

## ОПТИМАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ В ЖИДКОСТНО-РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

*И. П. Голдаев*

Качество жидкостно-ракетного двигателя как тепловой машины характеризуется удельной тягой. Чем выше удельная тяга, получаемая при данном горючем и окислителе, тем выше экономичность двигателя и тем лучше топливо.

Как известно, удельная тяга выражается равенством

$$P_{уд} = \frac{1}{g} W.$$

Скорость истечения газа из реактивного сопла определяется из уравнения

$$\omega = \sqrt{\varphi 2gT_z \left[ \frac{k_z}{k_z - 1} R_z - \frac{k_c}{k_c - 1} R_c \left( \frac{P_c}{P_z} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}$$

или в силу того, что  $R = \frac{848}{\mu_{пр. ст.}}$ ,

$$\omega = 29 \sqrt{\varphi T_z \left[ \frac{k_z}{k_z - 1} \frac{1}{\mu_{пр. ст. z}} - \frac{k_c}{k_c - 1} \frac{1}{\mu_{пр. ст. c}} \left( \frac{P_c}{P_z} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]},$$

где  $\varphi$  — коэффициент потерь в сопле,  
 $T_z$  и  $P_c$  — температура и давление газов в камере сгорания,  
 $\mu_{пр. ст. z}$  и  $\mu_{пр. ст. c}$  — средний молекулярный вес продуктов сгорания в камере и реактивном сопле,  
 $k_z$  и  $k_c$  — среднее значение показателя адиабаты в камере и реактивном сопле,  
 $P_c$  — давление газа на срезе сопла,  
 $n$  — среднее значение показателя политропы расширения газа в реактивном сопле.

Из этого равенства следует, что для получения высоких скоростей истечения из сопла, а следовательно, и больших удельных тяг, желательно, чтобы температура сгорания  $T_z$  и давление газов в камере  $P_z$  были по возможности большими, а молекулярный вес газа  $\mu_{пр. ст. z}$  и показатель адиабаты  $k_z$  — поменьше.

Воспользовавшись уравнением баланса энергии

$$(\Delta i)_{cr} = i_z - i_0,$$

откуда

$$T_z = \frac{1}{c_{pz}} [i_0 + (\Delta i)_{cr}]$$

или в силу того, что эффективно выделившееся тепло в процессе сгорания

$$(\Delta i)_{\text{ср}} = h_u \zeta_{\text{к.с.}} - \Delta q_{\text{дисс}},$$

получим выражение для определения температуры сгорания

$$T_z = \frac{1}{c_{pz}} (i_0 + h_u \zeta_{\text{к.с.}} - \Delta q_{\text{дисс}}),$$

где  $i_0$  — теплосодержание исходных продуктов горения,

$h_u$  — низшая теплотворность 1 кг топлива,

$\zeta_{\text{к.с.}}$  — коэффициент полноты сгорания,

$\Delta q_{\text{дисс}}$  — тепло, затраченное на диссоциацию продуктов сгорания,

$c_{pz}$  — удельная теплоемкость продуктов сгорания.

Для горючего, заданного химической формулой или смеси горючих, выраженной условной формулой  $C_m H_n O_k N_a$ , при окислении окислителем, приведенным к условной формуле  $O_x H_y N_z C_s$ , низшая теплотворность 1 кг топлива определяется равенством

$$h_u = \frac{H_u}{1 + \alpha L_0},$$

где  $\alpha$  — коэффициент избытка окислителя,

$L_0$  — теоретически необходимое количество окислителя в килограммах на килограмм горючего,

$H_u$  — низшая теплотворность 1 кг горючего при  $\alpha = 1$ , определяемая из выражения

$$H_u = 97650 \left( \frac{m}{\mu_r} + s L'_0 \right) + 28795 \left( \frac{n}{\mu_r} + y L'_0 \right) - \left[ \frac{1}{\mu_r} \sum_1^i g_{r1} \Delta H_{r1} + L'_0 \sum_1^i g_{0i} \Delta H_{0i} \right] \frac{\text{к кал}}{\text{кг горюч}}, \quad [4]$$

где  $L'_0$  — теоретически необходимое количество окислителя в кг/молях на килограмм горючего,

$\mu_r$  — молекулярный вес горючего,

$g_{r1}$  и  $g_{0i}$  — весовые доли горючего и окислителя в соответствующих смесях,

$\Delta H_{r1}$  и  $\Delta H_{0i}$  — молярная теплота образования соответствующего горючего и окислителя.

Из рассмотрения этих равенств следует, что температура сгорания  $T_z$  зависит от низшей теплотворности горючего  $H_u$ , коэффициента избытка окислителя  $\alpha$ , полноты сгорания  $\zeta_{\text{к.с.}}$ , тепла, затраченного на диссоциацию продуктов сгорания  $\Delta q_{\text{дисс}}$  и удельной теплоемкости продуктов сгорания  $c_{pz}$ .

Низшая теплотворность топливной смеси определяется химическим составом. Для получения высокой теплотворности желательно, чтобы теплота образования, главным образом окислителя, была по возможности меньше.

Полнота сгорания зависит от коэффициента избытка окислителя  $\alpha$  и ряда конструктивных и режимных параметров работы камеры сгорания (например, числа и расположения форсунок, длины камеры сгорания, наличия вихрей и т. п.). Однако даже при самых идеальных конструктивных условиях обеспечить быстрое и полное смешение частиц горючего с окислителем чрезвычайно трудно. Это приводит к тому, что из-за несовершен-

ства перемешивания в камере сгорания имеются зоны топливной смеси с различными соотношениями между горючим и окислителем, а именно: могут быть зоны с избытком и с недостатком окислителя. Несовершенство перемешивания может привести к тому, что часть горючего и окислителя не будет участвовать в процессе сгорания.

Обеспечение наибольшей полноты сгорания одного из компонентов топливной смеси, как это показывают отдельные исследования и работа реальных двигателей, возможно лишь при условии избытка одного из компонентов. Обычно имеется некоторый избыток горючего.

Максимальная скорость сгорания тоже имеет место при некотором избытке горючего.

Рассматривая реальный процесс сгорания топлива, мы знаем, что температура газов в камере зависит в значительной степени от диссоциации продуктов сгорания.

Температура газов, теплотворность, полнота сгорания и степень диссоциации продуктов сгорания взаимно связаны. Чем больше теплотворность и полнота сгорания топлива, тем выше температура газов в камере и тем выше степень диссоциации.

