

## Моделирование системы распределения воздуха пассажирского самолета

© С.Н. Гусаркин, С.Н. Скиданов

МАИ, Москва, 125993, Россия

*На основе результатов гидравлического расчета трехмерной геометрии трубопроводов предложен метод построения одномерной модели системы распределения воздуха в гермокабине пассажирского самолета. Преимущества этого метода заключаются в возможности быстро и с достаточной точностью пересчитать распределение воздуха больших разветвленных систем при внесении изменений в их конструкцию. По сравнению с пересчетом полной трехмерной геометрии конструкции в современном CFD-пакете (Computational Fluid Dynamics) при использовании такого метода требуются меньшие затраты вычислительной мощности и трудоемкости. Приведено описание работы прототипа системы распределения воздуха, а также рассмотрены структурная и функциональная схемы системы. Показано определение расходной характеристики трубопроводов системы с помощью трехмерного моделирования. Представлена построенная компьютерная модель системы, продемонстрированы возможности работы модели на статических и динамических режимах моделирования. По итогам моделирования выполнен анализ результатов, который подтвердил возможность использования приведенного в работе метода для инженерных расчетов. Верификация компьютерной модели проведена на результатах экспериментальных исследований с натурального стенда прототипа системы распределения воздуха.*

**Ключевые слова:** система распределения воздуха, одномерное моделирование, трехмерное моделирование, расходная характеристика

**Введение.** Современный пассажирский самолет имеет довольно неудобную компоновку для функционирования системы вентиляции, так как разбит на множество отсеков, отвечающих различным целевым назначениям. При решении задачи распределения воздуха необходимо стремиться к тому, чтобы его подача по длине фюзеляжа, составляющей в некоторых случаях десятки метров, была равномерной. Неравномерность подачи может привести к образованию застойных зон по длине кабины, а также нарушить симметрию циркуляции воздуха в поперечном сечении кабины, в результате чего также могут образовываться застойные зоны [1].

Информацию о распределении воздуха в кабине при разработке системы вентиляции обычно получают с натуральных стендов, имитирующих исследуемый салон самолета. Оптимальное распределение воздуха по системе обеспечивают с помощью дополнительных местных сопротивлений (шайб, сужений, диффузоров и т. д.) в трубопроводах системы. В итоге формируется конфигурация системы с оптимальным распределением воздуха для конкретной компоновки

гермокабины. Следовательно, при изменениях в конструкции системы ее необходимо заново балансировать.

Для того чтобы сократить временные и финансовые затраты, возникает необходимость разработать новые методы расчета с использованием современного программного обеспечения. Одним из таких методов может стать построение одномерной модели системы распределения воздуха с помощью расчета тракта в CFD-пакете (Computational Fluid Dynamics).

Классический подход к расчету систем распределения воздуха представлен в работах [1, 2]. Теория газовой динамики изложена в [3], а используемая в работе расходная характеристика рассмотрена в [4]. Моделированию систем вентиляции посвящено достаточно много работ, среди которых можно выделить как отечественные [5–8], так и иностранные [9–14].

Цель настоящей статьи — предложить метод расчета систем распределения воздуха пассажирских самолетов, основанный на создании одномерной модели, которая построена путем расчета трехмерной геометрии гидравлического тракта системы.

Для построения одномерной модели необходимо:

1) разбить модель трубопроводов системы на участки, провести их гидравлический расчет и построить расходную характеристику каждого участка;

2) построить и параметризовать одномерную модель системы распределения;

3) смоделировать работу системы на различных режимах и сопоставить полученные результаты с данными стендовых испытаний.

**Конструкция системы распределения воздуха.** Эта система должна обеспечивать равномерное и достаточное распределение воздуха в кабине экипажа самолета и трех зонах пассажирского салона. Основная часть свежего воздуха из двух установок охлаждения поступает в смеситель, где смешивается с отработанным воздухом из салона, нагнетаемым с помощью двух вентиляторов рециркуляции, а затем попадает в систему распределения пассажирского салона. Другая часть свежего воздуха попадает в кабину пилотов напрямую из установок охлаждения. Для того чтобы обеспечить тепловой режим в гермокабине, в трубопроводы подачи воздуха подмешивается горячий воздух, но эта подсистема в настоящей статье не рассматривается.

Функциональная схема системы распределения воздуха приведена на рис. 1. В пассажирский салон воздух из системы подается через специальные патрубки либо напрямую, либо через багажные полки. В кабине пилотов воздух подается на стекла, чтобы предотвращать их запотевание, и на пилотов, поступая через индивидуальные патрубки обдува, расположенные на потолке.

