

ВВЕДЕНИЕ

Силовая установка имеет большое значение для нормального функционирования летательного аппарата. Одним из ответственных моментов в работе силовой установки является обеспечение топливом двигателя на всех требуемых высотах полета. Умение рассчитать топливную систему при проектировании летательного аппарата необходимо для специалиста, работающего в области технологии производства силовых установок летательных аппаратов.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является приобретение студентами навыков по расчету всасывающего трубопровода при подаче топлива к основному топливному насосу для номинального и форсажного режимов полета с продольной перегрузкой и без нее на различных высотах.

2. ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАНИЯ И ЗАДАЧИ

Для охлаждения бортовых систем в качестве хладагента часто используется топливо двигателей. С этой целью в топливную систему ставят специальные радиаторы - теплообменники. На рис.2.1 представлен вариант такой системы.

На схеме топливо из расходного бака (1) через разъемный клапан (2) подается к подкачивающему топливному насосу (3). Насосом топливо засасывается в первый участок магистрали от насоса (3) до точки А длиной l_1 при температуре $t_1^{\circ}\text{C}$. На этом участке стоят: обратный клапан (4) и топливный фильтр (5).

Между точками А и Б расположен параллельный участок, который состоит из линии теплообменника (7) и линии кольцевания.

Линия теплообменника включает дроссель регулируемого сопротивления (6) и радиатор теплообменника (7). Длина участка от точки А по теплообменнику (7) мала, от теплообменника до точки Б - l_2 . За теплообменником температура топлива повышается до $t_2^{\circ}\text{C}$.

На линии кольцевания стоит дроссель переменного сопротивления (9), ее длина - l_3 .

От точки Б топливо через дроссель переменного сопротивления (12), перекрывной (пожарный) клапан (8), расходомер (11), фильтр

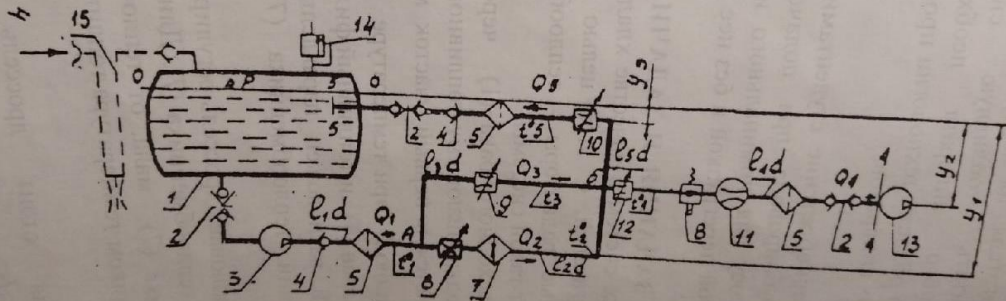


Рис. 2.1. Схема топливной системы
 1. Расходный бак; 2. Разъемный клапан; 3. Подкачивающий топливный насос; 4. Обратный клапан; 5. Топливный фильтр; 6, 9, 10, 12. Дроссели регулируемого сопротивления; 7. Теплообменник; 8. Перекрывной клапан; 11. Расходомер; 13. Основной топливный насос; 14. Клапан максимального давления; 15. Система наддува.

(5) и разъемный клапан (2) подводится к основному топливному насосу (13). Длина этого участка - l_4 .

Излишек топлива из системы по сливной магистрали, начинающейся от точки Б, возвращается в расходный бак (1). На ней стоят: дроссель переменного сопротивления (10), фильтр (5), обратный клапан (4) и клапан разьема (2). Длина сливной магистрали - l_5 .

Все участки системы имеют одинаковый диаметр d .

В точке Б происходит смешение нагретого в теплообменнике топлива с холодным, подводимым по линии кольцевания. За точкой Б температура топлива равна $t_4^{\circ}\text{C}$, определяемая по формуле:

$$t_4 = \frac{t_1 Q_3 + t_2 Q_2}{Q_2 + Q_3} \quad (2.1)$$

где Q_2 - расход в линии теплообменника (7);

Q_3 - подача топлива по линии кольцевания.

Система наддува (15) и клапан максимального давления (14) поддерживают в расходном баке (1) постоянное во время полета избыточное давление ΔP . Участки системы относительно поверхности топлива в баке (1) заглублены на расстоянии y_1, y_2, y_3 .

Потребная подача топлива к двигателю Q_h на высоте полета h км связана с расходом у земли на номинальном режиме Q_0 соотношением:

$$Q_h = Q_0 e^{-0,135h} \quad (2.2)$$

На форсажном режиме потребный расход топлива возрастает на $\varphi\%$ по сравнению с номинальным, а полет происходит с продольной перегрузкой $n_x = a/g$.

Минимально допустимое давление на входе в основной топливной насос (13) равно P_{min} .

Для исходной топливной системы требуется:

1. Методом последовательных приближений найти диаметр трубопровода системы при условии нормальной ее работы у земли на форсажном режиме полета с продольной перегрузкой n_x .

Температура топлива равна $t_1^{\circ}\text{C}$, дроссели (6) и (10) - закрыты, коэффициенты сопротивления дросселей (9) и (12) равны нулю.

2. Найти зависимость от высоты полета h величины коэффициентов сопротивления дросселей (6), (9), (10), (12):

$$\zeta_6 = f_1(h), \quad \zeta_9 = f_2(h), \\ \zeta_{10} = f_3(h), \quad \zeta_{12} = f_4(h), \text{ обеспечивающие}$$

постоянное в полете значение расхода Q_2 в линии теплообменника (7) и потребную подачу топлива к двигателю Q_H :

- а) при номинальном расходе топлива;
- б) на форсажном режиме с перегрузкой n_x .

3. Определить режим работы подкачивающего бортового насоса (3) - новое число оборотов колеса n_1 , обеспечивающий высотность топливной системы не менее h_{max} при номинальном расходе топлива.

4. Рассчитать высотность системы при полете на форсажном режиме с перегрузкой n_x : h_ϕ .

Насос (3) работает при числе оборотов n_0 .

5. Найти новое число оборотов n_2 насоса (3) так, чтобы высотность системы на форсажном режиме увеличилась до h_{max} .

6. Определить предельную высоту полета при номинальной подаче топлива с температурой $t_1^\circ\text{C}$ в случае отказа насоса (3): $h_{оп}$.

Дроссели (6) и (10) закрыты; коэффициенты сопротивления дросселей (9) и (12) равны нулю. Насос (3) считать местным сопротивлением с коэффициентом ζ_3 .

