

УДК 621.452.32

Ю. М. АХМЕТОВ, Д. А. АХМЕДЗЯНОВ, А. Е. МИХАЙЛОВ, Ю. А. ХОХЛОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ЗАПОЛНЕНИЯ ОСНОВНОГО КОНТУРА ДВУХКОНТУРНОЙ ФОРСУНКИ

Проведено исследование процесса заполнения основного контура форсунок с целью анализа изменения основных параметров работы камеры сгорания (КС) на дроссельных и переходных режимах. Получены качественные зависимости, отражающие снижение полноты сгорания, обусловленные плохим распылом топлива при низких перепадах давления в процессе заполнения основного контура форсунок. Рассмотрено влияние соотношения между пропускными способностями контуров форсунки на полноту сгорания. *Авиационные ГТД; камера сгорания; характеристики камеры сгорания; двухконтурная форсунка*

На большинстве современных авиационных ГТД для подачи топлива в камеры сгорания применяются двухступенчатые центробежные форсунки, которые позволяют значительно расширить диапазон работы камеры сгорания при запуске ГТД, на дроссельных режимах и в высотных условиях за счет повышения давления впрыска на малых расходах (с автоматическим отключением основного контура) [3, 4].

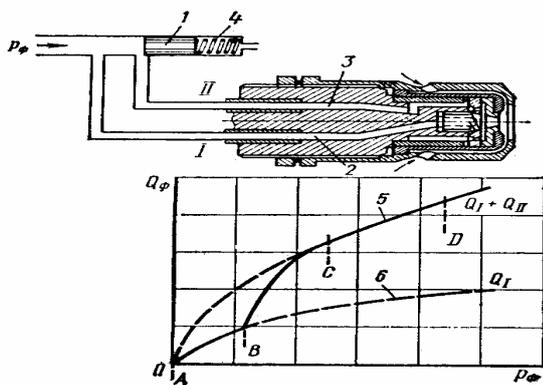


Рис. 1. Схема двухступенчатой форсунки с распределителем контуров и их совместная расходная характеристика

При работе на режимах с малыми расходами топлива клапан 1 закрыт и топливо в двигатель впрыскивается через центральный (дополнительный) канал 2 форсунки. С увеличением режима работы двигателя давление перед клапаном 1 растет и при определенной

величине открывается второй контур (основной) 3 форсунки вследствие преодоления силой от давления затяжки пружины 4. Каналы двух контуров имеют различные проходные сечения. Проходные сечения первого контура меньше чем второго; малые сечения обеспечивают высокое давление впрыска и хорошее качество распыла топлива на малых расходах топлива. Проходные сечения второго контура больше, они позволяют пропустить через форсунку большое количество топлива без чрезмерного повышения давления впрыска.

Совместная расходная характеристика такой форсунки представлена на графике (рис. 1). Участок *AB* характеристики соответствует подаче топлива через первый контур форсунки, *BC* — режиму открытия золотника клапана распределителя и *CD* — подаче топлива через оба канала форсунки. Действительный расход форсунки отображает кривая *ABCD*. Протяженность участка *BC*, соответствующего различным проходным сечениям второго контура распределителя с увеличением по мере возрастания давления топлива P_{ϕ} , определяется заданным законом изменения площади сечения при перемещении золотника. Суммарная характеристика по всем форсункам камеры сгорания определяется количеством головок камер, в которых устанавливаются форсунки. Индивидуальный расход через каждую форсунку (и, следовательно, через каждую камеру) определяется положением каждой камеры и, как будет показано, высотой гидростатического столба уровня

топлива в основном коллекторе (при горизонтальном расположении камеры сгорания).

Рассмотрена следующая модель камеры сгорания: камера сгорания трубчато-кольцевая, с десятью жаровыми трубами, расположенными симметрично с интервалом 36° , как показано на рис. 2.

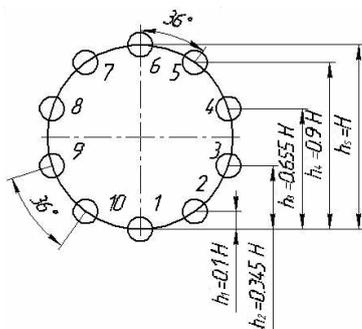


Рис. 2. Схема расчетного топливного коллектора с указанием высоты гидростатического столба топлива для каждой жаровой трубы

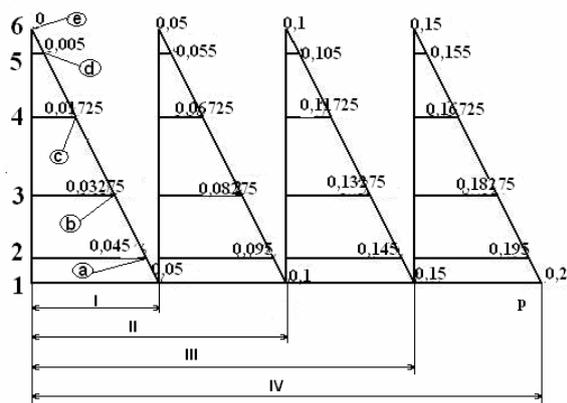


Рис. 3. Изменение перепада давления в основном контуре форсунки по 10 жаровым трубам

Использованы следующие исходные предпосылки:

1. Для удобства использования источников [1, 3, 4] мера измерения давления в данной статье — атмосферы, а расхода топлива — литры в час.
2. Гидростатическое давление столба топлива в топливном коллекторе между первой и шестой жаровыми трубами равно 0,05 атм.
3. Коэффициент расхода форсунки равен единице.
4. Расход воздуха через камеру сгорания и давление воздуха принимаются постоянными на участке заполнения основного контура.
5. Зависимость полноты сгорания топлива, поступающего через основной и дополни-

тельный контуры от давления топлива в форсунках, принимаются согласно данным [3] в функциональной зависимости $\eta = f(p)$ (рис. 5).

