , O_2 , N_2 , H , O и N .

Соотношение этих компонентов зависит от температуры сгорания. Чем выше температура сгорания, тем больше будет в этой смеси продуктов диссоциации.

Полное теплосодержание каждого из этих компонентов $I_{пi}$ при данной температуре сгорания равно сумме физического теплосодержания при этой температуре и химической энергии (теплоты) образования данного компонента.

Величины полного теплосодержания каждого из компонентов $I_{пi}$ в зависимости от температуры приведены в приложении 3.

Подсчет полного теплосодержания смеси продуктов сгорания одного килограмма топлива производится по формуле

$$I_{п.с} = \sum_i M_i I_{пi} \quad (\text{V. 26})$$

где M_i — число граммолей i -того газа, приходящееся на 1 кг смеси продуктов сгорания.

Числа граммолей M_i выражаются обычно через общее число граммолей продуктов сгорания, приходящихся на 1 кг топлива M_Σ и объемные доли газов, составляющих продукты сгорания r_i

$$M_i = M_\Sigma r_i. \quad (\text{V. 27})$$

Как известно,

$$r_i = \frac{p_i}{p_\Sigma}, \quad (\text{V. 28})$$

где p_i — парциальное давление i -того газа в смеси;
 p_Σ — общее давление смеси газов;

$$M_\Sigma = \frac{1000}{\mu_\Sigma}; \quad (\text{V. 29})$$

здесь μ_Σ — кажущийся молекулярный вес продуктов сгорания.

По формуле (II. 5)

$$\mu_\Sigma = \sum_i \mu_i r_i \quad (\text{V. 30})$$

или с учетом (V. 28)

$$\mu_\Sigma = \sum_i \mu_i \frac{p_i}{p_\Sigma} = \frac{1}{p_\Sigma} \sum_i \mu_i p_i \quad (\text{V. 31})$$

откуда

$$M_\Sigma = \frac{1000}{\mu_\Sigma} = \frac{1000 p_\Sigma}{\sum_i \mu_i p_i}. \quad (\text{V. 32})$$

Подставим (V. 32) и (V. 28) в формулу (V. 27); после сокращения на p_Σ получим

$$M_i = M_\Sigma \frac{p_i}{p_\Sigma} = \frac{1000 p_i}{\sum_i \mu_i p_i}. \quad (\text{V. 33})$$

После подстановки (V. 33) в (V. 26) получим расчетную формулу для определения полного теплосодержания продуктов сгорания

$$I_{\text{п.с.}} = \frac{M_\Sigma}{p_\Sigma} \sum_i I_{\text{п.с.}} p_i = 1000 \frac{\sum_i I_{\text{п.с.}} p_i}{\sum_i \mu_i p_i}. \quad (\text{V. 34})$$

При проведении тепловых расчетов (см. гл. VI) необходимо, чтобы подсчет полного теплосодержания топлива и продуктов сгорания проводился в одной и той же системе отсчета.

Связь между полным теплосодержанием и величиной теплотворной способности топлива

Величина полного теплосодержания используется при расчете ЖРД и характеризует запас энергии топлива.

Такой же характеристикой топлива является теплотворная способность его H_u . Поэтому должна быть вполне определенная связь между величиной теплотворной способности и величиной полного теплосодержания.

Под величиной теплотворной способности подразумевается количество тепла, выделяющегося при полном сгорании топлива.

Это количество тепла может быть определено следующим образом. Предположим, что происходит сгорание 1 кг топлива до продуктов полного сгорания. Выделяющееся при этом тепло пойдет на нагревание и повышение температуры продуктов сгорания. Если охладить продукты сгорания до начальной температуры, которую топливо имело до сгорания, то отведенное и могущее быть использованным количество тепла и будет равно теплотворной способности его.

Так как по закону сохранения энергии тепло, выделившееся при постоянном давлении, может быть получено только за счет изменения теплосодержания рабочей смеси, то величина теплотворной способности будет равна разности полных теплосодержаний топлива и продуктов сгорания, взятых при одной и той же температуре T_0 , равной температуре топлива до начала сжигания

$$H_u = [I_{п.т.} - I_{п.п.с.}]T_0, \quad (V. 35)$$

или

$$\begin{aligned} H_u &= I_{физ.т.} + I_{хим.т.} - I_{физ.п.с.} - I_{хим.п.с.} = \\ &= (I_{физ.т.} - I_{физ.п.с.}) + (I_{хим.т.} - I_{хим.п.с.}). \end{aligned} \quad (V. 36)$$

Таким образом теплотворная способность представляет собой сумму разностей физических и химических теплосодержаний топлива и продуктов сгорания.

Теплотворная способность определяется обычно при низких температурах, так что T_0 составит $\sim 300^\circ$ абс. ($18-27^\circ$ С). При этом условии изменение физических теплосодержаний при сгорании топлива и превращении ее в продукты сгорания сравнительно невелико и основную долю теплотворной способности составляет изменение химических энергий. Таким образом, можно считать, что

$$H_u \approx (I_{хим.т.} - I_{хим.п.с.}). \quad (V. 37)$$

Рассматривая величину этой разности, мы видим, что теплотворная способность тем больше, чем меньше химическая энергия продуктов сгорания $I_{хим.п.с.}$ и чем больше химическая энергия топлива $I_{хим.т.}$. Таким образом, повышения теплотворной способности топлива можно достичь за счет понижения химической энергии продуктов сгорания или за счет увеличения химической энергии топлива.

Химическая энергия продуктов полного сгорания зависит от типа образующихся молекул, т. е. от тех элементов, которые входят в топливо. Повышение теплотворной способности топлива поэтому возможно за счет использования элементов, которые дают продукты сгорания с большой отрицательной химической энергией. На этом основаны попытки использования в ЖРД металлов (алюминия, магния, бора) и других элементов в качестве горючих, а также использование в качестве окислительного элемента фтора. В результате сжигания таких веществ часто получаются соединения с большой отрицательной химической энергией.

Для топлив, в состав которых входит углерод и водород, а окислительным элементом является кислород, величина химической

энергии продуктов полного сгорания тем ниже, чем больше содержание в топливе водорода, имеющего на 1 кг продуктов сгорания более низкую химическую энергию (-3210 ккал/кг) по сравнению с углеродом (-2140 ккал/кг).

По этой же причине возможно применение в качестве горючего ЖРД жидкого водорода. Этому препятствует, однако, очень малый удельный вес жидкого водорода ($\gamma = 0,07$ кг/л), значительно более низкий, чем у других горючих.

Для обычных углеводородных топлив содержание водорода в горючем постоянно и составляет 12—14%. Химическая энергия продуктов полного сгорания углеводородов поэтому примерно постоянна.

Химическая энергия всех продуктов сгорания топлива зависит в основном от содержания в нем балласта, т. е. в нашем случае — азота.

С увеличением содержания балласта химическая энергия 1 кг продуктов сгорания увеличивается. Поэтому в соответствии с формулой (V. 37) теплотворная способность H_u топлива уменьшается. Мы видели, что для увеличения теплотворной способности топлива можно идти также по пути увеличения химической энергии его

$I_{\text{хим.т.}}$
Так как $I_{\text{хим.т.}}$ определяется теплотой образования горючего и окислителя, то, чем большее значение имеет теплота образования компонентов, тем выше будет теплотворная способность топлива.

Как уже указывалось, теплота образования различных веществ изменяется в широких пределах и может быть отрицательной и положительной. Очевидно, что выгоднее всего иметь положительную теплоту образования компонентов топлива.

Так, например, для образования из молекулярного кислорода 1 кг озона надо затратить около 730 ккал/кг.

Если использовать в ЖРД в качестве окислителя не кислород, а озон, то при сгорании его с горючим каждый килограмм озона выделит дополнительно 730 ккал/кг. Теплотворная способность такого топлива по сравнению с теплотворной способностью топлива, использующего в качестве окислителя кислород, будет большей.

С другой стороны, перекись водорода H_2O_2 имеет отрицательную теплоту образования, равную $-44,5$ ккал/граммоль.

При реакции разложения перекиси водорода образуется кислород и вода; последняя в количестве 1 граммоль на 1 граммоль перекиси. Так как теплота образования кислорода равна нулю, то полное теплосодержание продуктов сгорания определяется величиной теплоты образования воды, равной $-57,73$ ккал/граммоль. Теплотворная способность H_u перекиси водорода будет равна

$$H_u = -44,5 - (-57,73) = 13,23 \text{ ккал/граммоль,}$$

т. е. H_u имеет очень небольшое значение. Именно поэтому при реакции разложения перекиси водорода выделяется очень мало энергии.

Вещества, имеющие положительную теплоту образования, могут явиться основой для создания мощных топлив для ЖРД. Так,

например, атомарный водород, имеющий большую теплоту образования, равную 52 120 ккал/кг, может явиться примером такого мощного топлива с большой теплотворной способностью. Практическое применение (озон, ацетилен, атомарные элементы) ограничивается тем, что они, имея в себе большой запас энергии, являются очень неустойчивыми по отношению к любому внешнему воздействию и могут разлагаться со взрывом. Большинство современных горючих и окислителей имеет небольшую отрицательную теплоту образования.

Многообразные требования, предъявляемые к топливам ЖРД, а также стремление получить топлива, развивающие возможно большую удельную тягу, привели к тому, что множество веществ исследовалось и продолжает исследоваться с точки зрения возможности их применения в качестве компонентов топлив жидкостных ракетных двигателей.

Однако до настоящего времени в ЖРД применяется довольно узкий круг химических веществ, используемых в качестве компонентов топлива.

Так как свойства топлив определяются в основном окислителем, то рассматриваемые ниже топлива мы разобьем на группы по типу применяемого в них окислителя.

В современных ЖРД нашли практическое применение следующие топлива:

- 1) топлива на основе азотной кислоты и окислов азота;
- 2) топлива на основе кислорода;
- 3) топлива на основе перекиси водорода.

§ 28. ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ И ДРУГИХ ОКИСЛОВ АЗОТА¹

Азотная кислота

Азотная кислота HNO_3 в химически чистом виде представляет собой бесцветную жидкость. Техническая азотная кислота никогда не является химически чистым продуктом, а всегда содержит некоторое количество воды и окислов азота, придающих азотной кислоте красно-бурый цвет.

Добавка воды в азотную кислоту является нежелательной, так как она снижает ее теплосодержание. Поэтому в ЖРД применяют азотную кислоту с содержанием воды в количестве не более 2—4%, т. е. с концентрацией 98—96%.

Так как в ЖРД используется высококонцентрированная HNO_3 , то приводимые ниже физико-химические данные ее относятся к азотной кислоте 100%-ной концентрации.

Азотная кислота содержит 76% кислорода и обладает малой отрицательной теплотой образования, что делает ее относительно мощным окислителем. Из всех широко применяемых окислителей

¹ Некоторые данные о свойствах компонентов топлив ЖРД приведены в книге: *Моторные топлива, масла и жидкости*, т. 1, Гостоптехиздат, 1953.

она имеет наибольший удельный вес (1,52), что позволяет получить на ее основе топлива с высокой теплоплотностью.

Азотная кислота имеет весьма благоприятные для использования в ЖРД температуры кипения (+86° С) и замерзания (-42° С). Добавка воды несколько понижает температуру замерзания.

Температура кипения азотной кислоты возрастает с увеличением давления так, что при давлениях, имеющих место в тракте охлаждения ЖРД, температура кипения ее достигает 200° С.

Теплоемкость HNO_3 составляет около 0,5 ккал/кг, что совместно с высокой температурой кипения и большим содержанием ее в топливе ($v_0 = 5,47$) делает азотную кислоту удобной охлаждающей жидкостью с большой теплоемкостью.

Динамическая вязкость азотной кислоты при 20° С составляет около $1 \cdot 10^{-4}$ кгсек/м², что примерно равно динамической вязкости воды. При увеличении температуры динамическая вязкость несколько уменьшается.

Азотная кислота широко используется в народном хозяйстве для приготовления удобрений и взрывчатых веществ. Стоимость ее относительно невелика.

Азотная кислота обладает рядом недостатков. Пары HNO_3 ядовиты; при попадании на кожу азотная кислота вызывает тяжелые ожоги, поэтому работа с ней требует предосторожности, а это затрудняет эксплуатацию двигателей.

Азотная кислота также весьма агрессивна по отношению к металлам и другим конструкционным материалам. Особенно сильно влияет на металл кислота, разбавленная водой, поэтому промывка двигателей и деталей после попадания на них азотной кислоты должна быть очень тщательной. Материалами, которые не поддаются действию азотной кислоты, являются нержавеющие стали, алюминий и некоторые из его сплавов.

Давление насыщенных паров азотной кислоты при нормальной температуре значительно, т. е. азотная кислота легко испаряется, поэтому при ее хранении необходимо принимать меры предосторожности.

Присадки к азотной кислоте

Для улучшения свойств азотной кислоты как окислителя к ней добавляются различные присадки. Этим достигается повышение мощности окислителя и теплотворной способности топлива, повышение удельного веса окислителя, уменьшение агрессивности по отношению к конструкционным материалам, повышение активности окислителя относительно горючего и, особенно, относительно самовоспламеняющихся с азотной кислотой горючих, понижение температуры замерзания.

Многие присадки изменяют не одно, а несколько свойств азотной кислоты, т. е. имеют комбинированное воздействие. Рассмотрим основные присадки к азотной кислоте и их действие.

Четырехокись азота N_2O_4 представляет собой богатый кислородом окисел азота с положительной теплотой образования, что повышает теплосодержание окислителя по сравнению с HNO_3 и приводит к увеличению теплотворной способности топлива. Однако применение в качестве окислителя чистой четырехокиси N_2O_4 невозможно из-за высокой ее температуры замерзания ($-9,3^\circ C$) и низкой температуры кипения ($+22^\circ C$). Поэтому N_2O_4 и используется как присадка к HNO_3 для увеличения теплотворной способности топлива. Кроме того, добавка N_2O_4 к HNO_3 дает раствор с большим удельным весом, чем N_2O_4 и HNO_3 , взятые в отдельности. Максимальный удельный вес такого раствора (при содержании в HNO_3 40% N_2O_4) составляет 1,63 кг/л. Добавка N_2O_4 повышает также активность окислителя, а следовательно, облегчает условия запуска ЖРД, снижает температуру замерзания окислителя, но до определенного предела.

Концентрированная серная кислота H_2SO_4 применяется как присадка, снижающая агрессивные свойства азотной кислоты по отношению к металлам. Она улучшает условия запуска двигателя, особенно с самовоспламеняющимся топливом. Смеси азотной и серной кислот называются *меланжами*. Недостатком добавки серной кислоты в азотную является уменьшение теплосодержания окислителя.

Хлорное железо $FeCl_3$ добавляется в азотную кислоту для понижения температуры замерзания, а также как присадка, повышающая активность окислителя. Однако добавка $FeCl_3$ снижает теплотворную способность топлива.

Тетранитрометан как окислитель

Кроме азотной кислоты и четырехокиси азота, из азотных соединений кислорода в качестве окислителя может быть использован тетранитрометан $C(NO_2)_4$. Он имеет положительную теплоту образования, что повышает его теплосодержание. Большим достоинством тетранитрометана как окислителя ЖРД является высокий удельный вес (1,65 кг/л), больший чем у азотной кислоты, и отсутствие агрессивного воздействия на конструкционные материалы.

Применение тетранитрометана ограничивалось его взрывоопасностью, которая определяется тем, что в молекулу тетранитрометана входит и окислительный, и горючий элемент (углерод), поэтому молекула тетранитрометана напоминает молекулу пороха или взрывчатого вещества. Кроме того, тетранитрометан является сильным отравляющим веществом, действующим на слизистые оболочки человека.

Температура замерзания тетранитрометана $+13,8^\circ C$. Однако смесь его с N_2O_4 имеет температуру замерзания около $-25^\circ C$, что позволяет использовать его в качестве окислителя для ЖРД.

Основные физико-химические свойства окислителей приведены в табл. 3.

Основные физико-химические свойства некоторых современных чистых окислителей для жидкостных ракетных двигателей

Окислитель	Химическая формула	Молекулярный вес	Элементарный состав в кг/кг				Теплота образования в ккал/граммоль	Теплосодержание в ккал/кг	Удельный вес при 15°C	t _{плавл} в °C при 1 ата	t _{кип} в °C при 1 ата
			O ₀	C ₀	H ₀	N ₀					
Азотная кислота	HNO ₃	63,02	0,762	0	0,016	0,222	-41,66	-660	1,52	-42	+86
Четырехокись азота	N ₂ O ₄	92,01	0,696	0	0	0,304	+12,2	+132	1,47	-9,3	+22
Тетранитрометан	C(NO ₂) ₄	196,03	0,653	0,061	0	0,286	+5,2	+26	1,65	+13,8	+126
Кислород жидкий	O ₂	32,00	1,000	0	0	0	0,0	-96	1,14 (при -183°C)	-227	-183
Перекись водорода	H ₂ O ₂	34,02	0,940	0	0,060	0	-45,20	-1326	1,46	0	+152
Вода жидкая*	H ₂ O	18,02	0,889	0	0,111	0	-68,35	-3790	1,00	0	+100

* Вода включена в данную таблицу вследствие того, что она часто входит в состав окислителей и топлив.

Горючие топлив на основе азотной кислоты и окислов азота. Самовоспламеняющиеся топлива

Наиболее широко в качестве горючего топлив на основе HNO_3 и окислов азота применяется керосин. Основные физико-химические свойства керосина приведены в табл. 4, а данные топлив азотная кислота + керосин — в табл. 5.

Керосин обладает рядом положительных свойств, позволяющих успешно применять его в ЖРД. Он имеет высокую теплотворную способность. В широком пределе температур керосин является жидким веществом. Керосин может быть использован как охладитель двигателя; теплоемкость его составляет примерно $0,45 \text{ ккал/кг}$, а температура кипения при повышенных давлениях достигает 250°C . Перевозка и хранение керосина также не вызывают больших трудностей; производство его обеспечено как сырьем, так и широким развитием нефтеперерабатывающей промышленности.

Керосин может быть применен в качестве горючего со всеми окислителями на основе окислов азота.

Величина теплотворной способности топлива составляет 1460 ккал/кг для смеси HNO_3 + керосин. Для других окислов азота она несколько повышается (до 1500 ккал/кг) за счет лучших свойств окислителя. Недостатком керосина является сравнительно небольшой удельный вес его ($0,8—0,85 \text{ кг/л}$).

Топливо HNO_3 + керосин и другие топлива на основе окислов азота не являются самовоспламеняющимися и требуют принудительного воспламенения.

Другие углеводороды, дающие топлива, не самовоспламеняющиеся с азотной кислотой и окислами азота (например, спирты метиловый и этиловый), практически не нашли применения в азотнокислотных ЖРД. На основе HNO_3 созданы также самовоспламеняющиеся топлива.

Для получения надежных самовоспламеняющихся топлив соответствующие горючие составляются смесями углеводородов. В качестве углеводородов, дающих самовоспламеняющиеся с HNO_3 горючие, служат анилин, фурфуроловый спирт, ксилидин, трэтил-амин. Их состав и основные физико-химические данные приведены в табл. 4. Из особых свойств этих углеводородов следует указать только на несколько более высокий удельный вес анилина.

Основной величиной, характеризующей качество самовоспламеняющихся топлив, является период задержки самовоспламенения (период индукции). Для обеспечения надежного запуска двигателя время задержки самовоспламенения не должно превышать $0,03 \text{ сек}$. Для достижения таких значений времени задержки самовоспламенения подбираются смеси достаточно активных самовоспламеняющихся горючих и применяется активация окислителей.

Имеется большое число самовоспламеняющихся топлив различных составов. Общим их недостатком является сравнительно низкая теплотворная способность (часто более низкая, чем для топлива азотная кислота + керосин), а также высокая стоимость и

Таблица 4

Основные физико-химические свойства некоторых современных горючих для жидкостных ракетных двигателей

Горючее	Химическая формула	Молекулярный вес	Элементарный состав в кг/кг				Теплота образования в ккал/граммоль	Теплосодержание в ккал/кг ($H_u = 10170$)	Удельный вес в кг/л при 15°C	$t_{кип}$ в °C при 1 ата	$t_{плав}$ в °C при 1 ата
			C_T	H_T	O_T	N_T					
Керосин тракторный	Смесь углеводородов	100	0,858	0,135	0,007	0	—	0,79—0,84	170 (150—315) начало кипения	—50	
Спирт этиловый	C_2H_5OH	46,04	0,522	0,131	0,347	0	—65,90	0,789	78,3	—117,3	
Спирт метиловый	CH_3OH	32,03	0,375	0,125	0,500	0	—60,24	0,791	64,6	—94,9	
Анилин	$C_6H_5NH_2$	93,08	0,774	0,076	0	0,150	+7,09	1,022	184,4	—6,2	
Триэтиламин	$(C_2H_5)_3N$	101,07	0,712	0,149	0	0,139	—42,33	0,728	89,5	—114,8	
Ксалидин	$(CH_3)_2C_6H_8NH_2$	121,12	0,793	0,091	0	0,116	—46,2	—	—	—	
Фурфуроловый спирт	$C_4H_3OCH_2OH$	98,06	0,614	0,061	0,325	0	—63,1	—	171	—32	
Гидразин-гидрат	$(NH_2)_2 \cdot H_2O$	50,06	0	0,122	0,318	0,560	—63,15	1,03	118,5	—40	
Винилэтиловый эфир	$C_2H_3OC_2H_5$	72,07	0,667	0,111	0,222	0	—63,1	0,754	36	—50	

Основные свойства некоторых современных топлив для жидкостных ракетных двигателей

Окислитель	Горючее	H_u в ккал/кг	γ' в кг/л	V_r в л/кг	T° абс.	$P_{уд}$ в кгсек/кг
Азотная кислота 98%-ной концентрации	Керосин	1460	1,36	800	3000	215
	Тонка	1490	1,32	784	3000	210—220
	Анилин (80%) + фурфуроловый спирт (20%)	1420	1,39	756	3050	210
Тетраинторметан*	Керосин	1590	1,47	660	3300	230
	Керосин	1550	1,38	680	3200	230
Жидкий кислород*	Керосин	2200	1,00	650	3550	275
	Этиловый спирт 93,5%-ной концентрации	2020	0,99	789	3280	245
Перекись водорода 80%-ной концентрации	—	540	1,35	1083	780	100
Перекись водорода 80%-ной концентрации	Метиловый спирт (50%) + гидразин-гидрат (50%)	1020	1,30	940	2600	185

Примечания: 1. Температура сгорания и удельная тяга даны приблизительно для средних по своим параметрам жидкостных ракетных двигателей в условиях работы на земле.

2. Для топлив, помеченных звездочкой, значения удельной тяги получены расчетом.

дефицитность. Поэтому наряду с примененным самовоспламеняющимся смесей как основного топлива двигателя эти топлива преимущественно используются лишь как средство воспламенения в системах химического зажигания.

Наиболее распространенными самовоспламеняющимися топливами являются смеси:

1) азотная кислота и горючее, состоящее из 50% триэтиламина и 50% ксилидна (так называемая тонка); это топливо широко применялось в немецких ракетных двигателях;

2) азотная кислота и горючее, состоящее из 80% анилина и 20% фурфуримового спирта. Горючие на основе анилина используются во многих американских ракетных двигателях.

Данные этих топлив приведены в табл. 5.

§ 29. ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ ЖИДКОГО КИСЛОРОДА И ПЕРЕКИСИ ВОДОРОДА

Жидкий кислород

Жидкий кислород O_2 является еще более мощным окислителем, чем азотная кислота, так как содержит 100% окисляющего элемента и дает топлива, обладающие наиболее высокой теплотворной способностью. Жидкий кислород представляет собой прозрачную жидкость голубоватого цвета, кипящую при $-183^\circ C$. Удельный вес его значительно меньше, чем удельный вес HNO_3 и составляет при температуре кипения 1,14 кг/л.

Основные физико-химические свойства кислорода приведены в табл. 3.

Низкая температура кипения не позволяет использовать жидкий кислород в качестве охладителя и применять в двигателях, требующих хранения в заправленном состоянии. Заправка баков двигателя жидким кислородом производится непосредственно перед запуском. Даже при этом условии бывают большие потери жидкого кислорода вследствие испарения его.

Для хранения жидкого кислорода вне двигателя применяются баки с двойными стенками. Для осуществления теплоизоляции из пространства между стенками бака для хранения откачивается воздух или же это пространство заполняется теплоизолирующими веществами, что уменьшает теплопередачу от одной стенки к другой.

Материалом для изготовления кислородных баков двигателя могут служить нержавеющая сталь или сплавы алюминия. Уплотняющие прокладки изготавливаются из мягких металлов (медь, свинец) или специальных пластмасс.

Жидкий кислород практически безвреден для человека. При попадании на кожу в небольшом количестве он начинает кипеть и образовавшийся слой газообразного кислорода предохраняет кожу от обмерзания.

Жидкий кислород в последние годы широко применяется в самых разнообразных областях техники. Производство его поставлено в широком масштабе и удовлетворительно разрешены вопро-

ы хранения и перевозки. Несмотря на неизбежные потери, связанные с испарением (при использовании в ЖРД теряется примерно 50% начального количества жидкого кислорода), стоимость использования жидкого кислорода в ракетах невелика.

Горючие топлива на основе жидкого кислорода

В качестве горючего для жидкого кислорода могут применяться любые углеводороды. Все они дают несамовоспламеняющиеся топлива.

Наибольшую теплотворную способность (2200 ккал/кг) имеет топливо жидкий кислород+керосин. Это вообще наиболее мощное топливо из современных топлив ЖРД. Работы по использованию смеси кислород+керосин начались еще на заре развития ракетной техники. Трудность использования данной смеси определяется высокой температурой сгорания, а также весьма малым количеством керосина в смеси (~20%), что осложняет организацию охлаждения двигателя. Эти причины до сих пор ограничивают применение топлива кислород+керосин.

Широкое распространение в настоящее время получили топлива на основе жидкого кислорода, в которых в качестве горючего используются этиловый и метиловый спирты. В технике применяется этиловый спирт 93,5%-ной концентрации (по весу).

Основные свойства этилового и метилового спиртов приведены в табл. 4.

Теплотворная способность спиртов ниже, чем у керосина, так как они имеют большую отрицательную теплоту образования, но зато и температура сгорания спирта в кислороде ниже, что облегчает выполнение двигателей. Удельный вес спирта небольшой (около 0,8 кг/л). Температура кипения достаточно высока, что позволяет использовать спирт в качестве охлаждающей жидкости.

Вследствие того, что в самом спирте содержится значительное количество кислорода, относительное содержание спирта в топливе велико (доходит до 40—45%). Поэтому осуществить надежное охлаждение кислородно-спиртовых двигателей значительно легче, чем кислородно-керосиновых.

К тому же теплоемкость спирта несколько выше, чем у керосина, и составляет примерно 0,6 ккал/кг.

Этиловый и метиловый спирты в любой пропорции смешиваются с водой, поэтому легко получать топлива с разной теплотворной способностью, т. е. снижать температуру в камере сгорания и увеличивать тепловосприимчивость горючего в любой, необходимой для надежной работы двигателя степени. Именно по этому пути пошли конструкторы двигателя ракеты А-4 (V-2), применяв в качестве горючего водный раствор спирта 75%-ной концентрации (по весу), хотя при этом удельная тяга двигателя была значительно снижена (до 200 кгсек/кг).

Низкая температура застывания спирта позволяет использовать его в широком диапазоне температур окружающей среды.

Производство спирта поставлено очень широко, что делает его недефицитным топливом. По отношению к конструкционным материалам спирт не оказывает агрессивного воздействия, что позволяет изготавливать баки для спирта из сравнительно дешевых материалов.

Заместителем этилового спирта может служить метиловый спирт, дающий с кислородом топливо несколько худшего качества. Метиловый спирт смешивается с этиловым в любых пропорциях, поэтому его можно использовать при недостатке этилового спирта, добавляя в некоторой доле в горючее.

Топлива на основе жидкого кислорода применяются почти исключительно в ракетах дальнего действия.

Перекись водорода

Перекись водорода H_2O_2 в чистом виде (т. е. 100%-ой концентрации) в технике не применяется, так как она является чрезвычайно нестойким продуктом, способным к самопроизвольному разложению, легко переходящему во взрыв под влиянием всяких, казалось бы, незначительных внешних воздействий: удара, освещения, малейших загрязнений органическими веществами и некоторыми металлами.

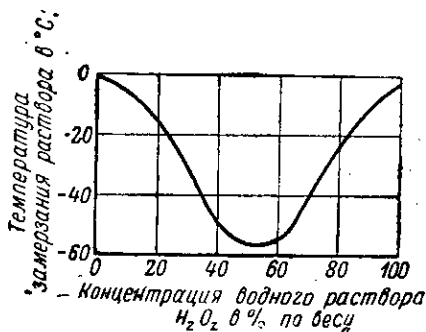
В ракетной технике применяется более стойкий продукт: высококонцентрированный раствор перекиси водорода в воде. Наиболее широко используется перекись водорода 80%-ой концентрации. Для повышения стойкости в перекись водорода добавляют в небольших количествах стабилизаторы (например, фосфорную кислоту). Применение 80%-ой перекиси водорода требует в настоящее время только обычных мер предосторожности, необходимых при обращении с сильными окислителями.

Перекись водорода 80%-ой концентрации в присутствии катализатора быстро разлагается с выделением тепла в количестве 540 ккал/кг и свободного кислорода, который может быть использован для окисления горючего.

Перекись водорода имеет значительный удельный вес (1,36 кг/л для 80%-ой перекиси).

Использовать перекись водорода в качестве охлаждающей жидкости не удастся, так как при нагреве она не кипит, а разлагается.

Температура замерзания водного раствора перекиси зависит от концентрации раствора. Эта зависимость показана на фиг. 61.



Фиг. 61. Зависимость температуры замерзания водных растворов H_2O_2 от концентрации.

температура замерзания обычно применяющейся 80%-ной перекиси водорода составляет — 25° С.

В качестве материалов для баков и трубопроводов двигателей, работающих на перекиси, могут быть использованы нержавеющие стали и очень чистый алюминий (99,5%). Совершенно недопустимо применение меди и других тяжелых металлов, так как медь является сильным катализатором, способствующим разложению перекиси водорода. Для прокладок и уплотнений могут быть применены некоторые сорта пластмасс.

Попадание концентрированной перекиси водорода на кожу вызывает тяжелые ожоги; органические вещества при попадании на них H_2O_2 загораются.

Горючие топлив на основе перекиси водорода

На основе перекиси водорода применяются два типа топлив. Могут применяться топлива раздельной подачи, в которых кислород перекиси используется для сжигания горючего.

Известно топливо, применявшееся в самолетном ЖРД «Вальтер». В нем окислителем служила 80%-ная перекись водорода. В качестве горючего использовалась смесь метилового спирта (50%) и гидразин-гидрата (50%).

Гидразин-гидрат $(NH_2)_2 \cdot H_2O$ имеет малый запас энергии, но обеспечивает самовоспламенение горючего с перекисью водорода.

Малая теплотворная способность такого топлива и высокое газообразование определяют низкую температуру в камере, что позволило создать надежный в работе двигатель. Однако этот двигатель имеет низкую удельную тягу — около 185 кгсек/кг.

Перекись водорода используется так же в качестве топлива, разлагающегося под действием катализатора. При этом происходит не реакция сгорания, а реакция разложения перекиси водорода с выделением тепла.

Однако в этом случае тепла выделяется значительно меньше, чем при использовании любых двухкомпонентных топлив. Температура в камере сгорания не превышает 850° С для высококонцентрированной перекиси водорода и снижается для более разбавленной. Вследствие такой низкой температуры ЖРД, использующие реакцию разложения перекиси водорода в присутствии катализатора, называются «холодными» двигателями. Камеры сгорания этих двигателей обычно даже не охлаждаются.

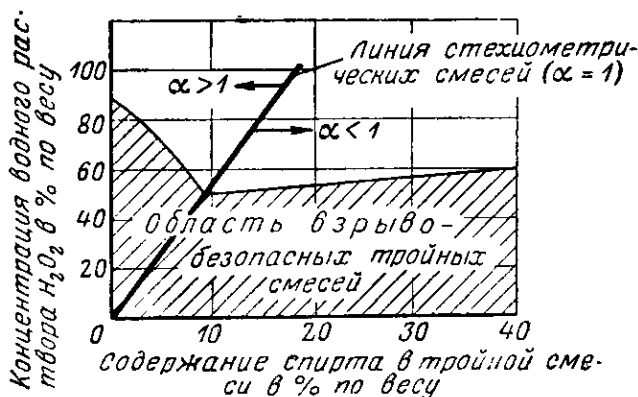
Основной недостаток «холодных» двигателей состоит в том, что ввиду малого выделения тепла они имеют очень низкую удельную тягу (порядка 90 кгсек/кг). Использование катализатора в «холодных» двигателях осуществляется двумя способами. Первый из них состоит в том, что жидкий катализатор (так же как и перекись водорода) поступает в камеру сгорания через форсунки.

Второй способ состоит в размещении катализатора непосредственно в камере сгорания. Его применяют при использовании твердых катализаторов. В этом случае перекись водорода является унитарным топливом.

Применение перекиси водорода для получения парогаса

Перекись водорода весьма удобна для получения парогаса, используемого для привода турбины. Температура парогаса, получающегося при разложении 80%-ной перекиси, составляет 400—500° С, что позволяет использовать его непосредственно в турбине турбонасосного агрегата.

Большую теплотворную способность, а следовательно, и парогаз более высокой температуры, могут дать топлива, представляющие раствор спирта в перекиси водорода. При некоторой добавке воды эти топлива не являются взрывоопасными, допускают



Фиг. 62. Области взрывобезопасности тройных смесей.

хранение и подачу в газогенератор по одному трубопроводу. Область взрывобезопасных тройных смесей: спирт+перекись водорода+вода показана на фиг. 62¹.