7. Найти давление перед перекрывным клапаном (8) и за ним при его срабатывании на форсажном режиме у земли.

8. Рассчитать мощность, потребляемую насосом (3)

- а) при номинальном режиме у земли;
- б) на форсажной подаче топлива и продольной перегрузке на высоте h_ϕ .

Необходимые данные для расчетов по различным вариантам выдаются руководителем курсовой работы.

3. АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

3.1. Для того, чтобы методом последовательных приближений найти диаметр трубопроводов системы при условии нормальной ее работы у земли на форсажном режиме полета с продольной перегрузкой n_x , составим уравнение Бернулли для сечения 0-0 и 4-4, полагая, что температура топлива - $t_1^\circ\text{C}$, дроссели (6) и (10) (рис.2.1) закрыты, а дроссели (9) и (12) полностью открыты, т.е. $\zeta_9 = \zeta_{12} = 0$. При этом будем считать, что, ввиду постоянства диаметров трубопроводов, скорость во всех его сечениях постоянна и равна V .

$$\frac{P_0}{\gamma} = \alpha \frac{V^2}{2g} - y_2 + \frac{P_4}{\gamma} - H_0^\phi + \sum h_{0-4} + H_{ин}, \quad \dots \quad (3.1.1)$$

где P_0 - давление на свободной поверхности 0-0 расходного бака, н/м²,
равное $P_0 = P_{ат} + \Delta P$; (3.1.2)

$P_{ат}$ - атмосферное давление, н/м²; ΔP - избыточное давление над
зеркалом топлива, н/м² (табл.3);

α - коэффициент неравномерности распределения скоростей, равный
для ламинарного режима 2, для турбулентного 1, причем режим
течения определяется по числу Рейнольдса

$$Re = V d / \nu \text{ или } Re = 4Q_0^\Phi / \pi d \nu; \quad (3.1.3)$$

ν - коэффициент кинематической вязкости при t_1 (табл. 6); если
 $Re \leq 2300$, то течение ламинарное, если же $Re > 2300$ течение
принимается турбулентным; $\gamma = \rho g$ - объемный вес жидкости при t_1 °С,
н/м³ (табл.7); g - ускорение силы земного притяжения, м/с²; y_2 -
геометрическая высота (рис. 2.1); P_4 - давление перед входом в
основной насос, равное $P_4 = P_{мин}$ (табл.3); H_0^Φ - напор создаваемый
насосом подкачки на форсажном режиме, определяется с графика
 $H_{н.п.} = f(Q_0^\Phi)$ при $n_0 = 6000$ об/мин (табл.4), при этом строится
график на миллиметровке; Q_0^Φ - расход на форсажном режиме у земли,
равный $Q_0^\Phi = Q_0 (1 + \phi/100)$; (3.1.4)

Σh_{0-4} - сумма гидравлических потерь на участке 0-4, определяется
как

$$\Sigma h_{0-4} = (2\zeta_2 + \zeta_4 + 2\zeta_5 + \zeta_7 + \zeta_8 + \zeta_{11}) \frac{V^2}{2g} + \lambda \frac{\Sigma l}{d} \frac{V^2}{2g}; \quad (3.1.5)$$

ζ - коэффициенты местных сопротивлений (табл.3);

λ - коэффициент сопротивления трения, определяемый в зависимости
от режима течения, если $Re \leq 2300$ то течение ламинарное и

$$\lambda = 64 / Re; \quad (3.1.6)$$

если $Re > 2300$, то течение турбулентное и

$$\lambda = 1 / (1,8 \lg Re - 1,5)^2; \quad (3.1.7)$$

полагая при этом, что в системе используются гладкие трубы;

$$\Sigma l = l_1 + l_3 + l_4; \quad (3.1.8) \text{ (табл.2)}$$

$$H_{ин} - \text{инерционный напор, равный } H_{ин} = n_x \Sigma l'; \quad (3.1.9)$$

$n_x = a/g$ - перегрузка (табл.2);

$$\Sigma l' = l_1 + l_3 + l_4 - y_1 + y_2; \quad (3.1.10) \text{ (табл.2)}$$

$$\sum \zeta = 2\zeta_2 + \zeta_4 + 2\zeta_5 + \zeta_7 + \zeta_8 + \zeta_{11} \dots \dots \dots (3.1.11)$$

С учетом (3.2), (3.5), (3.8), (3.9), (3.10), (3.11) уравнение (3.1.1) запишется

$$\frac{P_{ат} + \Delta P}{\gamma} = \frac{P_{min}}{\gamma} - y_2 - H_0^\phi + n_x \sum l' + \frac{V^2}{2g} (\alpha + \sum \zeta + \lambda \frac{\sum l}{d}) (3.1.12)$$

Величину скорости выразим через уравнение объемного расхода

$$V = \frac{4Q_0^\phi}{\pi d^2} \dots \dots \dots (3.1.13)$$

В уравнение (3.1.12) входят известные величины, которые мы обозначим через некоторый напор H , равный

$$H = \frac{P_{ат} + \Delta P - P_{min}}{\gamma} + y_2 + H_0^\phi - n_x \sum l' \dots \dots \dots (3.1.14)$$

Пусть далее $(\alpha + \sum \zeta + \lambda \frac{\sum l}{d}) = \zeta^* \dots \dots \dots (3.1.15)$

и тогда, учитывая (3.1.13), (3.1.14), (3.1.15), уравнение (3.1.12) запишем так

$$H = \frac{0,0827(Q_0^\phi)^2}{d^4} \zeta^* \dots \dots \dots (3.1.16)$$

Уравнение (3.1.16) решаем методом последовательных приближений. Сначала определяем H по уравнению (3.1.14) с учетом отмеченных выше соображений; затем задаемся в первом приближении $\alpha=1$, $\lambda=0$, находим ζ^* по уравнению (3.1.15), и решаем (3.1.16) относительно диаметра трубопровода; далее по найденному d определяем число Рейнольдса по уравнению (3.1.3); находим режим течения, α , определяем λ в зависимости от Re по формулам (3.1.6), (3.1.7); затем подставляем найденное значение λ во втором приближении и диаметра в первом приближении в формулу (3.1.15), находим ζ^* во втором приближении и решаем снова (3.1.16) относительно диаметра трубопровода. При этом оказывается достаточным 3-4 приближений для отыскания диаметра трубопровода с точностью до 1%. Окончательно округляем диаметр до ближайшего большего по стандарту.