На первый взгляд кажется, что при идеальном смешении максимальное тепловыделение имеет место для стехиометрического соотношения горючего и окислителя, то есть для случая, когда нет балластного избытка одного из компонентов топливной смеси ( $\alpha = 1$ ). Однако практика исследования показывает иное. В некоторых случаях, когда применяются высококалорийные топлива, степень диссоциации продуктов сгорания бывает настолько значительна, что эффективная теплотворность топлива оказывается иногда ниже, чем для смеси с некоторым избытком горючего.

Степень диссоциации продуктов сгорания в значительной степени определяется и химическим составом исходных продуктов горения.

Как известно, основным средством борьбы с диссоциацией в ракетных двигателях является повышение давления в камере сгорания. Если повышать давление газов неограниченно, то можно достичь такого положения, когда явление диссоциации практически прекратится. Это объясняется тем, что при высоком давлении полностью подавляются реакции диссоциации, протекающие с увеличением числа молекул. Исключение составляют реакции образования окиси азота в смесях с избытком кислорода и реакции водяного газа в смесях с недостатком кислорода.

При исследовании оптимальных параметров процесса сгорания ряда топлив были сделаны следующие допущения:

- 1) смешение частиц горючего с окислителем считали идеальным,
- 2) давление по длине камеры сгорания принимали постоянным и поток газа заторможенным,
- 3) пренебрегали теплообменом с окружающей средой и гидравлическими потерями в сопле.

В большинстве случаев в современных жидкостно-ракетных двигателях процесс сгорания протекает при давлении 20–50 ат и температуре свыше 2000° абс. и, как правило, при коэффициенте избытка окислителя, меньшем единицы ( $\alpha < 1$ ). Поэтому при термодинамическом расчете процесса сгорания можно считать, что в состав диссоциированных продуктов сгорания входят основные продукты:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  и продукты диссоциации:  $\text{O}_2$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{O}$ ,  $\text{H}$  и  $\text{N}$ .

Определение парциальных давлений продуктов сгорания, а по ним — и температуры газов в камере, велось по аналитическим зависимостям между парциальными давлениями продуктов сгорания и константами химического равновесия, уравнениям стехиометрического баланса и равенству энергосодержания исходных продуктов горения и продуктов сгорания [1, 2, 3, 4, 5].

При исследовании были рассмотрены такие топлива:  
керосин и жидкий кислород,  
бензин и жидкий кислород [8],  
96-процентный этиловый спирт и жидкий кислород,  
керосин и 96-процентная азотная кислота,  
гидразин и жидкий кислород [8],  
96-процентный этиловый спирт и азотная кислота с примесью  
13% двуокиси азота ( $N_2O$ ) [8],

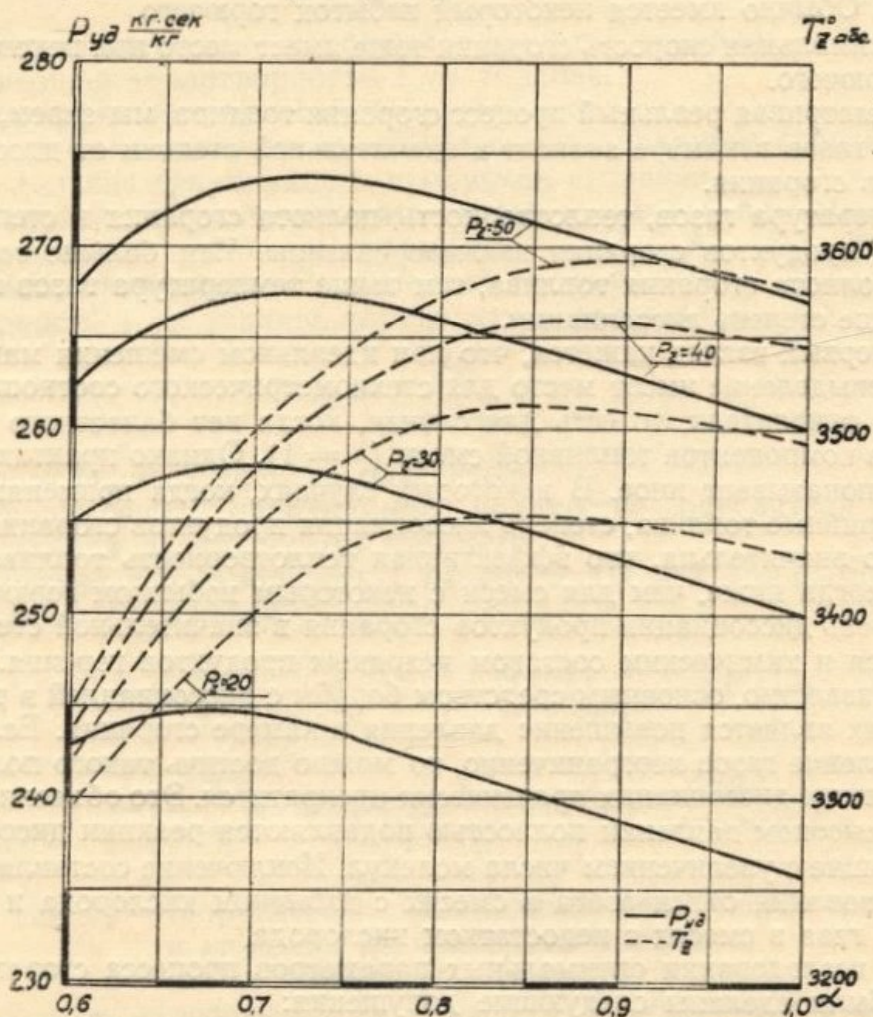


Рис. 1. Температура газов в камере сгорания  $T_z$  и удельная тяга  $P_{уд}$  при различных  $\alpha$  и давлениях сгорания  $P_z$  для топлива, состоящего из керосина и жидкого кислорода.

анилин и азотная кислота с примесью 15% двуокиси азота ( $NO_2$ ) [8],

этиловый спирт с примесью 25% воды и жидкий кислород [8],  
жидкий водород и жидкий кислород [8].

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Каждое топливо имеет свое максимальное значение температуры сгорания только при определенном оптимальном значении коэффициента избытка окислителя (рис. 1, 2, 3, 4).

В силу характера кривых одна и та же температура (в стороне от максимума), при прочих равных условиях (давление сгорания и т. п.), может быть получена при двух различных значениях коэффициента избытка окислителя.