6. Топливо, поступающее через форсунки основного контура, не взаимодействует с распыленным топливом дополнительного контура (т.е. качество распыла топлива, поступающего через основной контур, определяется только перепадом давления на форсунке).

7. Начало открытия дополнительного контура соответствует давлению перед РК — 0 атм.; начало открытия основного контура соответствует давлению перед РК — 12 атм.

8. Пропускная способность дополнительного контура $Q_I = 250$ л/час при $\Delta p_I = 12,0$ атм.; пропускная способность основного контура $Q_{II} = 777,7$ л/час при $\Delta p_{II} = 12,0$ атм.

9. Противодавление в камере сгорания $p_k = 0$.

10. Перепад давления на форсунке, исходя из п. 8 $p_k = 0$, равен давлению в топливном коллекторе и на участке заполнения основного контура $p_k = \Delta h$.

11. Распределенность параметров по длине камеры сгорания не учитывается, и полнота сгорания определяется степенью распыла топлива по каждому контуру форсунки.

12. Плотность топлива $\rho = 830$ кг/м³.

В данной статье на графиках приняты следующие обозначения величин:

- i — номер жаровой трубы;
- Q_{Ii}, G_{Ii} — объемный и массовый расход топлива через дополнительный (первый) топливный контур i -й жаровой трубы;
- Q_{IIi}, G_{IIi} — объемный и массовый расход топлива через основной топливный контур i -й жаровой трубы;
- η_{II} — полнота сгорания топлива, распыленного через основной контур форсунки;
- η_I — полнота сгорания топлива, распыленного через дополнительный контур форсунки;
- η_{Σ} — среднемассовая полнота сгорания топлива;
- η — полнота сгорания;
- Q_{Φ} — суммарный объемный расход топлива через форсунку;
- Q_{Σ} — суммарный объемный расход топлива;
- Q_{eff} — «эффективный» объемный расход топлива.

Исходя из заданного расположения жаровых труб в камере сгорания (рис. 2), были получены формулы для расчета гидростатического давления столба топлива, соответствующего уровню форсунки в основном топливном коллекторе:

$$h_1 = \frac{H}{2}(1 - \cos(36)) \text{ (атм.)}, \quad (1)$$

$$h_2 = \frac{H}{2}(1 - \cos(72)) \text{ (атм.)}, \quad (2)$$

$$h_3 = \frac{H}{2}(1 - \cos(108)) \text{ (атм.)}, \quad (3)$$

$$h_4 = \frac{H}{2}(1 - \cos(144)) \text{ (атм.)}, \quad (4)$$

$$h_5 = H \text{ (атм.)}, \quad (5)$$

где H — гидростатическое давления столба топлива по высоте равного высоте топливного коллектора (атм.).

С учетом предпосылок (9, 10) можно получить формулы для перепадов давления на форсунках, находящихся на различном уровне в топливном коллекторе. При высоте столба топлива h в пределах $0 < h \leq h_1$, т. е. когда заполнена только нижняя форсунка, перепад давлений определяется как:

$$\Delta h_1 = h \text{ (атм.)}. \quad (6)$$

При дальнейшем нарастании столба топлива $h_1 < h \leq h_2$ перепад давления на форсунках будет:

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= h \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_{2,10} &= (h - h_1) \text{ (атм.)}. \end{aligned} \quad (7)$$

При $h_2 < h \leq h_3$:

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= h \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_{2,10} &= (h - h_1) \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_{3,9} &= (h - h_2) \text{ (атм.)}. \end{aligned} \quad (8)$$

При $h_3 < h \leq h_4$:

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= h \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_{2,10} &= (h - h_1) \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_{3,9} &= (h - h_2) \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_{4,8} &= (h - h_3) \text{ (атм.)}. \end{aligned} \quad (9)$$

При $h_4 < h \leq h_5$:

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= h \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_{2,10} &= (h - h_1) \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_{3,9} &= (h - h_2) \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_{4,8} &= (h - h_3) \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_{5,7} &= (h - h_4) \text{ (атм.)}. \end{aligned} \quad (10)$$

При $h_5 < h$, т. е. при полном заполнении коллектора, перепады давления на форсунках можно вычислить как:

$$\begin{aligned} \Delta h_1 &= h \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_{2,10} &= (h - h_1) \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_{3,9} &= (h - h_2) \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_{4,8} &= (h - h_3) \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_{5,7} &= (h - h_4) \text{ (атм.)}, \\ \Delta h_6 &= (h - h_5) \text{ (атм.)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Массовый расход топлива через форсунку вычисляется по следующей формуле:

$$G = f\mu\sqrt{2\rho p}, \quad (12)$$

где

- f — площадь сечения форсунки;
- ρ — плотность топлива;
- p — перепад давления топлива на форсунке;
- μ — коэффициент расхода форсунки.