3.2. Для того, чтобы найти зависимости от высоты полета величин коэффициентов сопротивления дросселей (6), (9), (10), (12):

$$\zeta_6 = f_1(h); \zeta_9 = f_2(h); \zeta_{10} = f_3(h); \zeta_{12} = f_4(h),$$

обеспечивающих постоянное в полете значение расхода Q_2 в линии теплообменника (7) и потребную подачу топлива к двигателю Q_h при форсажном и номинальном расходе топлива, составим уравнение Бернулли для сечений (0-А), (А-Б)₂ (со стороны линии теплообменника), (А-Б)₃ (со стороны линии кольцевания) и (Б-4). При этом без большой погрешности считаем, что $Q_0 = const$ и не зависит от температуры топлива

$$(0-A) \quad P_0 = P_A + \alpha_{A1} \frac{\rho_1 V_{A1}^2}{2} - \gamma_1 \gamma_1 + \Sigma P_{0-A} - P_{н.л.}^h + P_{ин(0-A)} \quad (3.2.1)$$

$$(A-B)_2 \quad P_{A2} + \alpha_{A2} \frac{\rho_2 V_{A2}^2}{2} = P_{B2} + \alpha_{B2} \frac{\rho_2 V_{B2}^2}{2} + (\gamma_1 - \gamma_2) \gamma_2 + \Sigma P_2 + P_{ин2} \quad (3.2.2)$$

$$(A-B)_3 \quad P_{A3} + \alpha_{A3} \frac{\rho_3 V_{A3}^2}{2} = P_{B3} + \alpha_{B3} \frac{\rho_3 V_{B3}^2}{2} + (\gamma_1 - \gamma_2) \gamma_3 + \Sigma P_3 + P_{ин3} \quad (3.2.3)$$

$$(B-4) \quad P_{B4} + \alpha_{B4} \frac{\rho_4 V_{B4}^2}{2} = P_4 + \alpha_4 \frac{\rho_4 V_4^2}{2} + \Sigma P_{B-4} + P_{ин4} \quad (3.2.4)$$

Здесь с некоторыми допущениями можно принять

$$P_A = P_{A2} = P_{A3}; \quad P_B = P_{B2} = P_{B3} = P_{B4}; \quad V_{A1} = V_1; \\ V_{A3} = V_{B3}; \quad V_{A2} = V_{B2}; \quad V_{B4} = V_4.$$

Падение давления на участках 0-А, А-Б, Б-4 согласно (3.2.1), (3.2.2), (3.2.3), (3.2.4)

$$P_0 - P_A = \alpha_1 \frac{\rho_1 V_1^2}{2} - \gamma_1 \gamma_1 + \Sigma P_{0-A} - P_{н.л.}^h + P_{ин(0-A)};$$

$$P_{A-B} = (y_1 - y_2)\gamma_2 + \Sigma P_2 + P_{ин2} = (y_1 - y_2)\gamma_3 + \Sigma P_3 + P_{ин3}$$

$$P_B - P_4 = \Sigma P_{B-4} + P_{ин4}$$

Падение давления на участке 0-4 равно

$$P_0 - P_4 = (P_0 - P_A) + (P_A - P_B) + (P_B - P_4) =$$

$$= \alpha_1 \frac{\rho_1 V_1^2}{2} - y_1 \gamma_1 + \Sigma P_{0-A} - P_{н.п.}^h + P_{ин(0-A)} + \Sigma P_{B-4} + P_{ин4} + (P_A - P_B) \quad (3.2.5)$$

$$V_1 = \frac{4Q_1}{\pi d^2} \quad (3.2.6)$$

$$\Sigma P_{0-A} = \frac{\rho_1 V_2^2}{2} (\zeta_2 + \zeta_4 + \zeta_5 + \lambda_1 \frac{l_1}{d}) \quad (3.2.7)$$

$$P_{ин(0-A)} = n_x \gamma_1 (l_1 - y_1) \quad (3.2.8)$$

$$\Sigma P_{B-4} = \frac{\rho_4 V_4^2}{2} (\zeta_{12} + \zeta_8 + \zeta_{11} + \zeta_5 + \zeta_2 + \lambda_4 \frac{l_4}{d}) \quad (3.2.9)$$

$$P_{ин4} = n_x l_4 \gamma_4 \quad (3.2.10)$$

$$\Sigma P_3 = \frac{\rho_3 V_3^2}{2} (\zeta_9 + \lambda_3 \frac{l_3}{d}) \quad (3.2.11)$$

$$P_{ин3} = n_x (l_3 - y_1 + y_2) \gamma_3 \quad (3.2.12); \quad V_3 = \frac{4Q_3}{\pi d^2}; \quad V_4 = \frac{4Q_4}{\pi d^2};$$

$$\Sigma P_2 = \frac{\rho_2 V_2^2}{2} (\zeta_6 + \zeta_7 + \lambda_2 \frac{l_2}{d}) \quad (3.2.13); \quad V_2 = \frac{4Q_2}{\pi d^2};$$

$$P_{ин2} = n_x \gamma_2 (l_2 - y_1 + y_2) \quad (3.2.14); \quad P_4 = P_{min};$$

$$P_0 = P_{ат} + \Delta P; \quad P_{ин}^h = H_{ин}^h \gamma_1 \quad (3.2.15) \quad \text{и далее}$$

$$P_A - P_B = (y_1 - y_2) \gamma_3 + \frac{\rho_3 V_3^2}{2} (\zeta_9 + \lambda_3 \frac{l_3}{d}) + n_x \gamma_3 (l_3 - y_1 + y_2) \quad (3.2.16)$$

$$P_A - P_B = \gamma_2 (y_1 - y_2) + \frac{\rho_2 V_2^2}{2} (\zeta_6 + \zeta_7 + \lambda_2 \frac{l_2}{d}) + n_x \gamma_2 (l_2 - y_1 + y_2) \quad (3.2.17)$$

Индексы при γ, ρ, v, V, Q соответствуют температурам t_1, t_2, t_3, t_4 .

Далее решают уравнения (3.2.5), (3.2.16), (3.2.17) относительно ζ_9 и ζ_6 для различных высот, начиная с $h=0$ с учетом уравнений (3.2.6) - (3.2.15) до критической высоты $h_{кр}$, и строятся графики зависимости $\zeta_6 = f_1(h)$ и $\zeta_9 = f_2(h)$.

Критическая высота полета делит работу системы на два случая.