С уменьшением коэффициента избытка окислителя по сравнению с оптимальным количеством выделяющегося тепла при сгорании топлива

уменьшается. Так как это тепло в значительной своей части затрачивается на испарение и подогрев топлива до начала процесса горения и повышения температуры продуктов сгорания до общей температуры газов в

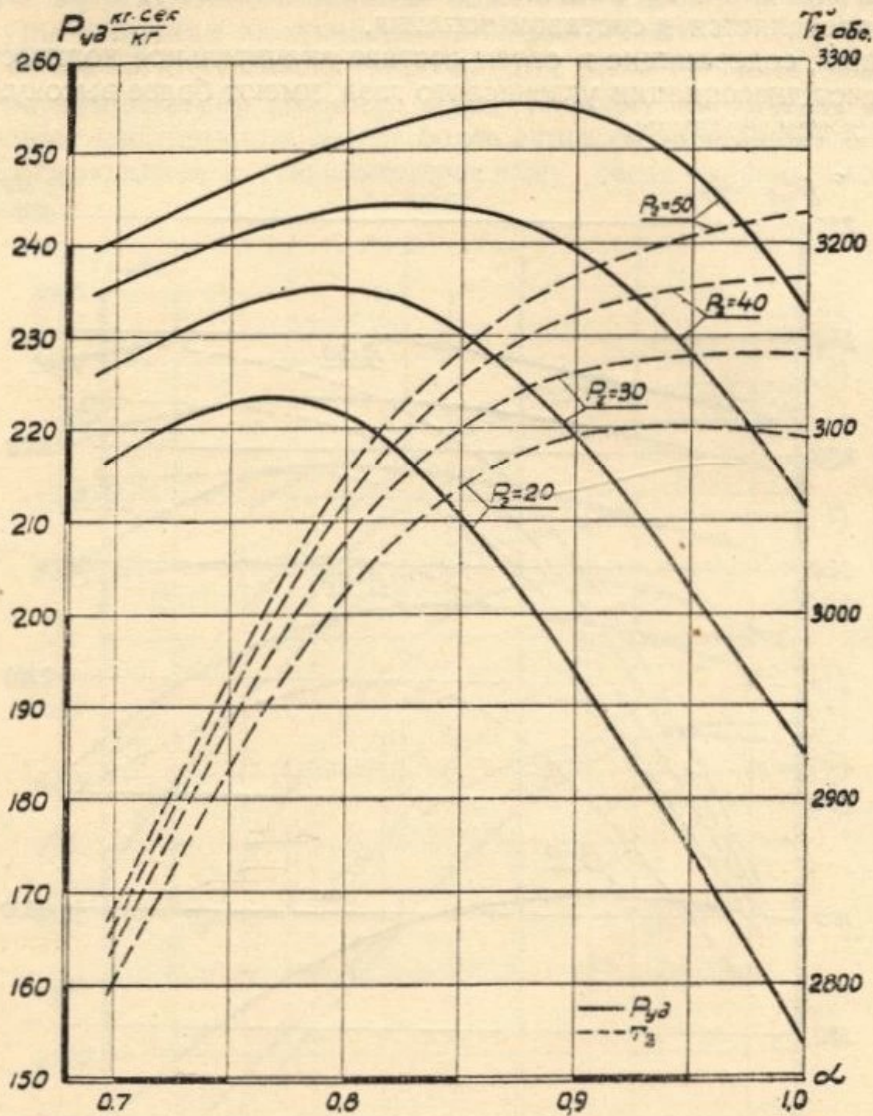


Рис. 2. Температура газов в камере сгорания  $T_z$  и удельная тяга  $P_{уд}$  при различных  $\alpha$  и давлениях сгорания  $P_z$  для топлива, состоящего из 96-процентного этилового спирта и жидкого кислорода.

камере, то это ведет к общему снижению температуры в камере сгорания. Увеличивающееся количество балластного горючего, забирающего на себя часть тепла, также способствует снижению температуры. При этом концентрация исходных продуктов горения и продуктов неполного сгорания повышается, а продуктов сгорания уменьшается. В силу этого химическое равновесие, зависящее при постоянном давлении от температуры и концентрации исходных продуктов горения и продуктов сгорания, устанавливается при меньшей степени диссоциации.

При увеличении коэффициента избытка окислителя выше оптимального несгоревшего горючего будет меньше, следовательно, тепла выделится больше. При этом, казалось бы, температура сгорания должна была бы увеличиться. Но так как концентрация продуктов сгорания возрастает, а исходных продуктов горения уменьшается, то химическое равновесие устанавливается при большей степени диссоциации. Поглощение

тепла при диссоциации приводит в конечном счете к тому, что температура газов снижается.

Поскольку степень диссоциации определяется и химическим составом продуктов сгорания, то величина снижения температуры за счет диссоциации определяется и составом топлива.

Топлива, содержащие в своем составе значительное количество углерода, за счет диссоциации углекислого газа, имеют более высокую степень понижения температуры.