Объемный расход топлива через форсунку вычисляется по аналогичной формуле:

$$Q = \frac{f\mu\sqrt{2\rho p} \cdot 3600 \cdot 1000}{\rho}. \quad (13)$$

Пропускные способности контуров форсунки измеряются в литрах в час, поэтому в данной статье для удобства используется объемный расход топлива, также измеряемый в литрах в час.

Основываясь на формуле (2) и известных пропускных способностях контуров (п. 8 в исходных предпосылках), были определены площади сечений контуров:

$$\begin{aligned} f_I &= \frac{Q_I\sqrt{\rho}}{3600 \cdot 1000\mu\sqrt{2\Delta p_I}}, \\ f_{II} &= \frac{Q_{II}\sqrt{\rho}}{\mu \cdot 3600 \cdot 1000\sqrt{2\Delta p_{II}}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Исходя из формул (14 и 13), зависимости объемного расхода через дополнительный

контур (Q_{Ii}) и основной контур (Q_{IIi}) от перепада давления могут быть представлены в следующем виде:

$$Q_{Ii} = f_{Ii} \mu \sqrt{2\rho p_{Ii} \cdot 101325 \cdot 3600 \cdot 1000 / \rho}; \quad (15)$$

$$Q_{II1} = f_{II1} \mu \sqrt{2\rho \Delta h_1} \cdot 101325 \cdot 3600 \cdot 1000 / \rho; \quad (16)$$

$$Q_{II2,10} = f_{II2,10} \mu \sqrt{2\rho \Delta h_2} \cdot 101325 \cdot 3600 \cdot 1000 / \rho; \quad (17)$$

$$Q_{II3,9} = f_{II3,9} \mu \sqrt{2\rho \Delta h_3} \cdot 101325 \cdot 3600 \cdot 1000 / \rho; \quad (18)$$

$$Q_{II4,8} = f_{II4,8} \mu \sqrt{2\rho \Delta h_4} \cdot 101325 \cdot 3600 \cdot 1000 / \rho; \quad (19)$$

$$Q_{II5,7} = f_{II5,7} \mu \sqrt{2\rho \Delta h_5} \cdot 101325 \cdot 3600 \cdot 1000 / \rho; \quad (20)$$

$$Q_{II6} = f_{II6} \mu \sqrt{2\rho \Delta h_6} \cdot 101325 \cdot 3600 \cdot 1000 / \rho, \quad (21)$$

где $p_{Ii} = \Delta h_i + 12$ (атм.),

p_{Ii} — перепад давления топлива на форсунке дополнительного контура;

Δh_i — перепад давления топлива на форсунках основного контура.

Суммарный объемный расход топлива через форсунку определяется следующим образом:

$$Q_{\Phi i} = Q_{Ii} + Q_{IIi}, \quad (22)$$

где Q_{Ii} — объемный расход через дополнительный контур i -й форсунки;

Q_{IIi} — объемный расход топлива через основной контур i -й форсунки.

Тогда суммарный объемный расход топлива в топливном коллекторе будет:

$$Q_{\Sigma} = \Sigma Q_{Ii} + \Sigma Q_{IIi}. \quad (23)$$

По графику зависимости полноты сгорания топлива от давления впрыска [3] (рис. 4), методом наименьших квадратов получена следующая аналитическая зависимость:

$$\eta_i = \frac{l + mp_i + np_i^2 + gp_i^3}{o + rp_i + sp_i^2 + tp_i^3} + u. \quad (24)$$

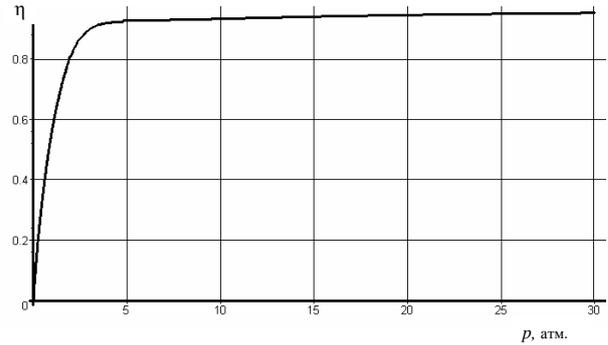


Рис. 4. Изменение полноты сгорания топлива в зависимости от давления впрыска в интервале давлений от 0 до 30 атмосфер

Соответствующие коэффициенты представлены в табл. 1.

Таблица 1

1	-575,865
m	126712,856
n	-30898,829
g	15895,182
r	6735,47
s	-21055,617
t	16483,865
u	0,004243
o	135720,639

Назовем «эффективным» расходом топлива величину, равную произведению средне-массовой полноты сгорания топлива на его суммарный расход.

$$G_{effi} = G_{\Sigma i} \cdot \eta_{\Sigma i}. \quad (25)$$

С учетом исходных предпосылок (пункты 9 и 10) можно записать следующее выражение:

$$\eta_{Ii} G_{Ii} + \eta_{IIi} G_{IIi} = \eta_{\Sigma i} G_{\Sigma i}, \quad (26)$$

откуда получим:

$$\eta_{\Sigma i} = \frac{(\eta_{Ii} G_{Ii} + \eta_{IIi} G_{IIi})}{G_{\Sigma i}}, \quad (27)$$

где

$$\eta_{Ii} = \frac{l + mp_{Ii} + np_{Ii}^2}{o + rp_{Ii} + sp_{Ii}^2 + tp_{Ii}^3} + u;$$

$$\eta_{IIi} = \frac{l + mp_{IIi} + np_{IIi}^2}{o + rp_{IIi} + sp_{IIi}^2 + tp_{IIi}^3} + u;$$

p_{Ii} — перепад давления на i -й форсунке дополнительного контура (атм.).

p_{IIi} — перепад давления на i -й форсунке основного контура (атм.).