1-ый случай до $h_{кр}$ и 2-ой-выше $h_{кр}$.

Критическую высоту полета определим из соотношения

$$Q_h = Q_0 e^{-0,135h} \quad \dots \quad (3.2.18)$$

$$Q_h = Q_2 \quad \text{или} \quad -0,135h = \ln \frac{Q_2}{Q_0}$$

Для номинального режима

$$h_{кр} = - \frac{\ln Q_2 / Q_0}{0,135} \quad \dots \quad (3.2.19)$$

для форсажного режима

$$h_{кр} = - \frac{\ln \frac{Q_2}{Q_0} \phi}{0,135} \quad \dots \quad (3.2.20)$$

6)

2.17.

3.2.2 Рассмотрим 1-ый случай, когда $Q_2 \leq Q_4^h$ (расход топлива на высоте h перед входом в основной насос). В этом случае дроссель (10) перекрыт, дроссель (12) полностью открыт; часть топлива проходит через дроссель (9) ($\zeta_{12} = 0$). Этот случай имеет место до тех пор пока Q_2 не станет равным Q_4^h . Задаемся рядом высот, начиная с $h=0$ до $h_{кр}$ (не менее 3-х), и для каждой высота определяем ζ_9 из уравнений (3.2.5) и (3.2.16). Для решения этих уравнений необходимо определить $\gamma, \nu, V, Re, \alpha, \lambda, P_{ин}, P_{ин.п.}^h, P_{ат}, Q^h$ для соответствующих температур топлива с учетом рассмотренных ранее соображений и зависимостей. По найденному значению ζ_9 на заданной высоте решаем (3.2.16) и (3.2.17) относительно ζ_6 .

Далее строятся графики зависимости $\zeta_6 = f_1(h)$ и $\zeta_9 = f_2(h)$ до $h_{кр}$; решения проводятся для форсажного и номинального режимов. Для номинального режима инерционное давление $\Delta P_{ин}$ равно нулю.

3.2.3 2-ой. Случай

$$Q_2 > Q_4^h; Q_5 = Q_2 - Q_4^h.$$

В этом случае излишек топлива сливается в расходный бак по сливной магистрали l_5 , дроссель (9) полностью перекрыт, дроссели (10) и (12) функционируют.

К полученным ранее соотношениям добавим уравнение Бернулли для сечений Б-5

$$P_B + \alpha_{Б5} \frac{\rho_5 V_{Б5}^2}{2} = P_5 + \Sigma P_{Б-5} + (y_2 - y_3) \gamma_5 - P_{ин5}, \dots \quad (3.2.21)$$

где $P_5 = P_0 + \gamma_1 y_3$ (3.2.22); $P_{ин5} = n_x \gamma_5 (l_5 - y_2 + y_3); \dots \quad (3.2.23)$

$$\Sigma P_{Б-5} = \frac{\rho_5 V_5^2}{2} (\zeta_{10} + \zeta_5 + \zeta_4 + \zeta_2 + \lambda_5 \frac{l_5}{d}). \dots \quad (3.2.24)$$

Здесь $\gamma_5 = \gamma_2; \alpha_{Б5} = \alpha_5; V_{Б5} = V_5;$

$$P_B = P_5 - \alpha_5 \frac{\rho_5 V_5^2}{2} + \frac{\rho_5 V_5^2}{2} \zeta_{10} + \frac{\rho_5 V_5^2}{2} (\zeta_5 + \zeta_4 + \zeta_2 + \lambda_5 \frac{l_5}{d}) + (y_2 - y_3) \gamma_5 - n_x \gamma_5 (l_5 - y_2 + y_3). \dots \quad (3.2.25)$$

С учетом (3.2.4) имеет

$$P_B = \frac{\rho_4 V_4^2}{2} \zeta_{12} + \frac{\rho_4 V_4^2}{2} (\zeta_8 + \zeta_{11} + \zeta_5 + \zeta_2 + \lambda_4 \frac{l_4}{d}) + n_x \gamma_4 l_4 + P_4 \quad (3.2.26)$$

Здесь $P_4 = P_{\min}$

Из (3.2.1) и (3.2.2) с учетом (3.2.7), (3.2.8), (3.2.15), (3.2.11), (3.2.12)

получаем

$$P_B = P_0 + y_1 \gamma_1 - \frac{\rho_1 V_1^2}{2} (\alpha_1 + \zeta_2 + \zeta_4 + \zeta_5 + \lambda_1 \frac{l_1}{d}) + H_{\text{ин}}^h \gamma_1 - n_x \gamma_1 (l_1 - y_1) - (y_1 - y_2) \gamma_2 - \frac{\rho_2 V_2^2}{2} \zeta_6 - \frac{\rho_2 V_2^2}{2} (\zeta_7 + \lambda_2 \frac{l_2}{d}) - n_x \gamma_2 (l_2 - y_1 + y_2) \quad (3.2.27)$$

На критической высоте $Q_4^h = Q_2$; $Q_5 = 0$; $\zeta_{12} = 0$; $\zeta_9 = \infty$. Решая для этих условий (3.2.26) и (3.2.27), получим значение ζ_6 на критической высоте.

Дроссель переменного сопротивления ζ_6 обеспечивает постоянство расхода топлива Q_2 в линии теплообменника l_2 . Выше критической высоты $h_{\text{кр}}$ расход топлива в основном топливном насосе, определяемый соотношением (3.2.18), с увеличением высоты полета уменьшается. В связи с этим излишек топлива в количестве Q_5^h сливается в расходный бак (I) (рис. 2.1), при этом

$$Q_5^h = Q_2 - Q_4^h \quad (3.2.28)$$

В уравнениях (3.2.22), (3.2.25), (3.2.27) значение P_0 определяется по формуле (3.1.2).

Для решения поставленной задачи во втором случае мы имеем три уравнения (3.2.25), (3.2.26) и (3.2.27) и четыре неизвестных ζ_{10} , ζ_{12} , ζ_6 и P_B . Первоначально будем считать, что дроссель ζ_{12} полностью открыт ($\zeta_{12} = 0$) и, уменьшающийся с высотой полета, требуемый расход топлива перед основным насосом (13) поддерживается дросселем переменного сопротивления (10). В этом случае находим P_B из (3.2.26) при $\zeta_{12} = 0$, и решаем (3.2.25) и (3.2.27) относительно ζ_{10} и ζ_6 соответственно для различных высот (минимум 3 высоты). Если по расчетам получается отрицательное значение ζ_{10} , что не имеет физического смысла, то регулировку расхода перед насосом (13) осуществляем с помощью дросселя (12), при этом дроссель (10) полностью открыт ($\zeta_{10} = 0$). Тогда P_B находим из (3.2.25) при $\zeta_{10} = 0$ и решаем (3.2.26) и (3.2.27) относительно ζ_{12} и ζ_6 соответственно. Далее строим графики зависимости $\zeta_6 = f_1(h)$, $\zeta_{10} = f_3(h)$, и $\zeta_{12} = f_4(h)$. Рассмотренное решение задачи осуществляется для форсажного и номинального режимов полета.