Наибольшей теплотворной способностью будет обладать смесь перекиси водорода 50%-ной концентрации с 18% спирта. Эта смесь является стехиометрической взрывобезопасной смесью.

Парогаз, получающийся при сгорании такой смеси, имеет температуру 800° С, что обеспечивает меньший весовой расход его, необходимый для получения данной мощности турбины по сравнению с расходом 80%-ной перекиси водорода.

§ 30. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТОПЛИВА ДЛЯ ЖРД

Выше были приведены физико-химические данные топлив, применяющихся в настоящее время в ЖРД. Все они, за исключением топлива керосин+кислород, не дают удельных тяг, больших, чем 240—250 единиц. В то же время необходимо повышать удельную тягу для дальнейшего совершенствования ракетных аппаратов.

¹ «Ракетные двигатели», Материалы Германской Академии авиационных исследований, Изд. БНТ, 1948.

В связи с этим продолжается изыскание новых топлив с большим запасом энергии в них и лучшим удельным весом.

Создание новых топлив с большим запасом энергии может проходить разными путями.

Металлические горючие и фтористые окислители

Во-первых, можно вводить в состав топлив элементы, дающие большой тепловой эффект при сгорании, и, во-вторых, использовать такие вещества, которые имеют большую положительную теплоту образования.

Тщательный анализ периодической системы Менделеева приводит к отбору элементов с наибольшим запасом химической энергии.

В качестве окислительных элементов наиболее целесообразно применять кислород и фтор. В качестве горючих элементов — водород, литий, бериллий, бор, углерод, магний, алюминий и кремний.

Теплотворные способности топлив на основе этих элементов приведены в табл. 6¹.

Таблица 6

Элемент	Кислородное топливо				Фтористое топливо			
	H_u в ккал/кг	H_{uT} в ккал/л	μ продук- тов сгора- ния	t° кипения продуктов сгорания в $^\circ C$	H_u в ккал/кг	H_{uT} в ккал/л	μ продук- тов сгора- ния	t° кипения продуктов сгорания в $^\circ C$
Водород	3210	1350	18,02	100	3210	1475	20,01	—
Литий	4760	3570	29,88	1300	5650	4930	25,94	(1960)
Бериллий	5830	8850	25,01	(3900)	4830	5950	47,01	(850)
Бор	4350	5570	69,94	—	3910	4750	67,82	—
Углерод	2140	2830	44,01	—78	1850	2250	88,01	—
Магний	3530	5050	40,32	(2250)	4210	5550	62,32	(1110)
Алюминий	3900	6460	101,94	2700	3710	5220	83,97	(1110)
Кремний	3350	5050	60,06	1900	3470	4600	104,06	—

Данные о сгорании перечисленных элементов с кислородом и фтором позволяют сделать следующие выводы.

1. Металлы дают значительно более высокие тепловые эффекты, чем обычные углеводородные топлива.

2. Молекулярные веса продуктов сгорания металлов, как правило, очень велики, что наряду с большим тепловым эффектом приводит к высоким температурам в камере сгорания и значительной диссоциации.

3. Температура кипения фтористых продуктов сгорания метал-

¹ Э. В. Брицке, Термохимические константы неорганических веществ, Изд. АН СССР, 1949.

лов значительно ниже, чем температура кипения кислородных соединений.

4. Сгорание углерода и водорода со фтором не дает большего теплового эффекта, чем сгорание этих элементов с кислородом.

В связи с этим следует предположить, что фтористые окислители могут оказаться мало целесообразными для обычных углеводородных горючих и их следует использовать при сжигании металлических горючих. При сжигании горючих, очень богатых водородом, использование фтористых окислителей может оказаться целесообразным, так как продукт сгорания водорода и фтора HF является двухатомной молекулой, весьма устойчивой против диссоциации. Это может увеличить степень превращения химической энергии в тепловую.

Несмотря на весьма высокие значения теплотворной способности металлических горючих, нельзя ожидать очень значительного возрастания удельной тяги при использовании их в ЖРД, так как полному использованию химической энергии будет препятствовать сильная диссоциация продуктов сгорания.

Конструктивное оформление двигателя будет сложным из-за высоких температур в камере сгорания.

Применять металлы в качестве горючих для ЖРД предполагается или в виде суспензий, т. е. взвесей металлических порошков в жидких горючих, или в виде так называемых металлоорганических соединений.

Некоторые металлоорганические соединения хотя и содержат большой процент металла, но при обычных условиях являются жидкими. Примером таких металлоорганических соединений могут служить следующие (табл. 7)¹.

Таблица 7

Вещество	Химическая формула	t° плавл в $^{\circ}\text{C}$	t° кип в $^{\circ}\text{C}$	Удельный вес γ в кг/л
Декаборан	$\text{B}_{10}\text{H}_{14}$	100	(213)	0,28
Диборанимин	$\text{B}_2\text{H}_7\text{N}$	-66	76	0,70
Диэтилбериллий	$\text{Be}(\text{C}_2\text{H}_5)_2$	12	200	0,20
Трисила	Si_3H_8	-117	53	0,88
Трисилвамин	$(\text{SiH}_3)_3\text{N}$	-106	52	0,895

Двигателей, работающих на каких-либо металлических топливах, в настоящее время нет.

Компоненты топлив с повышенной теплотой образования

Вторым путем увеличения теплотворной способности топлив для ЖРД является применение в качестве компонентов топлив веществ с большой положительной теплотой образования.

¹ Физика и химия реактивного движения, № 2, Издательство иностранной литературы, 1948.

В качестве окислителей такого рода можно указать на озон, который при образовании его из кислорода аккумулирует 730 ккал/кг, отдавая их при сгорании. Известным горючим с большой положительной теплотой образования является ацетилен, требующий для своего образования затраты 2120 ккал/кг.

Использование таких топлив затрудняется весьма большой взрывоопасностью компонентов.

Значительного повышения теплотворной способности топлив можно было бы достичь, если бы удалось применить в качестве горючих и окислителей обычные элементы, но находящиеся не в молекулярной, а в атомарной форме.

Так, например, теплота образования атомарного водорода составляет 52 120 ккал/кг. Если применить его в качестве горючего, то тепловой эффект топлива возрастет до 8960 ккал/кг. Если сжечь атомарный водород с атомарным кислородом, то тепловой эффект составит 12 200 ккал/кг.

Можно также говорить о применении атомарных веществ в качестве унитарных топлив, если энергия будет выделяться только за счет рекомбинации атомарного элемента в молекулярный.

Реальное применение атомарных элементов не может быть осуществлено до того момента, пока не будет найден способ консервации элементов в атомарном состоянии.

Возможности использования в ракетных двигателях атомной энергии

Дальнейшее увеличение запаса энергии в ракетных топливах может быть достигнуто путем использования энергии ядерных реакций, или так называемой атомной энергии.

Ядерные реакции, в противоположность реакциям химическим, происходят так, что они изменяют строение ядер атомов.

По современным представлениям, ядро атома состоит из тяжелых, имеющих (относительно) большую массу элементарных частиц двух видов, а именно протонов и нейтронов.

Протон представляет собой заряженную положительно частицу с массой, равной массе ядра атома водорода. Нейтрон, как показывает его название, вообще не имеет заряда; масса нейтрона также близка к массе водородного атома.

Свойства атома зависят от числа протонов и нейтронов в ядре. При этом в ядре атома каждого элемента число протонов Z всегда строго ограничено и численно равно порядковому номеру элемента в периодической системе Менделеева. Вследствие этого положительный заряд ядра составляет $Z \cdot e$ (e — величина заряда электрона).

Так как в нормальном состоянии атом электрически нейтрален, то число электронов в электронной оболочке атома, определяющих химические свойства элемента, всегда постоянно.

Число нейтронов, входящих в ядро, может быть различным. При этом поскольку различное число не имеющих заряда нейтронов в ядре не изменяет числа электронов и строения электронной

оболочки, то химические свойства атомов с разным числом нейтронов остаются неизменными, несмотря на то, что эти атомы имеют различный атомный вес, или массовое число A , представляющее сумму чисел протонов и нейтронов в ядре.

Этим свойством ядер атомов объясняется существование изотопов элементов, встречающихся в природе. Наличие изотопов приводит к дробным атомным весам многих элементов. Так, например, хлор, имеющий атомный вес 35,46, является в действительности смесью трех изотопов с массовым числом A , равным 34; 35 и 37. При этом число протонов Z равно порядковому номеру хлора, т. е. 17, и во всех изотопах неизменно. Строение ядра атома указывается индексами при символе элемента. Верхний символ обозначает массовое число A , представляющее сумму протонов и нейтронов; нижний индекс число протонов Z , т. е. порядковый номер N . Число нейтронов равно $A - Z$.

Так, Li_3^8 обозначает, что данный изотоп лития обладает массовым числом 8; в ядре этого атома имеется 3 протона и 5 нейтронов.

При образовании ядра атома из свободных протонов и нейтронов, так же, как и при образовании молекул, выделяется энергия. Выделение энергии обусловлено тем, что ядра элементов представляют собой устойчивую систему, связанную внутриядерными силами, возникновение которых при образовании ядра должно сопровождаться уменьшением потенциальной энергии системы.

Вычисление энергии образования ядра наиболее удобно производить, пользуясь принципом эквивалентности энергии и массы, согласно которому эти величины связаны между собой соотношением

$$E = mc^2, \quad (\text{V. 38})$$

где E — энергия в кГМ;

m — масса, выраженная в килограммах массы;

c — скорость света, равная $3 \cdot 10^{10}$, в м/сек.

Энергия, эквивалентная 1 кг массы, составляет

$$\sim 9 \cdot 10^{16} \text{ кГМ/кг массы,}$$

а в килокалориях на 1 кг веса

$$\frac{9 \cdot 10^{16}}{9,81 \cdot 427} = 2,15 \cdot 10^{13} \text{ ккал/кг.}$$

Из принципа эквивалентности массы и энергии следует, что притягательное взаимодействие частиц ядра, образующих устойчивый (с отрицательной потенциальной энергией) атом, сопровождается уменьшением их массы по сравнению с массой этих же частиц, удаленных на расстояние, исключающее взаимодействие между ними. Это уменьшение массы при ядерных реакциях носит название *дефекта массы*, обозначается Δm и может быть определено экспериментально.

По соотношению (V. 38) убыль энергии системы, а значит, величина выделившейся при этом энергии, равна

$$E = \Delta mc^2.$$

В качестве примера найдем энергию образования из элементарных частиц ядра атома гелия He_2^4 , имеющего 2 нейтрона, 2 протона, а следовательно, и 2 электрона.

За единицу массы при ядерных реакциях принимается $1/16$ массы атома кислорода O^{16} , равная

$$1,649 \cdot 10^{-27} \text{ кг массы.}$$

Массы частиц, выраженные в ядерных единицах, составляют:

масса свободного нейтрона	1,00845
масса свободного протона	1,007522
масса электрона	0,000548
масса атома гелия He_2^4	4,00336

Масса ядра гелия равна массе атома гелия за вычетом массы двух электронов:

$$\text{масса ядра гелия} = 4,00336 - 2 \cdot 0,000548 = 4,002264.$$

Дефект массы при образовании ядра гелия составит

$$\Delta m = (2 \cdot 1,00845 + 2 \cdot 1,007522) - 4,002264 = 0,02968 \text{ ядерных единиц массы.}$$

При образовании одного атома гелия из элементарных частиц выделится следующее количество тепла:

$$0,02968 \cdot 1,649 \cdot 10^{-27} \cdot 9,81 \cdot 2,15 \cdot 10^{13} = 1,02 \cdot 10^{-14} \text{ ккал/атом.}$$

На 1 г гелия приходится $1/4$ граммоля его, а так как в граммоле любого вещества находится $6,06 \cdot 10^{23}$ атомов, то общее количество тепла, выделенное при образовании 1 г гелия, составит

$$\frac{1}{4} \cdot 6,06 \cdot 10^{23} \cdot 1,02 \cdot 10^{-14} \text{ ккал/г} = 1,55 \cdot 10^9 \text{ ккал/г.}$$

Это количество тепла примерно соответствует тому, которое выделяется при образовании 50 т воды.

Энергия образования, а следовательно, и дефект массы различных ядер, так же как и энергия образования различных химических соединений, различна. Поэтому в принципе возможны ядерные реакции, которые приводят к образованию ядер с большими дефектами масс, чем исходные ядра. При этом вновь образованные ядра будут более устойчивыми. Энергия, выделяющаяся при образовании нового ядра, будет эквивалентна разности дефектов масс для вновь образованных и исходных ядер.

Ядерные реакции различных элементов проходят по-разному. Наиболее легко осуществляются ядерные реакции тяжелых эле-

ментов с большим массовым числом. Оказывается, что чем больше массовое число ядра, тем менее устойчиво ядро, тем большей склонностью к распаду оно обладает. Распад выражается в делении тяжелого ядра на более легкие с выделением энергии в виде излучения различных видов. Именно тяжелые ядра элементов обладают свойством радиоактивности, характеризующейся мощным излучением, возникающим при делении ядра.

Давно известны также и искусственные ядерные реакции, связанные с превращением легких элементов.

Однако для получения большого и постоянного выхода энергии при ядерных реакциях необходимо искусственно возбуждать ядра, увеличивая их энергию настолько, чтобы они становились неустойчивыми и распадались с образованием новых ядер. Эта энергия возбуждения ядер аналогична энергии активации химических реакций.

Величина энергии возбуждения сама по себе должна быть значительна, так как возбуждающая частица, несущая необходимую энергию, должна проникнуть в ядро.

Для интенсивного возбуждения ядер оказались непригодными заряженные частицы, так как большую часть своей энергии они теряют, не доходя до ядра, на преодоление сил электрического поля, окружающего ядро. Наиболее подходящей частицей для возбуждения ядра является не имеющий заряда нейтрон.

Кроме того, для непрерывного протекания ядерной реакции надо или иметь поток нейтронов соответствующей энергии, или же сама ядерная реакция должна являться источником образования нейтронов, необходимых для возбуждения все новых и новых ядер. Именно после создания таких условий стало возможным практическое использование ядерной энергии тяжелых элементов.

Для возбуждения легких элементов нужно еще больше энергии. Практически она получается путем использования энергии ядерных реакций тяжелых элементов.

Рассмотрим теперь количественную сторону вопроса и оценим возможности, открывающиеся при использовании ядерных реакций.

Каждая ядерная реакция характеризуется своим энергетическим эффектом. За меру его принимается дефект массы, который выражается в долях δ от первоначальной массы активного вещества.

Значение δ очень невелико; оно, конечно, меньше относительного дефекта массы при образовании ядер элементов, так как определяется разностью дефектов массы для двух ядер.

Для реакции деления ядра урана U_{92}^{235} $\delta=0,000731$; при реакциях с легкими атомами величина δ значительно выше.

Для реакции образования гелия из лития и водорода $Li_3^7 + H_1^1 \rightarrow 2He_2^4$ величина $\delta=0,00232$.

При реакции превращения водорода в гелий $4H_1^1 \rightarrow He_2^4$ величина $\delta=0,00715$.

Однако даже при таких незначительных дефектах масс ввиду огромной величины энергии, соответствующей единице массы, вы-

ход энергии K_a при указанных ядерных реакциях будет очень большим. Данные о выходе энергии приведены в следующей таблице.

Тип ядерной реакции	Выход энергии K_a в ккал/кг
Реакция деления урана U_{92}^{235}	$1,57 \cdot 10^{10}$
$Li_3^7 + H_1^1 \rightarrow 2He_2^4$	$2,67 \cdot 10^{10}$
$4H_1^1 \rightarrow He_2^4$	$1,54 \cdot 10^{11}$

Такое большое количество энергии при использовании ядерных реакций должно быть воспринято другим рабочим телом в виде тепловой или химической энергии, которую затем, так же как и в обычном двигателе, можно использовать для создания силы тяги.

Такой способ использования ядерной реакции открывает очень большие возможности в выборе носителя энергии в двигателе. В качестве рабочего тела, воспринимающего энергию ядерных реакций и реализующего ее в виде тепловой, может быть выбрано вещество с наибольшей весовой теплоемкостью, т. е. с низким числом атомов в молекуле и возможно меньшим молекулярным весом.

Таким веществом, возможным для использования, является водород, обладающий в качестве рабочего тела наилучшими свойствами, так как его молекулярный вес равен всего 2. Затем идут аммиак NH_3 и вода H_2O , весовые теплоемкости которых сравнительно высокие.

Следует отметить, что явление диссоциации, вредное при использовании химической энергии может оказаться полезным при использовании ядерной энергии, так как при диссоциации ядерная энергия может аккумулироваться в виде химической энергии, например, в виде положительной энергии образования атомарных газов.

Максимальная температура рабочего тела определяется возможностью создания надежно работающей конструкции атомного двигателя.

Данные о количестве тепла K_G в ккал/кг, аккумулированного в 1 кг рабочего тела, состоящего из различных веществ, при температуре 4000 и 6000° абс. (без учета диссоциации) приведены в табл. 8. Там же приведены количества активного вещества G_a (урана U_{92}^{235} или плутония Pu_{94}^{230}), необходимого для нагревания 1 кг рабочего тела до соответствующих температур.

Данные об удельной тяге, которую можно получить при использовании атомной энергии, говорят о том, что бо́льшая, чем у обычных топлив, тяга может быть достигнута только при высоких температурах в камере или при использовании водорода как рабочего тела двигателя. Однако водород неудобен тем, что удельный вес его в жидком состоянии мал. Повышение температуры в дви-

Таблица 8

Вещество, рабочего тела	4000° абс.				6000° абс.			
	K_G ккал/кг	C_a кг/кг	$P_{уд}$ кгсек/кг	$P_{уд}^1$ кгсек/л	K_G ккал/кг	C_a кг/кг	$P_{уд}$ кгсек/кг	$P_{уд}^1$ кгсек/л
Молекулярный водород (без диссоциации)	15500	$7,2 \cdot 10^{-10}$	822	57,6	25000	$1,2 \cdot 10^{-3}$	1045	78,2
Вода (без диссоциации)	2450	$1,14 \cdot 10^{-10}$	330	330	4700	$2,18 \cdot 10^{-10}$	453	453
Аммиак при разложении на молекулярные водород и азот	1940	$0,9 \cdot 10^{-10}$	293	200	3000	$1,39 \cdot 10^{-10}$	366	250
Атомарный водород (без рекомбинации)	71500	$3,34 \cdot 10^{-9}$	1105	—	81400	$3,78 \cdot 10^{-9}$	1350	—
Атомарный кислород (без рекомбинации)	4900	$2,28 \cdot 10^{-10}$	275	—	5500	$2,56 \cdot 10^{-10}$	337	—
Атомарный азот (без ре- комбинации)	9500	$4,42 \cdot 10^{-10}$	298	—	10200	$4,75 \cdot 10^{-10}$	360	—

гателе приведет к новым затруднениям в системе охлаждения двигателя.

Расход активной массы на подогрев до необходимых температур рабочего тела чрезвычайно мал. Однако действительное количество активной массы в двигателе будет определяться тем обстоятельством, что для протекания ядерных реакций необходима некоторая минимальная или критическая масса.

Необходимость ее объясняется тем, что размеры атомного ядра малы (поперечное сечение порядка 10^{-24} см²) и поэтому для обеспечения достаточно большой вероятности столкновения нейтронов с ядром атома необходимо обеспечить значительную величину пути, который нейтрон должен проходить в активном веществе, т. е. масса активного вещества должна быть больше некоторой минимальной величины.

Величина критической массы зависит от вида активного вещества и условий протекания ядерных реакций.

Например, для чистого вещества U^{238} , U^{235} или Pu^{239} критическая масса составляет шар, радиусом в несколько сантиметров и весом в 20—30 кг¹.

Однако вряд ли можно будет использовать в ракетном двигателе активные вещества в таком виде, так как при этих условиях поверхность теплопередачи получается очень малой; кроме того, ядерные реакции проходят слишком быстро. Для увеличения поверхности теплопередачи, замедления скорости ядерной реакции и возможности управления ею, к делящемуся веществу необходимо добавить так называемый замедлитель. Он должен обладать малой способностью поглощать нейтроны, но сильно уменьшать их скорость. В качестве замедлителя используется графит или тяжелая вода.

Такая схема использования активного вещества лежит в основе всех существующих проектов применения атомной энергии для промышленных целей.

Величина критической массы при использовании замедлителя сильно возрастает и доходит до сотен килограмм.

Основное затруднение, возникающее при размещении в камере двигателя пакета активной массы и замедлителя, состоит в том, что температура активного вещества для обеспечения теплопередачи рабочему телу должна быть больше, чем температура самого рабочего тела, т. е. должна быть очень высокой. Решение этой проблемы представляет большие трудности, так как неизвестны материалы, которые остаются твердыми при температурах 4000—6000 °абс. Уран плавится при $T=1150$ °абс. Более тугоплавкое вещество — окись урана — плавится при $T=2100$ °абс. Даже графит испаряется при температуре около 4000 °абс.

По этим причинам следует искать такое конструктивное решение, при котором не все части пакета активного вещества подвергались бы интенсивному нагреву и более холодные участки обес-

¹ «Современная техника», Сборник рефератов № 6, Издательство иностранной литературы, 1949.

печивали бы необходимую механическую прочность пакета в целом.

Размеры пакета, возможно, придется делать большими также и для получения необходимой величины поверхности, передающей тепло рабочему телу.

Это затруднение не встречается при другом способе использования ядерной энергии в двигателе, когда активное вещество впрыскивается в камеру в виде раствора или суспензии в жидкости. Такая схема использования атомной энергии является очень заманчивой, так как обеспечивает наилучшие условия теплопередачи в турбулентном газовом потоке.

Большой трудностью при использовании такой схемы является то, что размеры камеры должны быть очень большими.

Величина критической массы в этом случае заменяется критическим произведением из давления в камере p_2 на ее радиус R_k . По некоторым подсчетам при использовании в качестве рабочего тела водорода при температуре в камере, равной 5000° абс., необходимое произведение $p_2 R_k$ составляет $12\,000$ м. ата (произведение метров на $кг/см^2$). Таким образом, при давлении в камере в 100 $кг/см^2$ камера должна иметь минимальный диаметр в 240 м. Нельзя даже и говорить о создании камер таких размеров.

Те же подсчеты для других рабочих тел дают еще большие значения критического размера камеры.

Краткие сведения о возможностях использования энергии ядерных реакций в ракетных двигателях, приведенные выше, показывают, что эта проблема очень сложна и предстоит еще длительная работа, пока применение атомной энергии для ракетного двигателя станет реально осуществимым.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ И ЗАДАЧИ

1. Перечислите основные требования к топливу ЖРД.
2. Назовите конструктивные и эксплуатационные требования к топливу ЖРД.
3. Найдите весовой состав смеси: этилового спирта 75% и воды 25% .
4. Определите теоретически необходимое количество окислителя для сгорания 75% -ного раствора этилового спирта с водой.
5. Что называется коэффициентом избытка окислителя?
6. Что называется полным теплосодержанием?
7. Как определяется знак теплоты образования?
8. Опишите систему отсчета полных теплосодержаний, предложенную А. П. Ваничевым.
9. Определите полное теплосодержание 95% -ного раствора азотной кислоты с водой при 20° С, если теплота растворения воды в азотной кислоте составляет — 280 ккал/кг воды.
10. Определите полное теплосодержание 75% -ного раствора этилового спирта с водой при 20° С, если теплота растворения спирта в воде составляет — 170 ккал/кг воды.
11. Расскажите об основных свойствах азотной кислоты.
12. Назовите горючие, применяемые в топливах на основе кислорода.
13. Какие топлива для ЖРД следует считать перспективными?
14. С какими окислителями следует сжигать металлические горючие?

Глава VI

ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ

Тепловой расчет производится для определения удельной тяги и основных размеров сопла жидкостного ракетного двигателя. Он включает в себя расчет сгорания и истечения.

В основе расчета сгорания и истечения лежит расчет состава и температуры продуктов сгорания в камере двигателя и на срезе сопла при заданных давлениях.

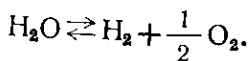
Этот расчет обязательно должен производиться с учетом диссоциации, так как в продуктах сгорания остается большое количество химической энергии.

§ 31. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРОСТЕЙШЕГО ТОПЛИВА

Составление системы уравнений для определения состава продуктов сгорания

Расчет состава и температуры продуктов сгорания представляет собой довольно громоздкую операцию, в которой надо ясно представлять смысл используемых уравнений и методы разрешения их. Поэтому прежде чем приступить непосредственно к интересующему нас расчету сгорания и истечения в ЖРД, мы на более простых примерах изучим способы составления и разрешения системы уравнений для определения температуры и состава продуктов сгорания.

Определим состав продуктов сгорания водорода и кислорода при температуре 3000°абс. и заданном давлении $p_2 = 1 \text{ ата}$, если исходная смесь содержала 1 *граммоль* водорода H_2 и 1 *граммоль* кислорода O_2 . При этом будем считать, что диссоциация продуктов полного сгорания, т. е. водяных паров, происходит только на молекулярные водород и кислород по уравнению



В таком случае продукты сгорания будут состоять из трех газов: водорода, кислорода и водяных паров. Число молей этих газов, которые мы обозначим через M_{H_2} , M_{O_2} и $M_{\text{H}_2\text{O}}$, будут тремя не-

известными, подлежащими определению. Для определения этих трех неизвестных необходимо составить систему из трех уравнений.

В соответствии с рассматриваемой реакцией диссоциации



константа равновесия (см. § 12) этой реакции записывается в виде

$$K = \frac{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (\text{VI. 2})$$

Эта величина в общем случае зависит от температуры, но так как в нашем примере температура задана, то она имеет определенное численное значение, которое составляет 0,049*.

Необходимо составить еще два уравнения для определения состава продуктов сгорания. Их можно найти, если воспользоваться законом сохранения вещества. Так как при химических реакциях не происходит изменения элементов, то мы можем утверждать, что количество элементов, т. е. водорода и кислорода, взятых до реакции сгорания, равно количеству этих элементов, находящихся в продуктах сгорания.

Уравнения сохранения вещества, написанные в такой форме, называются *уравнениями баланса элементов*. Так как количество того или иного элемента целиком определяется числом граммолей его, то будем составлять уравнение баланса в граммолях. Это в данном случае приводит к простейшему виду уравнений баланса.

Составим уравнение баланса водорода.

До сгорания по условию задачи мы имеем 1 граммоль водорода. После сгорания и диссоциации водород будет входить в водяные пары H_2O и в молекулярный водород H_2 . Обратим внимание на то, что для образования 1 граммоля водяных паров необходимо затратить также 1 граммоль молекулярного водорода.

Так как в образовавшихся продуктах сгорания имеется и H_2O и H_2 , то, очевидно, количество граммолей водяных паров H_2O , образовавшееся при сгорании 1 граммоля H_2 при наличии диссоциации, будет меньше единицы.

Число граммолей водяных паров в продуктах сгорания обозначим через x , т. е. $M_{\text{H}_2\text{O}} = x$. Тогда количество граммолей водорода, находящегося в продуктах сгорания, определяется суммой x граммолей H_2 , входящего в H_2O , и M_{H_2} граммолей свободного молекулярного водорода. Так как по закону сохранения вещества общее количество граммолей водорода при сгорании не изменилось, то, очевидно, эта сумма равна числу граммолей водорода в исходной смеси, т. е. 1. Следовательно,

$$1 = x + M_{\text{H}_2} \quad (\text{VI. 3})$$

* Величина константы взята по старым данным. Более точные значения константы приведены в приложении 2.

или, разрешая относительно M_{H_2} , получим

$$M_{H_2} = 1 - x. \quad (VI.4)$$

Такие же рассуждения позволяют составить и уравнение баланса кислорода. До сгорания в исходной смеси находится 1 *граммоль* O_2 ; после сгорания кислород находится в водяных парах H_2O и в виде свободного молекулярного кислорода O_2 . Количество кислорода, входящее в водяные пары, составляет $\frac{1}{2}$ *граммоля* на 1 *граммоль* H_2O . Так как число граммолей воды равно x , то, обозначив число граммолей свободного кислорода M_{O_2} , можно написать

$$1 = \frac{1}{2}x + M_{O_2}, \quad (VI.5)$$

или

$$M_{O_2} = 1 - 0,5x. \quad (VI.6)$$

Таким образом, мы получили еще два уравнения для определения состава продуктов сгорания. Обратим внимание на то, что число балансовых уравнений всегда равно числу элементов, входящих в исходное топливо. Теперь мы имеем три уравнения для нахождения трех неизвестных.

Решение системы уравнений для определения состава продуктов сгорания

Для решения полученной системы уравнений (VI.2), (VI.4) и (VI.6) выразим состав газов через парциальные давления. Для этого надо использовать связь парциальных давлений p_{H_2O} ; p_{H_2} и p_{O_2} с числом молей этих газов.

Известно, что

$$p_{H_2O} = r_{H_2O} p_{\Sigma}; \quad p_{H_2} = r_{H_2} p_{\Sigma}; \quad p_{O_2} = r_{O_2} p_{\Sigma}, \quad (VI.7)$$

где p_{Σ} — общее давление газовой смеси;

r_{H_2O} , r_{H_2} и r_{O_2} — объемные доли соответствующих газов в смеси.

Так как моль любого газа занимает при данных условиях строго определенный объем, не зависящий от рода газа, то объемная доля любого газа определяется отношением числа граммолей данного газа к суммарному числу граммолей M_{Σ} всех газов, составляющих смесь. В нашем случае

$$r_{H_2O} = \frac{M_{H_2O}}{M_{\Sigma}}; \quad r_{H_2} = \frac{M_{H_2}}{M_{\Sigma}}; \quad r_{O_2} = \frac{M_{O_2}}{M_{\Sigma}}. \quad (VI.8)$$

Общее число молей M_{Σ} составит

$$M_{\Sigma} = M_{H_2O} + M_{H_2} + M_{O_2}. \quad (VI.9)$$

Воспользовавшись выражениями (VI.4) и (VI.6), получим

$$M_{\Sigma} = x + 1 - x + 1 - 0,5x = 2 - 0,5x. \quad (VI.10)$$

В соответствии с (VI.8) и (VI.7) объемные доли и парциальные давления будут равны

$$\left. \begin{aligned} r_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{x}{2-0,5x}; & p_{\text{H}_2\text{O}} &= \frac{x}{2-0,5x} p_{\Sigma}; \\ r_{\text{H}_2} &= \frac{1-x}{2-0,5x}; & p_{\text{H}_2} &= \frac{1-x}{2-0,5x} p_{\Sigma}; \\ r_{\text{O}_2} &= \frac{1-0,5x}{2-0,5x}; & p_{\text{O}_2} &= \frac{1-0,5x}{2-0,5x} p_{\Sigma}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{VI. 11})$$

Подставим значения парциальных давлений и значение константы равновесия в уравнение (VI.2) и после сокращения на p_{Σ} и $(2-0,5x)$, получим

$$K = 0,049 = \frac{(1-x)(1-0,5x)^{\frac{1}{2}}}{(2-0,5x)^{\frac{1}{2}} x} p_{\Sigma}^{\frac{1}{2}} \quad (\text{VI. 12})$$

или

$$\frac{K}{p_{\Sigma}^{\frac{1}{2}}} = \frac{0,049}{p_{\Sigma}^{\frac{1}{2}}} = \frac{(1-x)(1-0,5x)^{\frac{1}{2}}}{(2-0,5x)^{\frac{1}{2}} x} \quad (\text{VI. 13})$$

Таким образом, если задана величина суммарного давления газовой смеси p_{Σ} , то из нашей системы получится одно уравнение с одним неизвестным.

Решим полученное уравнение при давлении p_{Σ} , равном одной физической атмосфере (в значения констант равновесия обычно входят не технические, а физические атмосферы).

В этом случае уравнение (VI.13) примет вид

$$0,049 = \frac{(1-x)(1-0,5x)^{\frac{1}{2}}}{(2-0,5x)^{\frac{1}{2}} x} \quad (\text{VI. 14})$$

Это уравнение представляет собой уравнение третьей степени, аналитическое решение которого возможно, но довольно громоздко.

Будем решать уравнение путем подбора. Наметим район ожидаемых значений x . Если бы сгорание происходило без диссоциации, то в продуктах сгорания находился бы 1 граммоль H_2O , ибо кислорода для окисления всего водорода в воду достаточно (надо $\frac{1}{2}$ граммоль, а имеется 1 граммоль) и значение $M_{\text{H}_2\text{O}} = x$ было бы равно единице. В результате диссоциации содержание водяных паров будет несколько меньше, т. е. $x < 1$.

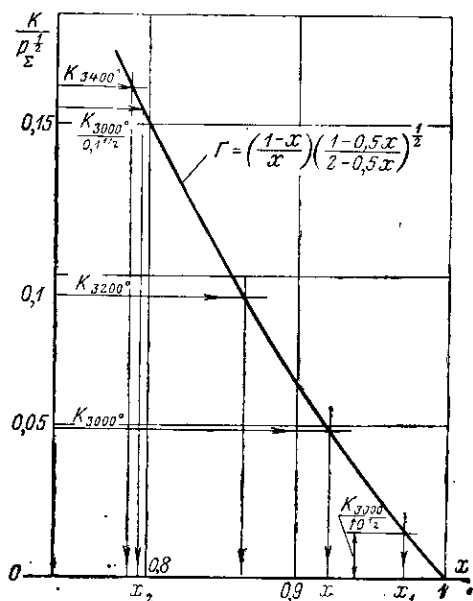
Задавшись различными значениями $x < 1$, подсчитываем величину Γ , входящую в уравнение (VI.14),

$$\Gamma = \left(\frac{1-x}{x} \right) \left(\frac{1-0,5x}{2-0,5x} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Решение уравнения (VI.14) проводим графически (фиг. 63). Для этого напомним на графике зависимость

$$\Gamma = f(x).$$

Решение уравнения (VI.14) находим как точку пересечения кривой Γ с прямой, отсекающей на оси Γ значение правой части



Фиг. 63. Графическое решение уравнения (VII.14) для определения состава диссоциированной смеси продуктов сгорания.