Формулу (26) можно преобразовать следующим образом:

$$\eta_{Ii} \frac{Q_{Ii} \rho}{1000 \cdot 3600} + \eta_{IIi} \frac{Q_{IIi} \rho}{1000 \cdot 3600} = \eta_{\Sigma i} \frac{Q_{ci} \rho}{1000 \cdot 3600}. \quad (28)$$

Плотность топлива, поступающего в основной и дополнительный контуры форсунки, является величиной постоянной, поэтому от (28) можно перейти к формуле по своему виду аналогичной (27), но содержащей объемный расход топлива:

$$\eta_{\Sigma i} = \frac{(\eta_{Ii} Q_{Ii} + \eta_{IIi} Q_{IIi})}{Q_{ci}}. \quad (29)$$

Из этого можно сделать вывод, что формулы (27) и (29) эквивалентны, поэтому будем далее использовать более удобную формулу (29), называя η_{Σ} среднemasсовой полной сгорания топлива.

Основываясь на известных пропускных способностях каналов форсунки (исходные предпосылки п. 8): дополнительный контур — 250 л/час при 12 атмосферах, основной контур — 777,7 л/час при 12 атмосферах, с использованием формулы (13) построена расходная характеристика исследуемой форсунки.

Рассмотрен процесс заполнения основного контура и показано изменение расходных характеристик основного контура по мере подключения отдельных форсунок.

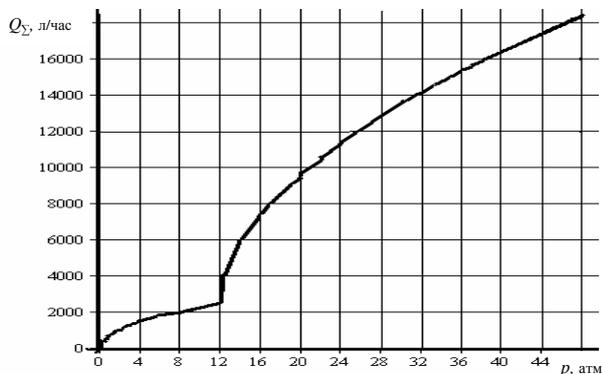


Рис. 5. Совместная расходная характеристика распределителя контуров и топливного коллектора с двухконтурными форсунками

Область oa соответствует началу заполнения топливного коллектора, когда работает

только нижняя форсунка, т. е. точка a соответствует заполнению основного контура до уровня форсунок 2–10; область ab — подключение следующих двух форсунок, находящихся на одном уровне, т. е. область работы трех форсунок: 1, 2, 10, при этом в точке b основной контур заполнен до уровня форсунок 3–9; область bc — область работы 5 форсунок: 1, 2, 3, 9, 10, в точке c основной контур заполнен до уровня форсунок 4–8; область cd — область работы 7 форсунок: 1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, точка d — заполнение основного контура до уровня форсунок 5–7; область de — область работы 9 форсунок: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, точка e соответствует полному заполнению коллектора, когда верхняя форсунка еще не пылит (рис. 6).

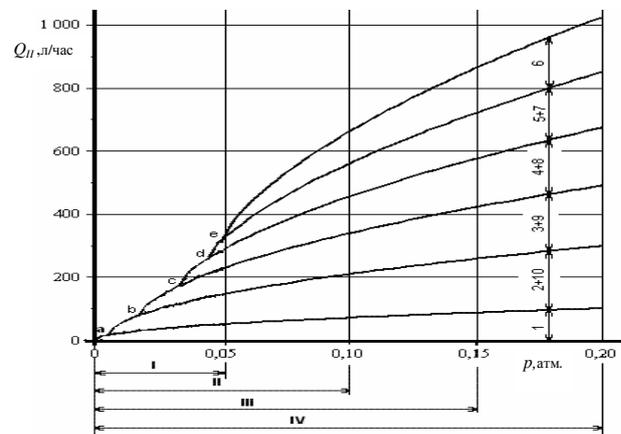


Рис. 6. Область рабочей характеристики форсунок, в которой происходит заполнение основного контура

В статье рассмотрены четыре случая, когда перепад давления топлива в основном контуре получил приращения равные I — 0,05, II — 0,1, III — 0,15 и IV — 0,2 атмосферы (рис. 3).

В жаровых трубах, находящихся на различной высоте в топливном коллекторе, будет различный перепад давления топлива на форсунках (формулы 6–11). Это обусловлено влиянием гидростатического давления столба топлива, соответствующего уровню форсунки в топливном коллекторе. На основании формул (6–11) получены массивы значений перепада давления на форсунках по 10 жаровым трубам, представленные на рис. 3 для перепада давления на форсунке в 1 жаровой трубе соответственно 0,05 атм., 0,1 атм., 0,15 атм. и 0,2 атм. Точки на графиках образуют прямые с углом наклона 135 градусов.