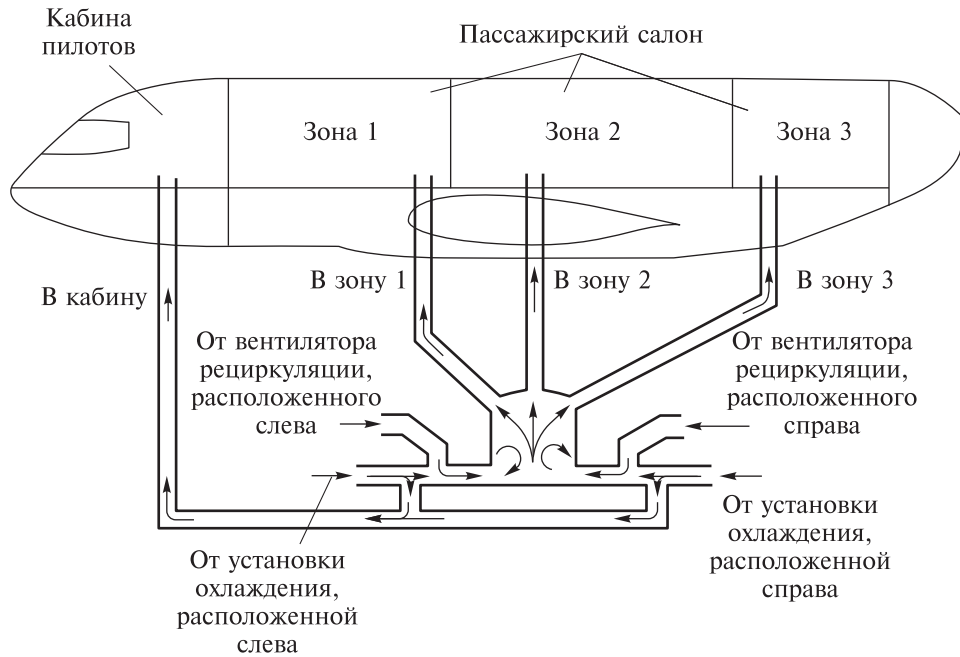


Рис. 1. Типовая функциональная схема системы распределения воздуха

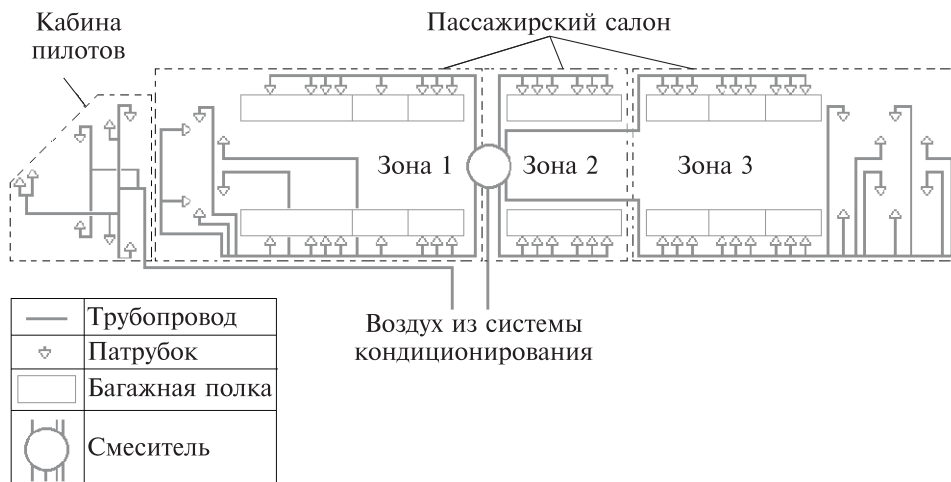


Рис. 2. Типовая структурная схема системы распределения воздуха

Типовая структурная схема системы распределения воздуха приведена на рис. 2.

Функциональная и структурная схемы системы распределения воздуха, приведенные на рис. 1 и 2, являются типовыми для современных среднемагистральных пассажирских самолетов, таких как А-320, В-737 и МС-21.

**Определение расходной характеристики трубопроводов системы.** Для параметризации одномерной модели необходимо определить расходные характеристики трубопроводов системы в виде зависимости объемного расхода воздуха  $Q$ , проходящего через систему, от перепада полного давления  $\Delta p$  на концах рассматриваемого участка:

$$Q = k\Delta p^m, \quad (1)$$

где  $k$  и  $m$  — характерные коэффициенты, получаемые опытным путем или с помощью CFD-расчета.