3.3 Определим режим работы подкачивающего бортового насоса (3) (рис. 2.1) - новое число оборотов n_1 - обеспечивающий высоту топливной системы не менее h_{\max} при номинальном расходе топлива. Для этого случая уравнение Бернулли для сечений 0-0 и 4-4 принимает вид

$$P_0^{h_{\max}} = P_{\min} + \frac{\rho_1 V_1^2}{2} (\alpha_1 + \zeta_2 + \zeta_4 + \zeta_5 + \lambda_1 \frac{l_1}{d}) - \gamma_1 y_1 - H'_{н.п.} \gamma_1 + (y_1 - y_2) \gamma_2 + \frac{\rho_2 V_2^2}{2} (\zeta_6 + \zeta_7 + \lambda_2 \frac{l_2}{d}) + \frac{\rho_4 V_4^2}{2} (\zeta_{12} + \zeta_8 + \zeta_{11} + \zeta_5 + \zeta_2 + \lambda_4 \frac{l_4}{d}) \quad (3.3.1)$$

Здесь $P_0^{h_{\max}} = P_{ат}^{h_{\max}} + \Delta P$; $V_1 = 4Q_0/\pi d^2$; $V_4 = \frac{4Q_4}{\pi d^2}^{h_{\max}}$;

$$Q_1 = Q_0$$

$Q_4^{h_{\max}}$ определяется по уравнению (3.2.18) при h_{\max} ;

ζ_6 принимаем при $h = h_{\max}$ с ранее построенного графика $\zeta_6 = f_1(h)$;

ζ_{12} принимаем при $h = h_{\max}$ с ранее построенного графика $\zeta_{12} = f_4(h)$.

Искомой величиной в уравнении (3.3.1) является напор создаваемый насосом подкачки $H'_{н.п.}$ при h_{\max} . Определяем $H'_{н.п.}$ из (3.3.1), и при $Q_1 = Q_0$ перестроим характеристику насоса для подобного режима работы, определив новое число оборотов n_1 . При этом считаем, что кривая потребного напора трубопровода совпадает с его характеристикой и, следовательно, с одной из парабол подобного режима работы насоса.

$$\frac{H'_{н.п.}}{Q_1^2} = const_1 = \frac{H'_0}{Q_0^2} \dots \dots \dots (3.3.2)$$

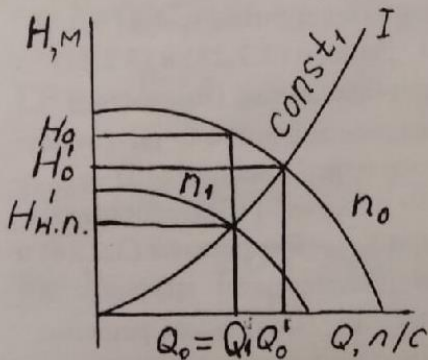


Рис. 3.3.1

Далее определив по (3.3.2) $const_1$, задаемся рядом значений Q , и находим H при $const_1$ из (3.3.2), например, при $Q = 1 \text{ л/с}$,

$$H = Q^2 const_1 = 1 const_1;$$

$$Q = 2 \text{ л/с}, H = 2^2 const_1;$$

$$Q = 3 \text{ л/с}, H = 3^2 const_1;$$

и т.д.,

и строим параболу подобного режима работы насоса (рис. 3.3.1).
 Затем с рис. 3.3.1 находим в точке пересечения параболы I с
 характеристикой насоса подкачки при n_0 значения H_0 и Q_0 . Далее
 определяем новое число оборотов насоса n_1 при $H'_{н.п.}$ и Q'_1 по формуле

$$n_1 = n_0 \frac{Q'_1}{Q_0} \quad (3.3.3)$$

Определив n_1 , пересчитываем характеристику насоса с n_0 на n_1 по
 формулам

$$\frac{H'_0}{H'_1} = \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \quad (3.3.4); \quad \frac{Q'_0}{Q'_1} = \frac{n_0}{n_1} \quad (3.3.5)$$

Значения H'_0 и Q'_0 в формуле (3.3.5) снимаем с имеющейся
 характеристики насоса при n_0 , и, определив H'_1 и Q'_1 , строим новую
 характеристику насоса при n_1 .

3.4 Определим высотность системы h_Φ при полете на форсажном
 режиме с перегрузкой n_x . Насос работает при числе оборотов n_0 . Согласно
 (3.2.27) можно записать, обозначив P_B через $P_{Брасп}$ (некое располагаемое
 давление в точке Б).

$$P_{Брасп} = P_{ат} + \Delta P + \gamma_1 y_1 - \frac{\rho_1 V_1^2}{2} (\alpha_1 + \zeta_2 + \zeta_4 + \zeta_5 + \lambda_1 \frac{l_1}{d}) + H_{н.п.}^h \gamma_1 -$$

$$- n_x \gamma_1 (l_1 - y_1) - (y_1 - y_2) \gamma_2 - \frac{\rho_2 V_2^2}{2} (\zeta_6 + \zeta_7 + \lambda_2 \frac{l_2}{d}) -$$

$$- n_x \gamma_2 (l_2 - y_1 + y_2) \quad (3.4.1)$$

С учетом (3.2.4), (3.2.9), (3.2.10) можно записать, обозначив P_B
 через $P_{Бпотр}$.

$$P_{Бпотр} = P_{min} + \frac{\rho_4 V_4^2}{2} (\zeta_{12} + \zeta_8 + \zeta_{11} + \zeta_5 + \zeta_2 + \lambda_4 \frac{l_4}{d}) + n_x \gamma_4 l_4 \quad (3.4.2)$$

Для различных высот с помощью (3.4.1) и (3.4.2) строятся
 графики зависимости $P_{Брасп} = f_1(h)$ и $P_{Бпотр} = f_2(h)$.

