
УДК 629.7.048

Выбор оптимальной структуры и параметров агрегатов петлевой схемы влагоотделения

Старостин К. И.

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

e-mail: ki-star1969@yandex.ru

Аннотация

Рассмотрены вопросы, связанные с оценкой применимости авиационных систем кондиционирования воздуха по высоте и скорости полёта и ее оптимизации по критериям стартовой и эквивалентной массы. Представлены результаты расчётов для систем различных структурных схем.

Ключевые слова: влажный воздух, петлевая схема влагоотделения, теплообменник, система кондиционирования воздуха, области применимости, установочная масса, стартовая и эквивалентная масса

Введение

В составе большинства современных авиационных систем кондиционирования воздуха (СКВ) применяется петлевая схема влагоотделения на высоком давлении (рис. 1), состоящая из двух теплообменников: подогревателя и конденсатора, влагоотделителей и многоступенчатой турбохолодильной машины. Использование петлевой схемы позволяет снижать температуру воздуха на выходе установок охлаждения СКВ до отрицательных значений, что даёт возможность уменьшить потребный расход воздуха, отбираемого от двигателей, а, следовательно, и массу всей системы. В то же время работа петлевой схемы на влажном воздухе оказывает влияние на области применимости СКВ по высоте и скорости полёта самолёта [4], а также на работоспособность отдельных агрегатов системы.

Постановка задачи

Используя имеющуюся математическую модель петлевой схемы влагоотделения и вычислительную программу на её основе, провести расчёты областей применимости СКВ раз-

личных структурных схем по высоте и скорости полёта, а также рассмотреть возможности оптимизации системы кондиционирования по критериям стартовой и эквивалентной массы.

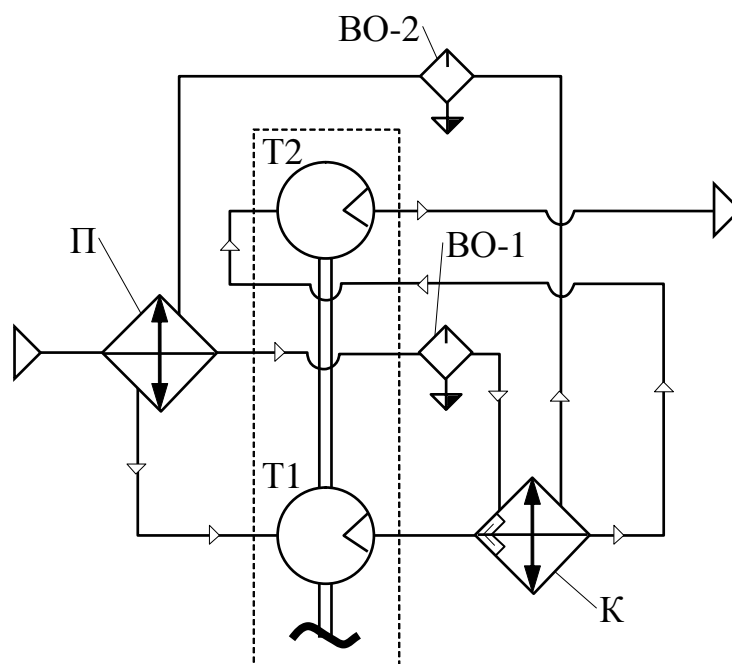


Рис. 1. Петлевая схема влагоотделения на высоком давлении.

К – конденсатор; П – подогреватель; T1, T2 – первая и вторая ступени турбины турбохолодильника; ВО-1, ВО-2 – влагоотделители.

1. Оценка применимости системы кондиционирования воздуха с петлевой схемой влагоотделения по высоте и скорости полёта

Математическая модель СКВ с петлевой схемой влагоотделения включает в себя общее уравнение энтальпии влажного воздуха, а также систему уравнений для расчёта параметров воздуха на выходе каждого агрегата. Данная модель представлена, например, в статье [5], в которой также рассмотрены вопросы численного решения указанных уравнений и особенности программной реализации этой модели.