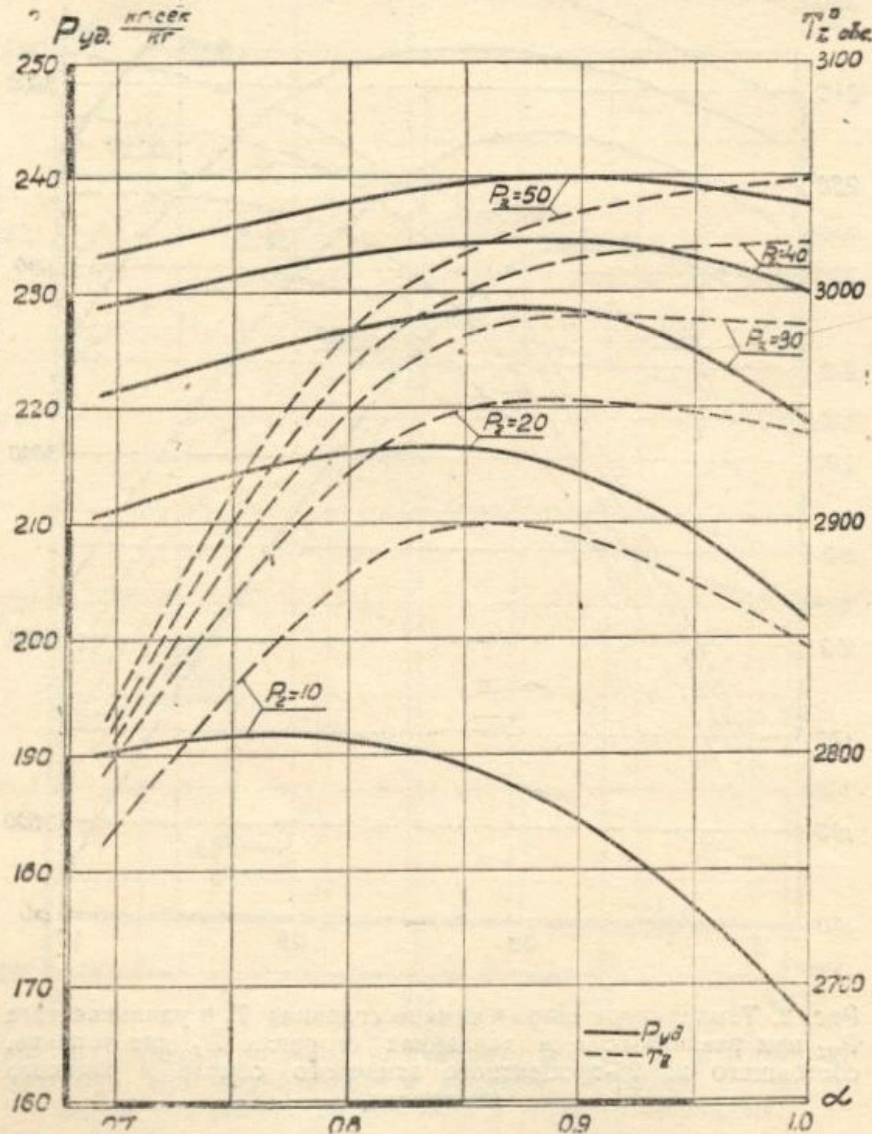


Рис. 3. Температура газов в камере сгорания  $T_z$  и удельная тяга  $P_{уд}$  при различных  $\alpha$  и давлениях сгорания  $P_z$  для топлива, состоящего из керосина и 96-процентной кислоты.

Высокая удельная теплоемкость, большее количество азотной кислоты, потребной для сгорания одного килограмма горючего, необходимость затраты тепла на разложение и наличие балластного азота в азотной кислоте ведут к тому, что топливо на базе последней имеют более низкую температуру сгорания.

Каждому давлению в камере сгорания соответствует оптимальный коэффициент избытка окислителя  $\alpha$ , при котором температура достигает максимума (рис. 1, 2, 3). Для одного и того же топлива с увеличением давления оптимальное значение  $\alpha$  стремится к единице. Это объясняется тем, что диссоциация продуктов сгорания, обычно увеличивающаяся с ростом  $\alpha$ , подавляется более высоким давлением.

Эффективность влияния повышения давления на рост температуры сгорания за счет подавления диссоциации в различных диапазонах давлений неодинакова и уменьшается с увеличением давления (рис. 5, 6, 7 и табл. 1). Эффективность влияния повышения давления на увеличение температуры сгорания неодинакова для различных  $\alpha$ .

При более богатых смесях диссоциация газов не столь велика, и ее влияние на температуру сгорания мало. Поэтому увеличение давления, уменьшающее диссоциацию, имеет более существенное значение для смесей, приближающихся к стехиометрическому, когда степень диссоциации значительна.

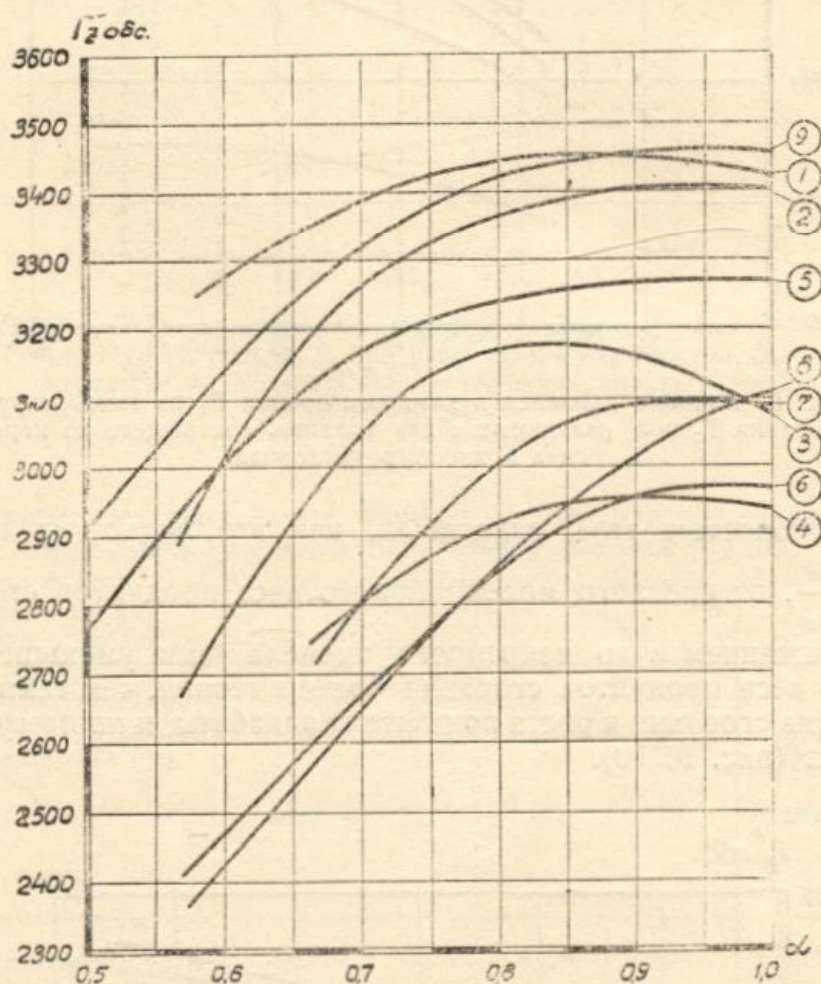


Рис. 4. Температура газов в камере сгорания  $T_z$  при постоянном давлении  $P_z = 20 \text{ кг/см}^2$  и различных  $\alpha$  для топлив, состоящих из: 1) керосина и жидкого кислорода; 2) бензина и жидкого кислорода; 3) 96-процентного этилового спирта и жидкого кислорода; 4) керосина и 96-процентной азотной кислоты; 5) гидразина и жидкого кислорода; 6) этилового спирта и азотной кислоты с добавкой 13%  $\text{NO}_2$ ; 7) анилина и азотной кислоты с добавкой 15%  $\text{NO}_2$ ; 8) этилового спирта с добавкой 25%  $\text{H}_2\text{O}$  и жидкого кислорода; 9) жидкого водорода и жидкого кислорода.

Удельная тяга двигателя имеет максимальное значение также при определенном оптимальном значении коэффициента избытка окислителя (рис. 1, 2, 3, 8).

При прочих равных условиях оптимальное значение  $\alpha$  для  $P_{\text{уд max}}$  бывает значительно меньше, чем при  $T_{z \text{ max}}$ .