По массиву значений перепада давления топлива в основном контуре форсунки

(рис. 3) по формуле 13 был получен массив значений суммарного объемного расхода топлива.

Результаты расчета представлены в следующем виде (рис. 7).

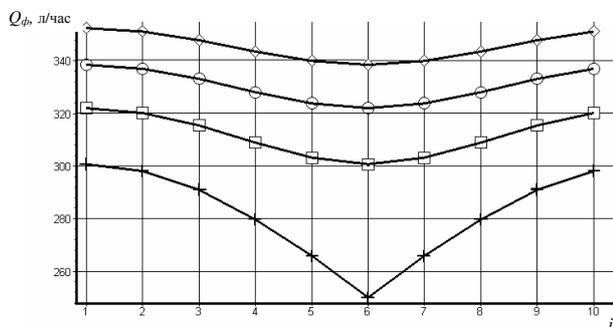


Рис. 7. Изменение расхода топлива через форсунку по 10 жаровым трубам при различных перепадах давления на форсунках основного контура: \diamond — при 0,2 атм.; \circ — при 0,15 атм.; \square — при 0,1 атм.; $+$ — при 0,05 атм. (т. е. ОК полностью заполнен)

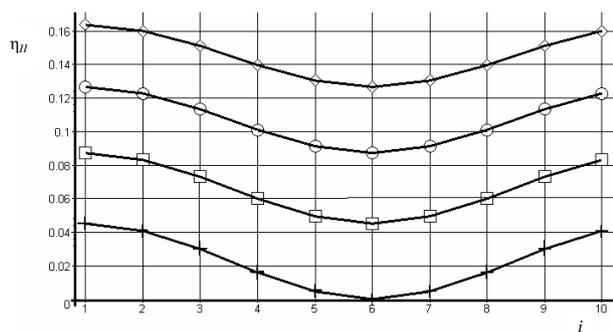


Рис. 8. Изменение полноты сгорания топлива, распыленного через основной контур форсунки при различных перепадах давления на форсунках основного контура: \diamond — при 0,2 атм.; \circ — при 0,15 атм.; \square — при 0,1 атм.; $+$ — при 0,05 атм.

Из полученных графиков можно видеть, что массовые расходы топлива значительно разнятся от одной жаровой трубы к другой, что приводит к неоднородности по сечению камеры сгорания коэффициентов избытка воздуха. Неоднородность по сечению состава топливоздушная смеси сказывается на эффективности работы камеры сгорания, что объясняется влиянием гидростатического столба на расходные характеристики (рис. 3) [2].

Рассмотрим один из основных показателей эффективности работы камеры сгорания — коэффициент полноты сгорания топлива.

На основании формулы (24) и массива значений перепада давления впрыска был

получен массив значений полноты сгорания топлива, распыленного через основной контур, представленный в следующем виде (рис. 8).

На графиках, представленных на рис. 8, видно, что полнота сгорания топлива основного контура имеет низкие значения, порядка 0,15 и менее, что может оказывать негативное влияние на среднемассовую полноту сгорания.

Так же по формуле (24) получены 4 массива значений полноты сгорания топлива, распыленного через дополнительный контур форсунки, и построены соответствующие графики, аналогичные тем, что представлены на рис. 8.

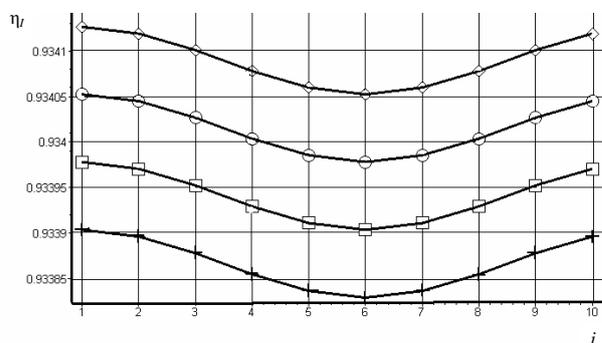


Рис. 9. Изменение полноты сгорания топлива, распыленного через дополнительный контур форсунки при различных перепадах давления на форсунках основного контура: \diamond — при 0,2 атм.; \circ — при 0,15 атм.; \square — при 0,1 атм.; $+$ — при 0,05 атм., что соответствует перепаду давления на нижней форсунке дополнительного контура соответственно 12,2; 12,15; 12,1; 12,05 атм.

Анализируя кривые, приведенные на рис. 9, приходим к выводу, что значения полноты сгорания топлива, распыленного через дополнительный контур, изменяются незначительно в пределах 0,933–0,934 при нарастающей расхода топлива.

С учетом изложенного и в соответствии с выражением (29) произведен расчет изменения среднемассовой полноты сгорания, результаты которого представлены на рис. 10.

Графики, представленные на рис. 10, дают наглядное представление о том, какое значительное влияние оказывает различное положение форсунок по высоте топливного коллектора на эффективность работы камеры сгорания в процессе открытия основного контура форсунки.

Рассмотрим более детально влияние раскрытия основного контура двухконтурной

форсунки на полноту сгорания топлива в камере сгорания. На основании формулы (24) был получен следующий график (рис. 11).