Для оценки областей применимости СКВ по высоте и скорости полёта по методике, изложенной в работах [3, 4], необходимо рассчитывать температуру влажного воздуха на выходе установок охлаждения на различных режимах полёта самолёта, что можно сделать с помощью программ, разработанных на основе указанной модели. Условие применимости считается выполненным, если температура воздуха на выходе СКВ не превышает заранее установленного предельного значения. При этом полагается, что требуемый расход охлаж-

дающего воздуха поддерживается постоянным при помощи специальной системы регулирования.

На рис. 2 показаны такие области для систем охлаждения с различными структурными схемами:

1. СКВ воздушного цикла с одноступенчатой турбиной без петлевой схемы;
2. СКВ с конденсатором, подогревателем и одноступенчатой турбиной;
3. СКВ с двухступенчатой турбиной в составе петлевой схемы.

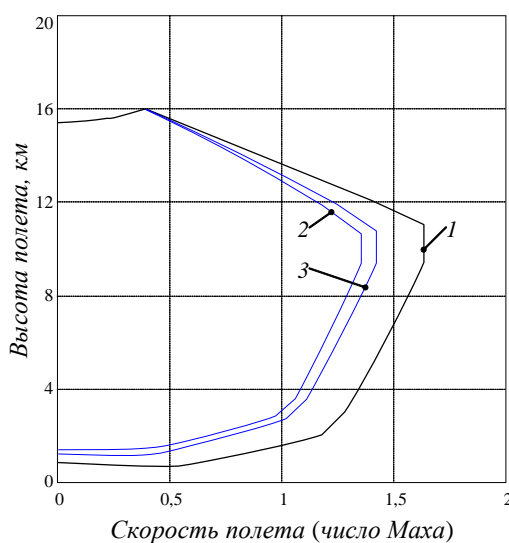


Рис. 2. Области применимости СКВ различных структурных схем по высоте и скорости полёта.

Расчет выполнялся для влажности атмосферного воздуха $\varphi_{\text{атм}} = 50\%$ с учётом впрыска сепарированной влаги в продувочную линию теплообменников первичного охлаждения. Требуемая температура на выходе из системы $t_{\text{доп}}$ принималась равной $+8^\circ \text{C}$.

В качестве исходных данных для расчёта принималось:

- коэффициент восстановления давления в воздухозаборнике $\nu_{\text{ВЗ}} = 0,9$;
- степень сжатия воздуха в компрессоре двигателя $\pi_{\text{к}} = 4,4$;
- КПД компрессора двигателя $\eta_{\text{к}} = 0,86$;
- КПД турбины турбохолодильника $\eta_{\text{ТХ}} = 0,85$;
- КПД конденсатора $\eta_{\text{к}} = 0,4$;
- КПД подогревателя $\eta_{\text{п}} = 0,6$.

Как показали проведённые исследования, наличие петлевой схемы несколько уменьшает область применимости СКВ, что объясняется эффектом разогрева воздуха в конденсаторе.

Следует отметить, что рис. 2 не дает полного представления о работоспособности исследуемых систем, поскольку при построении областей применимости не учитываются, например, процессы обмерзания теплообменников и соплового аппарата расширительных турбин турбохолодильников.

Тем не менее, можно утверждать, что наличие петлевой схемы сужает область применимости СКВ в том случае, когда влажность не оказывает существенного влияния на работоспособность системы. В качестве иллюстрации к сказанному, на рис. 3 показано несколько областей применимости при различных значениях КПД конденсатора η_k . Видно, что когда $\eta_k = 1$, область применимости системы уменьшается до размеров, соответствующих работе одного только первичного теплообменника (остальные агрегаты из схемы как бы исключаются), что является специфической особенностью петлевой схемы. Поэтому целесообразно предусматривать в составе СКВ обводные линии в обход «петли» при достижении самолетом высот, на которых влагосодержание атмосферного воздуха невелико.