Объясняется это тем, что удельная тяга определяется не только температурой сгорания, но и показателем адиабаты  $k_z$ , удельной

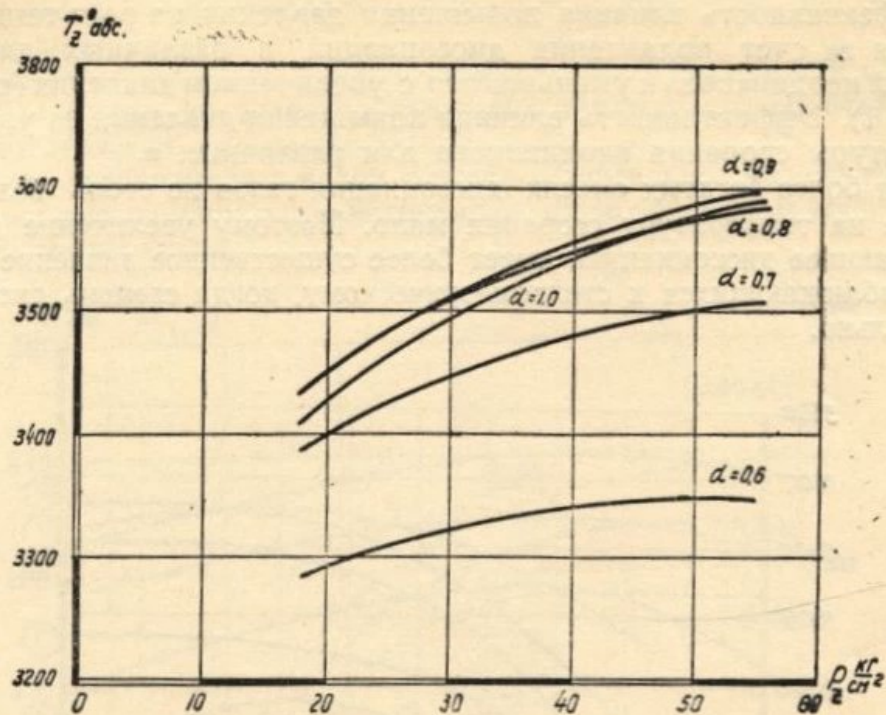


Рис. 5. Влияние давления в камере сгорания  $P_z$  на температуру сгорания  $T_z$  при различных  $\alpha$  для топлива, состоящего из керосина и жидкого кислорода.

работоспособностью газа, зависящей, как это видно из выражения

$$R_z = \frac{848}{\mu \text{ пр. сгз}},$$

от среднего молекулярного веса продуктов сгорания.

С понижением  $\alpha$  до некоторого предела темп уменьшения молекулярного веса продуктов сгорания более высокий, чем темп снижения температуры сгорания и роста показателя адиабаты, и поэтому удельная тяга растёт (рис. 9, 10).

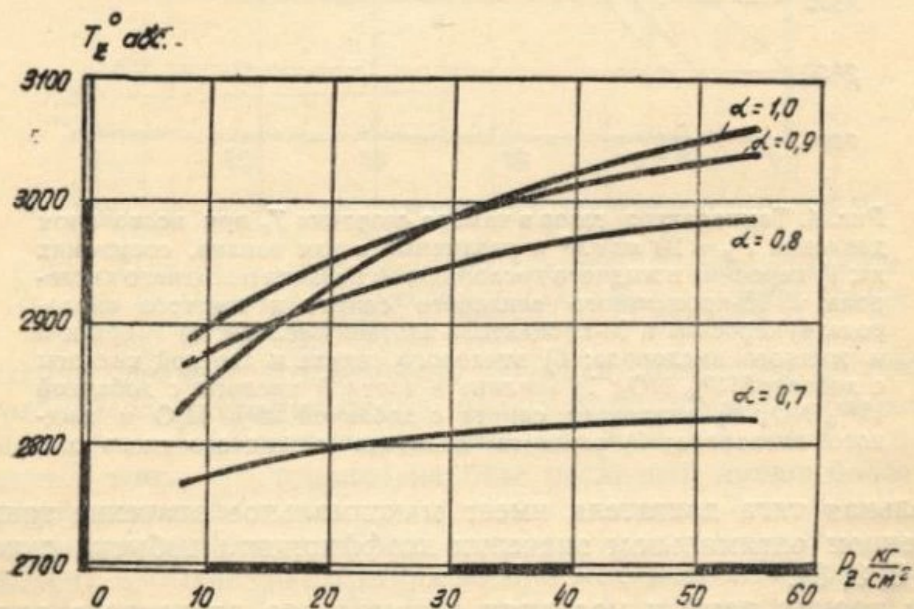


Рис. 6. Влияние давления в камере сгорания  $P_z$  на температуру сгорания  $T_z$  при различных  $\alpha$  для топлива, состоящего из керосина и 96-процентной азотной кислоты.



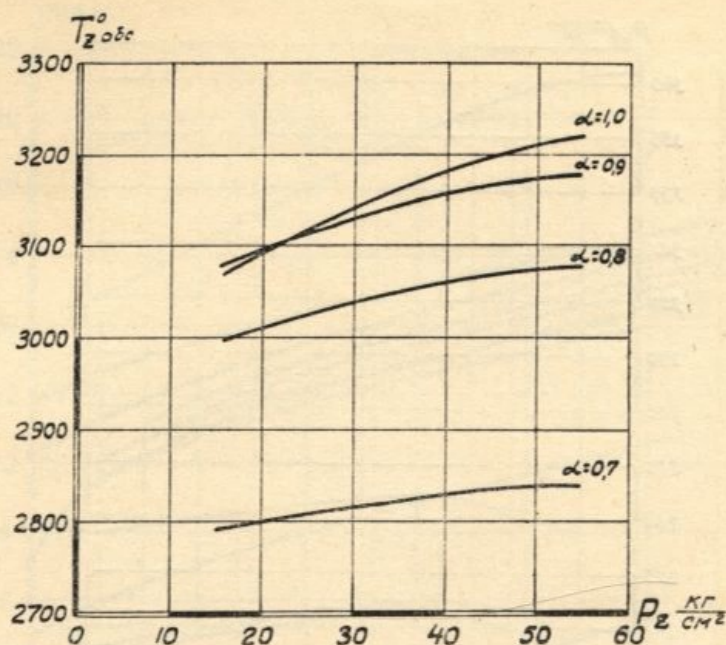


Рис. 7. Влияние давления в камере сгорания  $P_z$  на температуру сгорания  $T_z$  при различных  $\alpha$  для топлива, состоящего из 96-процентного этилового спирта и жидкого кислорода.

