

## Сравнительный анализ системы кондиционирования воздуха с применением панельного и пассивного теплообмена для пассажирского самолета

© Л.А. Гришина<sup>1</sup>, С.Б. Полудницын<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, 125993, Российская Федерация

<sup>2</sup>АО «Туполев», Москва, 105005, Российская Федерация

*На примере среднемагистрального пассажирского самолета рассмотрены варианты применения систем кондиционирования воздуха (СКВ) с панельным и пассивным теплообменом. Проведен сравнительный анализ указанных систем по таким показателям, как суммарный тепловой поток, количество подаваемого воздуха и температура подачи воздуха в салон самолета. Для вариантов СКВ было составлено и решено уравнение теплового баланса гермокабины самолета на двух экстремальных режимах: максимальном охлаждении и максимальном обогреве. Исследована целесообразность использования панельной теплозащиты в СКВ отечественных пассажирских самолетов. Дополнительно проанализировано применение разных типов теплозвукоизоляционных материалов, обозначаемых как ТЗИ (теплозвукоизоляция). Составлено и решено уравнение теплового баланса гермокабины самолета для ТЗИ разных типов. При сравнении расчетных данных по показателю суммарной массы ТЗИ был определен оптимальный материал — ВПП-1, который рекомендуется к применению. Предварительный расчет приращения взлетной массы и запасов топлива приведен для двух типов СКВ и разных материалов ТЗИ.*

**Ключевые слова:** пассивная теплозащита, активная теплозащита, панельный теплообмен, тепломассообмен, теплообмен, система кондиционирования воздуха

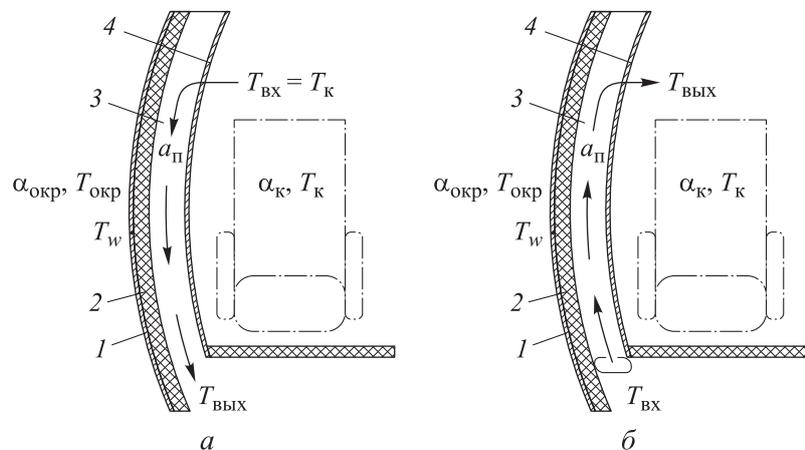
**Введение.** На протяжении всего времени существования гражданской авиации одной из главных задач является создание комфортных условий для пассажиров [1]. При рассмотрении ретроспективного развития систем обеспечения комфорта в пассажирских самолетах приходится сталкиваться с тем, что в опубликованной специальной технической литературе отсутствуют издания, посвященные методам теплозвуковой защиты салонов и анализу конструктивных решений по установке теплозвукоизоляционных материалов.

Цель данной работы — провести сравнительный анализ существующих методов проектирования и расчета теплозвукоизоляции (ТЗИ), а также дать рекомендации по применению ТЗИ в салонах пассажирских самолетов, для чего были исследованы конструктивные особенности установки ТЗИ на внутренние стенки фюзеляжа пассажирских самолетов, проведен обзор существующих материалов и способов их использования.

При проектировании системы кондиционирования воздуха (СКВ) основная задача заключается в разработке установки охлаждения

воздуха (УОВ) с оптимальными холодопроизводительностью и массой [2]. В состав СКВ входят система отбора, подготовки и распределения воздуха, а также соединительные трубопроводы и применяемые теплозвукоизоляционные материалы (ТЗИ), расположенные по всей длине самолета [3]. На практике зачастую приходится увеличивать массу всей системы для повышения ее производительности, поэтому такие задачи, как разработка компактных и легких СКВ, а также выбор ТЗИ с низкой плотностью и малым коэффициентом теплопроводности, являются актуальными [4, 5].

**Активная теплозащита, применяемая в СКВ.** При разработке СКВ инженеры всегда стремятся обеспечить комфорт пассажиров с минимальными энергетическими затратами. Из уравнения теплового баланса для кабины самолета становится ясно, что существенные тепловые потоки, поступающие в салон или исходящие из него, проходят через стенку самолета [6]. Поэтому для снижения энергозатрат СКВ применяют разные способы теплозащиты стенок самолета [7], в частности, активную теплозащиту [3]. Особенность последней заключается в том, что подвижный теплоноситель (воздух) забирает часть теплоты, поступающей через стенку кабины. На самолетах для обеспечения активной теплозащиты используют как обратные (рис. 1, а), так и прямые (рис. 1, б) панели.