Необходимо отметить, что соотношение (1) не зависит от плотности рабочего воздуха, поэтому оно справедливо только для тех термодинамических параметров рабочего воздуха (давления и температуры), при которых это соотношение получено.

В программе FloEFD (Flow Engineering Fluid Dynamics) по отдельности были выполнены расчеты участков гидравлической сети системы распределения воздуха при трех разных расходах, подобранных так, чтобы максимальная скорость воздуха в трубопроводах составляла  $\approx 5, 15$  и  $25$  м/с. Эти значения были выбраны исходя из требований к скорости потока в трубах, предъявляемых техническим заданием к системе распределения воздуха. Тогда рабочие расходы гидравлической сети системы попадают примерно в середину их характеристики.

Определив перепады полного давления на выбранных расходах в программе Excel с использованием инструмента построения линии тренда, подбирается степенная функция, являющаяся расходной характеристикой.

В одномерной модели для расчета массового расхода рабочего воздуха  $G$  через трубопроводы используется полученный с помощью (1) объемный расход:

$$G = Q\sqrt{\rho_{\text{хар}}\rho},$$

где  $\rho_{\text{хар}}$  — плотность воздуха, при которой была получена расходная характеристика (1);  $\rho$  — плотность воздуха, при которой ведется расчет.

**Построение и параметризация одномерной модели.** Математическая модель системы строится с помощью компонентов из специализированных библиотек Simcenter Amesim для моделирования пневматических систем с учетом влажности рабочего газа.

В библиотеке газовой смеси Simcenter Amesim давление  $P$  и температура  $T$  являются основными переменными, плотность можно

вычислить посредством уравнения состояния [15]. Для идеального газа плотность — обратная величина удельного объема  $V$ :

$$P = \frac{RT}{V};$$
$$R = \sum_i Y_i R_i.$$

Здесь  $R$  — газовая постоянная смеси (в рассматриваемом случае сухого воздуха и водяного пара);  $Y_i$  — массовая доля газа в смеси;  $R_i$  — газовая постоянная газа в смеси [15].

Полное давление смеси рассчитывается по закону Дальтона как сумма парциальных давлений газов в смеси [15].

Удельная теплоемкость  $C_p$  при постоянном давлении определяется по функции от температуры [15]:

$$C_p(T) = R \left( \frac{a_1}{T^2} + \frac{a_2}{T} + a_3 + a_4 T + a_5 T^2 + a_6 T^3 + a_7 T^4 \right),$$

где  $a_{1-7}$  — постоянные коэффициенты, зависящие от составляющих газовой смеси.

В элементах, имитирующих смеситель, а также газовые полости между сопротивлениями, которые воспроизводят с точностью гидравлическую сеть системы, давление  $P$ , температура  $T$ , а также парциальные давления газов  $P_i$  находятся из их производных по времени  $t$  с помощью следующих уравнений [15]:

– массового баланса

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho V)}{dt};$$

– энергетического баланса

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d(mh - PV)}{dt};$$

– баланса смеси газов

$$\frac{dY_i}{dt} = \frac{1}{m} \left( \frac{dm_i}{dt} - Y_i \frac{dm}{dt} \right).$$

Здесь  $m$  — полная масса смеси;  $dt$  — производная по времени;  $U$  — внутренняя энергия смеси;  $h$  — удельная энтальпия смеси;  $m_i$  — масса отдельного газа в смеси.

Конденсация воды в удельном объеме воздуха  $V$  происходит, когда парциальное давление водяного пара  $P_{wv}$  превышает его давление насыщения  $P_{wvSat}$  при температуре влажного воздуха  $T_{ma}$ . Массовый расход сконденсированной воды  $dm_{cond}$  в этом случае определяется следующим образом [15]:

$$dm_{cond} = \begin{cases} 0, & \text{если } P_{wv} < P_{wvSat}(T_{ma}); \\ \frac{V}{r_{wv}T_{ma}} \frac{P_{wvSat}(T_{ma}) - P_{wv}}{\tau} & \text{в остальных случаях,} \end{cases}$$

где  $r_{wv}$  — газовая постоянная водяного пара;  $\tau$  — константа времени гомогенной конденсации.

Испарение жидкой воды в удельный объем воздуха  $V$  происходит, когда парциальное давление водяного пара  $P_{wv}$  становится ниже давления насыщения  $P_{wvSat}$  при температуре жидкой воды  $T_{liq}$ . Тогда массовый расход испаряемого водяного пара  $dm_{evap}$  рассчитывают так [15]:

$$dm_{evap} = \begin{cases} 0, & \text{если } P_{wv} \geq P_{wvSat}(T_{liq}); \\ \rho_{ma} k_{evap} S_{liq/gas} \frac{r_{ma}}{r_{wv}} \frac{P_{wvSat}(T_{liq}) - P_{wv}}{P} & \text{в остальных случаях,} \end{cases}$$

где  $\rho_{ma}$  — плотность влажного воздуха;  $k_{evap}$  — коэффициент массообмена при испарении;  $S_{liq/gas}$  — площадь поверхности жидкой воды;  $r_{ma}$  — газовая постоянная влажного воздуха.