Таблица I

Влияние давления в камере сгорания на температуру сгорания  $T_r$  и удельную тягу жидкостно-ракетного двигателя  $P_{уд}$  [8]

Давление в камере сгорания $P_z$ кг/см <sup>2</sup>	10		20		50	
	$T_z$ ° абс.	$P_{уд}$ $\frac{\text{кг/сек}}{\text{кг}}$	$T_z$ ° абс.	$P_{уд}$ $\frac{\text{кг/сек}}{\text{кг}}$	$T_z$ ° абс.	$P_{уд}$ $\frac{\text{кг/сек}}{\text{кг}}$
Горючая смесь						
Жидкий кислород 61,1 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> и 75-процентный этиловый спирт 38,9 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> ( $\alpha = 1$ )	2997	205	3125	208	3330	253
Жидкий кислород 56 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> и 75-процентный этиловый спирт 44 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> ( $\alpha = 0,8$ )	2847	210	2858	233	2886	256
Жидкий кислород 88,8 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> и жидкий водород 11,2 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> ( $\alpha = 1,0$ )	3386	271	3485	297	3649	341
Жидкий кислород 76,2 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> и жидкий водород 23,8 <sup>0</sup> / <sub>0</sub> ( $\alpha = 0,4$ )	2664	323	2664	354	2670	358

С повышением давления в камере сгорания удельная тяга увеличивается и ее максимальное значение, как и для температуры сгорания, сдвигается в сторону более высоких значений  $\alpha$  (рис. 1, 2, 3). При увеличении давления в камере сгорания удельная тяга вначале растет интенсивно, а затем рост ее замедляется (рис. 11, 12, 13, 14).

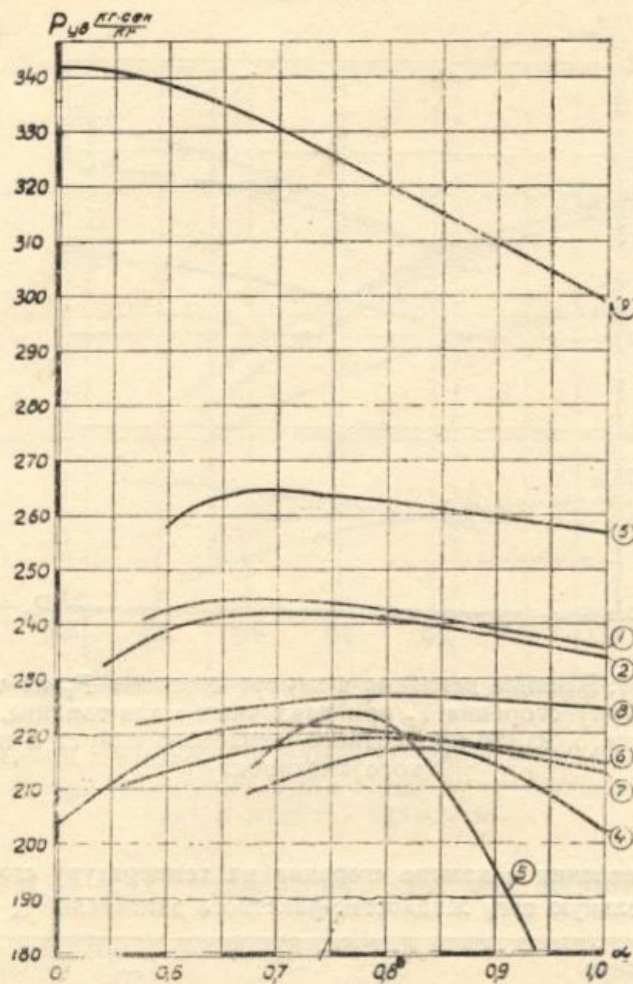


Рис. 8. Удельная тяга  $P_{уд}$ , при постоянном давлении в камере сгорания  $P_z = 20 \text{ кг/см}^2$  и различных  $\alpha$  для ряда топлив. (Состав топлив приведен под рис. 4).

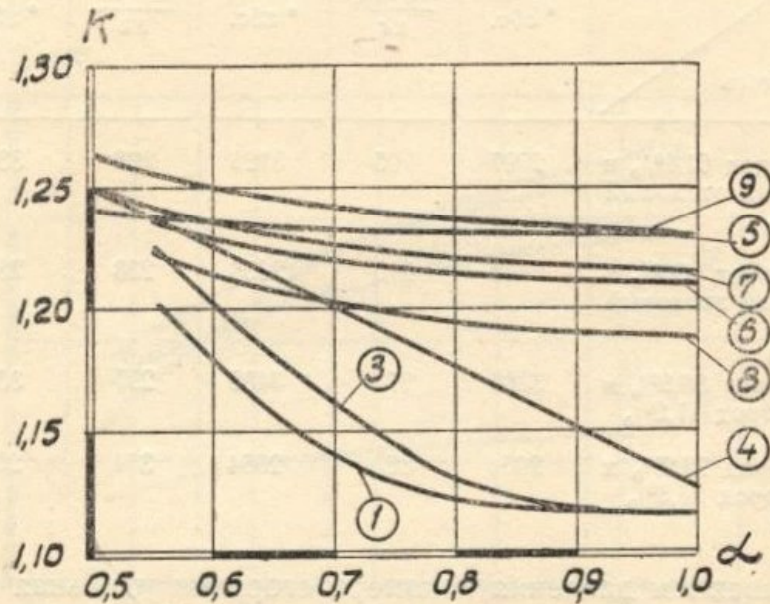


Рис. 9. Показатель адиабаты продуктов сгорания  $K$  при постоянном давлении в камере сгорания  $P_z = 20 \text{ кг/см}^2$  и различных  $\alpha$  для ряда топлив. (Состав топлив приведен под рис. 4).