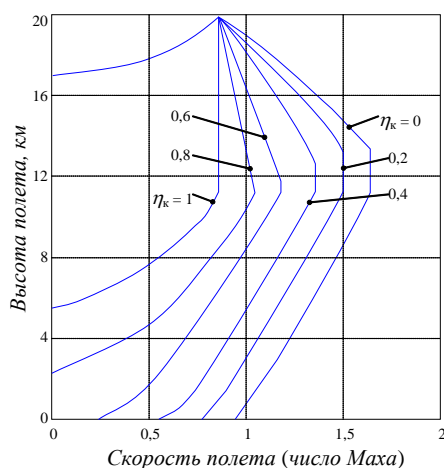


Рис. 3. влияние КПД конденсатора на область применимости СКВ.

Поскольку температура на выходе СКВ равно $t_{\text{доп}}$ только на границе области применимости, а для внутренних точек характерны более низкие температуры, то при переходе их в зону отрицательных значений на малых высотах применение петлевой схемы начинает давать преимущество за счет уменьшения потребного расхода воздуха, подаваемого в гермокабину, т.к. системы без петлевой схемы вынужденно ограничены положительными значениями выходной температуры на всех режимах полёта.

2. Сравнение СКВ различных структурных схем по критериям стартовой и эквивалентной массы

Для оценки совершенства авиационных систем и, в частности, СКВ широко используются различные массовые показатели. Однако собственная (установочная) масса того или иного агрегата системы составляет лишь некоторую долю всех связанных с ним весовых затрат на летательном аппарате. В настоящее время широкое распространение получили такие критерии качества СКВ, как стартовая и эквивалентная масса, учитывающие помимо установочной массы системы также затраты топлива на её транспортировку и функционирование.

Формулы для расчёта стартовой и эквивалентной масс имеют вид [3]:

$$M_{\text{ст}} = M_{\text{уст}} \cdot e^{c_R \bar{T} \tau_0} + \frac{m_{\text{хл}} + m_{\text{т}}}{c_R \bar{T}} \left(e^{c_R \bar{T} \tau_0} - 1 \right) \quad (1)$$

$$M_{\text{экв}} = \frac{M_{\text{ст}}}{e^{c_R \bar{T} \tau_0}} = M_{\text{уст}} + \frac{m_{\text{хл}} + m_{\text{т}}}{c_R \bar{T}} \left(1 - e^{-c_R \bar{T} \tau_0} \right) \quad (2)$$

где $M_{\text{ст}}$, $M_{\text{экв}}$ – стартовая и эквивалентная масса системы соответственно; c_R – коэффициент удельного расхода (отношение полного расхода топлива к тяге двигателя); \bar{T} – тяговооружённость; τ_0 – время полёта самолёта на выбранном режиме; $m_{\text{хл}}$ – расход хладагента; $m_{\text{т}}$ – расход топлива, вызванный всеми видами затрат энергии, связанных с работой СКВ.

Для сравнения были выбраны СКВ следующих структурных схем:

1. СКВ «простейшей» схемы (теплообменник первичного охлаждения и одноступенчатый турбохолодильник).
2. СКВ с петлевой схемой с одним конденсатором.
3. СКВ с петлевой схемой с конденсатором и подогревателем.
4. СКВ с петлевой схемой с конденсатором, подогревателем и турбохолодильником с двухступенчатой турбиной (по типу *Boeing-777* [6]).

Для самолетов класса *Tu-204* тепловая нагрузка для случая охлаждения гермокабины при стоянке самолета на земле составляет около 12...15 кВт. Магистральные пассажирские самолеты класса *Ил-96-300* могут иметь на данном режиме тепловую нагрузку до 35...55 кВт (при полной загрузке пассажиров). В связи с этим, расчет массовых показателей систем кондиционирования проводился для двух усредненных величин тепловой нагрузки: $Q_{\Sigma} = 13$ кВт и $Q_{\Sigma} = 45$ кВт.