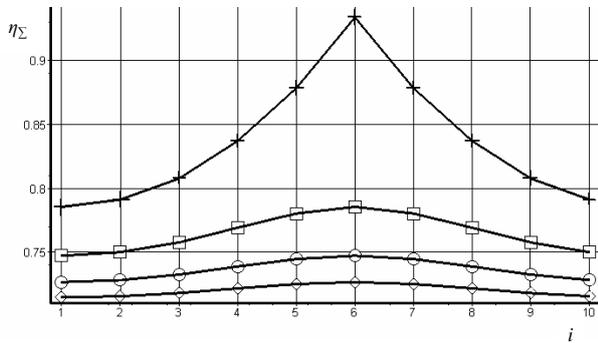


Рис. 10. Изменение среднemasовой полноты сгорания топлива по 10 жаровым трубам при различных перепадах давления на форсунках основного контура: \diamond — при 0,2 атм.; \circ — при 0,15 атм.; \square — при 0,1 атм.; $+$ — при 0,05 атм.

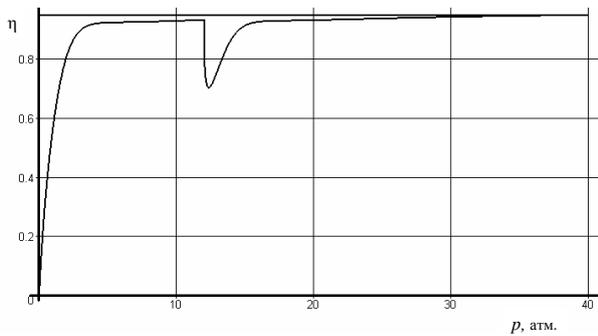


Рис. 11. Зависимость среднemasовой полноты сгорания топлива в камере сгорания от давления топлива перед форсункой

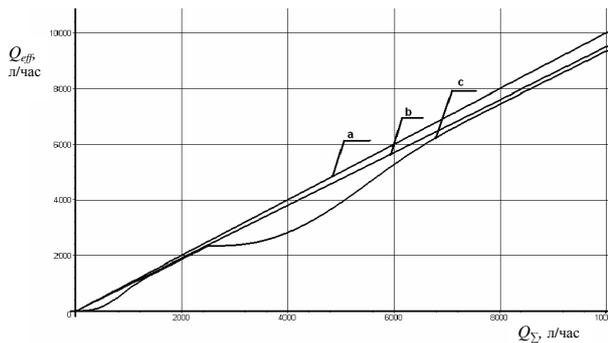


Рис. 12. Зависимость эффективного расхода топлива от суммарного расхода, где *a* — полнота сгорания равна единице; *b* — полнота сгорания равна 0,95; *c* — действительная кривая

От 0 до 12 атмосфер работает только дополнительный контур и из распределительного клапана в основной контур, топлива не поступает. При 12 атм. топливо, распыленное через дополнительный контур, горит с высокой полнотой. При 12 атм. начинается подключение основного контура форсунки, и в

интервале от 12 до 22 атмосфер давления перед РК происходит падение суммарной полноты сгорания, обусловленное плохим распылом топлива через основной контур, соответственно падает эффективность работы камеры сгорания.

Основываясь на формуле (25) и полученных ранее массивах значений суммарного расхода топлива и среднemasовой полноты сгорания топлива, был построен следующий график (рис. 12).

Две прямые *a* и *b* показывают случай идеального (полнота сгорания равна единице) и удовлетворительного (полнота сгорания 0,95) использования топлива. Кривая *c* отображает действительную эффективность использования расхода топлива. Анализ графиков указывает на наличие области падения эффективности использования топлива в области подключения и заполнения основного контура.

Область открытия дополнительного контура форсунки в работе не исследовалась, а проводилось исследование области заполнения основного топливного коллектора.

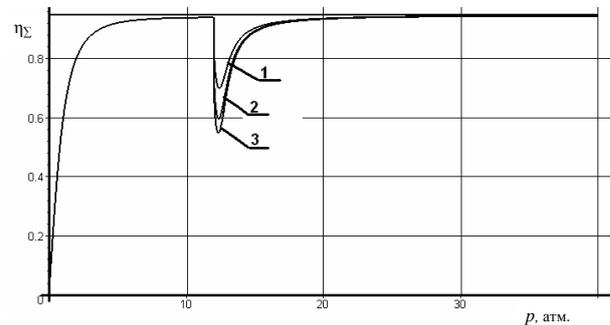


Рис. 13. Зависимости среднemasовой полноты сгорания топлива от перепада давления на форсунке, при: 1 — $Q_I = 250$ л/час; 2 — $Q_I = 144,3$ л/час; 3 — $Q_I = 100$ л/час (при $\Delta p_I = 12$ атм.), при этом пропускная способность основного контура $Q_{II} = 777,7$ л/час (при $\Delta p_{II} = 12$ атм.)

Далее рассмотрим влияния соотношения между расходами топлива на эффективность работы камеры.

Рассмотрим влияние изменения площади сечения, а соответственно, и пропускной способности дополнительного контура.

Исходя из формулы (29) и массива значений суммарного расхода топлива, были построены графики зависимости среднemasовой полноты сгорания от суммарного расхода топлива.