уравнения (VI.14). В рассматриваемом случае при $p_{\Sigma}=1$ и $T=3000^{\circ}$ абс.

$$\Gamma = K = 0,049.$$

Как видим, при этом $x=0,922$.

Таким образом, количество молей водяных паров, находящихся в диссоциированной смеси, равно

$$M_{H_2O} = 0,922.$$

Это означает также, что в результате диссоциации было разложено $1-0,922=0,078$ грамма водяных паров.

Воспользовавшись уравнениями (VI.4) и (VI.6), найдем

$$M_{H_2} = 1 - 0,922 = 0,078;$$

$$M_{O_2} = 1 - 0,5 \cdot 0,922 = 0,539.$$

Общее число молей продуктов сгорания M_{Σ} составит

$$M_{\Sigma} = 2 - 0,5x = 1,539,$$

а парциальные давления при $p_{\Sigma} = 1,0$ по (VI. 11) равны

$$p_{H_2} = \frac{0,078}{1,539} 1 = 0,050;$$

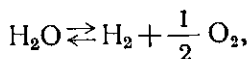
$$p_{O_2} = \frac{0,539}{1,539} 1 = 0,350;$$

$$p_{H_2O} = \frac{0,922}{1,539} 1 = 0,600.$$

Таким образом, мы определили состав диссоциировавших продуктов сгорания при $p_{\Sigma} = 1 \text{ ата}$ и $T = 3000^{\circ} \text{ абс.}$

Влияние давления и температуры на состав продуктов сгорания

Уравнение, по которому происходит диссоциация водяных паров



говорит о том, что диссоциация водяных паров сопровождается увеличением числа молей или объема газовой смеси. Следовательно, протекание реакции диссоциации зависит от давления (см. § 12). Увеличение давления должно привести к уменьшению диссоциации водяных паров, а понижение давления — к увеличению диссоциации их.

Кроме того, интенсивность реакций диссоциации продуктов сгорания зависит от температуры. С увеличением температуры в продуктах сгорания должно увеличиваться содержание продуктов диссоциации.

Для того, чтобы проследить влияние давления на состав газов, решим уравнение (VI. 13) при температуре $3000^{\circ} \text{ абс.}$ и при двух давлениях смеси: $p_{\Sigma} = 10 \text{ ата}$ и $p_{\Sigma} = 0,1 \text{ ата}$, в связи с чем левая часть уравнения (VI. 13) $\frac{0,049}{p_{\Sigma}^2}$ станет равна соответственно 0,0155

при $p_{\Sigma} = 10 \text{ ата}$ и 0,1550 при $p_{\Sigma} = 0,1 \text{ ата}$. Графические решения, приведенные на фиг. 63, дают соответственно

$$x_{p_{\Sigma}=10} = 0,972 \quad \text{и} \quad x_{p_{\Sigma}=0,1} = 0,796.$$

Состав продуктов сгорания, вычисленный при давлениях 0,1; 1 и 10 ата, приведен в табл. 9.

Данные этой таблицы показывают, что с уменьшением общего давления в смеси газов действительно увеличивается содержание продуктов диссоциации, т. е. M_{H_2} и M_{O_2} .

Таблица 9

Состав продуктов сгорания при температуре $T=3000^\circ$ абс. и трех различных давлениях
(исходная смесь: 1 граммоль H_2+1 граммоль O_2)

Давление p_{Σ} в ата	M_{H_2O}	M_{H_2}	M_{O_2}	M_{Σ}	p_{H_2O}	p_{H_2}	p_{O_2}
0,1	0,796	0,204	0,602	1,602	0,0497	0,0127	0,0376
1	0,922	0,078	0,539	1,539	0,6000	0,0500	0,350
10	0,972	0,028	0,514	1,514	6,4300	0,1800	3,390

Оценим влияние температуры на состав продуктов сгорания. Для этого дополнительно рассчитаем составы продуктов сгорания при давлении $p_{\Sigma}=1$ ата, еще при двух значениях температуры: при 3200° абс. и 3400° абс.

Левые части уравнения (VI. 13) будут соответственно равны значениям констант равновесия $K=0,093$ и $K=0,167$ (как и ранее, эти значения констант равновесия взяты из старых таблиц). Проведя графически решения, аналогичные предыдущим, получим данные, приведенные в табл. 10.

Таблица 10

Состав продуктов сгорания при давлении 1 ата и трех различных температурах
(исходная смесь: 1 граммоль H_2+1 граммоль O_2)

T° абс.	K_2	M_{H_2O}	M_{H_2}	M_{O_2}	M_{Σ}	p_{H_2O}	p_{H_2}	p_{O_2}
3000	0,049	0,922	0,078	0,539	1,539	0,600	0,050	0,350
3200	0,093	0,865	0,135	0,567	1,567	0,552	0,086	0,362
3400	0,162	0,790	0,210	0,605	1,605	0,492	0,131	0,377

Как видно из сравнения данных табл. 9 и 10, температура значительно более резко влияет на состав продуктов сгорания, чем давление. Так, изменение температуры от 3000 до 3400° абс., т. е. на 13%, привело примерно к такому же изменению состава, как и изменение давления от 1 до 0,1 ата, т. е. в 10 раз.

§ 32. СОСТАВЛЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В КАМЕРЕ ДВИГАТЕЛЯ

Разобранный нами пример определения состава продуктов сгорания при заданной температуре позволяет выяснить типы уравнений, входящих в необходимую для определения состава продуктов сгорания систему уравнений.

Первый тип уравнений — это уравнения констант равновесия тех реакций диссоциации, которые учитываются в расчете; второй

тип уравнений — это уравнения баланса элементов, входящих в топливо. Кроме того, при расчете используется уравнение $p_T = \sum p_i$

Уравнения указанных двух типов дают достаточное число уравнений, необходимых для отыскания состава продуктов сгорания. В качестве вспомогательных уравнений при определении состава используются уравнения, связывающие состав газа, выраженный в граммах, с составом газа, выраженным в парциальных давлениях.

Если поставить дополнительно задачу определения также и температуры в камере сгорания, то у нас появится новое неизвестное, а именно температура продуктов сгорания. Для ее определения надо составить еще одно уравнение.

Так как температура определяет запас энергии в газе, то для ее вычисления мы должны использовать уравнение, связывающее запас энергии в топливе и в продуктах сгорания. При сгорании топлива происходит переход химической энергии в тепловую энергию. Общий же запас энергии в топливе и в продуктах сгорания, если не учитывать потерь тепла во внешнюю среду, согласно закону сохранения энергии остается неизменным.

Общий запас энергии в случае сгорания при постоянном давлении характеризуется полным теплосодержанием I_n . Следовательно, полное теплосодержание продуктов сгорания $I_{n,п.с}$ (включая химическую энергию) при температуре сгорания T_2 , которую они имеют в конце камеры сгорания, должно быть равно полному теплосодержанию исходного топлива I_n .

$$I_n = [I_{n,п.с}]_{T_2} \quad (VI. 15)$$

Это уравнение, поскольку оно оперирует не с величинами теплотворных способностей, а с величинами полных теплосодержаний, годится как для полного, так и для неполного сгорания. Неполное сгорание может произойти из-за недостатка кислорода, а также вследствие диссоциации.

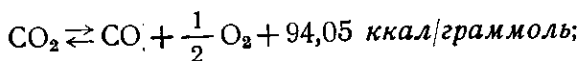
Рассмотрим составление такой системы уравнений для случая, когда в топливе содержится четыре элемента: углерод, водород, кислород и азот, так как этот случай наиболее характерен для применяемых в настоящее время топлив ЖРД.

Составление уравнений реакций диссоциации

Начнем составление системы уравнений с уравнений первого типа, т. е. уравнений реакций диссоциации, возможных для продуктов сгорания рассматриваемого топлива.

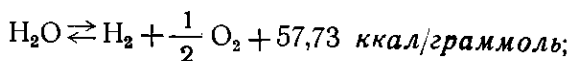
Таковыми реакциями являются:

1. Реакция диссоциации углекислого газа



$$K_1 = \frac{p_{\text{CO}} p_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{\text{CO}_2}} = f_1(T) \quad (VI. 16)$$

2. Реакция диссоциации водяных паров на молекулярный водород и кислород



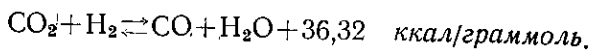
$$K_2 = \frac{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} = f_2(T). \quad (\text{VI. 17})$$

Эти реакции (VI. 16) и (VI. 17) при одинаковой температуре идут с различной интенсивностью.

При одновременном присутствии в смеси продуктов сгорания водорода и углерода эти реакции диссоциации могут взаимно влиять друг на друга.

Так, например, кислород, выделившийся при диссоциации углекислого газа, может пойти на окисление водорода, выделяющегося при диссоциации водяных паров.

Совместное протекание первых двух реакций легче всего исследовать, если составить суммарную реакцию, объединяющую их. В качестве такой реакции для случаев недостатка окислителя ($\alpha < 1$) особенно характерна реакция водяного газа, получающаяся при вычитании второй реакции из первой



Уравнение константы равновесия для этой реакции имеет вид

$$K_{2a} = \frac{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}} = f_{2a}(T). \quad (\text{VI. 17}')$$

Эта реакция осуществляется при получении генераторного газа путем вдувания паров воды в атмосферу окиси углерода над слоем раскаленного угля, отдающего тепло, необходимое для образования водорода, и называется *реакцией образования водяного газа*. Она имеет также важное значение и в процессах, протекающих в камере сгорания ЖРД. Особенностью реакции водяного газа является то, что в отличие от реакций, ее составляющих, она проходит без изменения числа молей (объема). Следовательно, состав продуктов сгорания, если они образуются в соответствии с этой реакцией, не зависит от давления в камере сгорания. Указанное обстоятельство снижает эффект повышения давления как меры, препятствующей диссоциации в камере сгорания ЖРД продуктов сгорания углеводородных горючих.

Константа равновесия K_{2a} , так же как и константы равновесия всех других реакций, идущих с затратой тепла, увеличивается при увеличении температуры. Следовательно, с увеличением температуры в смеси будет увеличиваться содержание окиси углерода и водяных паров. При низких температурах в равновесной смеси, наоборот, будет преобладать углекислый газ и молекулярный водород.

Уравнение реакции водяного газа часто используется при проведении расчетов равновесных состояний.

3. Реакция диссоциации водяного пара на водород и гидроксильную группу

$$\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{OH} + \frac{1}{2} \text{H}_2;$$

$$K_3 = \frac{p_{\text{OH}} p_{\text{H}_2}^{1/2}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} = f_3(T). \quad (\text{VI. 18})$$

4. Реакция образования окиси азота

$$\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{NO};$$

$$K_4 = \frac{p_{\text{NO}}^2}{p_{\text{N}_2} p_{\text{O}_2}} = f_4(T), \quad (\text{VI. 19})$$

проходящая с затратой тепла и без изменения числа молей.

5. Реакция диссоциации молекулярного водорода на атомарный:

$$\text{H}_2 \rightleftharpoons 2\text{H};$$

$$K_5 = \frac{p_{\text{H}}^2}{p_{\text{H}_2}} = f_5(T). \quad (\text{VI. 20})$$

6. Реакция диссоциации молекулярного кислорода на атомарный

$$\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{O};$$

$$K_6 = \frac{p_{\text{O}}^2}{p_{\text{O}_2}} = f_6(T). \quad (\text{VI. 21})$$

7. Реакция диссоциации молекулярного азота на атомарный

$$\text{N}_2 \rightleftharpoons 2\text{N};$$

$$K_7 = \frac{p_{\text{N}}^2}{p_{\text{N}_2}} = f_7(T). \quad (\text{VI. 22})$$

Семь приведенных реакций являются наиболее вероятными из тех, которые могут протекать в камере сгорания. Остальные реакции, например, реакции образования углеводородов (типа метана CH_4) при температурах, имеющих в камере сгорания, учитывать не следует, так как при высоких температурах углеводороды неустойчивы и не могут содержаться в камере ЖРД.

В приведенных семи уравнениях констант равновесия реакций диссоциации содержится 11 неизвестных парциальных давлений газов, составляющих продукты сгорания:

$$p_{\text{CO}_2}; p_{\text{H}_2\text{O}}; p_{\text{CO}}; p_{\text{N}_2}; p_{\text{H}_2}; p_{\text{O}_2}; p_{\text{NO}}; p_{\text{OH}}; p_{\text{H}}; p_{\text{O}} \text{ и } p_{\text{N}}.$$

Кроме того, нам не известна температура в камере сгорания, величина которой определяет значение констант равновесия. Таким образом, всего в уравнениях реакций диссоциации содержится 12 неизвестных величин.

Составление уравнений баланса элементов

Как было установлено выше, уравнения баланса элементов составляются путем приравнивания количества элемента, входившего в топливо, количеству этого же элемента, входящего в продукты сгорания. При составлении балансовых уравнений для камеры сгорания ЖРД будем выражать количество элемента, входящего в его состав, в кг на 1 кг топлива или же на 1 кг продуктов сгорания.

Рассмотрим подробно способ составления уравнений баланса элементов на примере составления уравнения баланса азота.

Количество килограмм азота, приходящегося на 1 кг топлива, по уравнениям (V.17) составит

$$N_T = \frac{N_T + \nu N_0}{1 + \nu} \quad (\text{VI. 23})$$

Для подсчета количества азота в продуктах сгорания будем иметь в виду, что он входит в состав следующих трех газов: молекулярного азота N_2 , атомарного азота N и окиси азота NO . Обозначим через M_{N_2} ; M_N ; M_{NO} числа граммолей этих газов, приходящихся на 1 кг продуктов сгорания.

В одном граммоле молекулярного азота N_2 содержится $2 \times 14 = 28$ г азота, а в 1 граммоле атомарного азота N и окиси азота NO содержится по $1 \times 14 = 14$ г азота. Следовательно, количество азота, входящее в продукты сгорания в граммах на 1 кг продуктов сгорания, составит

$$2 \cdot 14 M_{N_2} + 1 \cdot 14 M_N + 1 \cdot 14 M_{NO}$$

и в килограммах на 1 кг:

$$\frac{1}{1000} (2 \cdot 14 M_{N_2} + 1 \cdot 14 M_N + 1 \cdot 14 M_{NO}) = \frac{14}{1000} (2 M_{N_2} + M_N + M_{NO}).$$

В полученном соотношении перейдем от числа граммолей газов к величинам парциальных давлений их. Для этого рассмотрим две величины: суммарное давление, под которым находятся продукты сгорания p_Σ , и общее число граммолей всех продуктов сгорания M_Σ , приходящееся на 1 кг рабочей смеси (1 кг продуктов сгорания).

Тогда (см. § 31) числа молей азотосодержащих газов запишутся в виде

$$M_{N_2} = M_\Sigma \frac{p_{N_2}}{p_\Sigma}; \quad M_N = M_\Sigma \frac{p_N}{p_\Sigma}; \quad M_{NO} = M_\Sigma \frac{p_{NO}}{p_\Sigma}, \quad (\text{VI. 24})$$

и количество азота, входящее в 1 кг продуктов сгорания, можно записать так:

$$\frac{14}{1000} \frac{M_\Sigma}{p_\Sigma} (2 p_{N_2} + p_N + p_{NO}). \quad (\text{VI. 25})$$

По смыслу уравнений баланса элементов следует приравнять это количество азота тому количеству его, которое имеется в топливе. Окончательно балансовое уравнение для азота примет вид

$$N_T = \frac{N_T + \nu N_0}{1 + \nu} = \frac{14}{1000} \frac{M_{\Sigma}}{p_{\Sigma}} (2p_{N_2} + p_N + p_{NO}). \quad (\text{VI. 26})$$

Схема построения балансовых уравнений, как показывает разобранный выше пример, такова. Общим коэффициентом перед скобкой, в которую входит сумма парциальных давлений, является отношение

$\frac{M_{\Sigma}}{1000 p_{\Sigma}}$, умноженное на атомный вес элемента, для которого записывается балансовое уравнение. Парциальные давления, входящие в балансовые уравнения, берутся с коэффициентом, равным числу атомов данного элемента, находящихся в молекуле данного газа. На основании этого остальные балансовые уравнения для углерода, водорода и кислорода запишутся в следующем виде:

$$C_T = \frac{C_T + \nu C_0}{1 + \nu} = \frac{12 M_{\Sigma}}{1000 p_{\Sigma}} (p_{CO_2} + p_{CO}); \quad (\text{VI. 27})$$

$$H_T = \frac{H_T + \nu H_0}{1 + \nu} = \frac{1 M_{\Sigma}}{1000 p_{\Sigma}} (2p_{H_2O} + 2p_{H_2} + p_{OH} + p_H); \quad (\text{VI. 28})$$

$$O_T = \frac{O_T + \nu O_0}{1 + \nu} = \frac{16 M_{\Sigma}}{1000 p_{\Sigma}} (2p_{O_2} + 2p_{CO_2} + p_{H_2O} + p_{CO} + p_{OH} + p_{NO} + p_O). \quad (\text{VI. 29})$$

Дополнительные уравнения для определения состава и температуры продуктов сгорания

В полученных выше четырех уравнениях баланса появилось еще два дополнительных неизвестных — число граммолей продуктов сгорания, приходящихся на 1 кг топлива M_{Σ} , и общее давление p_{Σ} .

Общее давление определится как сумма парциальных давлений продуктов сгорания

$$p_{\Sigma} = p_{CO_2} + p_{H_2O} + p_{CO} + p_{N_2} + p_{O_2} + p_{H_2} + p_{OH} + p_{NO} + p_H + p_O + p_N = \sum p_i. \quad (\text{VI. 30})$$

Величину M_{Σ} также можно выразить через парциальные давления газов, составляющих продукты сгорания. Обозначим кажущийся молекулярный вес смеси продуктов сгорания через μ_{Σ} .

По формуле (II. 7)

$$\mu_{\Sigma} = \frac{1}{p_{\Sigma}} \sum_i \nu_i p_i \quad (\text{VI. 31})$$

1 кг смеси газов с кажущимся молекулярным весом μ_{Σ} составляет $\frac{1}{\mu_{\Sigma}}$ часть кг-моля, или $\frac{1000}{\mu_{\Sigma}}$ граммолей.

Следовательно, число граммолей в 1 кг равно

$$M_{\Sigma} = \frac{1000}{\mu_{\Sigma}} = \frac{1000 p_{\Sigma}}{\sum_i \mu_i p_i}, \quad (\text{VI. 32})$$

откуда видим, что отношение $\frac{M_{\Sigma}}{p_{\Sigma}}$, входящее в балансовые уравнения (VI. 26), (VI. 27), (VI. 28) и (VI. 29), можно записать в виде

$$\frac{M_{\Sigma}}{p_{\Sigma}} = \frac{1000 p_{\Sigma}}{p_{\Sigma} \sum \mu_i p_i} = \frac{1000}{\sum \mu_i p_i}. \quad (\text{VI. 33})$$

Последним уравнением в рассматриваемой системе будет уравнение сохранения энергии, которое для сгорания при отсутствии отвода тепла от камеры имеет вид (VI. 15)

$$I_{n.T} = [I_{n.p.c.}] T_2.$$

Для решения этого уравнения необходимо уметь находить полное теплосодержание продуктов сгорания при заданной температуре. Если состав продуктов сгорания определен (т. е. найдены p_i), то легко подсчитать полное теплосодержание их при заданной температуре (см. § 27), используя таблицы полных теплосодержаний, приведенные в приложении 3

$$I_{n.p.c.} = \frac{M_{\Sigma}}{p_{\Sigma}} \sum_i I_{n,i} p_i \quad (\text{VI. 34})$$

или с учетом (VI. 33)

$$I_{n.p.c.} = \frac{\sum_i I_{n,i} p_i}{\sum_i \mu_i p_i} 1000. \quad (\text{VI. 35})$$

Окончательный вид системы уравнений и пути разрешения ее

Сведем уравнения, описывающие состояние газа в камере двигателя, в единую систему, опуская промежуточные формулы. Эта система примет следующий вид.

$$\left. \begin{aligned} 1. \quad K_1 &= \frac{p_{\text{CO}} p_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{\text{CO}_2}} = f_1(T). \\ 2. \quad K_2 &= \frac{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{\text{H}_2\text{O}}} = f_2(T) \\ &\text{или} \\ K_{2a} &= \frac{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}} = f_{2a}(T). \end{aligned} \right\} \quad (\text{VI. 36})$$

$$3. K_3 = \frac{p_{OH} p_{H_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} = f_3(T).$$

$$4. K_4 = \frac{p_{NO}^2}{p_{N_2} p_{O_2}} = f_4(T).$$

$$5. K_5 = \frac{p_H^2}{p_{H_2}} = f_5(T).$$

$$6. K_6 = \frac{p_O^2}{p_{O_2}} = f_6(T).$$

$$7. K_7 = \frac{p_N^2}{p_{N_2}} = f_7(T).$$

$$8^*. C_T = \frac{12}{\sum \nu_i p_i} (p_{CO_2} + p_{CO}).$$

$$9. H_T = \frac{1}{\sum \nu_i p_i} (2p_{H_2O} + 2p_{H_2} + p_{OH} + p_H).$$

$$10. N_T = \frac{14}{\sum \nu_i p_i} (2p_{N_2} + p_{NO} + p_N).$$

$$11. O_T = \frac{16}{\sum \nu_i p_i} (2p_{O_2} + 2p_{CO_2} + p_{H_2O} + p_{CO} + p_{OH} + p_{NO} + p_O).$$

$$12. I_{n_T} = [I_{n, c}]_{T_2}.$$

$$13. \mu_{\Sigma} = \frac{\sum \nu_i p_i}{p_{\Sigma}}.$$

$$14. p_{\Sigma} = \sum p_i = p_2.$$

(VI. 36)

В эту систему из 14 уравнений входит 14 неизвестных величин, а именно: 11 парциальных давлений газов, составляющих смесь, μ_{Σ} , $p_{\Sigma} = p_2$ и T_2 , поэтому принципиально она может быть разрешена.

Полученная система уравнений, если бы она была сведена к одному уравнению (так как это было сделано в разобранным выше примере), дала бы уравнение очень высокой степени. При наличии только трех неизвестных парциальных давлений выше уже приходилось решать кубическое уравнение.

Всякое уравнение высокой степени имеет, как известно, не одно решение, а несколько корней, число которых равно степени уравнения. При решении технических и физических задач выбор необ-

* Уравнения баланса элементов записаны с учетом (VI. 33).

ходимого значения корня производится из рассмотрения физического смысла ожидаемого решения. Так как корни рассматриваемой системы уравнений представляют собой парциальные давления газов в их смеси, то все корни правильного решения должны быть положительными и действительными.

Доказано, что система уравнений констант равновесия и уравнений баланса, подобная нашей, имеет только одну единственную систему корней, в которой каждый корень имеет положительное и действительное значение.

Таким образом, задача решения рассматриваемой системы уравнений сводится к отысканию имени этой единственной системы корней. В частности, как уже было сказано, решение может быть получено сведением системы уравнений в одно уравнение высокой степени с последующим решением его методом подбора или методом последовательных приближений. Такая методика решения характерна для немецких работ в этой области. Она приводит к слишком громоздкому и требующему большой затраты времени решению. Всякие изменения в системе уравнений или в исходных данных требуют дополнительной работы по изменению обобщающего уравнения.

Более рациональными способами решения рассматриваемой системы являются методы последовательных приближений.

Для того, чтобы облегчить решение методом последовательных приближений этой громоздкой системы уравнений, необходимо разработать строгую последовательность решения с тем, чтобы рабочие уравнения были бы простыми (низкой степени) и схема решения допускала бы проверку полученных результатов.

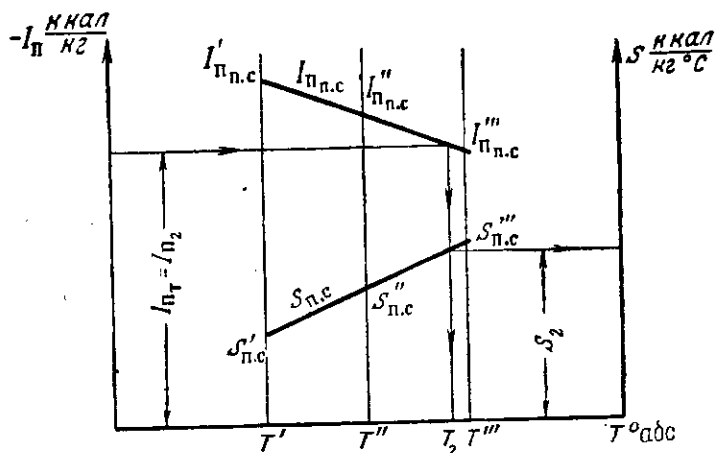
Схема решения системы методом последовательных приближений следующая.

Задаваясь температурой T в районе ожидаемых температур в камере сгорания, по таблицам приложения 2 или по каким-либо другим данным определяем численные значения всех констант равновесия. После этого в определенной последовательности (это и составляет особенности того или иного метода решения) разрешаем уравнения констант и баланса, задаваясь величиной одного или нескольких парциальных давлений (способ выбора величины тех парциальных давлений, которыми предварительно задаются, составляет также особенность той или иной методики расчета). Так как в том случае, если мы задаемся одним или несколькими парциальными давлениями освобождается и не используется соответствующее количество уравнений нашей системы (VI. 36), то эти освобожденные уравнения становятся проверочными уравнениями или же используются для нахождения последующих приближений парциальных давлений, выбранных ранее произвольно.

Подставив все полученные значения в проверочное уравнение, проверяем, правильно ли выбрано исходное парциальное давление. Если проверочное уравнение удовлетворено, то все парциальные давления определены правильно. Если же оно не удовлетворено, то в выбранное парциальное давление вносятся поправки до тех

пор, пока проверочное уравнение не будет удовлетворено с принятой в расчете степенью точности. При технических расчетах парциальные давления продуктов сгорания определяются с точностью до третьего или четвертого знака после запятой. Обычно проверочным уравнением является уравнение равенства суммы всех парциальных давлений — давлению в камере (VI.30). Найденные парциальные давления дадут нам равновесный состав продуктов сгорания при выбранной температуре.

Для проверки правильности выбора температуры служит уравнение (VI.15), которое должно быть точно соблюдено при отсутствии тепловых потерь. Если уравнение не удовлетворено, то за-



Фиг. 64. Определение температуры T_2 и энтропии S_2 в камере сгорания.

даются новой температурой, учитывая при этом знак ошибки баланса теплосодержаний. Практически целесообразно сразу вести расчет при трех температурах: T' ; T'' и T''' так, чтобы расчетная температура T оказалась бы между T' и T''' . Рассчитав состав продуктов сгорания при трех температурах, строят график зависимости теплосодержания продуктов сгорания от температуры и по нему находят расчетную температуру сгорания.

Схема этого решения приведена на фиг. 64.

§ 33. РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВ, НЕ СОДЕРЖАЩИХ АЗОТА

Приведем конкретный способ решения системы уравнений для определения состава продуктов сгорания при заданной температуре для топлив, не содержащих азота.

Система уравнений для определения состава продуктов сгорания

В этом случае система уравнений упрощается, так как выпадает уравнение баланса азота (VI. 26), а также уравнения констант равновесия (VI. 19) и (VI. 22). Кроме того, для упрощения решения системы уравнений воспользуемся не абсолютными балансовыми уравнениями, а отношениями их. В этом случае из балансовых уравнений выпадают значения μ_2 и p_2 , которые сокращаются при делении.

Рассмотрим отношения $\frac{O_T}{C_T}$ и $\frac{O_T}{H_T}$.

Отношение $\frac{O_T}{C_T}$ запишется в виде

$$\frac{O_T}{C_T} = \frac{16}{12} \frac{2p_{O_2} + 2p_{CO_2} + p_{H_2O} + p_{CO} + p_{OH} + p_O}{p_{CO_2} + p_{CO}} \quad (\text{VI. 37})$$

или

$$\frac{2p_{O_2} + 2p_{CO_2} + p_{H_2O} + p_{CO} + p_{OH} + p_O}{p_{CO_2} + p_{CO}} = \frac{3}{4} \frac{O_T}{C_T} = A. \quad (\text{VI. 38})$$

Отношение балансовых уравнений $\frac{O_T}{H_T}$ примет вид

$$\frac{2p_{O_2} + 2p_{CO_2} + p_{H_2O} + p_{CO} + p_{OH} + p_O}{2p_{H_2O} + 2p_{H_2} + p_{OH} + p_H} = \frac{1}{16} \frac{O_T}{H_T} = B, \quad (\text{VI. 39})$$

где A и B — коэффициенты, вычисляемые по составу топлива.

Кроме этих двух уравнений, в расчете используются оставшиеся уравнения констант равновесия (VI. 16), (VI. 17), (VI. 18), (VI. 20) и (VI. 21).

$$K_1 = \frac{p_{CO} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{CO_2}}; \quad K_2 = \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}}; \quad K_3 = \frac{p_{OH} p_{H_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}}$$

$$K_5 = \frac{p_H^2}{p_{H_2}}; \quad K_6 = \frac{p_O^2}{p_{O_2}}$$

Порядок решения системы уравнений для определения состава продуктов сгорания

Наметим порядок решения системы уравнений для определения состава продуктов сгорания топлива, не содержащего азота.

I. Исходные данные

Исходными данными для расчета являются:

а) Элементарный состав топлива (см. § 26).

б) Температура T , при которой ведется расчет и численные значения констант равновесия $K_1; K_2; K_3; K_5; K_6$ при этой температуре (температурой задаемся).

в) Давление в камере сгорания $p_2 = p_1$.

г) Постоянные для всего расчета коэффициенты

$$A = \frac{3}{4} \frac{O_T}{C_T}; \quad B = \frac{1}{16} \frac{O_T}{H_T}. \quad (\text{VI. 40})$$

Решение систем уравнений будем проводить методом последовательных приближений, задаваясь парциальным давлением кислорода.

II. Первое приближение в определении состава

1. Выбирается значение парциального давления кислорода первого приближения $p_{O_2} = a^2$. Выбор этого парциального давления должен производиться по результатам предыдущих расчетов.

2. Находятся выражения парциальных давлений всех составляющих продукты сгорания газов через парциальные давления CO_2 и H_2O :

а) Используя константу $K_1 = \frac{p_{CO} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{CO_2}}$, получим

$$p_{CO} = K_1 \frac{p_{CO_2}}{a} = b p_{CO_2}; \quad b = \frac{K_1}{a}. \quad (\text{VI. 41})$$

б) Используя константу $K_2 = \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}}$, получим

$$p_{H_2} = K_2 \frac{p_{H_2O}}{a} = c p_{H_2O}; \quad c = \frac{K_2}{a}. \quad (\text{VI. 42})$$

в) Используя константу $K_3 = \frac{p_{OH} p_{H_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}}$, получим

$$p_{OH} = K_3 \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2}^{\frac{1}{2}}} = \frac{K_3 p_{H_2O}}{\sqrt{c p_{H_2O}}} = d \sqrt{p_{H_2O}}; \quad d = \frac{K_3}{\sqrt{c}}. \quad (\text{VI. 43})$$

г) Используя константу $K_5 = \frac{p_{H}^2}{p_{H_2}}$, получим

$$p_H = \sqrt{K_5} \sqrt{p_{H_2}} = \sqrt{K_5} \sqrt{c p_{H_2O}} = e \sqrt{p_{H_2O}}; \quad e = \sqrt{K_5} \sqrt{c}. \quad (\text{VI. 44})$$

д) Используя константу $K_6 = \frac{p_O^2}{p_{O_2}}$, получим

$$p_O = \sqrt{K_6} a = f.$$

Все парциальные давления оказываются выраженными через парциальные давления p_{CO_2} и p_{H_2O} .

3. Решается система отношений балансовых уравнений (VI. 38) и (VI. 39). Для этого продельвается следующее:

а) В уравнение (VI. 38) подставляются значения p_{CO_2} ; p_{O_2} ; p_{O_2} и p_{OH} , определенные по формулам (VI. 41) — (VI. 44). Уравнение принимает вид

$$\frac{2a^2 + 2p_{CO_2} + p_{H_2O} + bp_{CO_2} + d\sqrt{p_{H_2O}} + f}{p_{CO_2} + bp_{CO_2}} = A. \quad (VI. 45)$$

б) В уравнении (VI. 45) приводятся подобные члены при p_{H_2O} ; $\sqrt{p_{H_2O}}$ и p_{CO_2} , после чего оно принимает вид

$$X_1 p_{CO_2} + Y_1 p_{H_2O} + Z_1 \sqrt{p_{H_2O}} + \Phi_1 = 0, \quad (VI. 46)$$

где X_1 , Y_1 , Z_1 и Φ_1 — численные значения коэффициентов уравнения (VI. 46).

в) В уравнение (VI. 39) подставляются значения

$$p_{H_2}; p_{OH}; p_{H}; p_{O_2}; p_{O}; p_{CO}$$

определенные ранее. Уравнение принимает вид

$$\frac{2a^2 + 2p_{CO_2} + p_{H_2O} + bp_{CO_2} + d\sqrt{p_{H_2O}} + f}{2p_{H_2O} + 2cp_{H_2O} + d\sqrt{p_{H_2O}} + e\sqrt{p_{H_2O}}} = B. \quad (VI. 47)$$

г) В уравнении (VI. 47) приводятся подобные члены при p_{CO_2} , p_{H_2O} и $\sqrt{p_{H_2O}}$; тогда оно принимает вид

$$X_2 p_{CO_2} + Y_2 p_{H_2O} + Z_2 \sqrt{p_{H_2O}} + \Phi_2 = 0, \quad (VI. 48)$$

где X_2 ; Y_2 ; Z_2 и Φ_2 — численные значения коэффициентов уравнения (VI. 48).