**Рис. 1.** Компоновка обратной (а) и прямой (б) панели:

1 — обшивка; 2 — слой теплоизоляции толщиной 0,03 м; 3 — воздушный канал толщиной 0,06 м; 4 — интерьерная стенка салона;  $T_{\text{окр}}$  — температура окружающего воздуха;  $\alpha_{\text{окр}}$  — коэффициент теплоотдачи окружающего воздуха;  $T_w$  — температура обшивки;  $T_k$  — температура воздуха в салоне самолета;  $T_{\text{вх}}/T_{\text{вых}}$  — температура воздуха на входе/выходе воздушного канала;  $\alpha_k$  — коэффициент теплоотдачи воздуха в салоне самолета;  $\alpha_n$  — коэффициент теплоотдачи воздуха воздушного канала

Впервые в практике проектирования отечественных пассажирских самолетов, в частности Ту-204, была разработана специальная стенка, которая обеспечивала удаление воздуха из салона самолета и не давала скапливаться в ТЗИ влаге, образовывавшейся из атмосферного воздуха [8]. Конструктивно стенка представляла собой *обратную панель*, работающую следующим образом: воздух, подаваемый из салона самолета в панель, проходит вдоль всего воздушного канала, где участвует в теплообменном процессе, в результате чего на выходе из панели он становится более нагретым или более охлажденным в зависимости от наружной температуры воздуха. В этом случае на выходе из панели воздух поступает в подпольное пространство самолета, где одна часть его идет на рециркуляцию, а другая — сбрасывается в атмосферу.

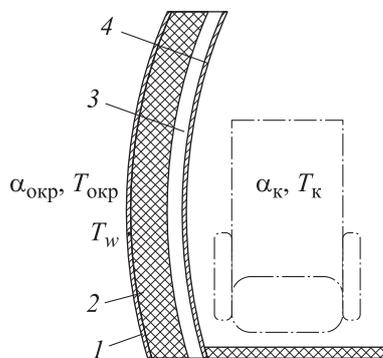
*Прямая панель* работает иначе: из миксера СКВ воздух подается на вход в нижнюю часть панели и также участвует в теплообмене, а на выходе поступает в верхнюю часть салона самолета.

Существенная разница между двумя описанными вариантами панелей заключается в том, что прямая панель работает значительно хуже, чем обратная. Во-первых, вся полученная теплота поступает непосредственно в гермокабину самолета, а во-вторых, вследствие высокой скорости протекания воздуха в панели возрастают уровень шума и коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности ТЗИ [4].

**Система кондиционирования воздуха с пассивным теплообменом.** Наиболее простой способ борьбы с теплотерями через стенку — использование ТЗИ с низким коэффициентом теплопроводности. На самолетах гражданской авиации зарубежного и отечественного производства применяют именно такой способ пассивной защиты (рис. 2). В данном случае в конструкции стенки наряду с матами ТЗИ используют неподвижный воздух в качестве дополнительного слоя теплоизоляции [9]. Следует отметить, что воздух обладает теплоизолирующим свойством только тогда, когда он неподвижен. В реальных условиях эксплуатации самолета невозможно полностью исключить воздухообмен с интерьерной стенкой салона.

**Рис. 2.** Компонировка боковой стенки для СКВ с пассивным теплообменом:

1 — обшивка самолета; 2 — слой теплоизоляции толщиной 0,045 м; 3 — воздушный канал толщиной 0,01 м; 4 — интерьерная стенка салона



**Анализ СКВ с применением панельного теплообмена.** При проведении сравнительного анализа двух СКВ — с панельным теплообменом и с пассивным теплообменом определим возможные причины отсутствия СКВ с панельным теплообменом на большинстве современных гражданских самолетов, хотя такие системы успешно функционируют на самолетах семейства Ту-204 и Ту-214.

Поскольку основной задачей СКВ является поддержание заданного теплового режима кондиционируемых объектов, рассмотрим два режима работы системы на охлаждение и обогрев:

*первый режим* — стоянка самолета на земле с максимальной загрузкой в жаркий солнечный день при температуре наружного воздуха  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

*второй режим* — полет ночью на крейсерском режиме при температуре наружного воздуха  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  с частичной загрузкой (30 %) пассажиров [9].

Следует определить холодопроизводительность системы для поддержания заданной температуры, решив уравнение теплового баланса

$$\sum Q = 0, \quad (1)$$

где  $\sum Q$  — алгебраическая сумма всех тепловых потоков, поступающих в кабину в единицу времени.

Расчет тепловых нагрузок проводился по зарубежной методике [10, 11], в которой во внимание принимаются нагрев стенки фюзеляжа и естественная конвекция. Для более точного решения задачи обшивка самолета была разделена на три зоны: стенка, пол и потолок, в каждой из которых определяли среднюю температуру обшивки.