Из уравнения теплового баланса гермокабины в случае стационарного теплообмена следует уравнение:

$$Q_{\Sigma} = c_p \cdot G_{\text{СКВ}}(T_k - T_{\text{СКВ}}) \quad (3)$$

где $G_{\text{СКВ}}$ – расход воздуха через СКВ; T_k – температура воздуха в кабине; $T_{\text{СКВ}}$ – температура на выходе СКВ:

- $T_{\text{СКВ}} = +5^{\circ} \text{C}$ (СКВ «простейшей» схемы);
- $T_{\text{СКВ}} = -1^{\circ} \text{C}$ (петлевая схема с конденсатором);
- $T_{\text{СКВ}} = -7^{\circ} \text{C}$ (петлевая схема с подогревателем и конденсатором);
- $T_{\text{СКВ}} = -9^{\circ} \text{C}$ (петлевая схема с двухступенчатой турбиной);

Величину установочной массы $M_{\text{уст}}$ для СКВ некоторых схем можно выбрать по статистическим данным, полагая, что необходимая холодопроизводительность будет обеспечена. Так для самолетов класса Ту-204, в которых применена СКВ с петлевой схемой, содержащей конденсатор, подогреватель и одноступенчатую турбину, масса системы без теплозвукоизоляции и агрегатов системы управления составляет примерно 220... 240 кг. С учётом дополнительной массы трубопроводной сети, составляющей примерно 50% от суммарной массы остальных агрегатов, получим $M_{\text{уст}} = 230 \cdot 1,5 = 345$ кг, (для $Q_{\Sigma} = 13$ кВт). Для дальнемагистральных самолетов большой вместимости типа Ил-96-300 установочная масса СКВ аналогичной схемы составит величину порядка 800 кг, а с учётом сети: $M_{\text{уст}} = 800 \cdot 1,5 = 1200$ кг (для $Q_{\Sigma} = 45$ кВт).

Для СКВ других выбранных типов можно выполнить пересчёт установочной массы, считая, что $M_{\text{уст}} \sim G_{\text{СКВ}}$ (такое допущение можно принять в том случае, если диапазон изменения температур $T_{\text{СКВ}}$ не слишком велик).

Расчет стартовой и эквивалентной масс по формулам (1) и (2) производился для участка крейсерского полета самолёта. Принятые исходные данные приведены в **Таблице 1**. Расход топлива на компенсацию энергопотребления системы определялся по методике, приведённой в работе [3].

На рис. 4 показаны диаграммы распределения стартовой и эквивалентной массы для принятых типов СКВ (за 100% выбраны показатели системы типа 3 – с петлевой схемой с конденсатором, подогревателем и одноступенчатой турбиной). Приведённые результаты расчёта обнаруживают четкую зависимость между установочной массой СКВ и ее стартовой массой при рассмотренных величинах тепловой нагрузки. Система «простейшей» схемы имеет стартовую массу на 30...33% больше, чем «петлевая» система с подогревателем и конденсатором и на 38...40% больше, чем СКВ с двухступенчатой турбиной. Расхождения в стартовых массах двух последних систем невелики и составляют около 25...100 кг (5%).

Следует отметить, что при существенном уменьшении $T_{СКВ}$ в область отрицательных температур, масса $M_{уст}$ будет расти из-за необходимости увеличения эффективностей агрегатов (в первую очередь, теплообменников), а следовательно, и их веса. Кроме того, величина $G_{СКВ}$ ограничена снизу нормами на вентиляцию гермокабины и пассажирских салонов.

Таблица 1.