Анализ протекания зависимости $Q_{eff} = f(Q_{\Sigma})$ показывает, что при уменьше-

нии пропускной способности дополнительного контура зона влияния подключения основного контура на глубину провала Q_{eff} расширяется и углубляется $\frac{\Delta_1}{Q_{eff1}} < \frac{\Delta_2}{Q_{eff2}} < \frac{\Delta_3}{Q_{eff3}}$ (рис. 14), и, соответственно, $\frac{\Delta\eta_{\Sigma 1}}{\eta_{\Sigma}} < \frac{\Delta\eta_{\Sigma 2}}{\eta_{\Sigma}} < \frac{\Delta\eta_{\Sigma 3}}{\eta_{\Sigma}}$ (рис. 15).

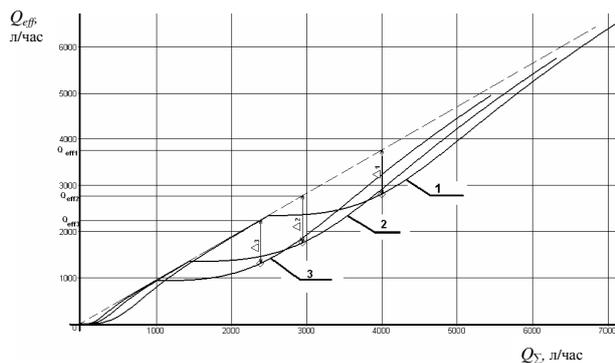


Рис. 14. Зависимость эффективного расхода топлива от суммарного, при: 1 – $Q_{II} = 250$ л/час; 2 – $Q_{II} = 144,3$ л/час; 3 – $Q_{II} = 100$ л/час (при $\Delta p_I = 12$ атм.), при этом пропускная способность основного контура $Q_{II} = 777,7$ л/час (при $\Delta p_{II} = 12$ атм.)

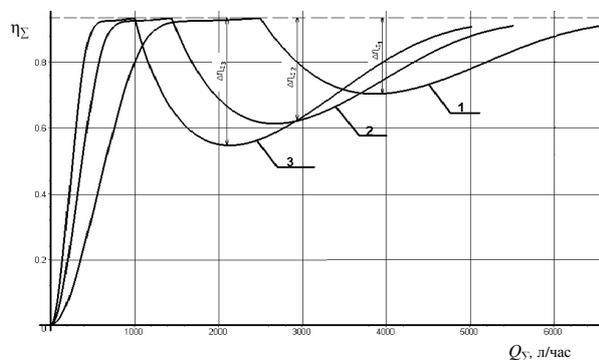


Рис. 15. Зависимость среднемассовой полноты сгорания топлива от суммарного расхода топлива, при: 1 – $Q_{II} = 250$ л/час; 2 – $Q_{II} = 144,3$ л/час; 3 – $Q_{II} = 100$ л/час (при $\Delta p_I = 12$ атм.), при этом пропускная способность основного контура $Q_{II} = 777,7$ л/час (при $\Delta p_{II} = 12$ атм.)

Далее рассмотрим влияние изменения пропускной способности основного контура.

На рис. 16, 17 и 18 представлены графики для постоянной пропускной способности дополнительного контура 100 л/час (при $\Delta p_I = 12$ атм.) и различной основного контура, соответственно 1 – 777,7 л/час, 2 – 655,2 л/час и 3 – 532,7 л/час (при $\Delta p_{II} = 12$ атм.).

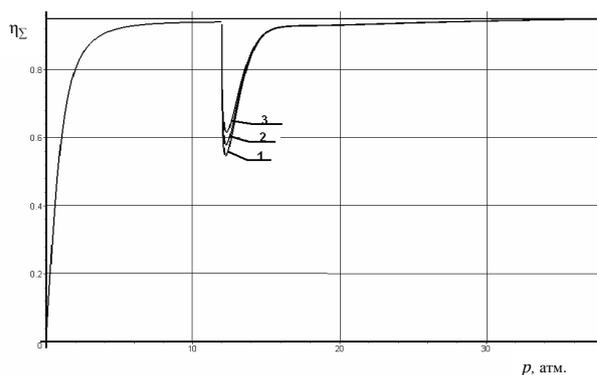


Рис. 16. Зависимость среднемассовой полноты сгорания от перепада давления на форсунке, при: 1 – $Q_{II} = 777,7$ л/час; 2 – $Q_{II} = 655,2$ л/час; 3 – $Q_{II} = 532,7$ л/час, (при $\Delta p_{II} = 12$ атм.), при этом пропускная способность дополнительного контура $Q_I = 100$ л/час (при $\Delta p_I = 12$ атм.)

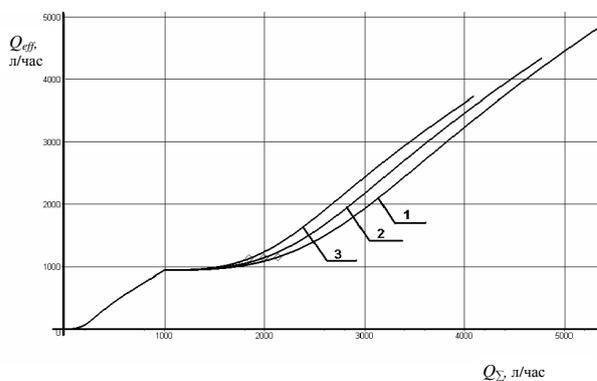


Рис. 17. Зависимость эффективного расхода топлива от величины суммарного расхода, при: 1 – $Q_{II} = 777,7$ л/час; 2 – $Q_{II} = 655,2$ л/час; 3 – $Q_{II} = 532,7$ л/час, (при $\Delta p_{II} = 12$ атм.), при этом пропускная способность дополнительного контура $Q_I = 100$ л/час (при $\Delta p_I = 12$ атм.)