Тепловой поток через обратную панель вычисляли методом последовательных приближений. Тепловой и гидравлический расчет проводили для одной панели в предположении, что теплообмен и сопротивление для всех панелей одинаковы [12, 13].

Для того чтобы найти температуру стенки фюзеляжа, составляем уравнение теплового баланса относительно стенки и путем подбора температурных значений стенки добиваемся равенства левой и правой частей уравнения [14]:

$$q_c = \alpha_n (T_{\text{пан}} - T_{\text{окр}}) + q_{\text{л}} + q_{\text{ил}} + k (T_w - T_k). \quad (2)$$

Здесь  $q_c$  — тепловой поток от солнечного излучения,  $q_c = A K_c I_0 K_n \cos \varphi$  ( $A$  — коэффициент поглощательной способности обшивки фюзеляжа,  $K_c$  — коэффициент, учитывающий состояние атмосферы (облачность, запыленность),  $I_0$  — солнечная постоянная, равная  $1388\text{ Вт/м}^2$ ,  $K_n$  — коэффициент, учитывающий изменение

потока солнечного излучения с высотой,  $\varphi$  угол падения солнечных лучей [15]);  $\alpha_n (T_{\text{впан}} - T_{\text{окр}})$  — тепловой поток от стенки самолета в окружающее пространство ( $\alpha_n$  — коэффициент теплоотдачи между обшивкой фюзеляжа и окружающей средой,  $T_{\text{впан}}$ ,  $T_{\text{окр}}$  — абсолютные температуры обшивки и окружающей среды соответственно [5, 15]);  $q_{\text{л}}$  — тепловой поток от излучения,  $q_{\text{л}} = \varepsilon \sigma (T_{\text{впан}}^4 - T_{\text{окр}}^4)$  ( $\varepsilon$  — степень черноты обшивки фюзеляжа,  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана [5, 15]);  $q_{\text{илл}}$  — тепловой поток, передаваемый через иллюминаторы салона самолета,  $q_{\text{илл}} = k_{\text{илл}} (T_{\text{впан}} - T_{\text{окр}})$  ( $k_{\text{илл}}$  — коэффициент теплопередачи через иллюминаторы [5, 15]).

В результате решения уравнения (2) методом последовательных приближений получили значение температуры стенки  $T_{\text{впан}} = 327\text{K} = 54\text{ }^\circ\text{C}$ . Аналогично была найдена величина температуры в других зонах обшивки самолета: на стенке потолка  $T_{\text{впан}} = 335,7\text{K} = 62,7\text{ }^\circ\text{C}$ ; на стенке пола  $T_{\text{впан}} = 313,5\text{K} = 40,5\text{ }^\circ\text{C}$ .

На основании полученных значений температуры можно сделать вывод о нецелесообразности определять конкретную температуру нижней стенки обшивки самолета (пола), так как она незначительно превышает температуру окружающего воздуха.

Зная температуру обшивки, можно определить количество теплоты, поступающей в салон через стенки самолета [16, 17]. Результаты расчетов для двух рассмотренных режимов на максимальное охлаждение и обогрев приведены в табл. 1.

*Таблица 1*

**Система кондиционирования воздуха с применением панельного теплообмена**

Показатель	Режим работы системы кондиционирования воздуха	
	на максимальное охлаждение	на максимальный обогрев
Суммарный тепловой поток, Вт	28337	4597
Температура наружного воздуха, К (°C)	313 (+40)	223 (-50)
Температура воздуха от СКВ на входе в салон самолета, К (°C)	278 (+5)	293 (+20)
Температура воздуха в салоне, К (°C)	298 (+25)	290 (+17)
Количество подаваемого воздуха от СКВ в салон самолета, кг/ч	5075	5075
Количество подаваемого воздуха в единицу времени на одного человека, м <sup>3</sup> /мин	0,33	0,33

Для режима максимального охлаждения заданная величина — температура воздуха в салоне самолета, а искомая — количество подаваемого воздуха. Для режима максимального обогрева заданная величина — количество подаваемого воздуха, а искомая — температура воздуха, подаваемого в салон самолета. Полученные расчетные значения полностью удовлетворяют нормам АП-25 (раздел D, глава «Вентиляция и отопление») [1].

**Анализ СКВ с применением пассивного теплообмена.** На самолетах зарубежного производства преимущественно устанавливают СКВ с применением пассивного теплообмена. В качестве теплоизоляционного слоя дополнительно используется воздух, расположенный между ТЗИ и интерьерной стенкой салона. Толщина воздушной прослойки составляет 10 мм. Это позволяет считать, что воздух остается неподвижным и обладает коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,023$  Вт/(м·К) [18]. Для данной системы был проведен аналогичный расчет, в результате которого получены следующие значения температуры фюзеляжа: боковой стенки  $T_{\text{вст}} = 326\text{К} = 53\text{ }^\circ\text{C}$ , стенки потолка  $T_{\text{впот}} = 335,7\text{К} = 62,7\text{ }^\circ\text{C}$ , стенки пола  $T_{\text{впол}} = 314\text{К} = 41\text{ }^\circ\text{C}$ .