Расчетная модель системы распределения воздуха показана на рис. 3.

Результаты расчета модели системы распределения воздуха приведены на рис. 4. На графиках приведена зависимость давления в смесителе и перед трубопроводами от общего расхода воздуха в систему распределения воздуха и расходов по зонам пассажирского салона.

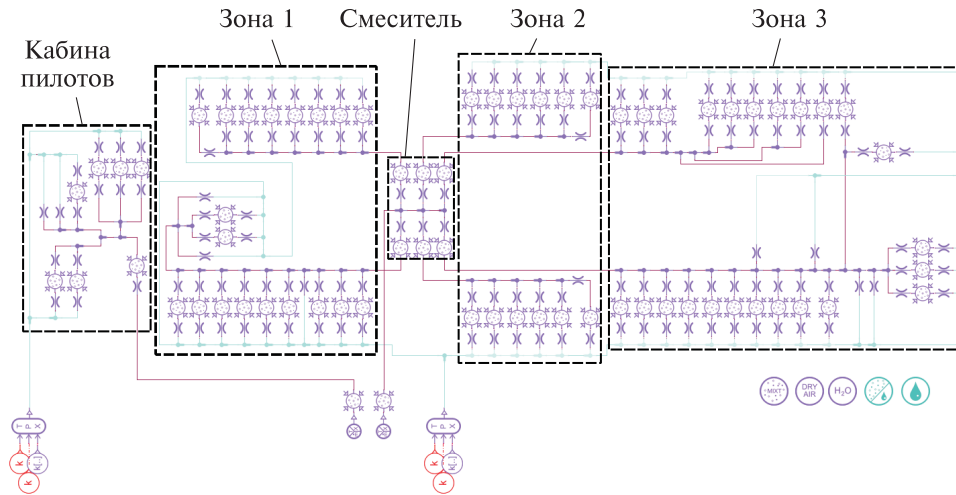


Рис. 3. Модель системы распределения воздуха в Simcenter Amesim

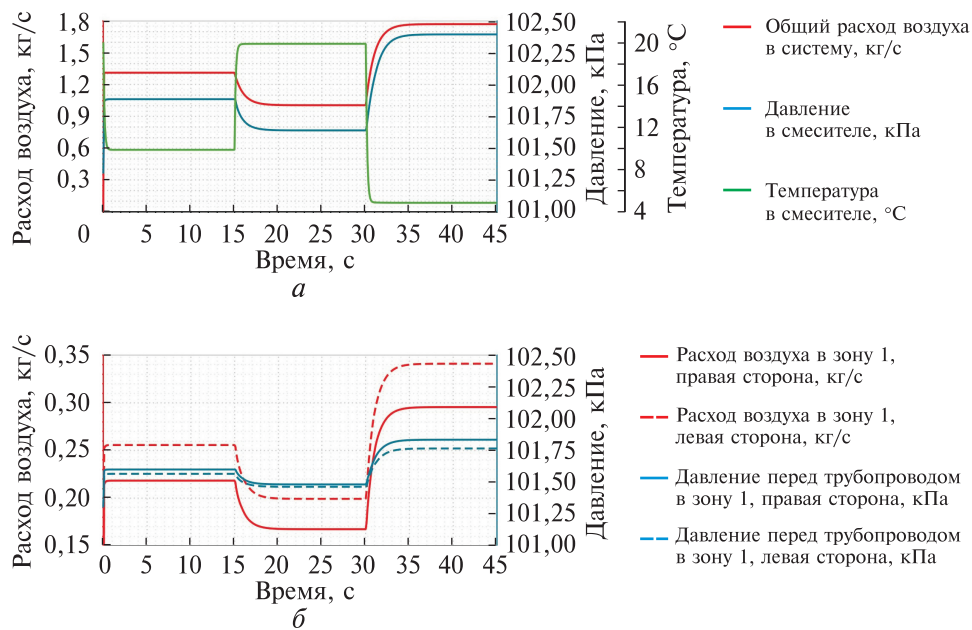
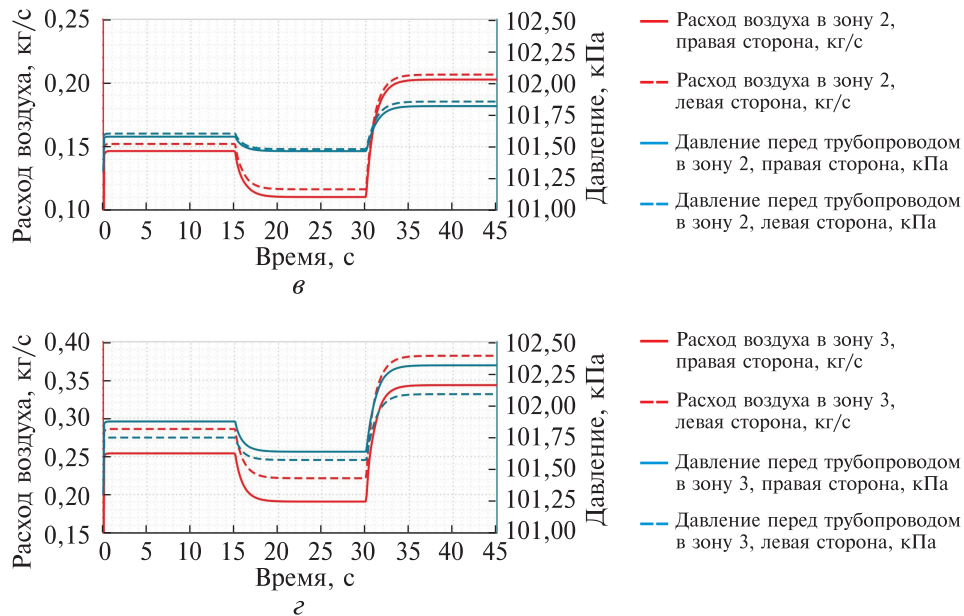