При этом ζ_6 и ζ_{12} принимаются равными $\zeta_6 = 0; \zeta_{12} = 0$;
 $\zeta_9 = f(h)$ работает, и $V_4 = V_2$. В точке пересечения $f_1(h)$ и $f_2(h)$
 определится высотность системы h_Φ .

3.5 Найдем новое число оборотов n_2 насоса (3) (рис.2.1) так, чтобы высотность системы на форсажном режиме увеличилась до h_{\max} . В этом случае высотность системы определяется также как в разделе 3.3, но с учетом форсажности режима.

Для этого случая уравнение Бернулли имеет вид:

$$P_0^{h_{\max}} = P_{\min} + \frac{\rho_1 V_1^2}{2} (\alpha_1 + \zeta_2 + \zeta_4 + \zeta_5 + \lambda_1 \frac{l_1}{d}) - \gamma_1 y_1 - H_{\text{нн}}'' \gamma_1 +$$

$$+ n_x \gamma_1 (l_1 - y_1) + (y_1 - y_2) \gamma_2 + \frac{\rho_2 V_2^2}{2} (\zeta_6 + \zeta_7 + \lambda_2 \frac{l_2}{d}) + n_x \gamma_2 (l_2 - y_1 + y_2) +$$

$$\frac{\rho_4 V_4^2}{2} (\zeta_{12} + \zeta_8 + \zeta_{11} + \zeta_5 + \zeta_2 + \lambda_4 \frac{l_4}{d}) + n_x \gamma_4 l_4 \dots \dots \dots (3.5.1)$$

Здесь $Q_1 = Q_0^\Phi = Q_i^\Phi$

ζ_6 и ζ_{12} принимаем по ранее полученным данным для форсажного режима.

Далее определяем $H_{\text{н.п.}}''$ из уравнения (3.5.1), определяем $const_1'$ равную

$$Const_1' = H_{\text{н.п.}}'' / (Q_1^\Phi)^2 = H_0'' / (Q_0^\Phi)^2 \dots \dots \dots (3.5.2)$$

Далее, задаваясь рядом значений Q , находим H при $const_1'$ из (3.5.2) так, как это делалось в разделе 3.3. Затем строим параболу подобного режима работы насоса при $const_1'$ (рис.3.5.1)

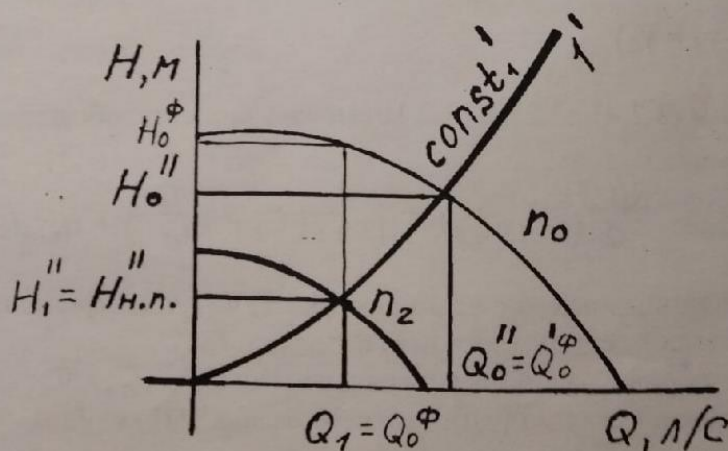


Рис. 3.5.1

С рис.3.5.1 находим в точке пересечения параболы I^1 с характеристикой насоса подкачки при n_0 значения H_0'' и Q_0'' , затем определяем новое число оборотов насоса n_2 при $H_{н.п.}''$, Q_0'' и Q_1'' по формуле

$$n_2 = \frac{Q_1}{Q_0''} n_0, \quad (3.5.2)$$

и перестраиваем характеристику насоса так, как указано в п. 3.3.

3.6. Определяем предельную высоту полета $h_{от}$ при номинальной подаче топлива с температурой t_1^0 С в случае отказа насоса (3). Дроссели (6) и (10) закрыты; $\zeta_9 = \zeta_{12} = 0$. Насос (3) считать местным сопротивлением с коэффициентом ζ_3 . Уравнение Бернулли для сечений 0-4 запишется так в этом случае:

$$P_{ат} + \Delta P - P_{мин} + y_2 \gamma_1 = \frac{\rho_1 V_1^2}{2} (\alpha + 2\zeta_2 + \zeta_3 + \zeta_4 + 2\zeta_5 + \zeta_8 + \zeta_{11} + (l_1 + l_3 + l_4) \frac{\lambda}{d})$$

пусть $P_{ат} + \Delta P - P_{мин} + y_2 \gamma_1 = P_{расп}$, а

$$\frac{\rho_1 V_1^2}{2} (\alpha + 2\zeta_2 + \zeta_3 + \zeta_4 + 2\zeta_5 + \zeta_8 + \zeta_{11} + (l_1 + l_3 + l_4) \frac{\lambda}{d}) = P_{потр}.$$

Задаемся рядом значений h и строим графики зависимости $P_{расп} = f_1(h)$ и $P_{потр} = f_2(h)$. В точке пересечения кривых $f_1(h)$ и $f_2(h)$ находим $h_{от}$.

3.7. Определим давление перед перекрывным клапаном (8) и за ним при его срабатывании на форсажном режиме у земли.

В этом случае дроссели (6) и (10) закрыты, коэффициенты сопротивления дросселей (9) и (12) равны нулю.

Давление перед перекрывным клапаном (8) можно принять с некоторым приближением равным давлению P_B в точке Б, которое можно определить из уравнения Бернулли, составленное для сечений Б-4.

$$P_{к} = P_B = P_{мин} + n_x l_4 \gamma_4 + \frac{\rho V^2}{2} (\zeta_8 + \zeta_{11} + \zeta_5 + \zeta_2) \quad (3.7.1)$$

Давление за клапаном будет

$$P_{з.к.} = P_B - \frac{\rho V^2}{2} \zeta_8 \quad (3.7.2)$$

При внезапном закрытии клапана давление перед ним будет P'_k , а за ним $P'_{зк}$, равные

$$P'_k = P_k + \Delta P_r \quad (3.7.3), \quad P'_{зк} = P_{зк} - \Delta P_r, \quad (3.7.4)$$

где ΔP_r - гидравлический удар, равный

$$\Delta P_r = \rho V a, \quad \text{н/м}^2 \quad (3.7.5)$$

Здесь ρ - плотность среды (при $t = t_1$), кг/м^3

V - скорость движения топлива, равная

$$V = 4Q_o^\Phi / \pi d^2, \quad \text{м/с}; \quad (3.7.6)$$

a - скорость звука в гидросистеме, определяется из

$$a = \frac{\sqrt{E_{ж} / \rho_{ж}}}{\sqrt{1 + \frac{E_{ж} d}{E_w \delta}}}, \quad \text{м/с}, \quad (3.7.7)$$

где $E_{ж}$ и E_w - модули упругости жидкости и материала стенки соответственно, н/м^2 ; $\rho_{ж}$ - плотность жидкости, кг/м^3 ; d - внутренний диаметр трубопровода, м; δ - толщина стенки трубопровода, м.