Зная температуру обшивки, можно определить количество теплоты, поступающей в салон через стенки самолета. Результаты расчета для двух рассмотренных режимов представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Система кондиционирования воздуха с применением пассивного теплообмена**

Показатель	Режим работы системы кондиционирования воздуха	
	на максимальное охлаждение	на максимальный обогрев
Суммарный тепловой поток, Вт	28916	2433
Температура наружного воздуха, К (°C)	313 (+40)	223 (–50)
Температура воздуха от СКВ на входе в салон самолета, К (°C)	278 (+5)	292 (+19)
Температура воздуха в салоне, К (°C)	298 (+25)	290 (+17)
Количество подаваемого воздуха от СКВ в салон самолета, кг/ч	5179	5179
Количество подаваемого воздуха в единицу времени на одного человека, м <sup>3</sup> /мин	0,34	0,34

Значения заданных и искомых величин полностью соответствовали расчетным. Полученные результаты расчета удовлетворяют нормам АП-25 (раздел D, глава «Вентиляция и отопление») [1].

**Сопоставление пассивного и панельного теплообмена, применяемых в СКВ.** В рассмотренных вариантах расчета были использованы ТЗИ одного вида. Толщина пакета ТЗИ для СКВ с пассивным

теплообменом как минимум на 15 мм больше, чем у пакета ТЗИ, применяемого для СКВ с панельным теплообменом [19]. Сопоставление результатов, полученных для двух рассматриваемых способов защиты, показало, что температура воздуха, подаваемого от СКВ на режимах максимального охлаждения и максимального обогрева, различаются незначительно (рис. 3).

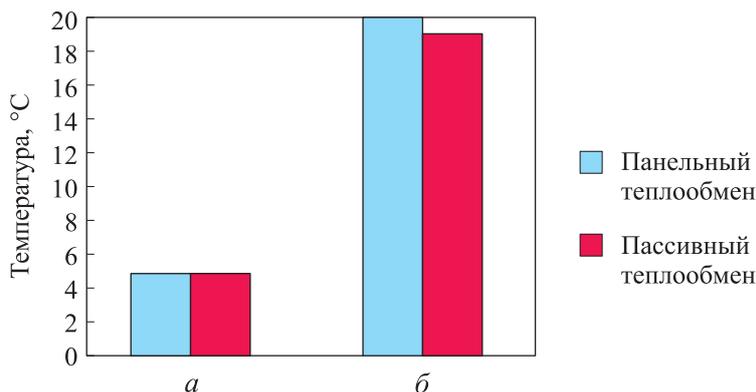


Рис. 3. Температура подачи воздуха для двух типов СКВ на предельных режимах охлаждения (а) и обогрева (б)

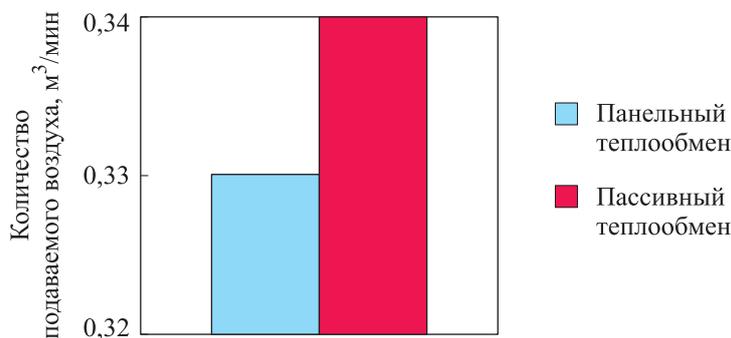


Рис. 4. Количество подаваемого воздуха в единицу времени на человека для СКВ двух рассматриваемых типов

Системы с панельным и пассивным теплообменом также не имеют больших различий по количеству подаваемого воздуха на одного человека в минуту (рис. 4).

Следует отметить, что установка обратной панели незначительно отличается от установки классической стенки самолета. Основное их отличие — разница массы ТЗИ, хотя в рассмотренных вариантах расчета применяются ТЗИ одного вида. Полученная разница обусловлена наличием ограничения минимальной толщины ТЗИ для классической стенки самолета. Поэтому в зависимости от типа ТЗИ можно определить, какая из систем легче: с панельным или пассивным теплообменом [20, 21].

**Современные теплозвукоизоляционные материалы, применяемые в авиастроении.** У тех же рассматриваемых СКВ заменим ранее используемый для теплозвукоизоляции материал БТМ-1 другими более современными теплозвукоизоляционными материалами. Сопоставление проведем по следующим параметрам: теплопроводность материала, Вт/(м·К); масса всей ТЗИ, применяемой на самолете, кг; суммарный тепловой поток, кВт; количество подаваемого воздуха в кабину на человека в единицу времени, м<sup>3</sup>/мин.