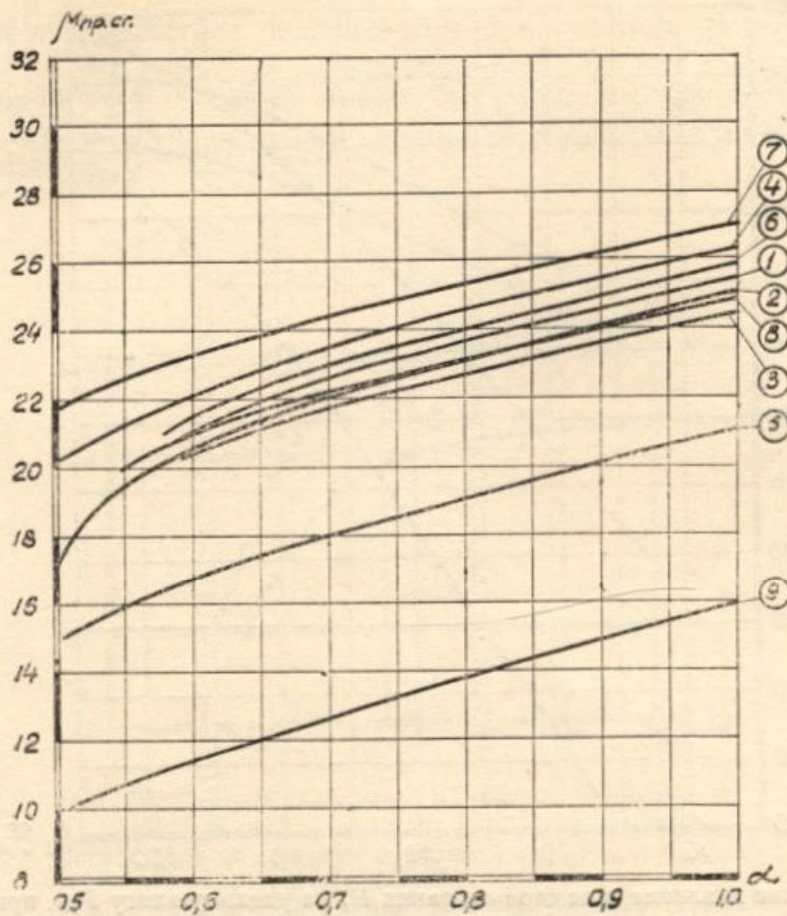


Рис. 10. Молекулярный вес продуктов сгорания  $\mu$  пр. ст. при постоянном давлении в камере сгорания  $P_z = 20 \text{ кг/см}^2$  и различных  $\alpha$  для ряда топлив-смесей. (Состав топлив приведен под рис. 4).

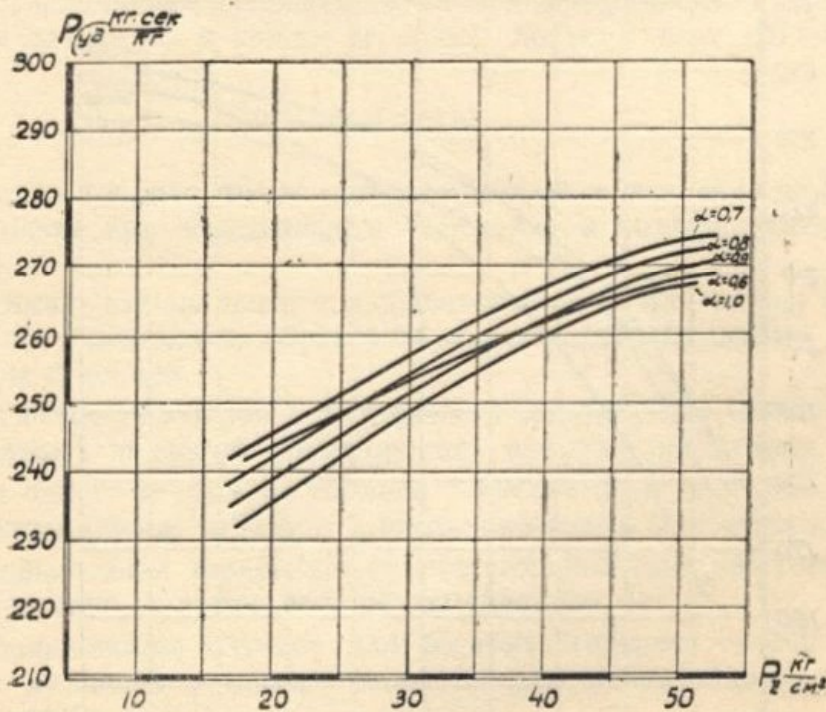


Рис. 11. Влияние давления в камере сгорания  $P_z$  на удельную тягу  $P_{уд}$  при различных  $\alpha$  для топлива, состоящего из керосина и жидкого кислорода.

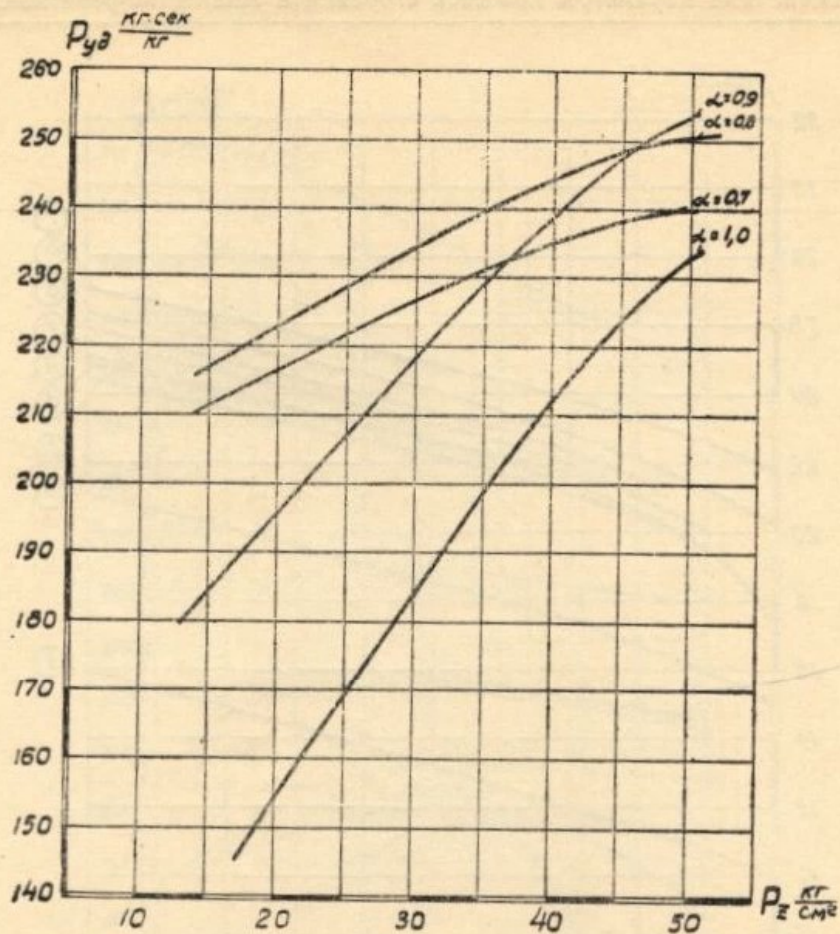


Рис. 12. Влияние давления в камере сгорания  $P_z$  на удельную тягу  $P_{уд}$  при различных  $\alpha$  для топлива, состоящего из 96-процентного этилового спирта и жидкого кислорода