д) Из оставшихся двух уравнений (VI. 46) и (VI. 48) исключается парциальное давление углекислого газа p_{CO_2} . Для этого уравнение (VI. 46) умножается на абсолютное значение коэффициента X_1 , а уравнение (VI. 48) — на абсолютное значение коэффициента X_2 , затем они складываются или вычитаются (в зависимости от знаков коэффициентов X_1 и X_2), так что p_{CO_2} в суммарное уравнение уже не входит. Полученное уравнение имеет вид квадратного уравнения относительно $\sqrt{p_{H_2O}}$.

$$Y p_{H_2O} + Z \sqrt{p_{H_2O}} + \Phi = 0. \quad (VI. 49)$$

4. Квадратное уравнение (VI. 49) разрешается относительно $\sqrt{p_{H_2O}}$.

Если $\sqrt{p_{H_2O}}$ имеет положительный и отрицательный знаки, то отбрасывается решение с отрицательным знаком, так как оно дает отрицательные значения p_{OH} и p_{H} , чего не может быть.

Если оба корня уравнения $\sqrt{p_{H_2O}}$ имеют положительные значения, то отбрасывание ненужного решения производится позднее, когда выяснится, что один из корней дает отрицательное значение парциального давления какого-либо газа. Обычно встречается первый случай разных знаков величины $\sqrt{p_{H_2O}}$.

5. Находятся парциальные давления первого приближения газов, составляющих продукты сгорания:

а) находится $p_{H_2O} = (\sqrt{p_{H_2O}})^2$;

б) находится $p_{H_2} = c p_{H_2O}$;

в) находится $p_{OH} = d \sqrt{p_{H_2O}}$;

г) находится $p_H = e \sqrt{p_{H_2O}}$.

д) Используется уравнение (VI. 46) или (VI. 48) и по известным значениям p_{H_2O} и $\sqrt{p_{H_2O}}$ определяется p_{CO} ,

$$p_{CO_2} = \frac{Y_1 p_{H_2O} + Z_1 \sqrt{p_{H_2O}} + \Phi_1}{X_1}; \quad (VI. 50)$$

е) находится $p_{CO} = b p_{CO_2}$.

6. Проверяется отсутствие ошибок в вычислении парциальных давлений:

а) проверяется значение констант. По найденным значениям парциальных давлений находятся величины констант и сравниваются с их истинными значениями, принятыми в расчетах;

б) проверяется правильность решения по выполнению абсолютных уравнений баланса элементов (VI. 27), (VI. 28) и (VI. 29).

Для этого предварительно определяется величина $\frac{M_{\Sigma}}{p_{\Sigma}} = \frac{1000}{\sum \nu_i r_i}$.

Если все эти уравнения удовлетворены, то в решении нет ошибок вычисления.

7. Проверяется правильность принятого значения парциального давления кислорода.

Для этого вычисляется общее давление продуктов сгорания.

$$p_{\Sigma} = p_{CO_2} + p_{CO} + p_{H_2O} + p_{H_2} + p_{O_2} + p_O + p_{OH} + p_H.$$

Если полученная сумма p_{Σ} с допустимой точностью сходится с заданным давлением в камере сгорания p_2 , то расчет на этом заканчивается. Если давление p_{Σ} отличается от давления p_2 больше, чем может быть допущено в расчете, то производится определение состава второго приближения.

III. Второе и последующие приближения в определении состава

1. Выбирается значение парциального давления кислорода второго приближения $p_{O_2} = a^2$. Если в первом приближении получено $p_{\Sigma} < p_2$, то следует увеличить p_{O_2} второго приближения по сравнению с p_{O_2} первого приближения и, наоборот, если $p_{\Sigma} > p_2$,

то p_{O_2} второго приближения следует уменьшить по сравнению с p_{O_2} первого приближения.

2. Повторяются все расчеты, проводившиеся при определении состава первого приближения.

3. В случае необходимости последующих приближений вносится необходимая поправка в значение $p_{O_2} = a^2$.

IV. Окончательное определение состава

Когда, наконец, в результате приближений найден состав продуктов сгорания и p_2 с заданной точностью оказывается равным p_2 , то вносится окончательная поправка в значение парциальных давлений продуктов сгорания. Эта поправка вносится исходя из предположения, что небольшие изменения давления не влияют на состав продуктов сгорания, а поэтому для определения состава при точном значении давления p_2 , парциальные давления составляющих переисчисляются прямо пропорционально давлению, т. е. определяются с помощью линейной интерполяции (см. пример § 38).

§ 34. РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ТОПЛИВ, СОДЕРЖАЩИХ АЗОТ

Система уравнений для определения состава продуктов сгорания

В рассматриваемом случае должна решаться вся система уравнений, выведенная в § 32. Для конкретного решения излагаемым ниже методом преобразуем эту систему.

Уравнения баланса элементов сведем к следующим отношениям:

1. Возьмем отношение $\frac{C_T}{N_T}$; оно будет равно

$$\frac{C_T}{N_T} = \frac{12}{14} \cdot \frac{p_{CO_2} + p_{CO}}{2p_{N_2} + p_{NO} + p_N},$$

или

$$\frac{p_{CO_2} + p_{CO}}{2p_{N_2} + A} = \frac{7}{6} \frac{C_T}{N_T} = Q, \quad (VI. 51)$$

где

$$A = p_{NO} + p_N;$$

$$Q = \frac{7}{6} \frac{C_T}{N_T}.$$

2. Возьмем отношение $\frac{H_T}{N_T}$; оно будет равно

$$\frac{H_T}{N_T} = \frac{1}{14} \frac{2p_{H_2O} + 2p_{H_2} + p_{OH} + p_H}{2p_{N_2} + p_{NO} + p_N}$$

или

$$\frac{2p_{H_2O} + 2p_{H_2} + B}{2p_{N_2} + A} = 14 \frac{H_T}{N_T} = R, \quad (VI. 52)$$

где

$$B = p_{\text{OH}} + p_{\text{H}}; \quad R = 14 \frac{H_{\text{T}}}{N_{\text{T}}}.$$

3. Возьмем отношение $\frac{O_{\text{T}}}{C_{\text{T}}}$; оно будет равно

$$\frac{O_{\text{T}}}{C_{\text{T}}} = \frac{16}{12} \frac{2p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}} + p_{\text{H}_2\text{O}} + 2p_{\text{O}_2} + p_{\text{O}} + p_{\text{OH}} + p_{\text{NO}}}{p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}}},$$

или

$$\frac{2p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}} + D}{p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}}} = \frac{3}{4} \frac{O_{\text{T}}}{C_{\text{T}}} = S, \quad (\text{VI. 53})$$

где

$$D = 2p_{\text{O}_2} + p_{\text{OH}} + p_{\text{NO}} + p_{\text{O}};$$

$$S = \frac{3}{4} \frac{O_{\text{T}}}{C_{\text{T}}}.$$

4. Используем уравнение суммарного давления

$$p_2 = p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}} + p_{\text{N}_2} + p_{\text{H}_2} + p_{\text{O}_2} + p_{\text{OH}} + p_{\text{NO}} + p_{\text{H}} + p_{\text{O}} + p_{\text{N}},$$

или

$$p_2 = p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}} + p_{\text{N}_2} + p_{\text{H}_2} + E, \quad (\text{VI. 54})$$

где

$$E = p_{\text{O}_2} + p_{\text{OH}} + p_{\text{NO}} + p_{\text{H}} + p_{\text{O}} + p_{\text{N}}.$$

5. Используем константу равновесия реакции водяного газа в виде

$$K_{2a} = \frac{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}}. \quad (\text{VI. 55})$$

Полученные пять уравнений (VI. 51) — (VI. 55) являются основными для последующего решения.

Кроме них, используем уравнения констант равновесия, которые запишем в таком виде.

6. Уравнение константы K_1

$$p_{\text{O}_2} = \left(K_1 \frac{p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}}} \right)^2.$$

7. Уравнение константы K_3

$$p_{\text{OH}} = K_3 \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2}^2}.$$

8. Уравнение константы K_4

$$p_{\text{NO}} = \sqrt{K_4 p_{\text{N}_2} p_{\text{O}_2}}.$$

(VI. 56)

9. Уравнение константы K_5

$$p_{\text{H}} = \sqrt{K_5 p_{\text{H}_2}}.$$

10. Уравнение константы K_6

$$p_{\text{O}} = \sqrt{K_6 p_{\text{O}_2}}.$$

11. Уравнение константы K_7

$$p_{\text{N}} = \sqrt{K_7 p_{\text{N}_2}}.$$

(VI. 56)

Приведенную выше систему уравнений будем решать методом последовательных приближений, считая в первом приближении, что парциальные давления шести газов, продуктов диссоциации, равны нулю

$$p_{\text{O}_2} = 0; \quad p_{\text{OH}} = 0; \quad p_{\text{NO}} = 0; \quad p_{\text{H}} = 0; \quad p_{\text{O}} = 0; \quad p_{\text{N}} = 0.$$

Тогда в системе уравнений остается всего пять неизвестных парциальных давлений:

$$p_{\text{CO}_2}; \quad p_{\text{H}_2\text{O}}; \quad p_{\text{CO}}; \quad p_{\text{N}_2} \text{ и } p_{\text{H}_2}.$$

Для нахождения этих неизвестных имеются первые пять уравнений (VI. 51) — (VI. 55), в которых величины A , B , D и E в первом приближении равны нулю.

Решая эту систему уравнений, находим парциальные давления первого приближения пяти газов

$$p_{\text{CO}_2}; \quad p_{\text{H}_2\text{O}}; \quad p_{\text{CO}}; \quad p_{\text{N}_2}; \quad p_{\text{H}_2}.$$

Во втором приближении, имея парциальные давления пяти газов первого приближения, по уравнениям (VI. 56) находим парциальные давления второго приближения для шести газов, принятые ранее равными нулю

$$p_{\text{O}_2}; \quad p_{\text{OH}}; \quad p_{\text{NO}}; \quad p_{\text{H}}; \quad p_{\text{O}}; \quad p_{\text{N}}.$$

По значениям этих шести парциальных давлений находятся величины A , B , D и E . Тогда система первых пяти уравнений становится вновь разрешимой и могут быть найдены парциальные давления первых пяти газов во втором приближении

$$p_{\text{CO}_2}; \quad p_{\text{H}_2\text{O}}; \quad p_{\text{CO}}; \quad p_{\text{H}_2}; \quad p_{\text{N}_2}.$$

Если разности между парциальными давлениями первого и второго приближения оказываются большими, чем допускаемые точностью расчета, то выполняется третье приближение и т. д.

Приведение полученной системы уравнений к рабочим формулам

Прежде чем излагать порядок решения системы, приведем полученные уравнения к более удобным рабочим формулам.

1. Вывод формулы для определения парциального давления азота p_{N_2} :

а) используем уравнение (VI. 51)

$$\frac{p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}}}{2p_{\text{N}_2} + A} = Q,$$

откуда

$$p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}} = Q(2p_{\text{N}_2} + A);$$

б) используем уравнение (VI. 52)

$$\frac{2p_{\text{H}_2\text{O}} + 2p_{\text{H}_2} + B}{2p_{\text{N}_2} + A} = R,$$

откуда

$$p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{H}_2} = \frac{R}{2}(2p_{\text{N}_2} + A) - \frac{B}{2};$$

в) используем уравнение (VI. 54)

$$p_2 = p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}} + p_{\text{H}_2} + p_{\text{N}_2} + E.$$

В этом уравнении суммы $p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}}$ и $p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{H}_2}$ заменяем исходя из полученных выше соотношений

$$p_2 = Q(2p_{\text{N}_2} + A) + \frac{R}{2}(2p_{\text{N}_2} + A) - \frac{B}{2} + p_{\text{N}_2} + E.$$

Отсюда получаем формулу для определения p_{N_2}

$$p_{\text{N}_2} = \frac{p_2 - E + \frac{B}{2} - A\left(Q + \frac{R}{2}\right)}{2Q + R + 1}. \quad (\text{VI. 57})$$

2. Вывод формул, выражающих парциальные давления CO , H_2O и H_2 через парциальные давления CO_2 .

а) Используем уравнение (VI. 51)

$$\frac{p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}}}{2p_{\text{N}_2} + A} = Q,$$

откуда

$$p_{\text{CO}} = Q(2p_{\text{N}_2} + A) - p_{\text{CO}_2}, \quad (\text{VI. 58})$$

или

$$p_{\text{CO}} = a - p_{\text{CO}_2},$$

где

$$a = Q(2p_{\text{N}_2} + A). \quad (\text{VI. 59})$$

б) Используем уравнение (VI. 53)

$$\frac{2p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}} + D}{p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}}} = S.$$

В числитель и знаменатель подставляем значения сумм $p_{CO_2} + p_{CO}$, найденные в п. 1. Тогда получим

$$\frac{p_{CO_2} + Q(2p_{N_2} + A) + p_{H_2O} + D}{Q(2p_{N_2} + A)} = S,$$

откуда

$$p_{H_2O} = Q(2p_{N_2} + A)(S - 1) - D - p_{CO_2}, \quad (\text{VI. 60})$$

или

$$p_{H_2O} = b - p_{CO_2},$$

где

$$b = Q(2p_{N_2} + A)(S - 1) - D. \quad (\text{VI. 61})$$

в) Используем уравнение (VI. 52)

$$\frac{2p_{H_2O} + 2p_{H_2} + B}{2p_{N_2} + A} = R,$$

откуда

$$p_{H_2} = \frac{R}{2}(2p_{N_2} + A) - \frac{B}{2} - p_{H_2O}.$$

Величину p_{H_2O} берем по соотношению (VI. 60). Тогда

$$p_{H_2} = \frac{R}{2}(2p_{N_2} + A) - \frac{B}{2} - Q(2p_{N_2} + A)(S - 1) + D + p_{CO_2}.$$

В окончательном виде

$$p_{H_2} = (2p_{N_2} + A) \left[\frac{R}{2} - Q(S - 1) \right] - \frac{B}{2} + D + p_{CO_2}, \quad (\text{VI. 62})$$

или

$$p_{H_2} = c + p_{CO_2},$$

где

$$c = (2p_{N_2} + A) \left[\frac{R}{2} - Q(S - 1) \right] - \frac{B}{2} + D. \quad (\text{VI. 63})$$

При расчете состава продуктов сгорания первого приближения коэффициенты A , B , D и E равны нулю. В связи с этим формулы (VI. 57), (VI. 58), (VI. 60) и (VI. 62) для первого приближения упрощаются и принимают вид

$$p_{N_2} = \frac{p_2}{2Q + R + 1}; \quad (\text{VI. 64})$$

$$p_{CO} = 2Qp_{N_2} - p_{CO_2}; \quad (\text{VI. 65})$$

$$p_{H_2O} = 2Qp_{N_2}(S - 1) - p_{CO_2}; \quad (\text{VI. 66})$$

$$p_{H_2} = 2p_{N_2} \left[\frac{R}{2} - Q(S - 1) \right] + p_{CO_2}. \quad (\text{VI. 67})$$

Порядок решения системы уравнений для определения состава продуктов сгорания

На основании полученных рабочих формул определим состав продуктов сгорания в следующем порядке.

I. Исходные данные

- а) элементарный состав топлива C_T ; H_T ; N_T ; O_T ;
- б) теплосодержание топлива $I_{п,Т}$;
- в) температура T , при которой ведется расчет и численные значения констант равновесия K_1 , K_{2a} , K_3 , K_4 , K_5 , K_6 и K_7 при этой температуре;
- г) давление в камере сгорания p_2 .

II. Предварительные вычисления

По известному элементарному составу топлива находим коэффициенты Q , R и S

$$Q = \frac{7}{6} \frac{C_T}{N_T}; \quad R = 14 \frac{H_T}{N_T}; \quad S = \frac{3}{4} \frac{O_T}{C_T}.$$

III. Определение состава продуктов сгорания первого приближения

1. В первом приближении принимаем парциальные давления равными

$$p_{O_2} = 0; \quad p_{OH} = 0; \quad p_{NO} = 0; \quad p_H = 0; \quad p_O = 0; \quad p_N = 0.$$

2. Принимаем коэффициенты равными

$$A = 0; \quad B = 0; \quad D = 0; \quad E = 0.$$

3. Находим парциальное давление азота p_{N_2} по формуле (VI. 64).

4. Находим выражения для p_{CO} ; p_{H_2O} и p_{H_2} через p_{CO_2} и известную величину p_{N_2} по формулам (VI. 65) — (VI. 67).

Эти выражения имеют вид

$$p_{CO} = a - p_{CO_2}; \quad p_{H_2O} = b - p_{CO_2}; \quad p_{H_2} = c + p_{CO_2},$$

где a , b и c — численные коэффициенты.

5. Решаем уравнение (VI. 55) константы равновесия водяного газа K_{2a} , в которую подставляем полученные ранее выражения парциальных уравнений p_{CO} ; p_{H_2O} и p_{H_2} .

$$K_{2a} = \frac{(a - p_{CO_2})(b - p_{CO_2})}{p_{CO_2}(c + p_{CO_2})}. \quad (VI. 68)$$

Уравнение (VI. 68) является квадратным уравнением по отношению к p_{CO_2} .

В результате решения его находим парциальное давление p_{CO_2} . Из двух корней решения уравнений выбираем то, которое дает положительные значения всех остальных парциальных давлений.

6. По уравнениям (VI. 65) — (VI. 67) находим парциальные давления p_{CO} , p_{H_2O} и p_{N_2} .

7. Проверку отсутствия ошибок в решении производим, подсчитывая K_{2a} по найденному составу и сравнивая ее с табличным значением этой константы. Кроме того, определяем суммарное давление p_{Σ} , которое должно быть равно давлению в камере p_2 .

IV. Определение состава продуктов сгорания второго и последующих приближений

1. Находим парциальные давления шести газов второго (и последующих) приближений по формулам (VI. 56), в которые подставляем парциальные давления пяти газов, найденные в первом (или в предыдущем) приближении:

$$\left. \begin{aligned} p_{O_2} &= \left(K_1 \frac{p_{CO_2}}{p_{CO}} \right)^2; \\ p_{OH} &= K_3 \frac{p_{H_2O}}{p_{H_2}^2}; \\ p_{NO} &= \sqrt{K_4 p_{N_2} p_{O_2}}; \\ p_H &= \sqrt{K_5 p_{H_2}}; \\ p_O &= \sqrt{K_6 p_{O_2}}; \\ p_N &= \sqrt{K_7 p_{N_2}}. \end{aligned} \right\} \quad (VI. 69)$$

2. Находим коэффициенты второго (или последующих) приближений [см. (VI. 51) — (VI. 54)].

$$\left. \begin{aligned} \text{а) } A &= p_{NO} + p_N; \\ \text{б) } B &= p_{OH} + p_H; \\ \text{в) } D &= 2p_{O_2} + p_{OH} + p_{NO} + p_O; \\ \text{г) } E &= p_{O_2} + p_{OH} + p_{NO} + p_H + p_O + p_N. \end{aligned} \right\} \quad (VI. 70)$$

Дальнейшее решение системы уравнений производится в том же порядке, что и в случае определения состава первого приближения, но во втором и последующих приближениях используются формулы (VI. 57), (VI. 58), (VI. 60) и (VI. 62), а не частные формулы (VI. 64) — (VI. 67), имеющие отношение только к первому приближению. Число необходимых приближений определяется заданной точностью определения состава продуктов сгорания.

§ 35. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КАМЕРЫ ДВИГАТЕЛЯ

Тепловой расчет камеры двигателя включает:

- а) определение температуры и состава продуктов сгорания в камере сгорания;
- б) определение энтропии продуктов сгорания в камере двигателя;
- в) расчет состава и температуры продуктов сгорания на срезе сопла;
- г) определение скорости истечения w_3 ;
- д) определение показателя изэнтропии $n_{из}$, геометрических размеров сопла и теоретической удельной тяги.

Определение теоретической температуры и состава продуктов сгорания в камере двигателя

Методами, изложенными выше, определяется равновесный состав продуктов сгорания при трех температурах T' , T'' и T''' в районе ожидаемой температуры сгорания. Пользуясь величинами парциальных давлений, полученными при определении состава, и табличными значениями полных теплосодержаний при соответствующей температуре, по формуле (V. 34) находим полное теплосодержание продуктов сгорания в *ккал/кг* при трех температурах. Определение теплосодержания удобно производить, пользуясь таблицей, форма которой приведена в примере § 38.

По данным таблицы строится график зависимости полного теплосодержания продуктов сгорания $I_{п.с.}$ от температуры при выбранном давлении в камере (см. фиг. 64).

На этом же графике наносится линия полного теплосодержания топлива, подсчитанного по формуле (V. 25). Точка пересечения кривой изменения теплосодержания $I_{п.с.}$ и линии $I_{п.т.} = \text{const}$ дает графическое определение температуры в камере сгорания T_2 .

Парциальные давления газов, составляющих продукты сгорания, при температуре T_2 находятся путем линейной интерполяции парциальных давлений, определенных при двух соседних температурах, между которыми находится T_2 .

Определив состав при температуре сгорания, находим для этого состава газовую постоянную R .

Определение энтропии продуктов сгорания в камере сгорания

При расчете истечения необходимо знать величину энтропии, которую имеют продукты сгорания в камере.

Определение энтропии продуктов сгорания $S_{п.с.}$ проводится при заданном давлении p_2 с использованием соотношений (II. 46) и (VI. 33)

$$S_{п.с.} = \frac{1000}{\sum \mu_i p_i} \sum (S_{0i} p_i - 4,57 p_i \lg p_i). \quad (\text{VI. 71})$$

Значения стандартной энтропии S_{0i} берутся из соответствующих таблиц. Примером таких таблиц может служить таблица приложения 4.

Вычисление энтропии продуктов в камере сгорания может производиться двумя способами.

При первом способе путем линейного интерполирования находят значения энтропий S_{0i} составляющих продуктов сгорания при найденной температуре T_2 . Затем по формуле (VI.71) производятся непосредственное определение энтропии в камере сгорания S_2 . При этом используются значения парциальных давлений продуктов сгорания при температуре T_2 и давлении в камере p_2 .

При втором способе находятся энтропии продуктов сгорания $S'_{n,c}$, $S''_{n,c}$ и $S'''_{n,c}$ при трех температурах T' , T'' и T''' , при которых производилось определение состава продуктов сгорания. В этом случае в формулу (VI.71) подставляются значения парциальных давлений, найденных при этих температурах.

Искомое значение энтропии S_2 находится как точка пересечения линии энтропий $S'_{n,c}$, $S''_{n,c}$ и $S'''_{n,c}$ с линией температуры T_2 (см. фиг. 64).

Определение энтропии удобнее вести, пользуясь таблицей расчета энтропий, приведенной в примере § 38.

Расчет состава и температуры газа на срезе сопла

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных позволяет утверждать, что при расширении продуктов сгорания в сопле реакции рекомбинации полностью успевают совершаться. Следовательно, в каждом сечении сопла устанавливается равновесный химический состав продуктов сгорания. Поэтому состав продуктов сгорания на срезе сопла подчиняется уравнениям констант равновесия, используемым при расчете сгорания. Кроме того, такой процесс истечения можно считать обратимым, следовательно, энтропия газов в любом сечении сопла равна энтропии в камере сгорания S_2 .

Для расчета состава и температуры продуктов сгорания на срезе сопла используется точно такая же система уравнений, которая была нами составлена для определения состава и температуры продуктов сгорания в камере (см. § 33 или 34), за исключением уравнения баланса теплосодержаний (VI.15).

В данном случае это уравнение нужно заменить уравнением изоэнтропического расширения

$$S_2 = S_3.$$

Отклонение реального процесса расширения от принятой теоретической схемы будем учитывать экспериментальным коэффициентом сопла.

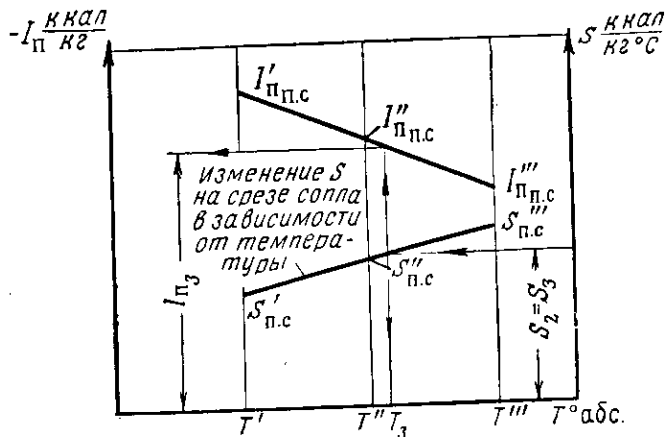
При разрешении этой системы уравнений следует иметь в виду, что температура на срезе сопла значительно ниже, чем в камере сгорания. В этих условиях часто можно пренебрегать содержанием в продуктах сгорания атомарных газов (H, O и N) и окиси азота (NO), что соответствующим образом упрощает расчет. Так же как и в камере сгорания, расчет состава ведется при трех

температурах в районе ожидаемой температуры. Эта температура может быть определена приближенно по соотношению

$$T_{\text{зож}} \approx T_2 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad (\text{VI. 72})$$

в котором можно рекомендовать следующие ориентировочные значения n : для топлива керосин+кислород $n=1,10$, для топлива кислород+спирт $n=1,12-1,16$; для топлива азотная кислота+керосин $n=1,14-1,20$. Меньшие значения n следует брать для более высоких температур T_2 .

После выбора трех значений температур T' , T'' и T''' ведется расчет состава продуктов сгорания при этих температурах и при давлении $p_2 = p_3$. Порядок расчета состава газа остается таким же, как и в случае определения состава продуктов сгорания в камере сгорания. Для найденных составов продуктов сгорания на срезе сопла при температурах T' , T'' и T''' определяется энтропия продуктов сгорания $S'_{\text{п.с}}$, $S''_{\text{п.с}}$ и $S'''_{\text{п.с}}$ по формуле (VI. 71) и строится график зависимости энтропии от температуры (фиг. 65). Рас-



Фиг. 65. Определение энтропии S_3 , температуры T_3 и теплового содержания $I_{\text{пз}}$ на срезе сопла.

четное значение температуры на срезе сопла T_3 найдется по величине энтропии в камере S_2 , которая уже определена ранее (см. фиг. 64). Для этого графически решается уравнение (VI. 73).

$$S_2 = S_3. \quad (\text{VI. 73})$$

Определение скорости истечения

Для полученного состава продуктов сгорания на срезе по формуле (V. 34) находится их полное теплосодержание при температурах T' , T'' и T''' и строится график зависимости теплосодержания от

температуры. Затем определяется теплосодержание $I_{пз}$ при найденной теоретической температуре T_3 (см. фиг. 65).

Теперь можно определить перепад полного теплосодержания $\Delta I_{п}$, пошедший на создание скорости w_3 . Этот перепад определяется разностью полных теплосодержаний, которые имеют продукты сгорания в камере и на срезе сопла. Так как полное теплосодержание продуктов сгорания в камере равно полному теплосодержанию топлива $I_{пт}$, то

$$\Delta I_{п} = I_{пт} - I_{пз}.$$

Так как истечение принимается адиабатическим, то теоретическая скорость истечения может быть подсчитана по уравнению (III. 10), в котором скорость истечения w равна нашей искомой скорости на срезе сопла w_3

$$w_3 = 91,5 \sqrt{\Delta I_{п}}. \quad (\text{VI. 74})$$

Определение теоретической удельной тяги и размеров сопла

По данным расчета состояния газа на срезе сопла находим удельный вес его

$$\gamma_3 = \frac{f_3}{R_3 T_3}. \quad (\text{VI. 75})$$

Составим далее уравнение расхода 1 кг продуктов сгорания через выходное сечение

$$1 = f'_3 \gamma_3 w_3, \quad (\text{VI. 76})$$

где f'_3 — удельное проходное сечение на срезе сопла, необходимое для пропуска 1 кг газа в секунду, т. е. $f'_3 = \frac{f_3}{G}$.

Используем это уравнение для определения f'_3

$$f'_3 = \frac{1}{\gamma_3 w_3}. \quad (\text{VI. 77})$$

Зная f'_3 и w_3 , находим теоретическую удельную тягу двигателя по формуле (I. 13)

$$P_{\text{уд теор}} = \frac{w_3}{g} + f'_3 (p_3 - p_H). \quad (\text{VI. 78})$$

По заданной абсолютной тяге P находим необходимый секундный теоретический расход топлива $G_{\text{теор}}$

$$G_{\text{теор}} = \frac{P}{P_{\text{уд теор}}}. \quad (\text{VI. 79})$$

Затем определяются теоретические размеры сопла на срезе

$$f_{3 \text{ теор}} = G f'_3. \quad (\text{VI. 80})$$

Для определения размеров критического сечения необходимо знать показатель изоэнтропы $n_{из}$; он может быть найден, если пре-

исбrecь изменением газовой постоянной в процессе расширения, по уравнению (III. 66)

$$T_3 = T_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n_{из}-1}{n_{из}}},$$

в котором из предыдущих расчетов известны все величины, кроме $n_{из}$.

Логарифмируя это уравнение и решая его относительно $n_{из}$, получим

$$n_{из} = \frac{\lg \frac{p_3}{p_2}}{\lg \frac{p_3}{p_2} \frac{T_2}{T_3}}. \quad (\text{VI. 81})$$

Для определения теоретического размера критического сечения воспользуемся тем условием, что степень уширения сопла зависит от заданного в расчете отношения давлений на срезе сопла и в камере сгорания и от показателя изоэнтропы расширения.

Поэтому, определив из теоретического расчета величину показателя $n_{из}$, можно вычислить отношение проходных сечений $\frac{f_{3, теор}}{f_{кр, теор}}$, воспользовавшись формулой (III. 65), подставляя в нее данное значение $\delta = \frac{p_3}{p_2}$ и величину $n_{из}$, найденную по равенству (VI. 81).

После этого находим величину теоретического критического сечения $f_{кр, теор}$.

Тепловой расчет ЖРД по диаграмме полное теплосодержание — энтропия

При расчете термодинамических процессов часто пользуются диаграммами полное теплосодержание — энтропия ($I_n S$ -диаграммами). Для некоторых топлив ЖРД имеются $I_n S$ -диаграммы, рассчитанные, конечно, с учетом диссоциации.

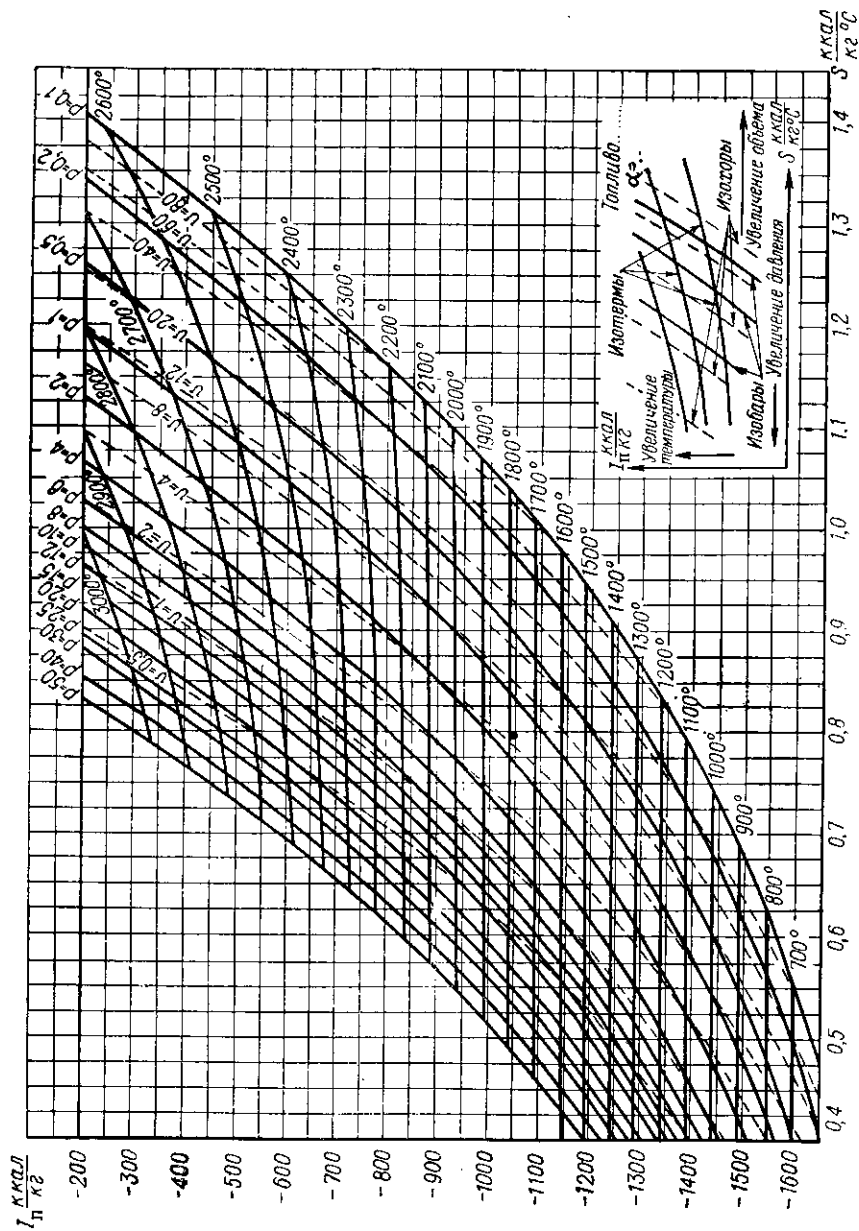
Схема энтропийной диаграммы изображена на фиг. 66. Энтропийная диаграмма рассчитывается для вполне определенного топлива, т. е. для данного горючего, окислителя и их соотношения γ в топливе и применять ее можно только для расчета двигателя, работающего на данном топливе.

На диаграмме наносятся по крайней мере три сетки кривых: изотерм, изобар и изохор, с помощью которых легко рассчитать все необходимые параметры теплового процесса двигателя.

Пример расчета теплового процесса показан на фиг. 67.