Для сравнения были выбраны наиболее распространенный ТЗИ-материал отечественного производства АТМ-1МК, представляющий собой мат из рыхлого слоя штапельных волокон, связанных фенолформальдегидной смолой; материал Solimide AC-550 фирмы Boyd Corporation, состоящий из эластичного пенополиамида; отечественный аналог Solimide AC-550 — ВПП-1 разработки ФГУП «ВИАМ». Результаты проведенного расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3

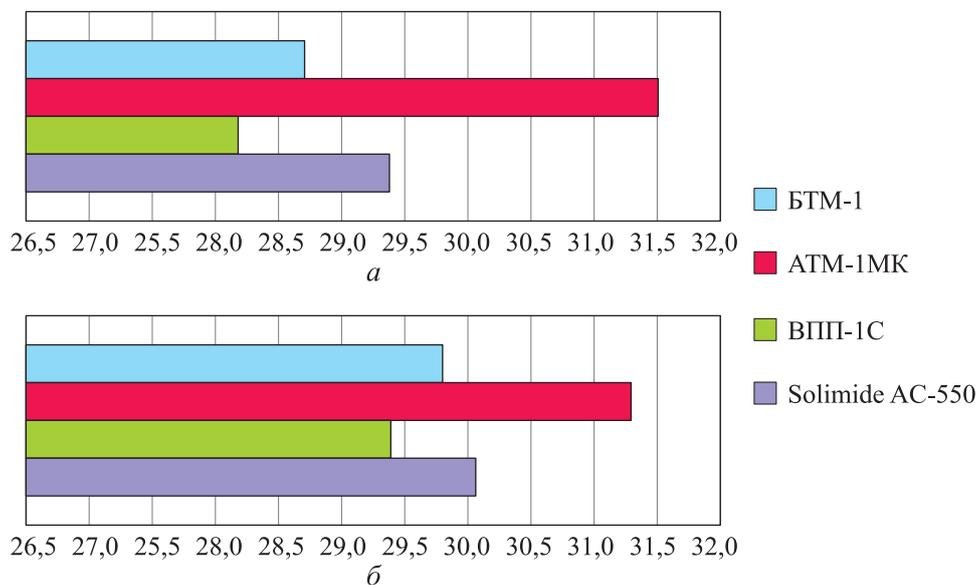
Технические характеристики ТЗИ

Материал ТЗИ	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплообмен панельный / пассивный		
			$\sum M_{\text{ТЗИ}}$ , кг	$\sum Q$ , кВт	$\sum G$ , м <sup>3</sup> /мин
БТМ-1	0,04–0,05	10	179/269	29,8/28,7	0,35/0,34
АТМ-1МК	0,07	8–10	143/215	31,3/31,5	0,37/0,37
ВПП-1	0,035–0,067	7–10	125/188	29,4/28,2	0,35/0,33
Solimide AC-550	0,046	7,1	172/191	30,1/29,4	0,36/0,35

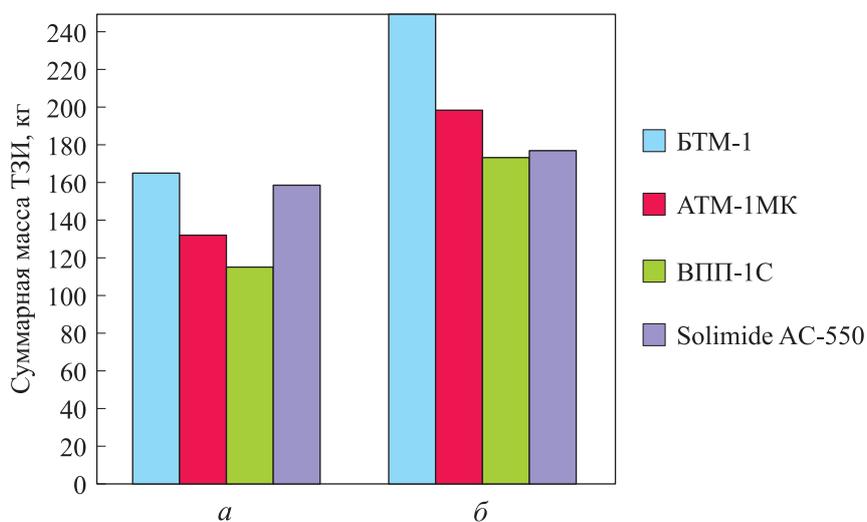
*Обозначения:*  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $\rho$  — плотность материала;  $\sum M_{\text{ТЗИ}}$  — суммарная масса применяемой теплозвукоизоляции;  $\sum Q$  — суммарный тепловой поток;  $\sum G$  — количество воздуха, подаваемого СКВ на одного человека.

Полученные результаты, визуализированные в виде диаграмм на рис. 5–7, позволяют наглядно определить преимущества и недостатки каждого из четырех типов ТЗИ. Для рассматриваемых типов теплоизоляции на рис. 5 приведены данные о суммарном тепловом потоке (кВт) на режиме максимального охлаждения для СКВ с пассивной ТЗИ и для СКВ с применением обратной панели, а на рис. 6 — данные всех типов ТЗИ о суммарной массе (кг), распределенной по всей длине самолета.