Решая приведенные соотношения (3.7.3) и (3.7.4) с учетом (3.7.1), (3.7.2), (3.7.5) - (3.7.7), получим искомые значения давления перед клапаном (8) и за ним при его срабатывании на форсажном режиме у земли.

Толщину стенки трубопровода можно уточнить по формуле

$$\delta = \frac{P'_k d}{[\sigma]}, \quad \text{мм}, \quad (3.7.8)$$

где d - диаметр трубопровода, мм;

P'_k - давление перед клапаном при внезапном закрытии, н/м^2 ;

$[\sigma]$ - допускаемое напряжение растяжения материала стенки трубопровода, н/м^2 .

3.8 Определим мощность, потребляемую насосом (3).

3.8.1. При номинальном режиме у земли.

Мощность определяется по уравнению

$$N = \frac{Q \gamma H_{н.п.}}{\eta}, \quad \text{Вт}, \quad (3.8.1)$$

где Q , $\text{м}^3/\text{с}$; γ , н/м^3 ; $H_{н.п.}$, м.

Для номинального режима $Q=Q_0$ напор, создаваемый насосом подкачки (3), определяется с графика $H_{н.п.}=f(Q_0)$ при $Q=Q_0$, а коэффициент полезного действия η определяется с графика

$$\eta = f_{\eta}(Q_0).$$

3.8.2. На форсажной подаче топлива и продольной перегрузке на высоте h_{ϕ} мощность определяется по уравнению (3.8.1), где расход Q равен его значению Q_{ϕ} на высоте h_{ϕ} .

$$Q_{\phi} = Q_0 e^{-0.135 h_{\phi}}$$

$H_{н.п.}$ определяется с графика $H_{н.п.}=f(Q_0)$ при Q_{ϕ} .

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица

Условный индекс	Марка топлива	$E_{ж}$	Материал трубопровода	$E_{тр}$	δ	ζ_z
		кг/см ²		кг/см ²	мм	
I	T-1	13000	Ст	$2,1 \cdot 10^6$	0,4	2,5
II	ТС-1	13100	АМц	$1,2 \cdot 10^6$	0,8	3,0
III	T-5	13000	АМг	$0,8 \cdot 10^6$	1,0	2,0
IV	T-6	13300	Д16	$1,7 \cdot 10^6$	0,6	3,5

Таблица № 2

Условный индекс	У ₁	У ₂	У ₃
Условный индекс	У ₄	У ₅	У ₆
Условный индекс	У ₇	У ₈	У ₉
Условный индекс	У ₁₀	У ₁₁	У ₁₂
Условный индекс	У ₁₃	У ₁₄	У ₁₅
Условный индекс	У ₁₆	У ₁₇	У ₁₈
Условный индекс	У ₁₉	У ₂₀	У ₂₁
Условный индекс	У ₂₂	У ₂₃	У ₂₄
Условный индекс	У ₂₅	У ₂₆	У ₂₇
Условный индекс	У ₂₈	У ₂₉	У ₃₀

Таблица № 2

Условны я индекс	l_1	l_2	l_3	l_4	l_5	Q_0	Q_2	φ	n_s	t_1	t_2	Y_1	Y_2	Y_3
	м	м	м	м	м	л/сек	л/сек	%		°С	°С	м	м	м
А	4,5	6,0	8,5	6,0	9,5	1,0	0,8	70	0,30	-20	70	2,0	1,5	0,3
Б	5,5	6,5	9,0	6,5	10,0	1,2	1,0	80	0,35	-15	75	2,1	1,6	0,4
В	6,5	7,0	9,5	7,0	10,5	1,4	1,2	90	0,40	-10	80	2,2	1,7	0,5
Г	7,5	7,5	10,0	7,5	11,0	1,6	1,4	100	0,60	-5	85	2,3	1,8	0,6
Д	8,5	2,5	4,5	8,0	11,5	1,8	1,6	80	0,40	0	90	2,4	1,9	0,7
Е	4,0	3,0	5,0	3,5	7,0	2,0	1,8	85	0,45	+5	95	2,5	2,0	0,8
Ж	5,0	3,5	5,5	4,0	7,5	2,1	1,5	110	0,65	+10	100	1,5	1,1	0,3
З	6,0	4,0	6,0	4,5	3,0	2,3	1,7	100	0,60	+15	120	1,7	1,2	0,4
И	7,0	4,5	6,5	5,0	8,5	2,5	1,9	90	0,55	-20	85	1,9	1,3	0,5
К	8,0	5,0	7,0	5,5	9,0	1,7	1,4	80	0,50	-15	90	2,1	1,4	0,6
Л	4,5	3,5	5,0	6,0	9,5	1,9	1,6	70	0,45	-10	95	2,3	1,5	0,7
М	5,5	4,5	5,5	6,5	10,0	2,1	1,8	80	0,50	-5	100	1,2	0,9	0,5
Н	6,5	5,5	6,0	7,0	10,5	2,5	2,0	90	0,55	0	110	1,4	0,8	0,4
О	7,5	4,0	6,5	3,5	8,5	2,6	2,2	60	0,45	+5	120	1,6	1,0	0,3
П	8,5	5,0	7,0	4,0	9,0	1,7	1,3	100	0,60	+10	130	1,8	1,1	0,4
Р	4,0	3,5	5,0	4,5	9,5	1,8	1,5	90	0,45	+15	140	1,3	0,7	0,3
С	5,0	4,5	6,0	5,5	10,0	1,9	1,7	80	0,40	+20	100	1,5	0,9	0,5