По пересечению линии полного теплосодержания, соответствующей полному теплосодержанию данного топлива $I_{n, т}$, и изобары, соответствующей заданному давлению в камере сгорания p_2 , находится точка, определяющая состояние продуктов в камере (точка 2 на фиг. 67), и могут быть определены значения T_2 и S_2 .

Линией изэнтропического расширения в этой диаграмме будет вертикальная линия $S_2 = \text{const}$. Пересечение этой вертикали с изобарой заданного давления на срезе сопла p_3 даст точку Z , опреде-

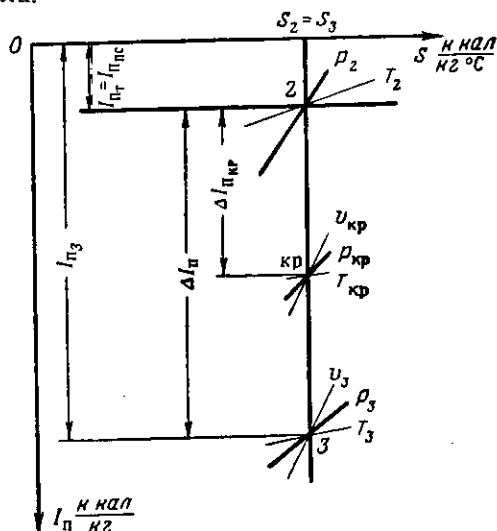


Фиг. 66. I_p - S -диаграмма и ее схема.

Диаграмма составлена для продуктов сгорания жидкого кислорода и этилового спирта при $\alpha=0,7$.

ляющую состояние продуктов сгорания на срезе сопла, т. е. их температуру T_3 , удельный объем v_3 и теплосодержание $I_{п3}$.

Затем расчет удельной тяги и проходных сечений производится совершенно так же, как и при аналитическом расчете после определения температуры и состава продуктов сгорания в камере и на срезе сопла.



Фиг. 67. Расчет теплового процесса ЖРД по $I_p S$ -диаграмме.

Расчет проходных сечений может производиться по величинам удельных объемов продуктов сгорания, снимаемым с $I_p S$ -диаграмм. В этом случае используется уравнение

$$f' = \frac{v}{w},$$

получаемое из уравнения расхода.

Состояние газа в критическом сечении определяется точкой пересечения линии $S_2 = \text{const}$ и изобары критического давления $p_{кр}$, которое находится по формуле (III. 52)

$$p_{кр} = p_2 \left(\frac{2}{n_{из} + 1} \right)^{\frac{n_{из}}{n_{из} - 1}}.$$

На некоторых $I_p S$ -диаграммах наносятся дополнительные линии, облегчающие нахождение геометрических размеров сопла.

§ 36. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ, ДАВЛЕНИЯ В КАМЕРЕ ДВИГАТЕЛЯ И СООТНОШЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВА НА ПАРАМЕТРЫ ЖРД

Влияние температуры

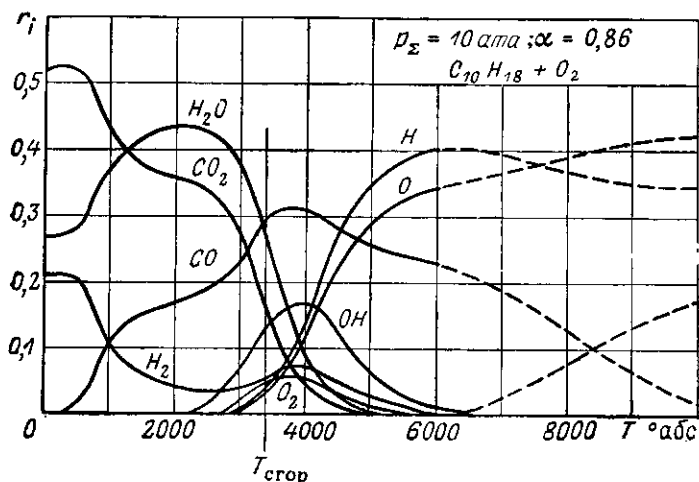
К настоящему времени произведено большое число расчетов состава и температуры продуктов сгорания и теоретических удельных тяг. Рассмотрим основные результаты этих расчетов.

На фиг. 68 приведен расчетный график изменения объемного содержания газов в продуктах сгорания керосина ($C_T = 0,87$,

$H_r=0,13$) с кислородом при $\alpha=0,86$ и давлении $p_z=10$ ата в зависимости от температуры.

В области относительно низких температур (300—2500° абс.) состав продуктов сгорания следует в основном уравнению константного равновесия реакции водяного газа, без образования значительного количества каких-либо других продуктов диссоциации, кроме окиси углерода CO и H₂. При этом с увеличением температуры быстро возрастает содержание в продуктах сгорания окиси углерода CO.

При возрастании температур сверх 3000° абс. происходит быстрое уменьшение содержания продуктов полного сгорания (трехатомных газов) за счет возрастания содержания двухатомных га-



Фиг. 68. Влияние температуры на состав продуктов сгорания.

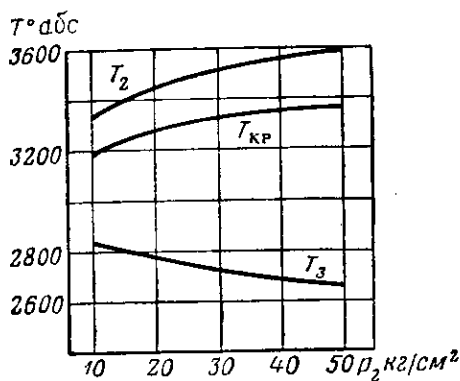
зов и в первую очередь окиси углерода CO. Менее значительно увеличивается содержание в продуктах сгорания других двухатомных газов H₂, O₂, OH. Являясь продуктами неполного сгорания, они имеют в себе химическую энергию, снижая таким образом полноту сгорания. Дальнейшее увеличение температуры сгорания сверх 3700° абс. вызывает диссоциацию и двухатомных газов (в первую очередь H₂ и O₂) на атомарные.

Расчетная температура сгорания этой смеси составляет 3360° абс., т. е. действительные температуры в камере сгорания находятся в той зоне, когда уже имеет место значительная диссоциация.

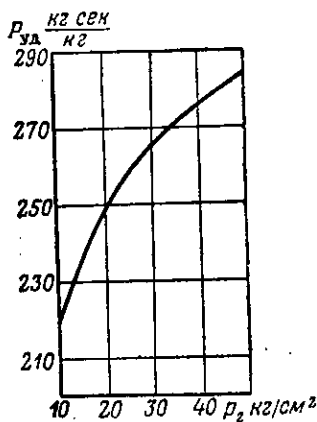
Влияние давления в камере сгорания

На графике фиг. 69 приведено изменение температуры продуктов сгорания T_2 и температуры на срезе сопла T_3 в зависимости от давления в камере p_2 , для продуктов сгорания топлива бензин+жидкий кислород при $\alpha=1$. Давление на срезе сопла при этом остается постоянным и равным одной атмосфере.

Из графика мы видим, что с ростом давления немного растут и температура сгорания T_2 . Это происходит в силу того, что повышение давления понижает степень диссоциации (см. § 12). Тем-



Фиг. 69. Зависимость T_2 и T_3 от давления в камере p_2 (при $p_3=1$).



Фиг. 70. Влияние давления в камере p_2 на удельную тягу (при $p_3=1$).

пература на срезе сопла T_3 с ростом p_2 понижается, так как уменьшается степень расширения в сопле $\delta = \frac{p_3}{p_2}$, а как известно,

$$T_3 = T_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n_{из}-1}{n_{из}}}$$

Влияние на температуру T_3 увеличения T_2 с ростом давления p_2 мало по сравнению с влиянием отношения $\frac{p_3}{p_2}$.

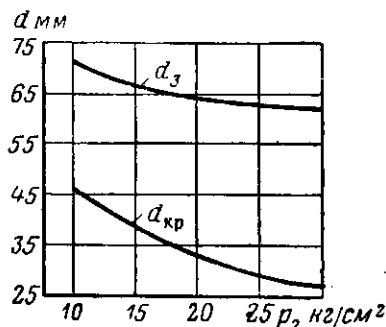
Таким образом, мы видим, что с ростом давления в камере растет и разность температур ($T_2 - T_3$), а следовательно, растет и скорость истечения продуктов сгорания из сопла так как (см. § 13)

$$w_3 = \sqrt{\frac{2g}{A} \Delta I_n} = \sqrt{\frac{2g}{A} c_p (T_2 - T_3)}$$

С ростом скорости истечения растет и удельная тяга ЖРД, следовательно, с ростом давления в камере сгорания растет удельная тяга ЖРД — $P_{уд}$. Зависимость удельной тяги ЖРД от давления показана на фиг. 70.

Изменение давления в камере приводит также к изменению геометрических размеров сопла. Это влияние характеризуется графиком фиг. 71, на котором нанесена зависимость диаметров критического $d_{кр}$ и выходного d_3 сечений сопла, необходимых для пропуска 1 кг продуктов сгорания в секунду от величины давления в камере p_2 .

С возрастанием давления диаметр критического сечения уменьшается довольно быстро; несколько медленнее уменьшается диаметр выходного сечения сопла двигателя.



Фиг. 71. Влияние давления в камере p_2 на размеры сопла. d_3 —удельный диаметр выходного сечения; $d_{кр}$ —удельный диаметр критического сечения.

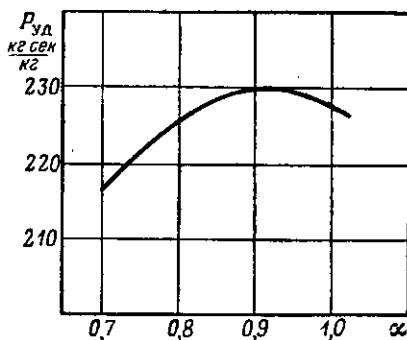
слителя ($\alpha < 1$ или $\nu < \nu_0$). Это объясняется тем, что продукты сгорания углеводородных топлив при $\alpha < 1$ содержат большее количество окиси углерода, которая хотя и является продуктом неполного сгорания, но в то же время сравнительно устойчива против дальнейшей диссоциации (см. фиг. 68). Вследствие этого при $\alpha < 1$ затрата тепла на диссоциацию несколько уменьшается, что и приводит к увеличению температуры в камере. Кроме того, увеличение относительного содержания СО увеличивает газовую постоянную R . По этим двум причинам удельная тяга имеет максимум при $\alpha < 1$. В качестве примера на фиг. 72 приведен график изменения

удельной тяги двигателя, работающего на топливе азотная кислота+керосин в зависимости от коэффициента избытка окислителя α при давлении в камере 30 ата и давлении на срезе 1 ата.

Влияние соотношения компонентов в топливе

На температуру в камере сгорания и удельную тягу двигателя оказывает также влияние величина действительного соотношения компонентов рабочей смеси ν или коэффициент избытка окислителя α .

Для обычных углеводородных топлив ЖРД удельная тяга $P_{уд}$ и температура в камере сгорания T_2 имеют максимальные значения (при прочих равных условиях) не при стехиометрическом соотношении компонентов $\alpha = 1$, а при недостатке окислителя.



Фиг. 72. Влияние соотношения компонентов топлива на удельную тягу.

§ 37. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ КОЭФФИЦИЕНТЫ ДВИГАТЕЛЯ И РАСЧЕТ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЙ УДЕЛЬНОЙ ТЯГИ

Коэффициент удельной тяги

Расчет теоретической удельной тяги учитывает только термодинамические потери энергии при осуществлении рабочего процесса в двигателе. К этим потерям относятся следующие потери:

— потери тепла, уносимого продуктами сгорания; они учитываются термическим к. п. д.;

— потери тепла, связанные с диссоциацией продуктов сгорания в камере; они учитываются непосредственно при расчете теоретической температуры в камере сгорания с учетом диссоциации.

Возврат части химической энергии в сопле за счет реакций комбинации учитывается тем, что процесс расширения описывается показателем изоэнтропы расширения $n_{из}$. Но тепловой расчет не учитывает потерь на физическое недогорание в камере, оцениваемых коэффициентом камеры η_k или φ_k (далее при расчетах будем применять систему импульсных коэффициентов), и потерь, связанных с трением и неравновесностью расширения в сопле. Эти потери оцениваются коэффициентом сопла η_c или φ_c .

Теоретическое определение этих потерь и учет их в расчете удельной тяги ЖРД в настоящее время невозможен. С целью приближения расчета к действительности используются экспериментальные коэффициенты, получаемые при испытании двигателя, а затем результаты испытания сравниваются с расчетными данными.

Уменьшение удельной тяги как за счет потерь в камере, так и за счет потерь в сопле может быть определено путем сравнения действительно удельной тяги $P_{уд}$ с теоретической удельной тягой $P_{уд, теор}$ подсчитываемой теоретически при тепловом расчете двигателя.

Очевидно, что отношение этих удельных тяг

$$\frac{P_{уд}}{P_{уд, теор}} = \varphi \quad (VI. 82)$$

является общим коэффициентом, учитывающим оба вида потерь.

Этот коэффициент называется *коэффициентом удельной тяги* φ . Очевидно, что коэффициент удельной тяги равен

$$\varphi = \varphi_k \varphi_c. \quad (VI. 83)$$

Для экспериментального определения φ необходимо провести замер трех величин: абсолютной тяги двигателя P , расхода горючего G_f и расхода окислителя G_o . По этим величинам находится $P_{уд}$.

Для того, чтобы можно было произвести расчет теоретической удельной тяги, надо, кроме того, знать давление в камере сгорания p_2 и давление на срезе сопла p_3 . Все измерения, связанные с испытанием ЖРД, являются довольно сложными, так как производятся в условиях опыта очень малой продолжительности и, по требованиям техники безопасности, должны осуществляться дистанционно — на расстоянии. Однако измерения расхода компонентов, тяги и давления в камере могут быть сейчас произведены с достаточной точностью. Мало освоены только измерения давления на срезе сопла.

Таким образом, все данные для определения $P_{уд, теор}$ могут быть получены. Расчет теоретической удельной тяги практически приходится вести после испытания двигателя при замеренном давлении

в камере и действительном соотношении расходов компонентов рабочей смеси

$$\nu = \frac{G_o}{G_r},$$

так как при испытаниях весьма трудно выдержать одновременно и заданное давление и заданное соотношение расходов. Давление на срезе сопла (если его величина не определяется экспериментально) принимается равным давлению окружающей среды или же принимается равным давлению, определяемому расчетом по формуле (III. 65) при ориентировочно выбранном заранее показателе изоэнтропы $n_{из}$.

Таким образом, по результатам испытания находится коэффициент удельной тяги φ .

Экспериментальное определение коэффициента камеры и коэффициента сопла (φ_k и φ_c)

Расчеты и замеры, необходимые для экспериментального определения коэффициента удельной тяги, позволяют разделить потери в камере и в сопле. Такое разделение потерь полезно тем, что оно может указать пути для улучшения конструкции двигателя и позволит более сознательно выбирать значения коэффициентов.

Для выяснения возможности выделения потерь в камере сгорания воспользуемся выражением (III. 63), которое запишем в виде

$$p_2 \frac{f_{кр}}{G} = \frac{\sqrt{RT_2}}{A_n}. \quad (VI. 84)$$

В этом выражении заменим величину RT_2 , принимая во внимание, что

$$T_2 = \frac{H_u}{c_p} \text{ и } c_p = \frac{k}{k-1} AR,$$

откуда

$$RT_2 = \frac{k-1}{k} \frac{H_u}{A}. \quad (VI. 85)$$

Вводя полученное значение RT_2 в (VI. 84) и обозначая постоянные члены через B_n , получим

$$p_2 \frac{f_{кр}}{G} = B_n \sqrt{H_u}. \quad (VI. 86)$$

Комплекс параметров $p_2 \frac{f_{кр}}{G}$ имеет размерность удельной тяги $кг \text{ сек}/кг$ и так же, как удельная тяга, пропорционален корню квадратному из величины энергии, затрачиваемой на ее создание.

Так как величина $\frac{p_2 f_{кр}}{G}$ включает в себя параметры двигателя, характеризующие камеру сгорания (до критического сечения сопла), то уменьшение этой величины по сравнению с расчетной теоретической будет вызвано потерями энергии в камере, не учитываемыми расчетом.

Потери в камере сгорания — это в основном потери процесса сгорания, поэтому величина комплекса параметров, находящихся из эксперимента, может быть записана в виде.

$$\left[\frac{p_2 f_{кр}}{G} \right]_{экс} = B_n \sqrt{H_u \eta_{кр}} = \varphi_{кр} \left[\frac{p_2 f_{кр}}{G} \right]_{теор} \quad (\text{VI. 87})$$

При этом величина $\left[p_2 \frac{f_{кр}}{G} \right]_{экс}$ может быть определена из обычных испытаний двигателя и не требует каких-либо новых измерений.

Выражение $B_n \sqrt{H_u}$ носит только качественный характер и не годится для вычисления $\eta_{кр}$ или $\varphi_{кр}$, так как не учитывает потерь энергии в результате диссоциации.

Для вычисления $\eta_{кр}$ или $\varphi_{кр}$ надо использовать результаты описанного выше теоретического расчета процесса сгорания и истечения с учетом диссоциации.

При таком определении $\left[\frac{p_2 f_{кр}}{G} \right]_{теор}$ коэффициент $\varphi_{кр}$, введенный нами в уравнение (VI. 87), будет учитывать только потери от физической неполноты сгорания и трения в камере сгорания двигателя, что находится в соответствии с системой к. п. д., рассмотренной ранее (см. § 19).

Таким образом, можно получить выражение для коэффициента камеры в виде

$$\varphi_{кр} = \sqrt{\eta_{кр}} = \frac{\left[\frac{p_2 f_{кр}}{G} \right]_{экс}}{\left[\frac{p_2 f_{кр}}{G} \right]_{теор}}, \quad (\text{VI. 88})$$

где $\varphi_{кр}$ — импульсный коэффициент камеры.

Величина $\varphi_{кр}$, следовательно, может быть определена из теплового расчета и испытаний двигателя.

Теоретический расчет теплового процесса целесообразно вести при экспериментально определенных p_2 , G и $v = \frac{G_o}{G_r}$, в связи с чем величины p_2 и G в формуле (VI. 88) могут быть сокращены и $\varphi_{кр}$ приобретет простую форму:

$$\varphi_{кр} = \frac{f_{кр. экс}}{f_{кр. теор}}, \quad (\text{VI. 89})$$

т. е. определяется отношением действительной площади критического сечения испытуемого двигателя к площади его, рассчитанной теоретически при заданном давлении p_2 , расходе топлива G и соотношении компонентов.

Если при испытании ЖРД на стенде выдержать заданный режим по расходу, т. е. $G_{экс} = G_{теор}$, то коэффициент камеры выразится следующим образом:

$$\varphi_{кр} = \frac{p_2 \text{ экс}}{p_2 \text{ теор}}, \quad (\text{VI. 90})$$

т. е. в этом случае коэффициент камеры представляет собой отношение действительного давления, полученного в камере сгорания, к теоретическому, которое должно быть определено при заданных расходах компонентов и величине критического сечения сопла.

Если при испытании двигателя выдерживается заданное давление, то

$$p_{2\text{теор}} = p_{2\text{экс}}$$

и для φ_k мы получаем формулу

$$\varphi_k = \frac{G_{\text{теор}}}{G_{\text{экс}}} \quad (\text{VI. 91})$$

Коэффициент камеры принимает вид коэффициента расхода и представляет отношение теоретического расхода, необходимого для создания заданного давления в камере сгорания (при заданном $f_{\text{кр}}$), к действительному, который получен при испытании.

Зная коэффициент камеры и коэффициент удельной тяги, можно получить также и значение коэффициента сопла:

$$\varphi_c = \frac{\varphi}{\varphi_k} \quad (\text{VI. 92})$$

При выборе значений коэффициента камеры и коэффициента сопла следует обращать внимание на соответствие конструктивных данных проектируемого двигателя конструктивным данным двигателя, при испытании которого были получены экспериментальные коэффициенты φ_k и φ_c .

Тепловой расчет двигателя с учетом экспериментальных коэффициентов

Задавшись величиной φ_k и φ_c , можно определить величину действительной удельной тяги по соотношению

$$P_{\text{уд}} = \varphi_k \varphi_c P_{\text{уд теор}} \quad (\text{VI. 93})$$

и найти действительно необходимый секундный расход компонентов

$$G = \frac{P}{P_{\text{уд}}} = \frac{G_{\text{теор}}}{\varphi_k \varphi_c} \quad (\text{VI. 94})$$

Можно также внести поправку в размеры критического сечения сопла, для того чтобы при новом расходе и с учетом потерь в камере и сопле получить заданное давление в камере p_2 .

Между действительным и теоретическим комплексами параметров будет иметь место соотношение, аналогичное (VI. 87)

$$\frac{f_{\text{кр}} p_2}{G} = \varphi_k \frac{f_{\text{кр теор}} p_{2\text{ теор}}}{G_{\text{теор}}}$$

Давление в камере p_2 должно равняться заданной величине давления $p_{2\text{ теор}}$, а действительный расход связан с теоретической величиной соотношением (VI. 94).

Следовательно,

$$\frac{f_{кр}}{f_{кр. теор}} = \varphi_k \frac{G}{G_{теор}} = \frac{\varphi_k}{\varphi_k \varphi_c},$$

или

$$f_{кр} = f_{кр теор} \frac{1}{\varphi_c}. \quad (VI. 95)$$

Отношение $\frac{f_{я}}{f_{кр}}$, необходимое для получения заданного давления на срезе сопла, при этом не будет отличаться от вычисленного ранее $\frac{f_{я теор}}{f_{кр теор}}$, так как показатель $n_{из}$ мы считаем неизменным. Вследствие этого

$$f_{я} = \frac{f_{я теор}}{\varphi_c}. \quad (VI. 96)$$

Таким образом, в результате расчета определяются действительная удельная тяга двигателя, секундный расход компонентов и геометрические размеры сопла.

§ 38. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА СГОРАНИЯ И ИСТЕЧЕНИЯ¹

Тепловой расчет ЖРД, работающего на азотосодержащем топливе

Произвести тепловой расчет жидкостного ракетного двигателя с тягой на земле 12 000 кг. Топливо: окислитель — 98%-ная азотная кислота, горючее — керосин состава: $G_r=0,865$; $H_r=0,135$; $O_r=0$. Коэффициент избытка окислителя $\alpha=0,8$. Давление в камере сгорания $p_2=30$ ата, давление на срезе сопла $p_3=0,9$ ата. Экспериментальные коэффициенты $\varphi_k=0,92$; $\varphi_c=0,95$.

Тепловой расчет ЖРД разделяется на следующие этапы.

1. Определение состава и температуры газов в камере сгорания.
2. Определение состава и температуры газов на срезе сопла.
3. Определение удельной тяги и размеров сопла.

Определение состава и температуры в камере сгорания

1. Состав 100%-ной азотной кислоты (см. табл. 3)

$O=0,762$; $H=0,016$; $N=0,222$.

Состав воды: $H=0,889$; $O=0,111$.

2. Состав окислителя [по формуле (V. 5)]

$O_o=0,98 \cdot 0,762 + 0,02 \cdot 0,889 = 0,764$;

$H_o=0,98 \cdot 0,016 + 0,02 \cdot 0,111 = 0,018$;

$N_o=0,98 \cdot 0,222 = 0,218$;

$C_o=0$.

¹ В примерах § 38 использованы значения термодинамических величин, взятые из работы А. П. Ваничева «Термодинамический расчет горения и истечения в области высоких температур» (изд. БНТ, 1947). Эти данные несколько расходятся с аналогичными данными таблиц приложения 1, 2, 3 и 4, которые являются более точными.

Проверка:

$$O_o + H_o + N_o = 0,764 + 0,018 + 0,218 = 1,000.$$

3. Определяем теоретически необходимое количество окислителя ν_o . По формуле (V. 13)

$$\nu_o = \frac{\frac{8}{3} C_r + 8H_r - O_r}{O_o - \frac{8}{3} C_o - 8H_o} = \frac{\frac{8}{3} 0,865 + 8 \cdot 0,135}{0,764 - 8 \cdot 0,018} = 5,47.$$

4. Определяем действительный расход окислителя на 1 кг горючего. По формуле (V. 15)

$$\nu = \alpha \nu_o = 0,8 \cdot 5,47 = 4,37.$$

5. Определяем состав топлива. По формулам (V. 17)

$$C_r = \frac{C_r + \nu C_o}{1 + \nu} = \frac{0,865}{1 + 4,37} = 0,161;$$

$$H_r = \frac{H_r + \nu H_o}{1 + \nu} = \frac{0,135 + 4,37 \cdot 0,018}{5,37} = 0,040;$$

$$O_r = \frac{O_r + \nu O_o}{1 + \nu} = \frac{4,37 \cdot 0,764}{5,37} = 0,622;$$

$$N_r = \frac{N_r + \nu N_o}{1 + \nu} = \frac{4,37 \cdot 0,218}{5,37} = 0,177.$$

Проверка:

$$C_r + H_r + O_r + N_r = 0,161 + 0,040 + 0,622 + 0,177 = 1,000.$$

6. Определяем теплосодержание топлива.

По данным табл. 3 теплосодержание HNO_3 равно — 660 ккал/кг; теплосодержание воды составит — 3790 ккал/кг; теплота растворения воды в азотной кислоте равна — 280 ккал/кг H_2O .

Теплосодержание окислителя по формуле (V. 23)

$$I_{\nu_o} = -660 \cdot 0,98 - 3790 \cdot 0,02 - 0,02 \cdot 280 = -729 \text{ ккал/кг.}$$

По данным табл. 4 теплосодержание керосина:

$$I_{\nu_r} = -440 \text{ ккал/кг.}$$

Теплосодержание топлива по формуле (V. 25)

$$I_{\nu_r} = \frac{I_{\nu_r} + \nu I_{\nu_o}}{1 + \nu} = \frac{-440 + 4,37 (-729)}{5,37} = -677 \text{ ккал/кг.}$$

7. В соответствии с данными табл. 5 температура в камере сгорания будет находиться в пределах 3000° абс. Поэтому расчет состава продуктов сгорания будем вести при трех температурах: $T' = 2900^\circ$ абс., $T'' = 3000^\circ$ абс. и $T''' = 3100^\circ$ абс.

8. Выражаем давление в физических атмосферах, для которых приведены значения константы равновесия: $p_2 = \frac{30}{1,033} = 29 \text{ ата.}$

9. Определяем постоянные для данного расчета величины Q , R и S . По формулам (VI. 51), (VI. 52) и (VI. 53)

$$Q = \frac{7}{6} \frac{C_T}{N_T} = \frac{7}{6} \frac{0,161}{0,177} = 1,060;$$

$$R = 14 \frac{H_T}{N_T} = 14 \frac{0,04}{0,177} = 3,162;$$

$$S = \frac{3}{4} \frac{O_T}{N_T} = \frac{3}{4} \frac{0,622}{0,161} = 2,90.$$

Далее проводим расчет состава продуктов сгорания при температуре 3000° абс., используя метод последовательных приближений, описанный в § 34.

Первое приближение

10. Определяем состав продуктов сгорания первого приближения по формулам (VI. 64) — (VI. 67).

$$p_{N_2} = \frac{p_2}{2Q + R + 1} = \frac{29}{2 \cdot 1,06 + 3,162 + 1} = 4,62;$$

$$p_{CO} = 2Qp_{N_2} - p_{CO_2} = 2 \cdot 1,06 \cdot 4,62 - p_{CO_2} = 9,80 - p_{CO_2};$$

$$p_{H_2O} = 2Qp_{N_2}(S - 1) - p_{CO_2} = 9,80(2,90 - 1) - p_{CO_2} = 18,60 - p_{CO_2};$$

$$p_{H_2} = 2p_{N_2} \left[\frac{R}{2} - Q(S - 1) \right] + p_{CO_2} = 2 \cdot 4,62 \left[\frac{3,162}{2} - 1,06(2,90 - 1) \right] + p_{CO_2} = p_{CO_2} - 4,07.$$

11. Квадратное уравнение (VI. 68) примет вид

$$K_{2a} = \frac{(9,80 - p_{CO_2})(18,60 - p_{CO_2})}{p_{CO_2}(p_{CO_2} - 4,07)}.$$

Берем значение K_{2a} при $T = 3000^\circ$ абс.

$$K_{2a} = 7,49.$$

Квадратное уравнение получает вид

$$6,49p_{CO_2}^2 - 2,1p_{CO_2} - 182,5 = 0,$$

откуда

$$p_{CO_2} = \frac{2,1 \pm \sqrt{2,1^2 + 4 \cdot 182,5 \cdot 6,49}}{2 \cdot 6,49} = 5,47.$$

$$p_{CO} = 9,80 - 5,47 = 4,33;$$

$$p_{H_2O} = 18,60 - 5,47 = 13,13;$$

$$p_{H_2} = 9,47 - 4,07 = 1,40.$$

Проверка:

а) по общему давлению

$$p_{\Sigma} = \sum p_i = 4,62 + 5,47 + 4,33 + 13,13 + 1,40 = 28,95; \quad (p_2 = 29).$$

б) по константе равновесия

$$K_{2a} = \frac{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2} p_{\text{CO}_2}} = \frac{4,33 \cdot 13,13}{1,40 \cdot 5,47} = 7,48 \text{ (7,49)}.$$

Второе приближение

12. Определяем парциальные давления шести газов.

Значения констант равновесия принимаем равными

$$K_1 = 0,368; \quad K_3 = 0,059; \quad K_4 = 0,0148; \quad K_5 = 0,0283; \quad K_6 = 0,014; \quad K_7 = 2,24 \cdot 10^{-6}.$$

По формулам (VI. 69)

$$p_{\text{O}_2} = \left(K_1 \frac{p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}}} \right)^2 = \left(0,368 \frac{5,47}{4,33} \right)^2 = 0,219;$$

$$p_{\text{OH}} = K_3 \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{H}_2}^2} = 0,059 \frac{13,13}{1,40} = 0,650;$$

$$p_{\text{NO}} = \sqrt{K_4 p_{\text{N}_2} p_{\text{O}_2}} = \sqrt{0,0148 \cdot 4,62 \cdot 0,219} = 0,122;$$

$$p_{\text{H}} = \sqrt{K_5 p_{\text{H}_2}} = \sqrt{0,0283 \cdot 1,40} = 0,200;$$

$$p_{\text{O}} = \sqrt{K_6 p_{\text{O}_2}} = \sqrt{0,014 \cdot 0,219} = 0,055;$$

$$p_{\text{N}} = \sqrt{K_7 p_{\text{N}_2}} = \sqrt{2,24 \cdot 10^{-6} \cdot 4,62} = 0,003.$$

13. Определяем коэффициенты *A*, *B*, *D* и *E* по формулам (VI. 70)

$$A = p_{\text{NO}} + p_{\text{N}} = 0,122 + 0,003 = 0,125;$$

$$B = p_{\text{OH}} + p_{\text{H}} = 0,650 + 0,200 = 0,850;$$

$$D = 2p_{\text{O}_2} + p_{\text{OH}} + p_{\text{NO}} + p_{\text{O}} = 2 \cdot 0,219 + 0,650 + 0,122 + 0,055 = 1,265;$$

$$E = p_{\text{O}_2} + p_{\text{OH}} + p_{\text{NO}} + p_{\text{H}} + p_{\text{O}} + p_{\text{N}} = \\ = 0,219 + 0,650 + 0,122 + 0,200 + 0,055 + 0,003 = 1,249.$$

14. Определяем парциальные давления основных газов во втором приближении. По формулам (VI. 57), (VI. 58), (VI. 60), (VI. 62)

$$p_{\text{N}_2} = \frac{p_2 - E + \frac{B}{2} - A \left(Q + \frac{R}{2} \right)}{2Q + R + 1} =$$

$$= \frac{29 - 1,249 + 0,425 - 0,125 \left(1,060 + \frac{3,162}{2} \right)}{2 \cdot 1,060 + 3,162 + 1} =$$

$$= \frac{29 - 1,249 + 0,425 - 0,125 \cdot 2,641}{6,282} = 4,44;$$

$$p_{\text{CO}} = Q(2p_{\text{N}_2} + A) - p_{\text{CO}_2} = 1,06(2 \cdot 4,44 + 0,125) - p_{\text{CO}_2} = \\ = 9,55 - p_{\text{CO}_2};$$

$$\begin{aligned}
 p_{\text{H}_2\text{O}} &= Q(2p_{\text{N}_2} + A)(S-1) - D - p_{\text{CO}_2} = \\
 &= 9,55(2,90-1) - 1,265 - p_{\text{CO}_2} = 16,88 - p_{\text{CO}_2}; \\
 p_{\text{H}_2} &= (2p_{\text{N}_2} + A) \left[\frac{R}{2} - Q(S-1) \right] - \frac{B}{2} + D + p_{\text{CO}_2} = \\
 &= (2 \cdot 4,44 + 0,125) \left[\frac{3,162}{2} - 1,060(2,90-1) \right] - \\
 &\quad - 0,425 + 1,265 + p_{\text{CO}_2} = p_{\text{CO}_2} - 3,03.
 \end{aligned}$$

Квадратное уравнение (VI.68) имеет вид

$$K_{2a} = \frac{(9,55 - p_{\text{CO}_2})(16,88 - p_{\text{CO}_2})}{p_{\text{CO}_2}(p_{\text{CO}_2} - 3,03)} = 7,49.$$

После преобразований получим

$$6,49 p_{\text{CO}_2}^2 + 3,70 p_{\text{CO}_2} - 161,2 = 0,$$

откуда

$$p_{\text{CO}_2} = \frac{-3,70 \pm \sqrt{3,70^2 + 4 \cdot 6,49 \cdot 161,2}}{2 \cdot 6,49} = 4,71;$$

$$p_{\text{CO}} = 9,55 - 4,71 = 4,84;$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = 16,88 - 4,71 = 12,17;$$

$$p_{\text{H}_2} = 4,71 - 3,03 = 1,68.$$

Проверка:

$$\begin{aligned}
 p_{\Sigma} &= p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}} + p_{\text{H}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{N}_2} + E = \\
 &= 4,71 + 4,84 + 1,68 + 12,17 + 4,44 + 1,249 = 29,089;
 \end{aligned}$$

$$K_{2a} = \frac{4,84 \cdot 12,17}{1,68 \cdot 4,71} = 7,49.$$

Третье приближение

15. Определяем парциальные давления шести газов. Формулы и константы взяты из второго приближения

$$p_{\text{O}_2} = \left(0,368 \frac{4,71}{4,84} \right)^2 = 0,135;$$

$$p_{\text{OH}} = 0,059 \frac{12,17}{\sqrt{1,68}} = 0,558;$$

$$p_{\text{NO}} = \sqrt{0,0148 \cdot 4,44 \cdot 0,135} = 0,093;$$

$$p_{\text{H}} = \sqrt{0,0283 \cdot 1,68} = 0,206;$$

$$p_{\text{O}} = \sqrt{0,014 \cdot 0,135} = 0,043;$$

$$p_{\text{N}} = \sqrt{2,24 \cdot 10^{-6} \cdot 4,44} = 0,003.$$

16. Определяем коэффициенты.

$$A = 0,093 + 0,03 = 0,096;$$

$$B = 0,558 + 0,206 = 0,764; \quad \frac{B}{2} = 0,382;$$

$$D = 2 \cdot 0,135 + 0,558 + 0,093 + 0,043 = 0,964;$$

$$E = 0,135 + 0,558 + 0,093 + 0,206 + 0,043 + 0,003 = 1,038.$$

17. Определяем парциальные давления основных газов

$$p_{N_2} = \frac{29 - 1,038 + 0,382 - 0,096 \cdot 2,641}{6,282} = 4,46;$$

$$p_{CO} = 1,06(2 \cdot 4,46 + 0,096) - p_{CO_2} = 9,56 - p_{CO_2};$$

$$p_{H_2O} = 9,56 \cdot 1,90 - 0,964 - p_{CO_2} = 17,20 - p_{CO_2};$$

$$p_{H_2} = (2 \cdot 4,46 + 0,096)(-0,43) - 0,382 + 0,964 + p_{CO_2} = \\ = p_{CO_2} - 3,29.$$

Квадратное уравнение получит вид

$$7,49 = \frac{(9,56 - p_{CO_2})(17,20 - p_{CO_2})}{p_{CO_2}(p_{CO_2} - 3,29)};$$

$$6,49 p_{CO_2} + 2,16 p_{CO} - 164,4 = 0;$$

$$p_{CO_2} = \frac{-2,16 \pm \sqrt{2,16^2 + 4 \cdot 6,49 \cdot 164,4}}{2 \cdot 6,49} = 4,88;$$

$$p_{CO} = 9,56 - 4,88 = 4,68;$$

$$p_{H_2O} = 17,20 - 4,88 = 12,32;$$

$$p_{H_2} = 4,88 - 3,29 = 1,59.$$

Проверка:

$$p_{\Sigma} = 4,46 + 4,88 + 4,68 + 12,32 + 1,59 + 1,038 = 28,968;$$

$$K_{2a} = \frac{4,68 \cdot 12,32}{4,88 \cdot 1,59} = 7,47.$$

Сравнивая решение во втором и третьем приближении, видим, что разница в значениях парциальных давлений еще относительно велика (больше 0,2 атa). Поэтому придется делать следующее, четвертое приближение.