В результате сравнения ТЗИ четырех типов оптимальным для применения оказался ВПП-1С, так как этот материал наиболее легкий и наименее теплопроводный.



**Рис. 5.** Суммарный тепловой поток с пассивным (а) и панельным (б) теплообменом для рассматриваемых видов СКВ с применением разных типов ТЗИ



**Рис. 6.** Суммарная масса всей ТЗИ, распределенная по длине самолета, для СКВ с панельным (а) и пассивным (б) теплообменом

При сравнении тех же типов теплоизоляции по приращению взлетной массы самолета на режиме максимального охлаждения для СКВ с классической пассивной ТЗИ и для СКВ с применением обратной панели при ТЗИ разных видов (см. рис. 7), предварительный расчет проводился для случая перелета продолжительностью не менее 7 ч.

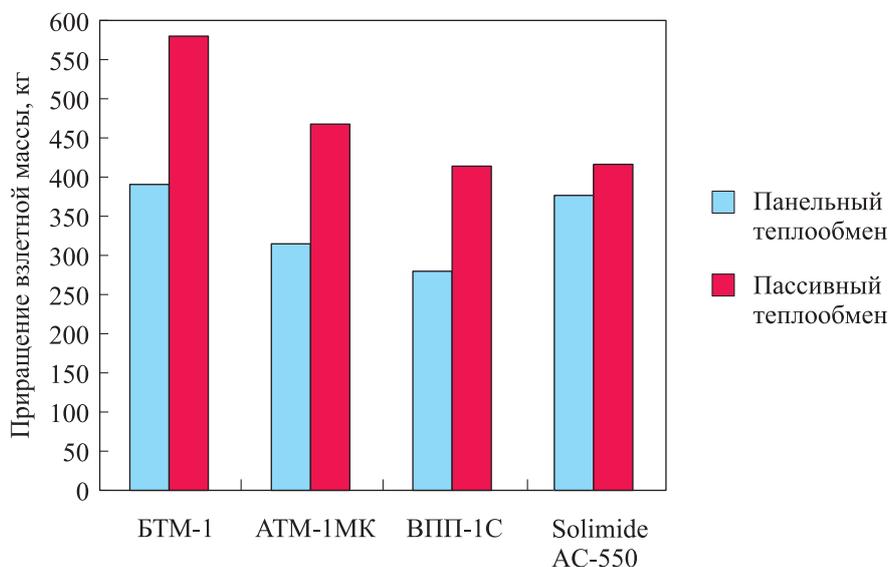


Рис. 7. Приращение взлетной массы для двух рассматриваемых видов СКВ

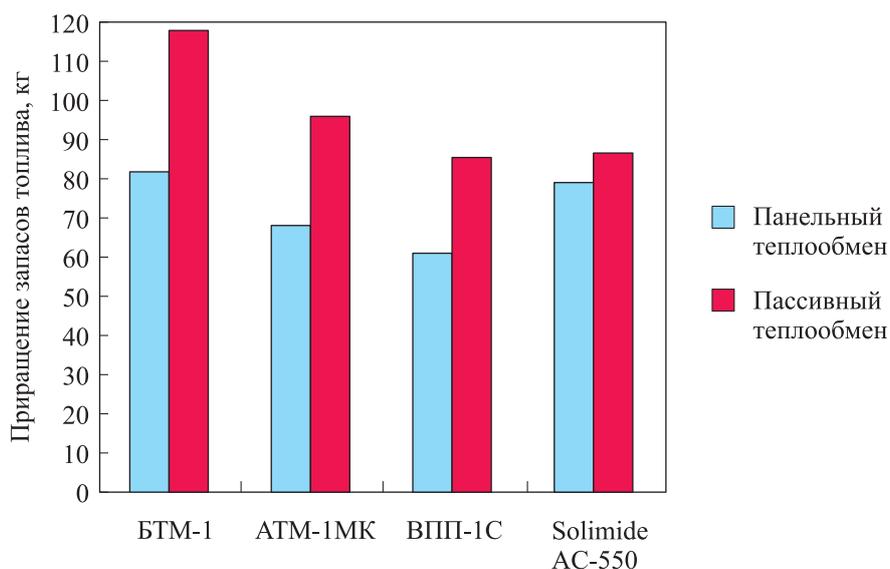


Рис. 8. Приращение запаса топлива для двух рассматриваемых видов СКВ

Было установлено, что применение активной теплозащиты уменьшает приращение запаса топлива от 7 до 35 кг для рассматриваемых материалов ТЗИ (см. рис. 8).

**Заключение.** Приведенный сравнительный анализ активной и пассивной теплозащиты на самолетах гражданской авиации выявил различия между применением типовой боковой стенки самолета с пассивной ТЗИ и обратной панелью.