Таблица №

Условный индекс	ζ_2	ζ_4	ζ_5	ζ_7	ζ_8	ζ_{11}	h_{\max} км	ΔP н/м ²	P_{\min} н/м ²
1	2,5	1,5	0,8	2,8	2,4	1,3	25	$2,5 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^4$
2	2,4	1,7	0,9	2,9	2,2	1,7	24	$2,6 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^4$
3	2,3	1,9	1,0	3,1	2,3	1,5	23	$2,7 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^4$
4	2,2	2,1	1,1	3,0	2,4	1,6	22	$2,8 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^4$
5	2,1	1,5	1,2	2,9	2,5	1,7	21	$2,9 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^4$
6	2,0	1,6	1,3	2,8	2,6	1,8	20	$3,0 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4$
7	1,9	1,7	1,4	2,7	2,5	1,9	28	$3,1 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^4$
8	1,8	1,8	1,5	2,6	2,4	1,5	27	$3,2 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^4$
9	1,7	1,4	1,6	2,5	2,3	1,6	26	$2,8 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^4$
10	1,6	1,5	1,7	2,4	2,2	1,7	25	$2,6 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^4$
11	1,5	1,7	0,8	3,1	2,0	1,8	24	$3,0 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$
12	2,5	1,6	0,9	3,0	2,1	1,6	23	$2,7 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^4$
13	2,4	1,8	1,0	2,9	1,9	1,5	22	$2,6 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^4$
14	2,3	1,9	1,1	2,8	1,8	1,4	20	$2,5 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$
15	2,2	1,3	1,2	2,7	1,7	1,3	19	$2,0 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^4$
16	2,1	1,4	1,3	2,6	1,6	2,2	18	$1,9 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^4$
17	2,0	1,7	1,4	3,5	2,5	1,3	25	$2,8 \cdot 10^4$	$2,5 \cdot 10^4$
18	1,9	1,8	1,5	3,0	2,4	1,1	24	$2,7 \cdot 10^4$	$2,9 \cdot 10^4$
19	1,8	2,0	1,6	2,9	2,9	1,6	23	$2,6 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^4$
20	1,7	2,3	1,7	2,8	2,2	1,4	22	$2,5 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^4$

Таблица № 4

Характеристика насоса подкачки при $n_0 = 6000$ об/мин

Q	л/сек	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3,0	3,5
H	м	10	10,7	10,6	10,1	9,3	8,0	6,7	5,2
η	%	0	39	58	72	78	77	74	67

Таблица стандартной атмосферы (по ГОСТ 4401-64)

Таблица №

Высота h м	Температура T_h °К	$\frac{T_h}{T_0}$	Давление P_h кг/м ²	$\frac{P_h}{P_0}$	Плотность ρ_h кг-сек ³ /м ³	$\Delta = \frac{\rho_h}{\rho_0}$	$\sqrt{\Delta}$	Скорость звука a м/сек
0	288,0	1,000	10332,0	1,000	0,125	1,000	1,000	340,3
1000	281,6	0,977	9164,8	0,887	0,1133	0,907	0,952	336,4
2000	275,1	0,955	8106,5	0,784	0,1026	0,822	0,905	322,5
3000	268,6	0,932	7150,8	0,692	0,0927	0,742	0,862	328,6
4000	262,1	0,910	6287,2	0,608	0,0835	0,669	0,818	324,6
5000	255,6	0,887	5511,1	0,533	0,0751	0,601	0,775	320,5
6000	249,1	0,865	4814,4	0,466	0,0673	0,539	0,734	316,4
7000	242,6	0,842	4190,8	0,406	0,601	0,482	0,694	312,2
8000	235,1	0,819	3635,1	0,352	0,0536	0,429	0,655	308,0
9000	229,6	0,797	3139,8	0,304	0,0476	0,381	0,618	303,8
10000	223,2	0,774	2701,3	0,261	0,0421	0,338	0,581	299,4
11000	216,7	0,751	2313,7	0,224	0,0372	0,298	0,546	295,1
12000	216,7	0,751	1977,3	0,191	0,0317	0,254	0,504	295,1
13000	216,7	0,751	1689,9	0,164	0,0271	0,217	0,466	295,1
14000	216,7	0,751	1444,3	0,140	0,0232	0,186	0,431	295,1
15000	216,7	0,751	1234,6	0,119	0,0198	0,159	0,399	295,1
16000	216,7	0,751	1055,2	0,102	0,017	0,136	0,368	295,1
17000	216,7	0,751	902,0	0,087	0,0145	0,116	0,340	295,1
18000	216,7	0,751	771,1	0,075	0,0124	0,099	0,315	295,1
19000	216,7	0,751	659,2	0,064	0,0106	0,085	0,291	295,1
20000	216,7	0,751	563,6	0,054	0,0091	0,072	0,269	295,1
21000	216,7	0,751	481,9	0,047	0,0077	0,062	0,249	295,1
22000	216,7	0,751	412,0	0,040	0,0066	0,053	0,230	295,1
23000	216,7	0,751	325,3	0,034	0,0056	0,045	0,213	295,1
24000	216,7	0,751	301,2	0,029	0,0048	0,039	0,197	295,1
25000	216,7	0,751	257,6	0,025	0,0041	0,033	0,187	295,1
26000	219,4	0,762	220,5	0,021	0,0035	0,028	0,167	296,9
27000	222,1	0,772	189,1	0,018	0,0030	0,024	0,154	298,8
28000	224,9	0,780	162,6	0,016	0,0025	0,020	0,142	300,6
29000	227,6	0,790	140,0	0,014	0,0021	0,017	0,131	302,4
30000	230,4	0,801	120,7	0,012	0,0018	0,015	0,121	304,2

Таблица № 6
Кинематические коэффициенты вязкости различных топлив

$$\nu \frac{\text{см}^2}{\text{с}}$$

°C	Т-1	ТС-1	Т-5	Т-6
-40	0,086	0,052	0,435	0,520
-20	0,041	0,028	0,145	0,150
0	0,025	0,018	0,063	0,064
20	0,018	0,013	0,038	0,036
40	0,012	0,010	0,025	0,023
60	0,009	0,008	0,017	0,017
80	0,0075	0,007	0,013	0,012
100	0,0064	0,0056	0,010	0,01
120	0,0054	0,0049	0,0070	0,008
140	0,0046	0,0043	0,0065	0,007

Таблица № 7

Плотность топлива

$$\rho \text{ кг/м}^3$$

°C	Т-1	ТС-1	Т-5	Т-6
-40	865	821	890	898
-20	849	807	876	884
0	835	791	862	871
20	820	776	848	858
40	809	762	834	846
60	794	746	820	833
80	782	730	807	820
100	767	718	793	807
120	751	704	780	794
140	739	690	765	782