Наименование параметра, размерность	Значение параметра	
	(для $Q_{\Sigma} = 13$ кВт)	(для $Q_{\Sigma} = 45$ кВт)
Продолжительность полета τ_0 , ч	2	2
Тяговооруженность \bar{T} , Н/кг	5	3
Удельный расход топлива c_R , кг/(Н·ч)	0,02	0,05
Расход хладагента $m_{хл}$, кг/ч	0	0
Расход топлива на компенсацию энергопотребления системы m_T , кг/ч:		
• Система 1-го типа	34	156
• Система 2-го типа	25	115
• Система 3-го типа	20	91
• Система 4-го типа	19	85

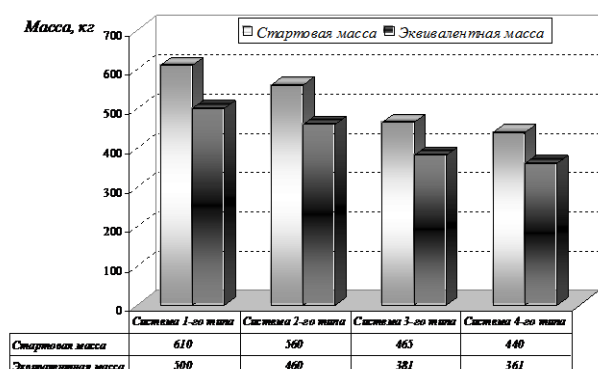
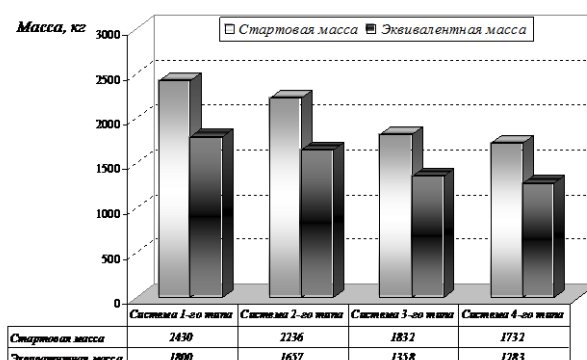
а) $Q_{\Sigma} = 13$ кВтб) $Q_{\Sigma} = 45$ кВт

Рис. 4. Стартовая и эквивалентной массы СКВ рассматриваемых типов:

- «простейшая» схема (тип 1);
- петлевая схема с конденсатором (тип 2);

- петлевая схема с подогревателем и конденсатором (тип 3);
- петлевая схема с двухступенчатой турбиной турбохолодильника (тип 4).

3. Возможности оптимизации СКВ по массовым критериям с учётом областей работоспособности системы

Для анализа работы СКВ с петлевой схемой в процессе численного эксперимента была разработана методика оценки работоспособности отдельных агрегатов системы, включающая в себя несколько проверок:

1. Проверка функциональной пригодности петлевой схемы по обеспечению требуемой температуры на выходе.
2. Проверка необходимой степени осушки воздуха и отсутствия осадков в виде тумана или снега в выходном сечении системы.
3. Проверка работоспособности конденсатора по обмерзанию его горячего тракта.
4. Проверка работоспособности конденсатора по обмерзанию его холодного тракта.
5. Проверка работоспособности подогревателя по обмерзанию его горячего тракта.
6. Проверка работоспособности подогревателя по обмерзанию его холодного тракта.
7. Проверка работоспособности первой ступени турбины турбохолодильника.
8. Проверка работоспособности второй ступени турбины турбохолодильника.