Четвертое приближение

18. Определяем парциальные давления шести газов

$$p_{O_2} = \left(0,368 \frac{4,88}{4,68}\right)^2 = 0,146;$$

$$p_{OH} = 0,059 \frac{12,32}{\sqrt{1,59}} = 0,577;$$

$$p_{\text{NO}} = \sqrt{0,0148 \cdot 4,46 \cdot 0,146} = 0,098;$$

$$p_{\text{H}} = \sqrt{0,0283 \cdot 1,59} = 0,212;$$

$$p_{\text{O}} = \sqrt{0,014 \cdot 0,146} = 0,045;$$

$$p_{\text{N}} = 0,003.$$

19. Определяем коэффициенты *A*, *B*, *D* и *E*.

$$A = 0,098 + 0,003 = 0,101;$$

$$B = 0,577 + 0,212 = 0,799; \quad \frac{B}{2} = 0,400;$$

$$D = 2 \cdot 0,146 + 0,577 + 0,098 + 0,045 = 1,012;$$

$$E = 0,146 + 0,577 + 0,098 + 0,212 + 0,045 + 0,003 = 1,081.$$

20. Определяем парциальные давления основных газов

$$p_{\text{N}_2} = \frac{29 - 1,081 + 0,400 - 0,101 \cdot 2,641}{6,282} = 4,46;$$

$$p_{\text{CO}} = 1,06(2 \cdot 4,46 + 0,101) = 9,56 - p_{\text{CO}_2};$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = 9,56 \cdot 1,90 - 1,012 - p_{\text{CO}_2} = 17,16 - p_{\text{CO}_2};$$

$$p_{\text{H}_2} = (2 \cdot 4,46 + 0,101)(-0,433) - 0,400 + 1,012 + p_{\text{CO}_2} = p_{\text{CO}_2} - 3,26.$$

Квадратное уравнение получит вид

$$7,49 = \frac{(9,56 - p_{\text{CO}_2})(17,16 - p_{\text{CO}_2})}{p_{\text{CO}_2}(p_{\text{CO}_2} - 3,26)};$$

$$6,49 p_{\text{CO}_2}^2 + 2,30 p_{\text{CO}_2} - 163,9 = 0;$$

$$p_{\text{CO}_2} = 4,85;$$

$$p_{\text{CO}} = 9,56 - 4,85 = 4,71;$$

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = 17,16 - 4,85 = 12,31;$$

$$p_{\text{H}_2} = 4,85 - 3,26 = 1,59.$$

Проверка:

$$p_{\Sigma} = 4,46 + 4,85 + 4,71 + 12,31 + 1,59 + 1,081 = 29,001;$$

$$K_{2a} = \frac{4,71 \cdot 12,31}{4,85 \cdot 1,59} = 7,51.$$

Сравнивая парциальные давления, полученные в третьем и четвертом приближениях, видим, что разница между ними не превосходит 0,05. Дальнейшие приближения нецелесообразны, поэтому за окончательный состав принимаем состав, полученный в четвертом приближении. Округляем значения парциальных давлений до второго знака после занятой; при этом не будет учитываться содержание атомарного азота, так как оно составляет всего 0,003 ата.

21. Результаты дальнейших расчетов сводим в табл. 11.

Таблица 11

Газ	P_i ата	ν_i	$\nu_i P_i$	I_{n_i} ккал/граммоль	$I_{n_i} P_i$	S_{0i} ккал/граммоль	$S_{0i} P_i$	$\lg P_i$	$4,57 \rho_i \lg P_i$	$S_{0i} P_i -$ $4,57 \rho_i \lg P_i$ ккал/граммоль
N ₂	4,46	28	128	22,21	99	63,79	284,5	0,649	13,2	271,3
CO ₂	4,85	44	213	-57,23	-278	79,94	387,5	0,685	16,5	371,0
CO	4,71	28	132	-4,61	-22	65,48	308,2	0,672	14,5	293,7
H ₂ O	12,31	18	222	-27,84	-343	68,25	841,0	1,090	61,4	780,0
H ₂	1,59	2	3,2	21,20	34	48,47	77,1	0,201	1,46	75,6
O ₂	0,14	32	4,5	23,47	3	67,85	9,5	-0,854	-0,5	10,0
OH	0,58	17	9,8	27,44	16	61,37	30,7	-0,237	-0,63	31,3
NO	0,10	30	3,0	44,31	4	70,72	7,1	-1,00	-0,56	7,6
H	0,21	1	0,2	65,13	13	38,90	8,2	-0,678	-0,65	8,8
O	0,04	16	0,6	72,55	3	50,28	2,0	-1,39	-0,21	2,2
Сумма	29,01	—	716,3	—	-472	—	—	—	—	1851,5

В последней строке таблицы приведены необходимые суммы. Пользуясь данными таблицы, проведем проверку правильности вычисленного состава по абсолютным балансовым уравнениям.

$$\begin{aligned}
 H_{\tau} &= \frac{1}{\sum_i \mu_i p_i} (2p_{H_2O} + 2p_{H_2} + p_{OH} + p_H) = \\
 &= \frac{1}{716,3} (2 \cdot 12,31 + 2 \cdot 1,59 + 0,58 + 0,21) = 0,0399 \quad (0,040); \\
 C_{\tau} &= \frac{12}{\sum_i \mu_i p_i} (p_{CO_2} + p_{CO}) = \frac{12}{716,3} (4,85 + 4,71) = 0,160 \quad (0,161); \\
 N_{\tau} &= \frac{14}{\sum_i \mu_i p_i} (2p_{N_2} + p_{NO}) = \frac{14}{716,3} (2 \cdot 4,46 + 0,1) = 0,176 \quad (0,177); \\
 O_{\tau} &= \frac{16}{\sum_i \mu_i p_i} (2p_{CO_2} + p_{CO} + p_{H_2O} + 2p_{O_2} + p_{OH} + p_{NO} + p_O) = \\
 &= \frac{16}{716,3} (2 \cdot 4,85 + 4,71 + 12,31 + 2 \cdot 0,14 + 0,58 + 0,10 + 0,04) = \\
 &= 0,621 \quad (0,622).
 \end{aligned}$$

В скобках указаны значения H_{τ} ; C_{τ} ; N_{τ} и O_{τ} , найденные по составу смеси. Таким образом, мы видим, что определение парциальных давлений проведено достаточно точно.

Значения полных теплосодержаний компонентов продуктов сгорания I_{pi} и стандартных энтропий S_{oi} взяты из соответствующих таблиц.

Пользуясь данными табл. 11, определяем

$$I_{n. c} = \frac{\sum_i I_{pi}}{\sum_i \mu_i p_i} 1000 = \frac{-472}{716,3} 1000 = -658 \text{ ккал/кг};$$

$$\mu_{\Sigma} = \frac{1}{p_{\Sigma}} \sum_i \mu_i p_i = \frac{716,3}{29,01} = 24,65;$$

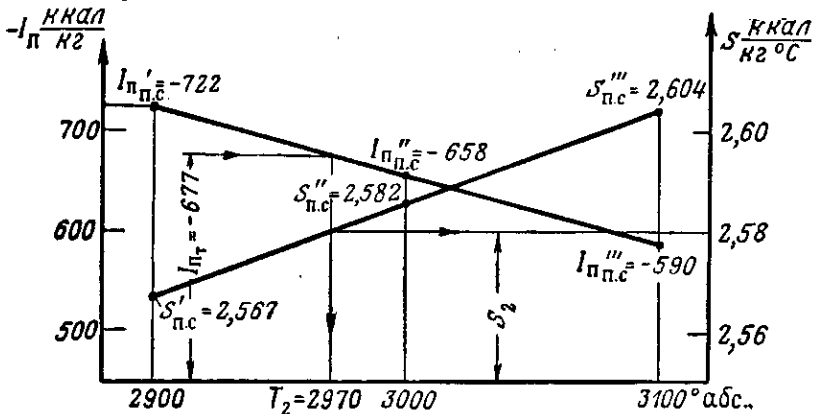
$$R = \frac{848}{\mu_{\Sigma}} = \frac{848}{24,65} = 34,4 \text{ кдж/кг}^{\circ}\text{С};$$

$$\begin{aligned}
 S_{n. c} &= \frac{1000}{\sum_i \mu_i p_i} \sum_i (S_{oi} p_i - 4,57 p_i \lg p_i) = \\
 &= \frac{1000 \cdot 1851,5}{716,3} = 2585 \text{ кал/кг}^{\circ}\text{С} = 2,585 \text{ ккал/кг}^{\circ}\text{С}.
 \end{aligned}$$

22. Проведя аналогичные расчеты для других температур (вычисления не приводятся), а именно для 2900 и 3100° абс., получим результаты, сведенные в табл. 12.

T° абс.	$I_{п.с}$ в ккал/кг	R в кгм/кг $^{\circ}C$	$S_{п.с}$ в ккал/кг $^{\circ}C$
2900	-722	34,2	2,567
3000	-658	34,4	2,582
3100	-590	34,6	2,604

Графически по пересечению кривой полного теплосодержания продуктов сгорания со значением полного теплосодержания топли-



Фиг. 73. К решению примера. Расчет T_2 и S_2 .

ва (-677 ккал/кг) находим температуру в камере сгорания и состояние газа в ней (фиг. 73).

$$T_2 = 2970^{\circ} \text{ абс.}; \quad S_2 = 2,580 \text{ ккал/кг}^{\circ} C;$$

Величину газовой постоянной R находим в табл. 12, применяя линейную интерполяцию. Округляя, получим

$$R = 34,4 \text{ кгм/кг}^{\circ} C.$$

На этом расчет состояния газа в камере сгорания заканчивается.

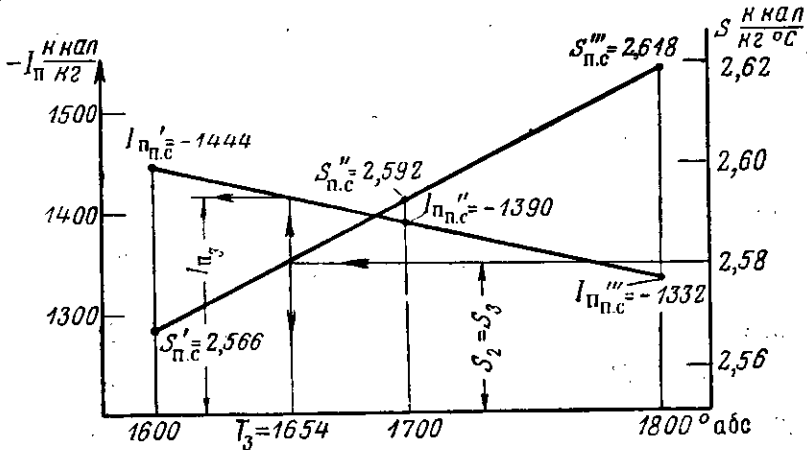
Расчет состава и температуры продуктов сгорания на срезе сопла

23. Задаемся примерным значением показателя изэнтропии, который для данного топлива можно считать равным 1,18, и находим ожидаемую температуру на срезе сопла

$$T_{\text{с.ож}} = T_2 \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n_{\text{из}} - 1}{n_{\text{из}}}} = 2970 \left(\frac{0,9}{30} \right)^{\frac{1,18 - 1}{1,18}} = 1740^{\circ} \text{ абс.}$$

24. Определение состава газа на срезе сопла ведем тем же способом, что и расчет состава в камере сгорания.

Расчет ведем при температурах 1600, 1700 и 1800° абс. и давлении 0,9 ата, пренебрегая ввиду низких температур содержанием в продуктах сгорания O₂; OH; NO; H и O.



Фиг. 74. К решению примера. Расчет T_3 и $I_{п.с}$.

В результате расчета получаем данные, приведенные в табл. 13, по которым строим график фиг. 74.

Таблица 13

T° абс.	$I_{п.с}$ ккал/кг	$S_{п.с}$ ккал/кг °C
1600	-1444	2,566
1700	-1390	2,592
1800	-1332	2,618

Воспользовавшись найденным значением энтропии при температуре сгорания в камере ($S_2 = 2,58$ ккал/кг°С), графически находят состояние газа на срезе сопла

$$T_3 = 1654^\circ \text{ абс.}; I_{п.с} = -1415 \text{ ккал/кг.}$$

Величина газовой постоянной продуктов сгорания на срезе по данным расчета составит $R_3 = 34,0$ кгм/кг°С.

Определение удельной тяги и размеров сопла

25. Определяем скорость истечения w_3

$$w_3 = 91,5 \sqrt{\Delta I_{п.с}} = 91,5 \sqrt{I_{п.с}' - I_{п.с}''} = 91,5 \sqrt{-677 + 1415} = 2480 \text{ м/сек.}$$

26. Определяем удельный вес продуктов сгорания на срезе сопла. По формуле (VI. 75)

$$\gamma_3 = \frac{p_3}{R_3 T_3} = \frac{0,9 \cdot 10^4}{34 \cdot 1654} = 0,16 \text{ кг/м}^3.$$

27. Определяем удельное проходное сечение среза сопла по формуле (VI. 77)

$$f'_3 = \frac{1}{\gamma_3 w_3} = \frac{1}{0,16 \cdot 2480} = 25,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{кг} = 25,2 \text{ см}^2/\text{кг}.$$

28. Определяем теоретическую удельную тягу. По формуле (VI. 78)

$$P_{\text{уд теор}} = \frac{w_3}{g} + f'_3 (p_3 - p_H) = \frac{2480}{9,81} + 25,2(0,9 - 1,0) = 250 \text{ кгсек/кг}.$$

29. Определяем удельную тягу. По формуле (VI. 93)

$$P_{\text{уд}} = P_{\text{уд теор}} \varphi_k \varphi_c = 250 \cdot 0,92 \cdot 0,95 = 217 \text{ кгсек/кг}.$$

30. Определяем расход топлива

$$G = \frac{P}{P_{\text{уд}}} = \frac{12000}{217} = 55,3 \text{ кг/сек};$$

$$G_r = \frac{G}{1 + \nu} = \frac{55,3}{5,37} = 10,3 \text{ кг/сек};$$

$$G_o = \frac{\nu}{1 + \nu} G = \frac{4,37}{5,37} 55,3 = 45,0 \text{ кг/сек}.$$

31. Определяем размер сопла на срезе. По формуле (VI. 96)

$$f_3 = \frac{f'_{3\text{теор}}}{\varphi_c} = \frac{f'_3 G}{\varphi_c} = \frac{25,2 \cdot 55,3}{0,95} = 1467 \text{ см}^2.$$

32. Находим показатель изэнтропы по формуле (VI. 81)

$$n_{\text{из}} = \frac{\lg \frac{p_3}{p_2}}{\lg \frac{p_3}{p_2} \frac{T_2}{T_3}} = \frac{\lg \frac{0,9}{30}}{\lg \frac{0,9 \cdot 2970}{30 \cdot 1650}} = 1,20.$$

33. Воспользовавшись графиком фиг. 45 или формулой (III. 65), по значению $n = 1,2$ и отношению давления $\frac{p_o}{p_2} = 33,3$ находим необходимое отношение $\frac{f_{\text{в}}}{f_{\text{кр}}}$; оно равно 4,96.

Откуда

$$f_{\text{кр}} = \frac{1467}{4,96} = 296 \text{ см}^2.$$

**Расчет состава продуктов сгорания топлива,
не содержащего азота**

Найти состав продуктов сгорания топлива следующего состава: горючее — 96% - ный этиловый спирт, окислитель — жидкий кислород при $\alpha = 1$; $C_T = 0,167$; $H_T = 0,043$; $O_T = 0,790$; давление 40 ата и температура 3400° абс.

1. Пересчитываем давление в физические атмосферы

$$p_2 = \frac{40}{1,033} = 38,72 \text{ ата.}$$

2. Принимаем значения необходимых констант при температуре 3400° абс. равными

$$K_1 = 1,250; K_2 = 0,157; K_3 = 0,366; K_5 = 0,245; K_6 = 0,156.$$

3. Определяем значения постоянных для всего расчета коэффициентов

$$A = \frac{3 O_T}{4 C_T} = \frac{3 \cdot 0,790}{4 \cdot 0,167} = 3,55; B = \frac{1 O_T}{16 H_T} = \frac{1 \cdot 0,790}{16 \cdot 0,043} = 1,15.$$

Первое приближение

4. Принимаем значение парциального давления кислорода первого приближения $p_{O_2} = a^2 = 2,50$; $a = 1,58$.

5. По формулам (VI. 41—VI. 44) вычисляем значения коэффициентов

$$b = \frac{K_1}{a} = \frac{1,25}{1,58} = 0,791; p_{CO} = 0,791 p_{CO_2};$$

$$c = \frac{K_2}{a} = \frac{0,157}{1,58} = 0,099; p_{H_2} = 0,099 p_{H_2O};$$

$$d = \frac{K_3}{\sqrt{c}} = \frac{0,366}{\sqrt{0,099}} = 1,160; p_{OH} = 1,160 \sqrt{p_{H_2O}}.$$

$$e = \sqrt{K_5} \sqrt{c} = \sqrt{0,245 \cdot 0,099} = 0,156; p_H = 0,156 \sqrt{p_{H_2O}};$$

$$f = \sqrt{K_6} a = \sqrt{0,156 \cdot 1,58} = 0,624; p_O = f = 0,624.$$

6. Находим первое квадратное уравнение. Для этого используем уравнение (VI. 45)

$$\frac{2a^2 + 2p_{CO_2} + bp_{CO_2} + p_{H_2O} + d\sqrt{p_{H_2O}} + f}{p_{CO_2} + bp_{CO_2}} = A.$$

После подстановки найденных значений парциальных давлений оно имеет вид

$$\frac{2 \cdot 2,50 + 2p_{CO_2} + 0,791 p_{CO_2} + p_{H_2O} + 1,160 \sqrt{p_{H_2O}} + 0,624}{p_{CO_2} + 0,791 p_{CO_2}} = 3,55.$$

После приведения подобных членов получим первое квадратное уравнение

$$-3,57 p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + 1,16 \sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}} + 5,624 = 0.$$

7. Находим второе квадратное уравнение.

В уравнение (VI. 47)

$$\frac{2a^2 + 2p_{\text{CO}_2} + bp_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + d\sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}} + f}{2cp_{\text{H}_2\text{O}} + 2p_{\text{H}_2\text{O}} + d\sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}} + e\sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}}} = B$$

подставляем найденные значения парциальных давлений

$$\frac{2 \cdot 2,50 + 2p_{\text{CO}_2} + 0,791 p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + 1,16 \sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}} + 0,624}{2 \cdot 0,099 p_{\text{H}_2\text{O}} + 2p_{\text{H}_2\text{O}} + 1,16 \sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}} + 0,156 \sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}}} = 1,15.$$

Приведа подобные члены, получим

$$2,79 p_{\text{CO}_2} - 1,53 p_{\text{H}_2\text{O}} - 0,358 \sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}} + 5,624 = 0.$$

8. Умножаем второе уравнение на отношение $\frac{3,57}{2,79}$ и складываем полученное уравнение с первым квадратным уравнением. Получаем

$$0,96 p_{\text{H}_2\text{O}} - 0,70 \sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}} - 12,83 = 0.$$

9. Решаем найденное уравнение относительно $\sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}}$

$$\sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{0,70 \pm \sqrt{0,70^2 + 4 \cdot 12,83 \cdot 0,96}}{2 \cdot 0,96} = 4,04.$$

Берем только положительное решение, так как при $\sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}} < 0$

$$p_{\text{OH}} = d \sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}} \text{ и } p_{\text{H}} = e \sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}}$$

будут отрицательными, что невозможно.

10. Находим парциальные давления водородосодержащих газов

$$p_{\text{H}_2\text{O}} = (\sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}})^2 = 4,04^2 = 16,30; \quad p_{\text{H}_2} = cp_{\text{H}_2\text{O}} = 0,099 \cdot 16,30 = 1,61;$$

$$p_{\text{OH}} = d \sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}} = 1,16 \cdot 4,04 = 4,68; \quad p_{\text{H}} = e \sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}} = 0,156 \cdot 4,04 = 0,63.$$

11. Находим парциальные давления углеродосодержащих газов; для этого в первое квадратное уравнение подставляем найденное значение парциального давления $p_{\text{H}_2\text{O}}$.

$$-3,57 p_{\text{CO}_2} + 16,30 + 4,68 + 5,624 = 0,$$

откуда

$$p_{\text{CO}_2} = 7,45 \text{ и } p_{\text{CO}} = 0,791 p_{\text{CO}_2} = 5,90.$$

12. Составляем таблицу состава продуктов сгорания (табл. 14).

Таблица 14

Газ	O ₂	O	H ₂ O	H ₂	OH	H	CO ₂	CO	Сумма
p_i	2,50	0,62	16,30	1,61	4,68	0,63	7,45	5,90	39,69
μ_i	32	16	18	2	17	1	44	28	—
$\mu_i p_i$	80	10	29,1	3,2	80	0,6	328,1	1,165	959

13. Проверяем правильность решения (отсутствие ошибок) по абсолютным балансовым уравнениям (VI. 27), (VI. 28), (VI. 29) и с учетом (VI. 33).

$$N_T = \frac{1}{\sum_i \mu_i p_i} (2p_{H_2} + 2p_{H_2O} + p_{OH} + p_H) =$$

$$= \frac{1}{959} (2 \cdot 1,61 + 2 \cdot 16,30 + 4,68 + 0,63) = 0,0428 \quad (0,043)$$

$$C_T = \frac{12}{\sum_i \mu_i p_i} (p_{CO_2} + p_{CO}) = \frac{12}{959} (7,45 + 5,90) = 0,167 \quad (0,167)$$

$$O_T = \frac{16}{\sum_i \mu_i p_i} (2p_{CO_2} + 2p_{CO} + p_{H_2O} + p_{CO} + p_{OH} + p_O) =$$

$$= \frac{16}{959} (2 \cdot 7,45 + 2 \cdot 2,50 + 16,30 + 5,90 + 4,68 + 0,63) = 0,789$$

(0,790)

В скобках указаны принятые в расчете значения

N_T , C_T и O_T .

В определении состава продуктов сгорания существенных ошибок нет.

14. Так как полученная при расчете величина $p_2 = 39,69$ больше, чем заданное в расчете давление $p_2 = 38,72$ ата, то проводим второй расчет, задавшись меньшим значением p_0 .

15. Выбираем $p_0 = a^2 = 2,45$ и в результате аналогичного расчета получаем следующую таблицу (табл. 15).

Таблица 15

p_{O_2}	p_O	p_{H_2O}	p_{H_2}	p_{OH}	p_H	p_{CO_2}	p_{CO}	p_2
2,45	0,61	15,60	1,56	4,57	0,63	7,14	5,71	38,21

Как видим, давление p_2 , полученное в результате расчета, меньше, чем заданное давление p_2 .

16. Производим пересчет состава на расчетное давление 38,7 физ. ата, считая, что в узком интервале давлений между 39,69

и 38,21 ата парциальные давления изменяются по линейному закону

$$p_{i\ 38,7} = p_{i\ 38,21} + \Delta p_i \frac{38,7 - 38,21}{39,69 - 38,21} = p_{i\ 38,21} + 0,333 \Delta p_i.$$

При этом производим округление до четвертого знака. Данные пересчета сведены в табл. 16.

Таблица 16

Газ	O ₂	O	H ₂ O	H ₂	ОН	H	CO ₂	CO	Σ
$p_{i\ 39,69}$	2,50	0,62	16,39	1,61	4,68	0,63	7,45	5,90	39,69
$p_{i\ 38,21}$	2,45	0,61	15,60	1,56	4,57	0,63	7,14	5,71	38,21
Δp_i	0,05	0,01	0,70	0,05	0,11	—	0,21	0,19	—
$0,333 \Delta p_i$	0,015	0,003	0,212	0,015	0,033	—	0,063	0,057	—
$p_{i\ 38,7}$	2,47	0,61	15,81	1,58	4,60	0,63	7,20	5,77	38,67

Таким образом, необходимый состав найден.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОВТОРЕНИЯ

1. На какие группы разбивается система уравнений для определения состава продуктов сгорания?
2. Как влияет давление на состав продуктов сгорания водорода и кислорода?
3. Как влияет температура на состав продуктов сгорания?
4. Напишите уравнение баланса азота и объясните, как оно получается?
5. Как определяется кажущийся молекулярный вес продуктов сгорания μ_2 ?
6. Как определяется общее число граммолей продуктов сгорания M_2 , приходящееся на 1 кг топлива?
7. Напишите уравнение сохранения энергии для сгорания топлива в камере при отсутствии потерь тепла.
8. Объясните порядок расчета температуры и состава продуктов сгорания в камере двигателя.
9. Расскажите, как вести расчет температуры на срезе сопла?
10. Как определяется теоретическая скорость истечения из сопла?
11. Как определяются теоретические размеры сопла?
12. Как производится тепловой расчет по IS -диаграмме?
13. Объясните влияние температуры на состав продуктов сгорания?
14. Как влияет давление в камере сгорания на удельную тягу ЖРД и на геометрические размеры сопла?
15. Как экспериментально определяется коэффициент камеры φ_k ?
16. Как учесть экспериментальные коэффициенты при расчете действительной удельной тяги и геометрических размеров сопла?

Глава VII

ОХЛАЖДЕНИЕ ЖИДКОСТНЫХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

§ 39. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ КУРСА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Передача тепла

Прежде чем перейти к рассмотрению особенностей охлаждения ЖРД, коротко напомним основные сведения из курса теплопередачи¹.

В процессе теплопередачи тепло всегда передается от более нагретого к менее нагретому телу, т. е. от тела с более высокой температурой к телу с менее высокой.

Тепловой поток, который мы будем обозначать Q , представляет собой общее количество тепла, передаваемого телом в единицу времени. Будем выражать его в *ккал/час* или *ккал/сек*.

Интенсивность теплообмена определяется величиной удельного теплового потока q , под которым понимается количество тепла, которое проходит в единицу времени через единицу поверхности тела. Размерность удельного теплового потока, таким образом, составляет *ккал/м²час* или *ккал/м²сек*.

Передача тепла от тела к телу и внутри данного тела происходит разными способами, в зависимости от строения тел, участвующих в теплообмене, физического состояния их и других причин.

В процессе теплообмена различают три основных вида передачи тепла: *теплопроводность*, *теплообмен путем конвекции* и *тепловое излучение*.

Передача тепла теплопроводностью происходит только при непосредственном соприкосновении между частицами тела. При этом в жидкостях и твердых телах (диэлектриках) перенос энергии осуществляется за счет распространения упругих волн, в газах — путем диффузии атомов или молекул, а в металлах — путем диффузии свободных электронов.

Теплообмен путем конвекции происходит лишь в жидкостях и газах. При этом перенос тепла осуществляется непосредственным перемещением частиц (объемов) газа.

Тепловое излучение — это процесс распространения энергии в виде электромагнитных волн. Тепловое излучение сопро-

¹ М. А. Михеев, Основы теплопередачи, Госэнергоиздат, 1949.

вождается превращением тепловой энергии в лучистую и обратно — лучистой в тепловую.

В технических устройствах и тепловых машинах тепло, как правило, передается одновременно двумя или тремя способами. При этом иногда бывает очень трудно определить, каким же именно способом передается большая часть тепла.

Теплообмен путем теплопроводности

С помощью одной лишь теплопроводности тепло передается только через твердые, непрозрачные тела.

В ЖРД теплообмен путем теплопроводности в чистом виде происходит при передаче тепла через сплошную (не пористую) стенку камеры сгорания к охлаждающей жидкости. Количество тепла, переданное путем теплопроводности, определяется следующим образом:

Пусть дана стенка толщиной δ м и площадью F м² (фиг. 75).

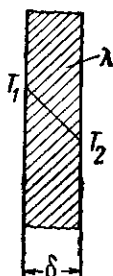
Температура нагретой поверхности T_1 °С, температура холодной поверхности T_2 °С. Тепловой поток, прошедший через стенку в единицу времени от горячей поверхности к холодной Q ккал/час, определяется по формуле

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} F (T_1 - T_2), \quad (\text{VII. 1})$$

откуда удельный тепловой поток

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{\lambda}{\delta} (T_1 - T_2),$$

Фиг. 75. К определению передачи тепла теплопроводностью.



где λ — коэффициент теплопроводности. Он характеризует собой способность данного тела проводить тепло.

Из формулы (VII. 1)

$$\lambda = \frac{Q\delta}{F(T_1 - T_2)} \text{ ккал. м/м}^2\text{ час}^\circ\text{С (или ккал/м час}^\circ\text{С)}. \quad (\text{VII. 2})$$

Иногда величина коэффициента теплопроводности λ выражается в ккал/мсек °С.

Коэффициент теплопроводности определяется количеством тепла, которое проходит в единицу времени через единицу поверхности при разности температур на единицу толщины стенки в один градус. Чем больше коэффициент теплопроводности, тем легче проходит тепло через стенку, тем меньшая разность температур возникает на стенке данной толщины.

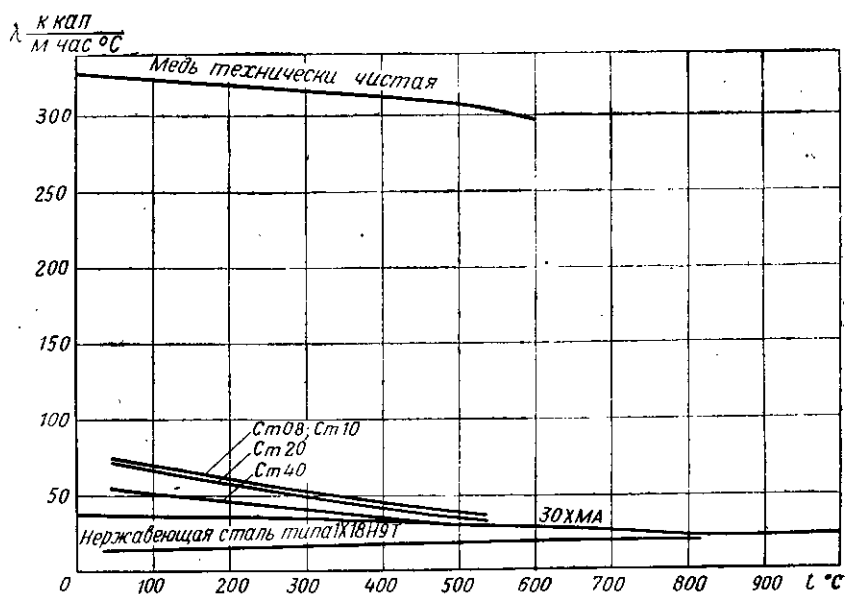
Величина коэффициента теплопроводности различна для различных веществ и тел и для каждого из них зависит от температуры, плотности, влажности, структуры.