Системы кондиционирования воздуха сопоставлялись по потребному расходу подачи воздуха в салон, количеству поступающей в него теплоты, а также по массовой характеристике ТЗИ. В результате были определены лишь незначительные различия между двумя видами теплозащиты. Полученные результаты позволяют предположить, что можно применять панели в СКВ пассажирских самолетов, но при условии выбора более эффективных ТЗИ. Предварительный расчет приращений взлетной массы самолета и запаса топлива для СКВ с пассивной ТЗИ и с панельным теплообменом подтвердил правильность таких выводов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории*, 2015, с поправкой 10 от 28.06.2022.
- [2] Дьяченко Ю.В., Спарин В.А., Чичиндаев А.В. *Системы жизнеобеспечения летательных аппаратов*. Новосибирск, НГТУ, 2003.
- [3] Воронин Г.И. *Конструирование машин и агрегатов систем кондиционирования*. Москва, Машиностроение, 1978 .
- [4] Алексеев Г.Н. *Общая теплотехника*. Москва, Высшая школа, 1980.
- [5] Нестеренко А.В. *Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха*. Москва, Высшая школа, 1971.
- [6] Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. *Теплопередача*. Москва, Энергия, 1975.
- [7] *Руководство по технической эксплуатации Ту-214*. Москва, Департамент ГС ГА Минтранса России, 21.05.2001.
- [8] Пашенко Н.И., Дьяченко Ю.В. Моделирование авиационной системы кондиционирования воздуха. *Авиакосм. приборостроение*, 2008, № 12, с. 31–37.
- [9] *ГОСТ 4401–81. Межгосударственный стандарт. Атмосфера стандартная. Параметры*. Соответствует международному стандарту ISO 2533–75. Москва, ИПК Изд-во стандартов, 01.07.1982, дата актуализации 2021.
- [10] Лыков А.В. *Теория теплопроводности*. Москва, Высшая школа, 1967.
- [11] Эккерт Э.Р., Дрейк Р.М. *Теория тепло- и массообмена*. Москва, Госэнергоиздат, 1961.
- [12] Воронин Г.И., Верба М.И. *Кондиционирование воздуха на летательных аппаратах*. Москва, Машиностроение, 1965 .
- [13] Михеев М.А. *Основы теплопередачи*. Москва, Госэнергоиздат, 1960.
- [14] Grishina L.A., Pronin D.V. Analysis of the work, efficiency and possibilities of constructive improvement of electrical air conditioning systems. Moscow Aviation Institute (National Research University). *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 383, 04042, TT21C-2023.
- [15] Шустров Ю.М. *Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха*. Москва, Машиностроение, 2006.
- [16] Дракин И.И. *Аэродинамический и лучистый нагрев в полете*. Москва, Оборонгиз, 1961.
- [17] Кошкин В.К. *Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике*. Москва, Машиностроение, 1975.
- [18] Куталадзе С.С., Боришанский В.М. *Справочник по теплопередаче*. Москва, Госэнергоиздат, 1959.

- [19] *ГОСТ Р Система увязки геометрических параметров и обеспечения взаимозаменяемости узлов и агрегатов ЛА. Общие положения.* Москва, Стандартинформ, 2020.
- [20] Токарев В.И., Мельников Б.Н., Воротынцев В.М. *Снижение шума бортовых систем кондиционирования воздуха.* Москва, Транспорт, 1986.
- [21] Егер С.М., Мишин В.Ф., Лисейцев Н.К. *Проектирование самолетов.* Москва, Машиностроение, 1983.

Статья поступила в редакцию 18.09.2024

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гришина Л.А., Полудницын С.Б. Сравнительный анализ системы кондиционирования воздуха с применением панельного и пассивного теплообмена для пассажирского самолета. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, вып. 2. EDN VGEXNK

**Гришина Лариса Андреевна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры 101 «Проектирование и сертификация авиационной техники» Московского авиационного института. e-mail: petrolar88@yandex.ru

**Полудницын Сергей Борисович** — инженер-конструктор 3-й категории АО «Туполев». Специалист в области систем жизнеобеспечения и оборудования летательных аппаратов. e-mail: sergeipoludnitsyn@yandex.ru

## **Comparative analysis of the air conditioning system using the panel and passive heat exchange for a passenger aircraft**

© L.A. Grishina<sup>1</sup>, S.B. Poludnitsyn<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Moscow, 125993, Russian Federation

<sup>2</sup>United Aircraft Company Tupolev — Public Joint Stock Company,  
Moscow, 105005, Russian Federation

*The paper uses a medium-range passenger aircraft as an example to consider application options of the air conditioning systems (ACS) with the panel and passive heat exchange. It provides a comparative analysis of the specified systems using such indicators as total heat flow, amount of the air supplied, and temperature of the air supplied to the aircraft cabin. For the ACS options, an equation for heat balance of the aircraft pressurized cabin is compiled and solved in the two extreme modes: maximum cooling and maximum heating. The paper studies the issue of feasibility when using the panel heat protection in the domestic passenger aircraft ACS. In addition, it analyzes the use of various types of the heat and sound insulation (HSI) materials. In the same way, an equation for heat balance of the aircraft pressurized cabin is compiled and solved for the HSI of different types. When comparing the computed data for the total HSI mass indicator, the paper determines the optimal material VPP-1 and recommends it for use. The paper provides preliminary computation of the takeoff weight and fuel reserve increment for two types of the ACS and various SI materials.*