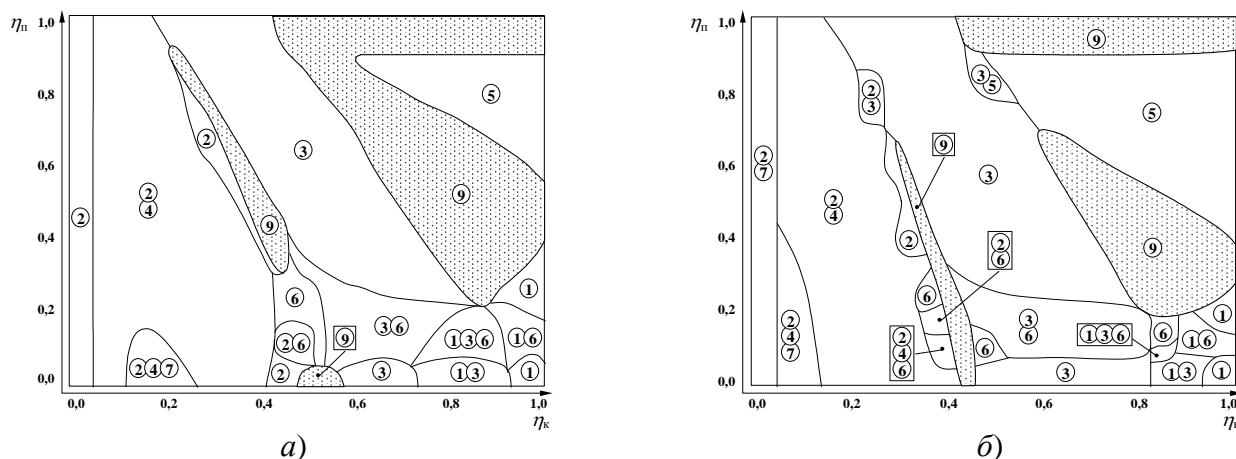
Работоспособным считается только такой режим работы петлевой схемы влагоотделения, когда все перечисленные выше проверки дают положительный результат (условия работоспособности выполнены).

На рис. 5 показаны типовые варианты областей работоспособности, рассчитанные для различных рабочих режимов. Причины выхода системы из строя обозначены цифрами ①...⑧, в соответствии с их номерами в списке проверок работоспособности (цифрой ⑨ обозначена область, внутри которой система работоспособна).

Представляет интерес сопоставление областей работоспособности СКВ и их массовых характеристик, что легче всего осуществляется с помощью графиков $M_{уст}$ в координатах: (η_k ; η_n) – КПД конденсатора и подогревателя. Для упрощения задачи можно в качестве определяющего массового показателя рассматривать только сумму масс конденсатора и подогревателя.

Величина *термодинамической эффективности* (КПД) теплообменника $\eta_{то}$, представляющая собой отношение фактического теплосъема к максимально возможному, зависит от

схемы движения потоков в теплообменнике, размеров теплопередающей поверхности, соотношения расходов теплоносителей и интенсивности процессов теплообмена.



● – область работоспособности системы; ○ – система не работоспособна.

Рис. 5. Типовые области работоспособности систем охлаждения с петлевой схемой влагоотделения и области их возможных отказов, построенные в пространстве параметров $(\eta_k; \eta_n)$ для различных режимов работы:

Выражение, связывающее значения $\eta_{то}$ с соотношением водяных эквивалентов $\frac{W_{\min}}{W_{\max}}$, коэффициентом теплопередачи и площадью теплообменной поверхности, для воздуховоздушных теплообменников противоточной схемы имеет следующий вид:

$$\eta_{то} = \frac{1 - \exp \left[-\frac{k_{cp} \cdot F}{W_{\min}} \left(1 - \frac{W_{\min}}{W_{\max}} \right) \right]}{1 - \frac{W_{\min}}{W_{\max}} \cdot \exp \left[-\frac{k_{cp} \cdot F}{W_{\min}} \left(1 - \frac{W_{\min}}{W_{\max}} \right) \right]}, \quad (4)$$

где W_{\min} , W_{\max} – наименьший и наибольший водяные эквиваленты теплоносителей; k_{cp} – средний коэффициент теплопередачи по теплоносителю, характеризуемому величиной W_{\min} ; F – площадь поверхности теплообмена, по которой вычисляется коэффициента теплопередачи.

Комплекс

$$\frac{k_{cp} \cdot F}{W_{\min}} = \frac{1}{W_{\min}} \iint_F k \, dF = NTU \quad (5)$$

часто используется в виде самостоятельной характеристики процесса теплопередачи и называется *числом единиц переноса тепла (NTU)* [2].