Для газов коэффициент теплопроводности лежит в пределах от $\lambda = 0,005$ ккал/м час °С до $\lambda = 0,5$ ккал/м час °С. С повышением тем-

температуры λ растет. От давления этот коэффициент для газов практически не зависит.

Для капельных жидкостей коэффициент теплопроводности лежит в пределах $0,08 \div 0,60$ ккал/м час $^{\circ}$ С. Для большинства жидкостей (кроме воды и глицерина) с ростом температуры λ падает.

Для различного рода строительных и теплоизоляционных материалов (кирпич, дерево, кожа, шлаковая вата и т. д.) коэффициент теплопроводности лежит в пределах от $\lambda = 0,02$ до $\lambda = 2,5$ ккал/м час $^{\circ}$ С.



Фиг. 76. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для некоторых металлов.

Для металлов коэффициент теплопроводности лежит в пределах от $\lambda = 2$ до $\lambda = 360$ ккал/м час $^{\circ}$ С. С ростом температуры коэффициент теплопроводности для большинства металлов убывает. При наличии разного рода добавок в металлы коэффициент теплопроводности резко уменьшается. Поэтому сплавы обычно имеют низкий коэффициент теплопроводности.

На фиг. 76 дана зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для некоторых металлов.

Теплообмен путем конвекции

Теплообмен путем конвекции (конвективный теплообмен) имеет место при передаче тепла через жидкости и газы, а также при передаче тепла от жидкости или газа к стенке или наоборот, — от стенки к жидкости или газу. Теплообмен путем конвекции всегда сопровождается теплообменом путем теплопроводности.

При конвективном теплообмене перенос тепла неразрывно связан с переносом частиц движущейся жидкости или газа, поэтому конвективный теплообмен представляет собой очень сложный процесс, зависящий от большого числа различных факторов.

В ЖРД тепло путем конвекции передается от горячих продуктов сгорания, движущихся по камере и соплу, к стенкам и от них — к охлаждающей жидкости. Тепловой поток, передаваемый от газа к стенке путем конвекции, определяется по формуле

$$Q = \alpha \cdot F (T_1 - T_2), \quad (\text{VII. 3})$$

где F — площадь поверхности, через которую передается тепло, в м^2 ;

T_1 — температура газа в $^{\circ}\text{C}$;

T_2 — температура стенки в $^{\circ}\text{C}$;

α — коэффициент теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи определяется условиями теплообмена между жидкостью или газом и стенкой. Как видно из уравнения (VII. 3),

$$\alpha = \frac{Q}{F(T_1 - T_2)} \text{ ккал/м}^2 \text{ час } ^{\circ}\text{C}. \quad (\text{VII. 4})$$

Следовательно, коэффициент теплоотдачи определяется количеством тепла, переданного в единицу времени через единицу поверхности при разности температур между поверхностью и жидкостью или газом в один градус.

При конвективном теплообмене передача тепла от газа или жидкости к стенке или, наоборот, от стенки к жидкости или газу неразрывно связана с движением самих частиц жидкости или газа. Именно эти частички, приближаясь к стенке, отдают ей свою энергию в виде тепла или уносят от нее энергию в массу жидкости.

Поэтому ясно, что чем больше частичек передает свою энергию (определяемую величиной температуры T_1) стенке, тем больше величина коэффициента теплоотдачи α . Количество частичек, проходящих у стенки и могущих обмениваться с ней энергией, пропорционально скорости движения их и (для газов) количеству частичек в единице объема, т. е. плотности.

Таким образом, количество тепла, переданного стенке, пропорционально произведению плотности потока на его скорость, т. е. ρw . Это произведение носит название *массовой скорости*. Чем больше величина массовой скорости, тем выше теплоотдача. Так, например, в ЖРД при движении по соплу массовая скорость согласно уравнению неразрывности определяется выражением

$$\rho w = \frac{G}{gf}. \quad (\text{VII. 5})$$

Так как величины G и g постоянны по длине сопла, то, очевидно, массовая скорость имеет наибольшее значение в критическом сечении сопла, где f имеет наименьшее значение.

Опыты подтверждают, что действительно наибольшие конвективные тепловые потоки имеют место возле критического сечения сопла.

Массовая скорость, а следовательно, и коэффициент теплоотдачи от газа к стенке, зависит также и от давления. С возрастанием давления плотность ρ увеличивается и массовая скорость растет. Растет и теплоотдача от газа к стенке.

При движении несжимаемой жидкости $\rho = \text{const}$ и коэффициент теплоотдачи α зависит в основном от скорости ω . Такое положение имеет место в рубашке охлаждения ЖРД.

Кроме массовой скорости, на величину коэффициента теплоотдачи α оказывают влияние многие другие причины: теплопроводность, теплоемкость газа, форма канала и т. д.

Наибольшие трудности в расчете тепловых потоков при конвективном теплообмене заключаются в определении коэффициента теплоотдачи α . Теоретически коэффициент теплоотдачи определить очень трудно, а часто и невозможно. Поэтому обычно коэффициент теплоотдачи определяют по формулам, полученным на основании большого числа опытов, проведенных на подобных установках. Эти формулы дают соотношение между коэффициентом теплоотдачи, теплопроводностью, массовой скоростью течения газа и температурой его.

Формулы для подсчета коэффициента теплоотдачи

Приведем две формулы подсчета коэффициента теплоотдачи для случаев теплообмена, близких к условиям ЖРД.

Для подсчета коэффициента теплоотдачи от горячего газа к стенке при течении газа по гладкой цилиндрической трубе наиболее надежной в настоящее время следует считать полуэмпирическую формулу Гухмана—Илюхина, проверенную опытным путем для чисел $М < 1$.

Формула имеет вид

$$\frac{\alpha_r d}{\lambda_{г.ст}} = 0,0162 \left(\frac{\gamma \omega c_{p,г.ст} d}{\lambda_{г.ст}} \right)^{0,82} \left(\frac{T^*}{T_{г.ст}} \right)^{0,35}, \quad (\text{VII. 6})$$

где α_r — коэффициент теплоотдачи от газа к стенке в $\text{ккал/м}^2 \text{сек}^\circ\text{C}$;
 $c_{p,г.ст}$ и $\lambda_{г.ст}$ — теплоемкость в $\text{ккал/кг}^\circ\text{C}$ и коэффициент теплопроводности в $\text{ккал/мсек}^\circ\text{C}$ газа — продуктов сгорания при температуре газовой стенки;
 ω — скорость движения газов в м/сек ;
 d — внутренний диаметр трубы в м ;
 γ — удельный вес текущего газа в кг/м^3 ;
 $T_{г.ст}$ — температура стенки, которой газ передает тепло, — горячей стенки в $^\circ\text{абс.}$

¹ А. А. Гухман и Н. В. Илюхин, Основы учения о теплообмене при течении газа с большой скоростью, Машгиз, 1951.

T^* — температура торможения газового потока в °абс.
 При расчете теплопередачи в ЖРД считаем по всей длине камеры сгорания и сопла $T^* = T_2$.

Так как в дальнейшем мы будем пользоваться этим соотношением, приведем его к более простому виду.

Из формулы (VII. 6)

$$\alpha_r = 0,0162 \frac{\lambda_{г.ст}^{0,18}}{d^{0,18}} (\gamma \omega c_{p.ст})^{0,82} \left(\frac{T_2}{T_{г.ст}} \right)^{0,35} \quad (\text{VII. 7})$$

Умножим и разделим правую часть уравнения (VII. 7) на комплекс

$$(c_{p.ст} g \mu_{г.ст})^{0,18},$$

где $\mu_{г.ст}$ — динамическая вязкость горячих газов при температуре газовой стенки в $кгсек/м^2$.

Получим

$$\alpha_r = 0,0162 \frac{\lambda_{г.ст}^{0,18}}{(c_{p.ст} g \mu_{г.ст})^{0,18}} \frac{(c_{p.ст} g \mu_{г.ст})^{0,18}}{d^{0,18}} \times \\ \times (\gamma \omega c_{p.ст})^{0,82} \left(\frac{T_2}{T_{г.ст}} \right)^{0,35} \quad (\text{VII. 8})$$

Величина $\frac{\lambda_{г.ст}}{c_{p.ст} g \mu_{г.ст}}$ зависит только от состава газов и не зависит от температуры и давления. Для продуктов сгорания ЖРД, работающих на обычных топливах, она меняется в узких пределах и может быть принята равной 1,25, т. е.

$$\frac{\lambda_{г.ст}}{c_{p.ст} g \mu_{г.ст}} = 1,25. \quad (\text{VII. 9})$$

Из уравнения неразрывности

$$G = \gamma \omega F, \quad (\text{VII. 10})$$

где G — секундный расход газовой смеси в $кг/сек$;
 F — площадь поперечного сечения в $м^2$.

Из формулы (VII. 10)

$$\gamma \omega = \frac{G}{F} = \frac{4G}{\pi d^2}. \quad (\text{VII. 11})$$

Подставляя (VII. 9) и (VII. 11) в выражение (VII. 8), получим

$$\alpha_r = 0,0162 (1,25)^{0,18} \frac{(c_{p.ст} g \mu_{г.ст})^{0,18}}{d^{0,18}} \left(c_{p.ст} \frac{4G}{\pi d^2} \right)^{0,82} \left(\frac{T_2}{T_{г.ст}} \right)^{0,35}$$

или

$$\alpha_r = 0,0162 (1,25)^{0,18} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{0,82} c_{p.ст} (g \mu_{г.ст})^{0,18} \frac{G^{0,82}}{d^{1,82}} \left(\frac{T_2}{T_{г.ст}} \right)^{0,35}$$

откуда, подсчитав численную величину постоянного коэффициента, получим:

$$\alpha_r = 0,0206 c_{p \text{ г. ст}} (g^{\mu_{\text{г. ст}}})^{0,18} \frac{G^{0,82}}{d^{1,82}} \left(\frac{T_2}{T_{\text{г. ст}}} \right)^{0,35} \quad (\text{VII. 12})$$

Здесь α_r дано в $\text{ккал/м}^2 \text{сек} \text{ } ^\circ\text{C}$. Обычно коэффициент теплоотдачи используют в размерности $\text{ккал/м}^2 \text{час} \text{ } ^\circ\text{C}$; тогда формула (VII. 12) примет вид

$$\alpha_r = 74,3 c_{p \text{ г. ст}} (g^{\mu_{\text{г. ст}}})^{0,18} \frac{G^{0,82}}{d^{1,82}} \left(\frac{T_2}{T_{\text{г. ст}}} \right)^{0,35} \quad (\text{VII. 13})$$

Эту формулу используют при расчете теплообмена в ЖРД.

Для подсчета коэффициента теплоотдачи в случае принудительного течения несжимаемой жидкости по каналам различной формы дается следующее эмпирическое соотношение

$$\frac{\alpha_{\text{ж}} d_s}{\lambda_{\text{ж}}} = 0,023 \left(\frac{\gamma w d_s}{g^{\mu_{\text{ж}}}} \right)^{0,8} \left(\frac{g^{\mu_{\text{ж}}} c_{p \text{ ж}}}{\lambda_{\text{ж}}} \right)^{0,4} \quad (\text{VII. 14})$$

где $\alpha_{\text{ж}}$ — коэффициент теплоотдачи от стенки к жидкости в $\text{ккал/м}^2 \text{сек} \text{ } ^\circ\text{C}$;
 $\lambda_{\text{ж}}$ — в $\text{ккал/мсек} \text{ } ^\circ\text{C}$;
 $\mu_{\text{ж}}$ — в кгсек/м^2 ;
 $c_{p \text{ ж}}$ — в $\text{ккал/кг} \text{ } ^\circ\text{C}$;
 $\gamma_{\text{ж}}$ — в кг/м^3 —

соответственно: теплопроводность, вязкость, теплоемкость и удельный вес охлаждающей жидкости, взятые при средней температуре ее на данном участке;

d_s — эквивалентный диаметр поперечного сечения канала в м.
 Он подсчитывается из выражения

$$d_s = \frac{4f}{\Pi_r}$$

где f — площадь поперечного сечения канала в м^2 ;

Π_r — периметр сечения, через которое происходит теплообмен, в м.

Определение его для различных форм каналов, используемых в рубашках охлаждения ЖРД, будет дано ниже (см. § 42).

Приведем выражение (VII. 14) к более удобному для расчетов виду. Из (VII. 14)

$$\alpha_{\text{ж}} = 0,023 \lambda_{\text{ж}}^{0,6} \frac{c_{p \text{ ж}}^{0,4}}{(g^{\mu_{\text{ж}}})^{0,4}} \left(\frac{\gamma_{\text{ж}} w}{d_s^{0,2}} \right)^{0,8} \quad (\text{VII. 15})$$

По уравнению неразрывности:

$$F_{\text{ж}} \cdot \gamma_{\text{ж}} \cdot \omega = G_{\text{охл}},$$

где $G_{\text{охл}}$ — секундный расход охладителя через рубашку охлаждения в кг/сек;

$F_{\text{ж}}$ — площадь поперечного сечения охлаждающего тракта в м².

Отсюда

$$\gamma_{\text{ж}} \omega = \frac{G_{\text{охл}}}{F_{\text{ж}}}. \quad (\text{VII. 16})$$

Подставив выражение (VII. 16) в (VII. 15) и обозначив

$$\lambda_{\text{ж}}^{0,6} \frac{c_{\text{рж}}^{0,4}}{(g_{\text{ж}}^{0,4})} = Z,$$

получим

$$\alpha_{\text{ж}} = \frac{0,023}{d_{\text{э}}^{0,2}} Z \left(\frac{G_{\text{охл}}}{F_{\text{ж}}} \right)^{0,8}. \quad (\text{VII. 17})$$

В формуле (VII. 17) $\alpha_{\text{ж}}$ дано в ккал/м² сек °С. Мы везде используем $\alpha_{\text{ж}}$ в размерности ккал/м² час °С. Тогда формула (VII. 17) принимает вид

$$\alpha_{\text{ж}} = 82,5 Z \frac{1}{d_{\text{э}}^{0,2}} \left(\frac{G_{\text{охл}}}{F_{\text{ж}}} \right)^{0,8}. \quad (\text{VII. 18})$$

В таком виде эта формула и используется при расчете теплообмена в ЖРД.

Физические константы жидкостей, применяемых для охлаждения ЖРД, приведены на графиках фигур 97—100¹.

Величины Z для различных компонентов, используемых в качестве охлаждающих жидкостей, подсчитанные в размерности, соответствующей формуле (VII. 18), приведены на графиках фиг. 101.

Лучистый теплообмен

Носителем лучистой энергии являются электромагнитные колебания с длиной волны от долей микрона до многих километров. Они известны под названием рентгеновских, ультрафиолетовых, видимых (световых), инфракрасных лучей и электромагнитных волн.

Для нас особый интерес представляют лучи, способные переносить тепловую энергию. Такими свойствами обладают в наибольшей мере световые и инфракрасные лучи, т. е. лучи с длиной волны примерно от 0,4 мк до 40 мк (1 мк = 0,001 мм). Эти лучи мы и называем *тепловыми*, а процесс их распространения *тепловым*

¹ М. П. Малков и К. Ф. Павлов, Справочник по глубокому охлаждению, Гостехиздат, 1947.

Справочник химика, Госхимиздат, 1951.

Техническая энциклопедия, Справочник физических, химических и технологических величин, изд. «Советская энциклопедия», 1927.

излучением, или *лучеиспусканием*. Законы распространения, отражения и преломления, установленные для видимых лучей, справедливы и для тепловых.

Всякое тело, имеющее некоторую температуру, всегда излучает энергию. При попадании на другие тела эта энергия частью поглощается, частью отражается, частью проходит сквозь тело. Та часть лучистой энергии, которая поглощается телом, снова превращается в тепловую. Та часть энергии, которая отражается от него, попадает на другие (окружающие) тела и ими поглощается. То же самое происходит и с той частью энергии, которая проходит сквозь тело.

Таким образом, после ряда поглощений излучаемая энергия полностью распределяется между окружающими телами. Следовательно, каждое тело не только непрерывно излучает, но и непрерывно поглощает энергию. Поэтому количество отдаваемого или воспринимаемого телом тепла определяется разностью между количествами излучаемой и поглощаемой лучистой энергии.

В ЖРД лучистый теплообмен имеет место при теплоотдаче от нагретых продуктов сгорания в камере двигателя к стенкам его.

Тепловая энергия Q_L , излучаемая телом (лучистый тепловой поток), выражается в ккал/час. Количество энергии, излучаемое единицей поверхности в единицу времени, называется *излучательной, или лучеиспускательной способностью* тела и обозначается обычно буквой E . Таким образом,

$$E = \frac{Q_L}{F} \text{ ккал/м}^2 \text{ час.} \quad (\text{VII. 19})$$

Если из всего количества энергии Q_L , падающей на тело, часть Q_A поглощается, Q_R отражается и Q_D проходит сквозь тело (фиг. 77), то очевидно,

$$Q_L = Q_A + Q_R + Q_D. \quad (\text{VII. 20})$$

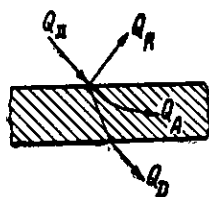
Деля обе части (VII. 20) на Q_L получим

$$\frac{Q_A}{Q_L} + \frac{Q_R}{Q_L} + \frac{Q_D}{Q_L} = 1$$

или

$$A + R + D = 1. \quad (\text{VII. 21})$$

Первый член уравнения (VII. 21) характеризует поглощательную способность тела A , второй — отражательную способность R и третий — пропускательную способность D . Эти величины показывают относительную долю энергии, отраженную, поглощенную или пропущенную телом, и изменяются лишь в пределах от 0 до 1. Если вся падающая лучистая энергия поглощается телом, то $A=1$. Такое тело называется *абсолютно черным телом*.



Фиг. 77. Распределение лучистой энергии.

Если вся падающая энергия полностью отражается, то $R=1$. Если при этом отражение правильное, т. е. следует законам геометрической оптики, то тело называется *зеркальным*, если отражение рассеянное — *абсолютно белым*.

Если вся падающая энергия полностью проходит сквозь тело, то $D=1$. Такое тело называется *абсолютно прозрачным телом*.

Абсолютно черных, белых и прозрачных тел в природе нет. Твердые тела и жидкости для тепловых лучей практически непрозрачны (т. е. для них $D=0$). Поглощательная способность A и отражательная способность R зависят от природы тела, температуры и длины волны излучения, а также сильно зависят от качества поверхности тела.

Абсолютно черное тело испускает лучи всех длин волн от $\lambda=0$ до $\lambda=\infty$ при всех температурах, отличных от нуля.

При любой данной температуре интенсивность излучения абсолютно черного тела больше интенсивности излучения любого другого реального тела в тех же условиях.

Если тело излучает лучи всех длин волн от $\lambda=0$ до $\lambda=\infty$ при всех температурах, отличных от нуля, но интенсивность излучения этого тела для каждой длины волны пропорционально ниже, чем для абсолютно черного тела, то такое тело называют *серым телом*.

В теплотехнических расчетах обычно требуется рассчитать лучистый теплообмен между телами, у которых известны качество поверхности, размеры и температура.

По этим данным энергия излучения обоих тел всегда может быть определена на основании закона Стефана-Больцмана.

Закон Стефана-Больцмана формулируют обычно так: *энергия излучения абсолютно черного тела пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры*¹

$$E_0 = c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (\text{VII. 22})$$

где E_0 — лучеиспускательная способность абсолютно черного тела;

c_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;

$c_0 = 4,96$ в $\text{ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{абс}^4$.

В применении к серым телам закон Стефана-Больцмана имеет вид

$$E = c \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (\text{VII. 23})$$

где c — коэффициент лучеиспускания серого тела в $\text{ккал/м}^2 \text{ час } ^\circ\text{абс}^4$;

E — лучеиспускательная способность серого тела.

Отношение лучеиспускательной способности серого тела к лучеиспускательной способности абсолютно черного тела при той же

¹ Здесь и в дальнейшем в обзорной части основ теплопередачи вывод формул не приводится. Подробно см. М. А. Михеев, Основы теплопередачи, Госэнергоиздат, 1949.

температуре называется *относительной излучательной способностью, или степенью черноты* ϵ .

$$\epsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{c \left(\frac{T}{100}\right)^4}{c_0 \left(\frac{T}{100}\right)^4} = \frac{c}{c_0}. \quad (\text{VII. 24})$$

Очевидно, что значение ϵ лежит в пределах от 0 до 1.

Так как количество тепла, отдаваемого телом, есть разность между количествами излучаемой и поглощаемой телом лучистой энергии, расчетная формула для лучистого теплообмена между двумя параллельными плоскостями имеет вид

$$q_{1-2} = c_n \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right], \quad (\text{VII. 25})$$

где q_{1-2} — количество тепла, переданное от стенки 1 к стенке 2, в ккал/м²час;

T_1 — температура стенки 1 в °абс;

T_2 — температура стенки 2 в °абс;

$$c_n = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \frac{1}{c_0}}. \quad (\text{VII. 26})$$

приведенный коэффициент лучеиспускания системы тел в ккал/м²час°абс.⁴. Здесь c_1 , c_2 и c_0 — коэффициенты лучеиспускания тела 1, тела 2 и абсолютно черного тела.

Лучистый теплообмен в газах

Газы также обладают способностью испускать и поглощать энергию, но для различных газов эта способность различна. Значительной излучательной и поглощательной способностью обладают многоатомные газы и, в частности, углекислота CO₂, водяной пар H₂O, сернистый ангидрид SO₂.

Излучение и поглощение газов имеет следующие отличия от излучения и поглощения твердых тел: твердые тела излучают и поглощают лучистую энергию всех длин волн от $\lambda=0$ до $\lambda=\infty$, а газы поглощают и испускают энергию только в определенных интервалах длин волн, различных для различных газов. Такое излучение и поглощение называется *избирательным, или селективным*.

Твердые тела в большинстве своем непрозрачны для тепловых лучей, и можно считать, что излучение и поглощение у них происходит в поверхностном слое.

В газах же излучение и поглощение энергии происходит в объеме. При прохождении лучей через газ энергия луча вследствие частичного поглощения теряется. Величина потери энергии определяется количеством встречаемых на пути молекул, которое пропорционально длине пути луча l и парциальному давлению газа p . Поэтому поглощательная и излучательная способности газа

зависят в основном от произведения pl ; кроме того, они зависят еще от температуры.

Опытные данные показывают, что излучение и поглощение углекислоты пропорционально $T^{3.5}$, а излучение и поглощение водяного пара T^3 . Однако для удобства в основу практических расчетов лучеиспускания газов также положен закон Стефана-Больцмана. Излучение и поглощение газа, отнесенные к единице поверхности занимаемого им объема, принимаются пропорциональными четвертой степени абсолютной температуры газа.

Таким образом, количество тепла, излучаемое газом, определяется по формуле

$$q_r = \varepsilon_r c_0 \left(\frac{T_r}{100} \right)^4 \text{ ккал/м}^2 \text{ час,} \quad (\text{VII. 27})$$

где q_r — тепловой поток, приходящийся на единицу поверхности массы газа; ε_r — степень черноты газа.

Величина ε_r зависит для данной массы от состава газа и формы, которую имеет излучающая масса, т. е. от произведения pl , а также от температуры газа T_r .

Для продуктов сгорания обычных топлив основными излучающими составляющими газовой смеси являются углекислый газ и водяные пары.

Среднюю длину пути луча для различных форм объема, который занимает газ, можно определить по данным табл. 17.

Таблица 17

Средняя длина пути луча для газовых тел различной формы

Форма газового тела	Длина пути луча l
Сфера диаметром d	0,6 d
Цилиндр диаметром d , бесконечно длинный, излучение на боковую поверхность	0,9 d
Цилиндр высотой $h=d$, излучение на боковую поверхность	0,6 d

Количество тепла, отдаваемое газом стенке, не будет, однако, равно количеству тепла, излученного газом. Это происходит потому, что так же, как и в рассмотренном выше случае теплообмена между двумя поверхностями, часть тепла, излученного газом на стенку, отражается от нее в газ и там поглощается.

Лучистый тепловой поток q_l на стенку в связи с этим определяется по следующей формуле:

$$q_l = \varepsilon'_{ст} c_0 \left[\varepsilon_r \left(\frac{T_r}{100} \right)^4 - A_r \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right], \quad (\text{VII. 28})$$

где $\varepsilon'_{ст} \approx 0,5(\varepsilon_{ст} + 1)$ — эффективная степень черноты стенки, учитывающая наличие излучающего газа;

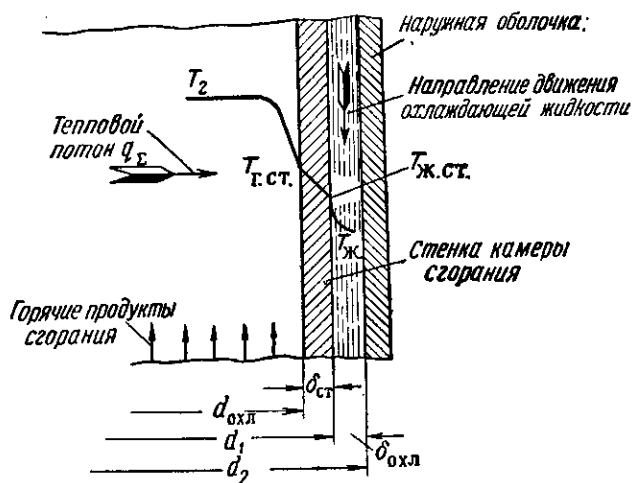
ε_r — степень черноты газа при температуре газа;

A_r — поглощательная способность газа при температуре стенки $T_{ст}$

Физическая картина процесса теплообмена в ЖРД

Физическая картина процесса теплообмена в ЖРД может быть представлена следующим образом (фиг. 78).

Тепло путем конвекции и лучеиспускания отдается от горячих продуктов сгорания стенке камеры сгорания. Таким образом, мож-



Фиг. 78. К объяснению процесса теплообмена в ЖРД.

T_2 —температура газов в камере сгорания; $T_{г.ст.}$ —температура «газовой стенки», т. е. температура стенки камеры двигателя со стороны горячих газов; $T_{ж.ст.}$ —температура «жидкостной стенки», т. е. температура стенки камеры двигателя со стороны охладителя; $T_{ж}$ —температура охлаждающей жидкости — охладителя.

но сказать, что общий тепловой поток от горячих газов в стенке q_{Σ} складывается из двух тепловых потоков: конвективного q_k и лучистого q_l , т. е.

$$q_{\Sigma} = q_k + q_l \quad (\text{VII. 29})$$

где

$$q_k = \alpha_r (T_2 - T_{г.ст.}) \quad (\text{VII. 30})$$

Далее путем теплопроводности тепло передается через стенку камеры. От стенки камеры тепло путем конвекции передается охлаждающей жидкости, проходящей по рубашке охлаждения. Если наружного охлаждения нет (что бывает при внутреннем охлаждении или при аккумуляции тепла), то тепло от стенки отдается в окружающую атмосферу.

В начальный момент работы двигателя, когда стенки камеры и сопла еще холодные, не весь тепловой поток будет проходить сквозь стенки и передаваться охлаждающей жидкости. Часть этого теплового потока пойдет на разогрев стенок камеры двигате-

ля. Такой режим охлаждения ЖРД, при котором температура стенки и тепловой поток в охлаждающую жидкость изменяются с течением времени, называют *нестационарным режимом охлаждения*.

С течением времени устанавливается равновесие, при котором охлаждающая жидкость снимает весь тепловой поток, поступающий от горячих продуктов сгорания в стенку камеры двигателя. С этого момента устанавливаются и остаются постоянными (на данном режиме работы двигателя) температуры газовой и жидкостной стенок камеры двигателя и тепловой поток через стенку. Такой режим называется *стационарным режимом охлаждения*.

Особенности теплообмена в ЖРД

Одной из основных задач при создании ЖРД является задача обеспечения надежного охлаждения камеры сгорания и сопла ЖРД. По сравнению с охлаждением других тепловых машин организация охлаждения камер сгорания ЖРД значительно усложняется особенностями процесса сгорания и течения газа в камере двигателя и условиями работы ЖРД как двигательной установки. Процесс сгорания в ЖРД протекает при высоких температурах и высоком давлении. Оба эти фактора способствуют увеличению тепловых потоков к стенкам камеры.

Нагретые газы движутся по камере сгорания и соплу с очень большой скоростью. Поэтому для ЖРД характерны большие массовые скорости потока. В силу этого резко возрастает коэффициент конвективной теплоотдачи от горячих продуктов сгорания к стенкам камеры двигателя α , и мы получаем конвективные тепловые потоки в стенки камеры, значительно превышающие тепловые потоки в обычных тепловых машинах.

Высокие температуры сгорания топлива в ЖРД определяют и вторую особенность организации охлаждения ЖРД — большие тепловые потоки от теплоотдачи путем лучеиспускания.

Как известно, лучеиспускательная способность газов пропорциональна степени 3—3,5, поэтому при температурах порядка 1700—3300°С, имеющих место в камере сгорания и сопле ЖРД, в них возникают большие тепловые потоки от лучеиспускания, которые для обычных топлив достигают 20—30% общего теплотока в стенки камеры сгорания. По мере снижения температуры газа в сопле относительная доля лучистого теплового потока снижается.

Суммарные тепловые потоки в стенки камеры сгорания и сопла достигают в критическом сечении весьма значительных величин (q_{\max} до $20 \cdot 10^6$ ккал/м²час). Организация съема таких мощных тепловых потоков представляет большие трудности.

Третья особенность организации охлаждения ЖРД вытекает из особенностей их применения. В подавляющем большинстве случаев ЖРД применяются в снарядах или на летательных аппаратах различного рода. Поэтому использовать для охлаждения двигателя специальную жидкость нерационально. Обычно ЖРД охлаждают компонентами топлива, пропуская их в камеру сгорания ЖРД через

рубашку охлаждения (так называемая регенеративная система охлаждения). Это создает новые трудности и вызывает дополнительные требования к топливным компонентам и к системе охлаждения, так как количество охлаждающих компонентов, проходящих через рубашку, ограничено.

Четвертая особенность организаций охлаждения ЖРД состоит в том, что наличие мощных тепловых потоков в стенки камеры сгорания и сопла приводит к тому, что температура материала стенок становится очень высокой. Это требует применения в ЖРД жаропрочных металлов с возможно более высоким коэффициентом теплопроводности.

Правильное решение задачи охлаждения ЖРД заключается в том, чтобы при заданных условиях работы двигателя (давлении в камере p_2 , расходе $G_{\text{охл}}$ и температуре продуктов сгорания T_2) удовлетворить следующим условиям:

1) температура газовой стенки камеры $T_{\text{г.ст}}$ должна иметь такую величину, которая обеспечивает необходимую прочность стенок. Уменьшение $T_{\text{г.ст}}$ увеличивает надежность работы двигателя;

2) температура жидкости $T_{\text{ж}}$ на выходе из рубашки охлаждения не должна превышать температуры кипения. Это условие будет выполнено тогда, когда общий тепловой поток через всю охлаждающую поверхность камеры $Q_{\text{общ}}$ будет меньше, чем теплоемкость охлаждающей жидкости

$$Q_{\text{общ}} \leq G_{\text{охл}} c (T_s - T_{\text{вх}}), \quad (\text{VII. 31})$$

где $G_{\text{охл}}$ — расход охлаждающей жидкости в кг/час;
 c — теплоемкость охлаждающей жидкости;

T_s — температура кипения охлаждающей жидкости при давлении в рубашке;

$T_{\text{вх}}$ — температура жидкости на входе в охлаждающую рубашку.

Рассмотрим, как условия охлаждения и работы двигателя влияют на температуру газовой стенки камеры ЖРД.

Зависимость $T_{\text{г.ст}}$ от скорости движения охлаждающей жидкости

Скорость движения охлаждающей жидкости влияет на величину коэффициента теплоотдачи от стенки к жидкости $\alpha_{\text{ж}}$, причем с увеличением этой скорости $\alpha_{\text{ж}}$ также увеличивается.

При одном и том же удельном тепловом потоке q_{Σ} и температуре жидкости $T_{\text{ж}}$ температура стенки со стороны жидкости $T_{\text{ж.ст}}$ определяется из выражения, полученного на основе формулы, аналогичной (VII. 30),

$$q_{\Sigma} = \alpha_{\text{ж}} (T_{\text{ж.ст}} - T_{\text{ж}}), \quad (\text{VII. 32})$$

которая после преобразования примет вид

$$T_{\text{ж.ст}} = T_{\text{ж}} + \frac{q_{\Sigma}}{\alpha_{\text{ж}}},$$

т. е. при увеличении $\alpha_{\text{ж}}$ температура $T_{\text{ж.ст}}$ уменьшается.

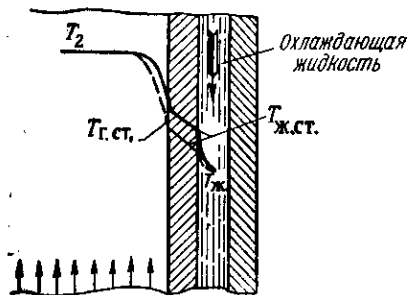
В свою очередь тепловой поток через стенку камеры передает-ся теплопроводностью и следует закону, выраженному форму-лой (VII. 1), который в нашем случае примет вид

$$q_{\Sigma} = \frac{\lambda}{\delta_{\text{ст}}} (T_{\text{г. ст}} - T_{\text{ж. ст}}), \quad (\text{VII. 33})$$

откуда

$$T_{\text{г. ст}} = q_{\Sigma} \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda} + T_{\text{ж. ст}} \quad (\text{VII. 34})$$

Таким образом, при одних и тех же металле, толщине стенки $\delta_{\text{ст}}$ и удельном тепловом потоке q_{Σ} температура газовой стенки $T_{\text{г. ст}}$ будет тем меньше, чем меньше температура стенки со стороны жидкости $T_{\text{ж. ст}}$.