**Keywords:** *passive thermal protection, active thermal protection, panel heat exchange, heat and mass exchange, heat exchange, air conditioning system*

### REFERENCES

- [1] *Aviatsionnye Pravila. Chast 25. Normy letnoy godnosti samoletov transportnoy kategorii* [Aviation regulations. Part 25. Airworthiness standards for transport category aircraft], 2015, with amendment 10 dated June 28, 2022.
- [2] Dyachenko Yu.V., Sparin V.A., Chichindaev A.V. *Sistemy zhizneobespecheniya letatelnykh apparatov* [Aircraft life support systems]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2003.
- [3] Voronin G.I. *Konstruirovaniye mashin i agregatov sistem konditsionirovaniya* [Design of machines and units of the air conditioning systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978.
- [4] Alekseev G.N. *Obshchaya teplotekhnika* [General heat engineering]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1980.
- [5] Nesterenko A.V. *Osnovy termodinamicheskikh raschetov ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukha* [Fundamentals of thermodynamic calculations of ventilation and air conditioning]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1971.
- [6] Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1975.
- [7] *Rukovodstvo po tekhnicheskoy ekspluatatsii Tu-214* [Aircraft Tu-214 Guide. Technical Operation]. Moscow, Departament GS GA Mintransa Rossii Publ., 21.05.2001.
- [8] Pashchenko N.I., Dyachenko Yu.V. *Modelirovaniye aviatsionnoy sistemy konditsionirovaniya vozdukha* [Modeling of the aircraft air conditioning system].

- Aviakosmicheskoe priborostroenie — Aerospace Instrument-Making*, 2008, no. 12, pp. 31–37.
- [9] *GOST 4401–81. Mezhhgosudarstvennyi standart. Atmosfera standartnaya. Parametry* [GOST 4401-81. Interstate standard. Standard atmosphere. Parameters]. Moscow, IPK Standards Publ., July 1, 1982, last updated in 2021.
- [10] Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of Heat Conduction]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1967.
- [11] Eckert E.R., Drake R.M. *Heat and Mass Transfer*. McGraw Hill Text, 1959 [In Russ.: Ekkert E.R., Dreyk R.M. *Teoriya teplo- i massobmena*. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1961].
- [12] Voronin G.I., Verba M.I. *Konditsionirovanie vozdukha na letatelnykh apparatakh* [Air Conditioning in the Aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965.
- [13] Mikheev M.A. *Osnovy teploperedachi* [Fundamentals of Heat Transfer]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1960.
- [14] Grishina L.A., Pronin D.V. Analysis of the work, efficiency and possibilities of constructive improvement of electrical air conditioning systems. Moscow Aviation Institute (National Research University). In: *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 383, 04042, TT21C-2023.
- [15] Shustrov Yu.M. *Proektirovanie aviatsionnykh sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Design of the aircraft air conditioning systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006.
- [16] Drakin I.I. *Aerodinamicheskii i luchisty nagrev v polete* [Aerodynamic and radiant heating in flight]. Moscow, Oborongiz Publ., 1961.
- [17] Koshkin V.K. *Osnovy teploperedachi v aviatsionnoy i raketno-kosmicheskoy tekhnike* [Fundamentals of heat transfer in the aviation and rocket-space technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975.
- [18] Kutaladze S.S., Borishansky V.M. *Spravochnik po teploperedache* [Handbook of heat transfer]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1959.
- [19] *GOST R Sistema uvyazki geometricheskikh parametrov i obespecheniya vzaimozamenyemosti uzlov i agregatov LA. Obshchie polozheniya* [GOST R. System for linking the geometric parameters and ensuring interchangeability of the aircraft components and assemblies. General provisions]. Moscow, Standartinform Publ., 2020.
- [20] Tokarev V.I., Melnikov B.N., Vorotyntsev V.M. *Snizhenie shuma bortovykh sistem konditsionirovaniya vozdukha* [Noise reduction of the on-board air conditioning systems]. Moscow, Transport Publ., 1986.
- [21] Eger S.M., Mishin V.F., Liseytshev N.K. *Proektirovanie samoletov* [Aircraft design]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983.

**Grishina L.A.**, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of Department 101 “Aircraft Design and Certification”, Moscow Aviation Institute (National Research University). e-mail: petrolar88@yandex.ru

**Poludnitsyn S.B.**, 3rd category Design Engineer, United Aircraft Company Tupolev — Public Joint Stock Company; specialist in the aircraft life support systems and equipment. e-mail: sergeipoludnitsyn@yandex.ru