Коэффициент теплопередачи k_{cp} зависит от коэффициентов теплоотдачи со стороны горячего и холодного теплоносителей, размеров и материала разделительных пластин, а также эффективности применяемого оребрения. Обычно при расчетах коэффициент теплопередачи принимается постоянным, а его величина для теплообменников петлевой схемы составляет примерно $75...90 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, что соответствует условиям оптимальности теплообменника с точки зрения минимизации его массы, габаритов и гидравлических потерь при заданном теплосъеме [1]. При этом оптимальное значение $NTU \approx 2$.

Для схем движения теплоносителей, отличных от противотока, получить зависимости, аналогичные (5), в ряде случаев (например, при перекрестно-точной схеме без перемешивания потоков) не представляется возможным, и нужные решения получают либо численно, либо с помощью эмпирических таблиц. Перекрестно-точная схема представляет особый интерес, т.к. именно она наиболее часто применяется в конструкции существующих теплообменников петлевой схемы влагоотделения. При этом в силу особенностей данной структурной схемы СКВ, у подогревателя и конденсатора отношение водяных эквивалентов

$$\frac{W_{\min}}{W_{\max}} \approx 1.$$

Если значение $\eta_{то}$ при проведении исследований не вычисляется, а назначается, то основные геометрические параметры теплообменника (площадь теплообменной поверхности, размеры проходных сечений и т.п.) могут быть определены через $\eta_{то}$ с помощью имеющихся зависимостей $\eta_{то} = f(NTU)$. Зная расходы воздуха через горячий и холодный тракты теплообменника ($G_{г}$ и $G_{х}$ соответственно) и принимая значение коэффициента теплопередачи $k_{cp} = 80 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, можно вычислить водяные эквиваленты горячей и холодной линии: $W_{г} = G_{г} \cdot c_{p(г)}$; $W_{х} = G_{х} \cdot c_{p(х)}$, после чего определяется значение NTU , соответствующее заданному КПД теплообменника и отношению водяных эквивалентов теплоносителей (пользуясь для этого формулами типа (4) или таблицами). Затем из (5) находим полную поверхность теплообмена:

$$F = \frac{NTU \cdot W_{\min}}{k_{cp}}. \quad (6)$$

Полученные характеристики затем могут быть использованы для расчета установочной массы теплообменника ($M_{то}$) по различным статистическим зависимостям [3]:

$$M_{то} = \gamma_{то} \cdot F, \quad (8)$$

где $\gamma_{\text{то}}$ – удельная (приходящаяся на единицу поверхности теплообмена) масса теплообменника: для теплообменников, выполненных из алюминиевых сплавов, $\gamma_{\text{то}} = 1,0 \dots 1,5 \text{ кг/м}^2$; для стальных – $\gamma_{\text{то}} = 1,8 \dots 2,5 \text{ кг/м}^2$;

Зависимость суммарной массы конденсатора и подогревателя от их КПД ($\eta_{\text{к}}$ и $\eta_{\text{п}}$), рассчитанная при тех же исходных данных, что и стартовая масса СКВ, представлена на рис. 6 (а, б). Анализ данной зависимости с учётом выявленных зон работоспособности системы (см. рис. 6 (в)) позволил установить, что для оптимизации СКВ с петлевой схемой влагоотделения по массовым критериям желательно, чтобы значения $\eta_{\text{к}}$ и $\eta_{\text{п}}$ были близки между собой. При этом необходимо учитывать, что наименьшую массу система имеет на границе области работоспособности, где температура на выходе из неё минимальна.