----- Распределение температур при большем значении $\alpha_{\text{ж}}$, т.е. при большей скорости движения охлаждающей жидкости

Фиг. 79. Влияние скорости движения охлаждающей жидкости на $T_{\text{г. ст}}$.

Однако при понижении $T_{\text{ж. ст}}$ суммарный тепловой поток в стенку камеры двигателя несколько возрастет за счет уменьшения $T_{\text{г. ст}}$ [см. формулы (VII. 30)], что приведет снова к росту $T_{\text{г. ст}}$, $T_{\text{ж. ст}}$ и т. д.

В конце концов стационарный режим охлаждения при увеличении скорости охлаждающей жидкости устанавливается при меньших $T_{\text{г. ст}}$ и $T_{\text{ж. ст}}$, чем это имело место до увеличения скорости (фиг. 79). Таким образом, температура газовой стенки $T_{\text{г. ст}}$ сильно зависит от скорости движения охлаждающей жидкости: чем она больше, тем меньше $T_{\text{г. ст}}$. Следовательно, выдержать необходимую $T_{\text{г. ст}}$ можно, повышая скорость движения охлаждающей жидкости, например, путем уменьшения проходного сечения охлаждающего тракта.

Влияние поверхностного кипения охлаждающей жидкости на величину $T_{\text{г. ст}}$

В процессе теплоотдачи от стенки камеры сгорания к жидкости возможны два случая соотношения между $T_{\text{ж. ст}}$ и температурой кипения жидкости T_s при заданном давлении в рубашке

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{ж. ст}} &\leq T_s \\ T_{\text{ж. ст}} &> T_s \end{aligned} \right\} \quad (\text{VII. 35})$$

В первом случае закипание жидкости в рубашке невозможно. Во втором случае возможно закипание охлаждающей жидкости на поверхности жидкостной стенки камеры. Если при этом масса жидкости имеет температуру, меньшую чем T_s , то образу-

ниваясь на поверхности жидкостной стенки пузырьки пара будут смываться потоком жидкости и конденсироваться затем в более холодном ядре потока. Таким образом, эти пузырьки, действуя, как «шпалки» для жидкости, будут увеличивать теплоотдачу от стенки к жидкости, т. е. $\alpha_{ж}$ будет возрастать при той же скорости движения охлаждающей жидкости.

Увеличение $\alpha_{ж}$ за счет поверхностного кипения приведет к тем же конечным результатам, что и увеличение $\alpha_{ж}$ за счет увеличения скорости, т. е. к уменьшению $T_{г.ст}$ при некотором увеличении суммарного потока q_{Σ} .

Улучшение условий охлаждения стенки в этом случае не приводит к необходимости увеличивать давление охлаждающей жидкости, которое было бы необходимо для увеличения скорости движения ее. Однако интенсивное кипение на поверхности может привести к столь энергичному парообразованию, что пузырьки пара не будут успевать смываться потоком жидкости, а будут образовывать сплошную пленку пара на поверхности стенки. Так как пар плохо проводит и передает тепло, то в этом случае коэффициент теплоотдачи $\alpha_{ж}$ резко упадет, что приведет к обратному результату — увеличению $T_{г.ст}$ и, возможно, к прогару стенки.

Зависимость $T_{г.ст}$ от теплопроводности материала камеры двигателя λ

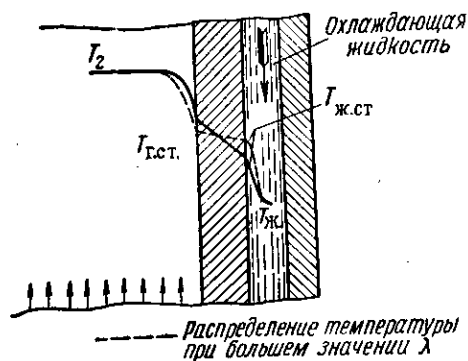
Согласно выражению (VII.1) тепловой поток через стенку камеры сгорания и сопла следует закону

$$q_{\Sigma} = \frac{\lambda}{\delta_{ст}} (T_{г.ст} - T_{ж.ст}), \quad (VII.36)$$

откуда

$$T_{г.ст} = \frac{\delta_{ст}}{\lambda} q_{\Sigma} + T_{ж.ст} \quad (VII.37)$$

Как видно из этого соотношения, при одних и тех же $T_{ж.ст}$, $\delta_{ст}$ и q_{Σ} температура газовой стенки $T_{г.ст}$ будет тем меньше, чем больше коэффициент теплопроводности металла λ . Однако и здесь с уменьшением $T_{г.ст}$ в соответствии с выражением (VII.30) возрастет сум-



Фиг. 80. Влияние коэффициента теплопроводности металла камеры λ на $T_{г.ст}$.

марный тепловой поток q_{Σ} , за счет чего $T_{г.ст}$ снова немного понижается. Но и в этом случае (так же, как и в случае снижения $T_{ж.ст}$ при увеличении $\alpha_{ж}$) стационарный режим охлаждения устанавливается уже при меньшей $T_{г.ст}$, чем это имело бы место для стенки с меньшей величиной λ ее материала.

Как следует из (VII. 36), падение температуры по толщине стенки двигателя с ростом λ будет более пологим. Так как q_{Σ} немного возрастет, то и подогрев жидкости увеличится, следовательно возрастет и $T_{ж.ст}$.

Таким образом, линия изменения температуры по толщине стенки при металле с большим λ пройдет, как показано на фиг. 80, пересекая прежнюю линию изменения температуры по толщине стенки (при меньшем λ). Следовательно, для изготовления камер ЖРД целесообразно использовать материалы с возможно большим коэффициентом теплопроводности λ . Однако надо иметь в виду, что, как правило, металлы, имеющие большой коэффициент теплопроводности, быстро теряют свою прочность с возрастанием температуры.

Зависимость $T_{г.ст}$ от толщины стенки камеры двигателя $\delta_{ст}$

Из выражения (VII. 37) видно, что при неизменных $T_{ж.ст}$ и q_{Σ} температура газовой стенки $T_{г.ст}$ будет тем меньше, чем меньше толщина стенки $\delta_{ст}$.

Хотя с уменьшением $T_{г.ст}$ тепловой поток q_{Σ} согласно выражению (VII. 30) немного возрастет, стационарный режим охлаждения установится при меньшей $T_{г.ст}$. Следовательно, камеры ЖРД желательно делать с возможно меньшей толщиной стенки $\delta_{ст}$.

Влияние давления в камере сгорания на величину $T_{г.ст}$ и q_{Σ}

С увеличением давления в камере по всей камере двигателя увеличивается плотность движущегося газа, а следовательно, и массовая скорость его. В связи с этим должна (см. § 39) увеличиваться величина коэффициента теплопередачи от газа к стенкам α_r . При этом возрастает также и величина конвективного потока q_k . По теоретическим и экспериментальным данным, q_k возрастает при увеличении давления в отношении $\left(\frac{p'}{p''}\right)^{0,8}$.

Увеличение давления в камере двигателя приведет также к возрастанию парциальных давлений p_{CO} и p_{H_2O} , излучения которых складывается лучистый тепловой поток в стенку q_{λ} .

Таким образом, увеличение давления приводит к возрастанию суммарного теплового потока в стенку камеры двигателя q_{Σ} . Увеличение q_{Σ} приводит в соответствии с формулой

$$T_{ж.ст} = T_{ж} + \frac{q_{\Sigma}}{\alpha_{ж}}$$

к увеличению температуры жидкостной стенки $T_{ж.ст}$; так же увеличивается $T_{г.ст}$, что видно из формулы

$$T_{г.ст} = T_{ж.ст} + \frac{q_{\Sigma}}{\lambda} \delta_{ст}$$

Правда, при этом тепловой поток q_{Σ} несколько уменьшится за счет увеличения $T_{г.ст}$, но новое стационарное состояние уста-

новится при большей $T_{г.ст}$ и большем суммарном тепловом потоке q_{Σ} , чем это имело бы место при меньшем давлении в камере двигателя.

Таким образом, увеличение давления в камере двигателя приводит к увеличению $T_{г.ст}$ и q_{Σ} , что затрудняет решение задачи охлаждения камеры двигателя.

Влияние температуры в камере сгорания на величину $T_{г.ст}$

С увеличением T_2 конвективный и лучистый тепловые потоки возрастают. Таким образом, увеличение температуры продуктов сгорания приводит к такому же результату, что и увеличение давления в камере, т. е. к возрастанию $T_{г.ст}$ и увеличению q_{Σ} .

Такая зависимость условий охлаждения двигателя от температуры продуктов сгорания приводит к большим трудностям в создании двигателей, работающих на топливах с большей теплотворной способностью H_u . Так, в настоящее время в литературе не известен еще ни один доведенный ЖРД, работающий на топливе керосин + кислород. Применение других, более теплопроизводительных топлив, потребует еще более интенсивного охлаждения камеры двигателя.

Рассмотрев влияние основных параметров на $T_{г.ст}$ камеры двигателя, можно сделать следующий вывод. Для уменьшения $T_{г.ст}$ при наружном охлаждении надо увеличивать скорость движения охлаждающей жидкости, что приводит к увеличению $\alpha_{ж}$. Камеру двигателя желательно изготовлять из возможно более теплопроводных металлов.

Если невозможно обеспечить допустимую величину $T_{г.ст}$ только наружным охлаждением, то тепловые потоки в стенки искусственно уменьшают путем создания в слое газа, прилегающем к стенке, пониженной температуры за счет обогащения этого пристеночного слоя одним из компонентов топлива. Такой способ охлаждения называется *внутренним охлаждением камеры двигателя*. С этой целью используется обычно горючее. Оно может быть подано в пристеночный слой или особыми форсунками, расположенными на головке двигателя, или через ряд отверстий в стенке двигателя (так называемые пояса охлаждения).

В последнем случае температура стенки снижается дополнительно за счет поглощения части теплового потока в связи с затратой тепла на нагрев и испарение жидкости.

Часто для сохранения $T_{г.ст}$ на допустимом уровне применяют одновременно внутреннее и наружное охлаждение. Такое охлаждение называется *смешанным охлаждением*.

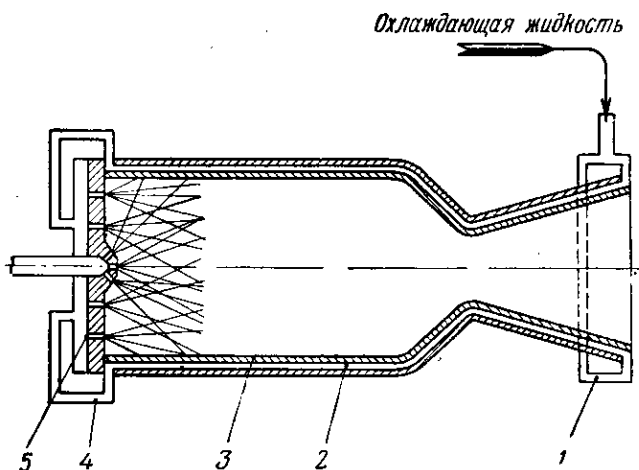
§ 41. РАСЧЕТ НАРУЖНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Схемы наружного охлаждения

Простейшая схема наружного охлаждения приведена на фиг. 81.

Охлаждающая жидкость поступает в коллектор I , а из него — в рубашку охлаждения (охлаждающий тракт). Проходя по рубаш-

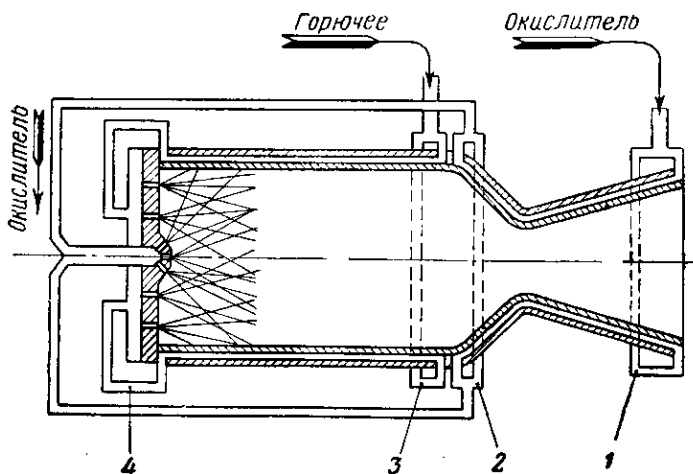
ке, жидкость охлаждает стенки 3 и при этом сама нагревается. Нагретая жидкость выходит из рубашки через коллектор 4. Как уже указывалось, при наружном охлаждении камера двигателя



Фиг. 81. Схема наружного охлаждения.

1—входной коллектор охлаждающей жидкости; 2—охлаждающий тракт; 3—стенки камеры двигателя; 4—выходной коллектор охлаждающей жидкости; 5—головка камеры двигателя.

охлаждается обычно самими компонентами. Охлаждающей жидкостью может служить и горючее, и окислитель.



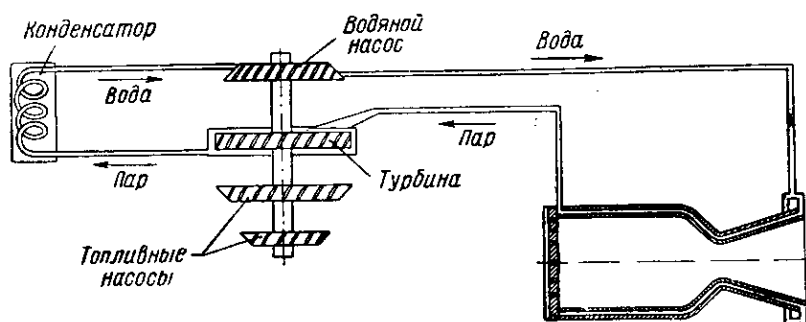
Фиг. 82. Схема наружного охлаждения камеры двигателя двумя компонентами.

1—входной коллектор окислителя; 2—выходной коллектор окислителя; 3—входной коллектор горючего; 4—выходной коллектор горючего.

Иногда при очень ограниченных количествах горючего и окислителя для охлаждения применяют оба компонента. Так как сме-

шения компонентов вне камеры допустить нельзя, то обычно один из них охлаждает сопло двигателя, а второй — камеру сгорания. Схема такого охлаждения приведена на фиг. 82.

Кроме того, было предложено охлаждать ЖРД большой тяги водой так, чтобы охлаждающая вода закипала в рубашке охлаждения и образовывала пар необходимого давления и температуры.



Фиг. 83. Схема охлаждения камеры двигателя водой с дальнейшим использованием образовавшегося пара для привода турбины.

Такой пар можно использовать в турбине для привода насосов, подающих компоненты в двигатель. Схема такого охлаждения показана на фиг. 83.

Порядок расчета наружного охлаждения камеры двигателя

Как известно, конструктивные расчеты разделяются на два вида: *проектные* и *проверочные*.

При *проектном* расчете мы на основании заданных условий работы ЖРД (T_2 , G_r , G_o , p_2 , материалы стенки) должны рассчитать форму и размеры охлаждающего тракта камеры, обеспечивающего надежное охлаждение стенок.

При *проверочном* расчете мы сперва выбираем конструкцию и определяем ее размеры, а затем расчетным путем проверяем, обеспечит ли принятая конструкция заданные условия работы.

В настоящее время при решении вопросов охлаждения ЖРД обычно идут вторым путем.

Принципиальная схема теплообмена, положенная в основу проверочного расчета, приведена на фиг. 78.

Исходя из этой схемы расчет наружного охлаждения производим в следующем порядке.

1. Используя имеющиеся данные расчетов охлаждения, задаемся температурой газовой стенки камеры сгорания и сопла $T_{г.ст.}$, определяем коэффициент конвективной теплоотдачи от горячих продуктов сгорания к стенке $\alpha_г$ и находим конвективные удельные тепловые потоки q_k .

2. Определяем лучистые удельные тепловые потоки $q_{л}$.
3. Определяем суммарные удельные тепловые потоки в стенки камеры двигателя q_{Σ} .
4. Проверяем наличие необходимого количества охлаждающей жидкости для сиятия удельных тепловых потоков q_{Σ} и определяем нагрев охладителя.
5. Зная суммарный удельный тепловой поток q_{Σ} и скорость течения охлаждающей жидкости по охлаждающему тракту, определяем коэффициент теплоотдачи от жидкостной стенки к охлаждающей жидкости $\alpha_{ж}$ и находим получающуюся при этих условиях температуру жидкостной стенки $T_{ж.ст}$.
6. Зная коэффициент теплопроводности металла, определяем $T_{г.ст}$ и проверяем, соответствует ли она при данных тепловых потоках q_{Σ} и полученной $T_{ж.ст}$ температуре газовой стенки $T_{г.ст}$ заданной нами в п. 1.
7. Если полученная в результате расчета $T_{г.ст}$ отличается от заданной более чем на 5%, то расчет производим сначала, задаваясь новыми значениями $T_{г.ст}$, промежуточными между первоначально заданными и полученными.

Определение конвективных удельных тепловых потоков в стенку камеры двигателя

Величина конвективного удельного теплового потока определяется из уравнения (VII. 30)

$$q_k = \alpha_r (T_2 - T_{г.ст}),$$

где α_r — коэффициент теплоотдачи от газа к стенке в $\text{ккал}/\text{м}^2\text{час } ^\circ\text{C}$;
 T_2 — температура заторможенного газового потока, в $^\circ\text{абс.}$; она постоянна по длине камеры;
 $T_{г.ст}$ — температура газовой стенки в $^\circ\text{абс.}$

Температура газа T_2 нам известна из теплового расчета процесса сгорания в камере двигателя (см. гл. VI)

Коэффициент теплоотдачи от газа к стенке α_r будем определять по формуле (VII. 13)

$$\alpha_r = 74,3 c_{p,г.ст} (g_{г.ст})^{0,18} \frac{G^{0,82}}{d^{1,82}} \left(\frac{T_2}{T_{г.ст}} \right)^{0,35}$$

Следует оговорить, что применение этой формулы к расчету теплообмена в ЖРД не вполне правомерно, так как она проверена для дозвуковых скоростей и предполагает течение газа по цилиндрической трубе. В сопловой же части камеры двигателя мы имеем скорость выше звуковой и коническую форму канала. Для того чтобы использовать эту формулу при расчете охлаждения ЖРД, надо разбить камеру двигателя на ряд цилиндрических участков, диаметр

которых равен среднему диаметру соответствующей конической части этого участка.

Пользуясь формулой (VII.13), расчет конвективных удельных тепловых потоков от газа к стенке q_k проводим по следующим этапам.

1. Задаемся температурой газовой стенки камеры сгорания. При этом температуру стальной стенки в критической части сопла можно принимать равной $700\text{--}800^\circ\text{C}$; для медной $300\text{--}350^\circ\text{C}$. Температуру стенки на выходе из сопла считаем равной $350\text{--}500^\circ\text{C}$ для стальной стенки и $150\text{--}200^\circ\text{C}$ для медной. Температура стенки на входе в сопло на $50\text{--}100^\circ$ выше температуры стенки на выходе из сопла. Температуру газовой стенки для цилиндрической части камеры считают постоянной и равной температуре газовой стенки на входе в сопловую часть.

Распределение температуры по длине камеры двигателя в первом приближении принимаем прямолинейным (фиг. 84).

2. Подсчитываем теплоемкость $c_{p,г,ст}$ и вязкость $\mu_{г,ст}$ продуктов сгорания при температуре газовой стенки на входе в сопловую часть и считаем их постоянными по всей длине двигателя.

Вообще говоря, $c_{p,г,ст}$ и $\mu_{г,ст}$ зависят от температуры продуктов сгорания у газовой стенки, т. е. от $T_{г,ст}$, но так как расчет приближенный, то можно допустить, что $c_{p,г,ст}$ и $\mu_{г,ст}$ по длине камеры двигателя постоянны. Обычно значения $c_{p,г,ст}$ и $\mu_{г,ст}$ берут при температуре газовой стенки на входе в сопло.

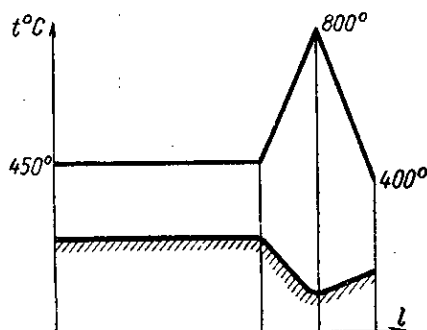
При подсчете $c_{p,г,ст}$ и $\mu_{г,ст}$ теплоемкостью и вязкостью тех компонентов продуктов сгорания, содержание которых в газовой смеси очень мало, пренебрегаем. Такими компонентами являются обычно O, OH, H, NO. $c_{p,г,ст}$ подсчитываем по известной из термодинамики формуле для теплоемкости газовой смеси

$$c_{p,г,ст} = \sum g_i c_{p_i,г,ст} \quad (\text{VII. 38})$$

где $c_{p_i,г,ст}$ — теплоемкость данного компонента газовой смеси продуктов сгорания в $\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$. Значения c_{p_i} для различных газов приведены в табл. 18¹;
 g_i — весовая доля компонента смеси газов

$$g_i = \frac{r_i m_i}{\sum r_i m_i} \quad (\text{VII. 39})$$

¹ М. П. Вукалович и др., Термодинамические свойства газов, Машгиз, 1953.



Фиг. 84. Примерное распределение $T_{г,ст}$ для стальной камеры.

Теплоемкости газов c_p в ккал/кг °С

Таблица 18

Наименование газа	Химическая формула	Температура в °С												
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Кислород	O ₂	0,218	0,223	0,230	0,2376	0,2445	0,2504	0,2553	0,2593	0,2627	0,2656	0,2682	0,2703	0,2723
Азот	N ₂	0,248	0,2489	0,2512	0,2554	0,2607	0,2664	0,2721	0,2774	0,2822	0,2864	0,2902	0,2935	0,2964
Водород	H ₂	3,390	3,4509	3,4643	3,4712	3,4826	3,5020	3,5298	3,5660	3,6101	3,6572	3,7063	3,7584	3,8095
Оксид углерода	CO	0,248	0,2495	0,2528	0,2580	0,2641	0,2704	0,2763	0,2816	0,2863	0,2904	0,2939	0,2970	0,2996
Оксид азота	NO	0,238	0,2381	0,2414	0,2472	0,2534	0,2594	0,2648	0,2695	0,2736	0,2770	0,2799	0,2824	0,2845
Двуокись углерода	CO ₂	0,194	0,2182	0,2371	0,2524	0,2652	0,2758	0,2847	0,2921	0,2984	0,3037	0,3081	0,3119	0,3152
Водяной пар	H ₂ O	0,444	0,4515	0,4635	0,4778	0,4931	0,5092	0,5258	0,5429	0,5601	0,5769	0,5929	0,6080	0,6220

Здесь r_i и m_i —объемная доля и молекулярный вес i -того компонента газовой смеси;

$$r_i = \frac{p_i}{p_2}, \quad (\text{VII. 40})$$

где p_i —парциальное давление компонента газовой смеси. Оно известно из теплового расчета;
 p_2 —давление в камере сгорания.

Подставив (VII. 40) в (VII. 39), получим

$$g_i = \frac{\frac{p_i}{p_2} m_i}{\sum \frac{p_i}{p_2} m_i} = \frac{p_i m_i}{\sum p_i m_i}. \quad (\text{VII. 41})$$

Коэффициент динамической вязкости $\mu_{i, \text{ст}}$ подсчитываем по известной формуле для смеси газов

$$\frac{1}{\mu_{r, \text{ст}}} = \sum \frac{g_i}{\mu_{i, \text{ст}}}, \quad (\text{VII. 42})$$

где $\mu_{i, \text{ст}}$ —коэффициент динамической вязкости i -того компонента при заданной $T_{r, \text{ст}}$.

Для наших расчетов формулу (VII. 42) удобнее преобразовать, поделив обе части уравнения на величину ускорения земного притяжения g . Тогда она примет вид

$$\frac{1}{g \mu_{r, \text{ст}}} = \sum \frac{g_i}{g \mu_{i, \text{ст}}}. \quad (\text{VII. 42}')$$

(Здесь не следует смешивать g_i —весовую долю с g —ускорением земного притяжения)

Значения $g \mu_{i, \text{ст}}$ в зависимости от температуры для различных газов приведены в табл. 19. Во всех применяемых нами формулах для расчета охлаждения входит произведение $g \mu$, имеющее размерность

$$\frac{\text{м кг сек}}{\text{сек}^2 \text{ м}^2} = \frac{\text{кг}}{\text{м сек}}.$$

Часто в справочниках под величиной вязкости подразумевают произведение $g \cdot \mu$ и называют эту величину *динамической вязкостью*.

Значения $g \cdot \mu$ в кг/м сек для некоторых жидкостей даны на фиг. 97—100.

В табл. 19 и на графиках фиг. 97—100 приведены именно произведения $g \cdot \mu$. При пользовании другими справочными материа-

Значения коэффициента динамической вязкости ($g \cdot 10^6$ в $кг/м \cdot сек$ в зависимости от температуры)

Наименование газа	Химическая формула	Температура °C												
		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Кислород	O ₂	1,943	2,460	2,910	3,312	3,677	4,014	4,327	4,622	4,900	5,164	5,416	5,657	5,889
Азот	N ₂	1,667	2,101	2,478	2,815	3,121	3,402	3,664	3,911	4,143	4,364	4,575	4,777	4,97
Водород	H ₂	0,850	1,052	1,226	1,381	1,521	1,651	1,771	1,884	1,991	2,093	2,190	2,283	2,373
Окись углерода	CO	1,656	2,087	2,462	2,797	3,100	3,380	3,640	3,885	4,116	4,336	4,545	4,746	4,939
Окись азота	NO	1,352	1,825	2,257	2,653	3,020	3,362	3,683	3,986	4,272	5,546	4,807	5,057	5,298
Двуокись углерода	CO ₂	1,384	1,846	2,262	2,642	2,991	3,316	3,620	3,906	4,177	4,435	4,681	4,917	5,143
Водяной пар	H ₂ O	0,818	1,208	1,605	2,000	2,390	2,772	3,145	3,510	3,864	4,21	4,447	4,874	5,194

лами надо обращать внимание на размерность, в которой приведена вязкость, и при подстановке в формулы переводить эту вязкость в соответствующую размерность.

3. Разбиваем камеру двигателя по длине на 10—20 участков (в зависимости от желаемой точности расчета), для каждого участка подсчитываем по формуле (VII. 13) величину α_r , как для цилиндрической трубы, принимая диаметр ее d и заданную температуру газовой стенки $T_{г.ст}$ средними для данного участка.

4. Зная α_r , определяем для каждого участка конвективный удельный тепловой поток q_k по формуле

$$q_k = \alpha_r (T_2 - T_{г.ст}). \quad (\text{VII. 43})$$

Определение лучистых удельных тепловых потоков и суммарного теплового потока в стенки камеры двигателя

В камере двигателя тепловые потоки идут от горячих продуктов сгорания в стенки камеры. Как уже указывалось (см. § 39), основную долю теплового излучения дают CO_2 и H_2O .

Экспериментальное определение лучистых тепловых потоков в камерах ЖРД чрезвычайно затруднено. Поэтому они подсчитываются по эмпирическим формулам, применяемым при расчете лучистого теплообмена, в других устройствах и машинах¹

$$q_{\text{CO}_2} = 3,5 \sqrt[3]{p_{\text{CO}_2} l} \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^{3,5} - \left(\frac{T_{г.ст}}{100} \right)^{3,5} \right] \text{ ккал/м}^2 \text{ час}; \quad (\text{VII. 44})$$

$$q_{\text{H}_2\text{O}} = 3,5 p_{\text{H}_2\text{O}}^{0,8} l^{0,6} \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^3 - \left(\frac{T_{г.ст}}{100} \right)^3 \right] \text{ ккал/м}^2 \text{ час}, \quad (\text{VII. 45})$$

где p_{CO_2} и $p_{\text{H}_2\text{O}}$ — парциальные давления газов в кг/см^2 ;
 l — приведенная средняя длина пути луча (определяется по табл. 17).

Общий лучистый тепловой поток q_l считаем равным сумме этих потоков

$$q_l = q_{\text{CO}_2} + q_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (\text{VII. 46})$$

В ЖРД лучистые тепловые потоки по длине камеры двигателя будут не одинаковы, так как температуры горячих продуктов сгорания в самой камере сгорания и в сопле различны.

Поэтому сначала определяем лучистые тепловые потоки для трех сечений.

1. Сечение камеры на входе в сужающуюся часть.
2. Критическое сечение сопла.
3. Сечение на срезе сопла.

¹ А. В. Болгарский и В. К. Шукин, Рабочие процессы в жидкостно-реактивных двигателях, Оборонгиз, 1953.

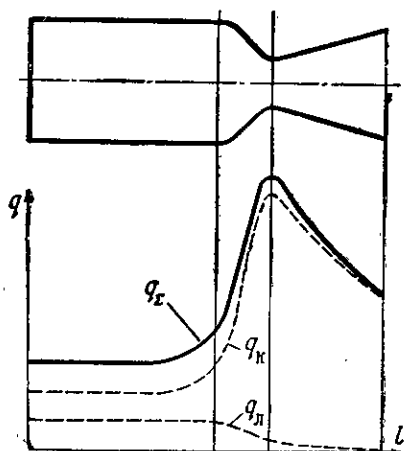
В каждом сечении q_l условно вычисляется для бесконечно длинного цилиндра с диаметром, равным соответственно диаметру камеры сгорания, диаметру узкого сечения сопла и диаметру выходного сечения сопла. По всей камере q_l принимаем одинаковым и равным q_l на выходе из камеры.

Для промежуточных участков сопла q_l находим, соединяя по кривой значения q_l в заданных трех сечениях.

Определив q_l и зная конвективный тепловой поток q_k , подсчитываем суммарный удельный тепловой поток в стенке камеры сгорания ЖРД q_Σ для каждого участка по выражению

$$q_\Sigma = q_l + q_k. \quad (\text{VII. 47})$$

Характер распределения тепловых потоков по длине камеры двигателя показан на фиг. 85.



Фиг. 85. Характер распределения тепловых потоков по длине камеры двигателя.

Проверка наличия необходимого количества охлаждающей жидкости и определение ее подогрева на каждом участке

Зная величину тепловых потоков в стенку камеры сгорания, мы знаем, следовательно, какое количество тепла должна воспринять охлаждающая жидкость.

Наибольшее количество тепла, которое может воспринять охлаждающая жидкость, определяется ее нагревом ее до температуры кипения T_s при данном давлении в охлаждающей рубашке.

Полное количество тепла, поступающее в стенку камеры, идет на нагревание охлаждающей жидкости, т. е. можно записать

$$\sum_{i=1}^{i=n} q_{\Sigma i} f_i = c G_{\text{охл}} (T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}), \quad (\text{VII. 48})$$

где c — теплоемкость охлаждающей жидкости в $\text{ккал/кг}^\circ\text{C}$, взятая при средней температуре

$$T_{\text{ср}} = \frac{T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}}{2};$$

$G_{\text{охл}}$ — расход охлаждающего компонента в кг/час ;

$q_{\Sigma i}$, f_i — суммарный тепловой поток в $\text{ккал/м}^2\text{час}$ и площадь поверхности в м^2 i -того участка камеры сгорания;

$T_{\text{вх}}$ и $T_{\text{вых}}$ — температуры входа и выхода охлаждающей жидкости.

По формуле (VII. 48) температура выхода охлаждающей жидкости из рубашки охлаждения определится в виде

$$T_{\text{вых}} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} q_{\Sigma i} f_i}{cG_{\text{охл}}} + T_{\text{вх}}. \quad (\text{VII. 49})$$

В большинстве случаев, как уже упоминалось, ЖРД охлаждается самими компонентами. Если температура выхода охлаждающей жидкости из рубашки $T_{\text{вых}}$ больше, чем температура кипения его при данном давлении, значит одного компонента для охлаждения камеры двигателя недостаточно и чтобы снять все поступающее тепло, используют для охлаждения двигателя оба компонента по схеме, приведенной на фиг. 82.

Если обоих компонентов для охлаждения недостаточно (что обычно имеет место на камерах малых тяг, где расходы компонентов невелики), то вводят внутреннее охлаждение (см. ниже).

Выбрав охлаждающую жидкость, можно подсчитать температуру ее на каждом участке. Температура охлаждающей жидкости на входе в охлаждающую рубашку известна (обычно ее считают равной 15°C). Подогрев жидкости на участке определяется из выражения

$$q_{\Sigma i} f_i = cG_{\text{охл}} (T_{\text{вых } i} - T_{\text{вх } i}), \quad (\text{VII. 50})$$

откуда температура выхода охлаждающей жидкости из участка (равная температуре входа на следующий участок, т. е. $T_{\text{вх } i+1} = T_{\text{вых } i}$) находится по уравнению

$$T_{\text{вых } i} = \frac{q_{\Sigma i} f_i}{cG} + T_{\text{вх } i}. \quad (\text{VII. 51})$$

Теплоемкость c ккал/кг $^{\circ}\text{C}$ надо брать для температуры равной $T_{\text{вх } i}$.

Определение коэффициента теплоотдачи от жидкостной стенки к охлаждающей жидкости $\alpha_{\text{ж. ст}}$ и температуры жидкостной стенки камеры двигателя $T_{\text{ж. ст}}$

Температура жидкостной стенки зависит не только от теплопроводности λ и толщины $\delta_{\text{ст}}$ стенки камеры двигателя, но также и от условий омывания этой стенки охлаждающей жидкостью.

Очевидно, чем интенсивнее охлаждающая жидкость будет омывать стенку камеры, тем лучше она будет снимать тепловые потоки, тем ниже будет температура жидкостной стенки. Понижение $T_{\text{ж. ст}}$, в свою очередь, повлечет за собой понижение температуры газовой стенки $T_{\text{г. ст}}$, а последнее приведет к изменению всего теплового потока в стенку.

Таким образом, мы имеем здесь очень сложную взаимозависимость между температурами стенок и тепловыми потоками.