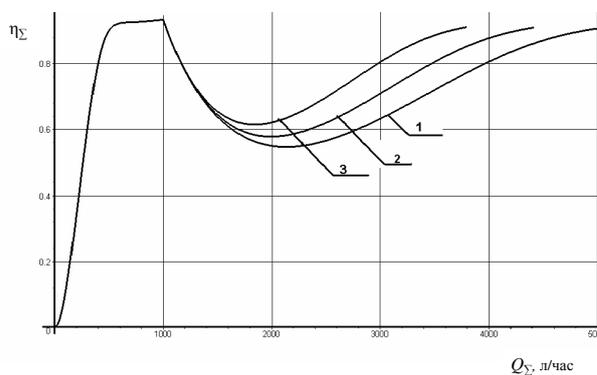


Рис. 18. Зависимость среднемассовой полноты сгорания от суммарного расхода топлива, при: 1 – $Q_{II} = 777,7$ л/час; 2 – $Q_{II} = 655,2$ л/час; 3 – $Q_{II} = 532,7$ л/час (при $\Delta p_{II} = 12$ атм.), при этом пропускная способность дополнительного контура $Q_I = 100$ л/час (при $\Delta p_I = 12$ атм.)

По графикам 13–18 можно наглядно наблюдать интервал падения по среднемассовой

полноте сгорания, величину падения эффективности использования топлива и в каком диапазоне расходов находятся эти области.

Таким образом, сравнение графиков (рис. 14–17) показывает значительное влияние соотношения пропускных способностей основного и дополнительного контура на среднюю полноту сгорания, а также на эффективный расход топлива. Исходя из графиков, представленных на рис. 13–15, можно сказать, что от пропускной способности дополнительного контура зависит начало зоны падения эффективности использования топлива, в то время как пропускная способность основного контура больше влияет на глубину этой зоны, а также на ее протяженность (рис. 16–18). Анализируя зависимости средней полноты сгорания от перепада давления на форсунке, приходим к выводу, что избежать падения средней полноты сгорания из-за заполнения основного контура невозможно, поэтому необходимо подбирать оптимальное соотношение между пропускными способностями контуров, чтобы минимизировать область падения средней полноты сгорания топлива и, следовательно, улучшить характеристики камеры сгорания в целом. При этом особое внимание стоит уделять эффективности использования топлива в целях экономичности.

Анализ проведенных расчетных работ показывает:

1) использование в топливных системах ТРД двухконтурных центробежных форсунок может вызывать снижение полноты сгорания топлива основной камеры сгорания при подключении основного контура топливных форсунок через распределитель расхода топливной автоматики (клапан РК);

2) снижение полноты сгорания камеры сгорания вызывается низкими значениями давления топлива в основном топливном коллекторе.

3) на протяженность зоны снижения полноты сгорания оказывает влияние соотношение между расходами топлива через контура при одинаковом перепаде давления;

4) при выборе алгоритмов управления подачей топлива на переходных режимах необходимо проводить дополнительное детальное изучение характера горения топлива с учетом заполнения основного топливного контура и существенной деформации радиальных и окружных температурных полей перед турбиной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пчелкин, Ю. М.** Камеры сгорания газотурбинных двигателей / Ю. М. Пчелкин. М. : Машиностроение, 1984. 392 с.
2. **Кулагин, В. В.** Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / В. В. Кулагин. М. : Машиностроение, 2003. 616 с.
3. **Исследование** рабочего процесса в камерах сгорания газотурбинных двигателей : сб. ст. М. : Машиностроение, 1964. 81 с.
4. **Леонтьев, В. Н.** Испытание авиационных двигателей и их агрегатов / В. Н. Леонтьев, С. А. Сиротин, А. М. Твердовский. М. : Машиностроение, 1976. 216 с.

ОБ АВТОРАХ



Ахметов Юрий Мавлютович, доц. каф. прикл. гидромех., зам. ген. дир. НИИТ. Дипл. инж.-мех. по авиадвиг. (УАИ, 1959). Канд. техн. наук по тепл. двиг. (МАИ, 1978). Иссл. в обл. газогидр. течений и систем упр. энерг. установок.



Ахмедзянов Дмитрий Альбертович, проф. каф. авиадвиг., зам. декана ФАД. Дипл. инж.-мех. (УГАТУ, 1997). Д-р техн. наук (там же, 2007). Иссл. в обл. раб. процессов в ГТД, мат. моделей слож. техн. объектов, САПР авиадвиг. ГТД.



Михайлов Алексей Евгеньевич, студ. каф. авиационных двигателей по спец. «Авиационные двигатели и энергетические установки».



Хохлова Юлия Андреевна, студ. каф. авиадвигателей по спец. «Авиационные двигатели и энергетические установки».