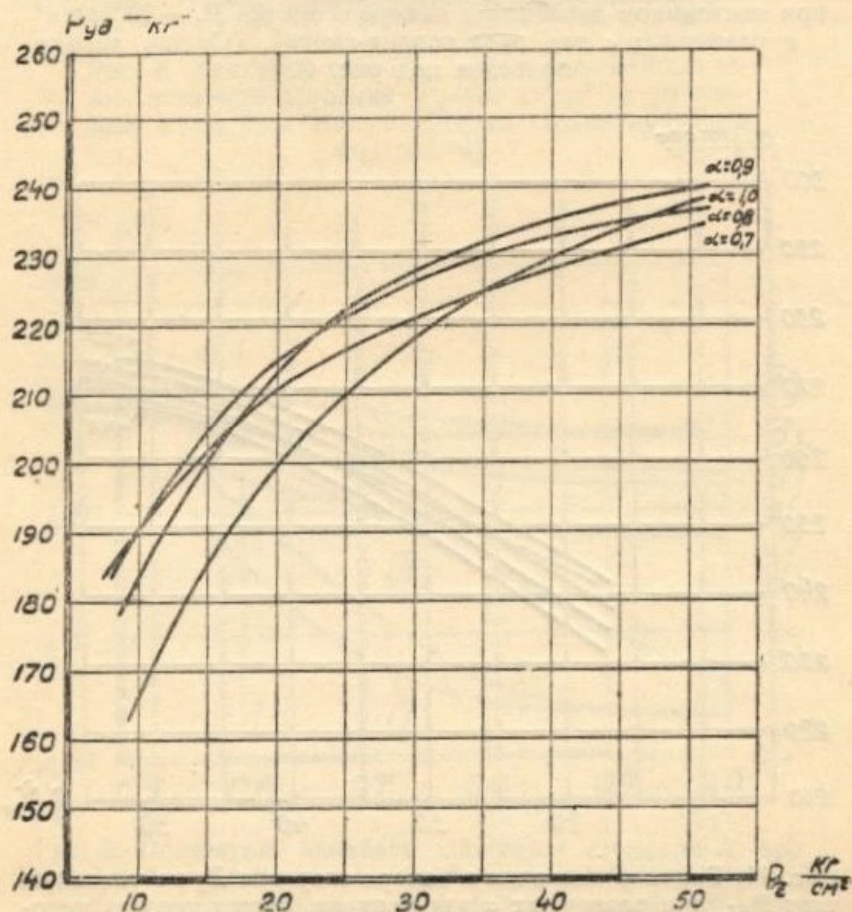


Рис. 13. Влияние давления в камере сгорания  $P_z$  на удельную тягу  $P_{уд}$  при различных  $\alpha$  для топлива, состоящего из керосина и 96-процентной азотной кислоты.

Эта закономерность с практической точки зрения имеет существенное значение. Действительно, может оказаться, что тот выигрыш от прироста удельной тяги, который может быть получен при работе с очень большими давлениями, не будет оправдан конструктивными усложнениями и утяжелением двигателя.

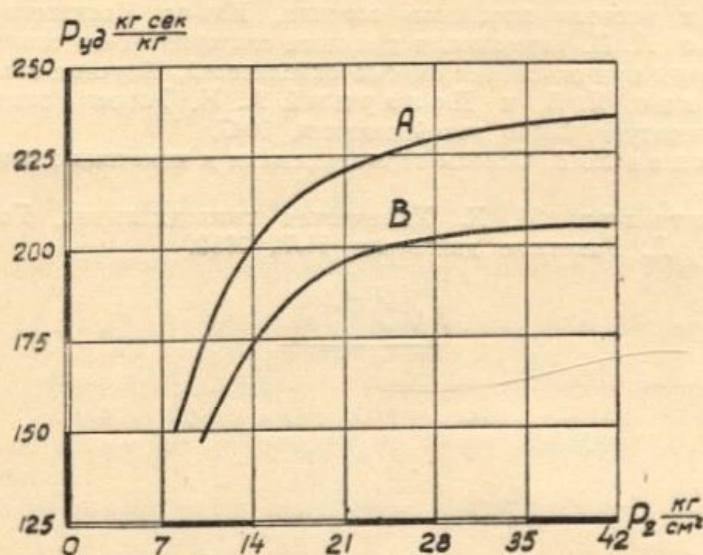


Рис. 14. Влияние давления в камере сгорания  $P_z$  на удельную тягу  $P_{уд}$  при  $\alpha = 0,65$  для топлива, состоящего из анилина и азотной кислоты с добавкой 15%  $\text{NO}_2$  [8].

A — теоретическая кривая; B — усредненная экспериментальная кривая.

При работе с широко известными горючими и окислителями, дающими сравнительно невысокую температуру сгорания (процессы сгорания не сопровождаются особенно сильной диссоциацией), наиболее благоприятным давлением в камере сгорания следует считать 20–50 кг/см<sup>2</sup>.

## ВЫВОДЫ

1. Каждое топливо имеет свое максимальное значение температуры сгорания только при определенном оптимальном коэффициенте избытка окислителя.
2. Оптимальное значение  $\alpha$ , соответствующее максимуму удельной тяги, меньше значения  $\alpha$ , соответствующего максимальному значению температуры сгорания.
3. Чем выше теплопроизводительность топлива, тем меньше величина оптимальных значений коэффициента избытка окислителя.
4. Для одного и того же топлива с увеличением давления в камере сгорания оптимальные значения  $\alpha$  увеличиваются и стремятся к единице.
5. С повышением давления в камере сгорания удельная тяга вначале растет интенсивно, а затем рост ее замедляется.
6. В большинстве случаев для богатых горючим смесей ( $\alpha < 0,7$ ) повышение давления в камере сгорания для подавления диссоциации мало эффективно.
7. Молекулярный вес продуктов сгорания для различных топлив отличен, но темп уменьшения его с уменьшением  $\alpha$  почти одинаков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Болгарский А. В. и Шукин В. К. Рабочие процессы в жидкостно-реактивных двигателях, Оборонгиз, 1953.
2. Ваничев А. П. Термодинамический расчет горения и истечения в области высоких температур, Бюро новой техники, 1947.
3. Гуревич А. И. и Шаулов Ю. X. Термодинамические исследования методом взрыва и расчеты процессов горения, Изд-во Московского Ун-та, 1955.
4. Голдаев И. П. Термохимия процесса сгорания смеси топлив в двигателях внутреннего сгорания при окислении смесью окислителей, Научные зап. ХАИ, 16, 1955.
5. Зельдович Я. Б. и Полярный А. И. Расчеты тепловых процессов при высокой температуре, Бюро новой техники, 1947.
6. Иноземцев Н. В. Основы термодинамики и кинетики химических реакций, Машгиз, 1950.
7. Карапетьянц М. X. Химическая термодинамика, Госхимиздат, 1953.
8. Саттон Д. Ракетные двигатели, ИЛ., 1952.

133232