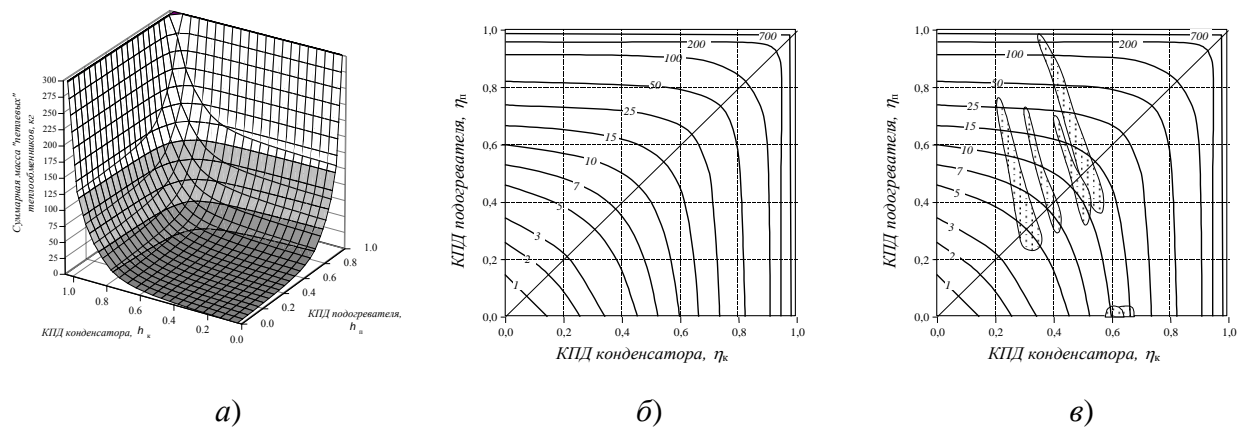


Рис. 6. Зависимость суммарной массы конденсатора и подогревателя от их КПД, $\eta_{\text{к}}$ и $\eta_{\text{п}}$:

- а) трехмерный график, построенный в пространстве ($\eta_{\text{к}}$; $\eta_{\text{п}}$);
- б) кривые равной массы в пространстве ($\eta_{\text{к}}$; $\eta_{\text{п}}$);
- в) сопоставление кривых равной массы и зон работоспособности системы охлаждения воздуха на различных расчётных режимах.

Выводы

Наличие петлевой схемы в составе СКВ суживает область её применимости по высоте и скорости полёта самолёта, что объясняется эффектом разогрева воздуха в конденсаторе. Поэтому целесообразно предусматривать в системе кондиционирования воздуха обводные линии в обход «петли» при достижении самолётом высот, на которых влагосодержание атмосферного воздуха невелико и не влияет на работоспособность системы.

Сравнительные расчёты, выполненные для четырех различных структурных схем СКВ, показали, что оптимальной по критериям стартовой и эквивалентной массы является система

с петлевой схемой с конденсатором и подогревателем. Использование двухступенчатой турбины не приводит к значительному снижению стартовой массы (расхождение не более 5%), однако оно может быть оправдано из соображений повышения надежности работы теплообменников в составе петлевой схемы.

Сопоставление областей работоспособности СКВ и массовых характеристик систем показало, что для снижения установочной массы системы кондиционирования с петлевой схемой желательно иметь близкие по величине значения КПД конденсатора и подогревателя. Необходимо также учитывать, что наименьшую массу система имеет на границе области работоспособности, где температура на выходе минимальна.

Применение методов численного моделирования работы авиационных СКВ на начальном этапе проектирования представляет несомненную практическую ценность для организаций, связанных с производством и эксплуатацией данных систем.

Список литературы

1. Воронин Г.И. Системы кондиционирования воздуха на летательных аппаратах.– М.: Машиностроение, 1973.
2. Кейс В. М., Лондон А. Л. Компактные теплообменники.– М.: Энергия, 1967.
3. Антонова Н.В., Дубровин Л.Д, Егоров Е.Е. Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха: Учебное пособие для студентов высших технических учебных заведений/.– М.: Машиностроение, 2006.
4. Акопов М.Г., Бекасов В.И., Долгушев В.Г. Системы оборудования летательных аппаратов: Учебник для студентов высших технических учебных заведений/ – М.: Машиностроение, 2005.
5. Старостин К.И. Математическое моделирование авиационных систем кондиционирования воздуха с учётом влажности // Вестник Московского авиационного института. 2009. Т. 16. № 2. С. 141-145.
6. *Warwick G.* Boeing-777, the inside story // Flight International. 25 December – 7 January 1992.