Рис. 4 (начало). Результаты расчета модели системы распределения воздуха:  
 а — изменение общих параметров (расход воздуха, давление, температура) в пассажирском самолете; б — первая зона пассажирского самолета



**Рис. 4 (окончание).** Результаты расчета модели системы распределения воздуха:  
 в — вторая зона пассажирского самолета; з — третья зона пассажирского самолета

**Моделирование функционирования системы на рабочих режимах.** Для проверки достоверности разработанной модели было проведено сравнение результатов моделирования некоторых режимов работы системы распределения воздуха с данными стендовых испытаний (табл. 1). Найдено относительное отклонение результатов моделирования от данных испытаний (табл. 2). При сравнении использовали пять различных режимов работы системы, соответствующих реальным ситуациям на борту самолета (табл. 3). Все значения в табл. 1 и 3 даны в процентах от максимально возможного значения расхода в системе распределения воздуха.

Таблица 1

**Результаты расчета разработанной модели и данные стендовых испытаний системы распределения воздуха**

Режим работы системы	Расход воздуха в системе распределения, %							Тип испытания
	Кабина пилотов	Зона 1		Зона 2		Зона 3		
		левая	правая	левая	правая	левая	правая	
1	6,9	18,2	15,7	11,0	10,8	19,8	17,5	Стендовое испытание
	6,9	18,2	15,7	11,0	10,8	19,9	17,5	Моделирование
2	5,8	15,8	13,4	9,3	9,1	16,7	14,8	Стендовое испытание



Режим работы системы	Расход воздуха в системе распределения, %							Тип испытания
	Кабина пилотов	Зона 1		Зона 2		Зона 3		
		левая	правая	левая	правая	левая	правая	
2	5,7	15,5	13,2	9,2	9,0	17,1	15,0	Моделирование
3	4,4	13,8	11,7	7,5	7,2	12,9	11,7	Стендовое испытание
	4,6	12,8	10,8	7,5	7,3	13,9	12,2	Моделирование
4	4,7	13,5	11,2	7,7	7,3	12,8	11,4	Стендовое испытание
	4,6	12,7	10,7	7,5	7,2	13,8	12,1	Моделирование
5	4,4	12,0	10,2	7,1	6,8	13,2	11,6	Стендовое испытание
	4,4	12,0	10,2	7,1	6,8	13,1	11,7	Моделирование

Таблица 2

**Относительные отклонения результатов моделирования от данных стендового испытания системы распределения воздуха**

Режим работы системы	Относительное отклонение, %						
	Кабина экипажа	Зона 1		Зона 2		Зона 3	
		левая	правая	левая	правая	левая	правая
1	0,16	0,08	0,01	0,03	0,25	0,59	0,09
2	1,22	1,77	1,33	0,89	0,76	2,40	1,17
3	3,23	8,09	7,73	0,85	1,21	6,85	4,52
4	0,49	6,66	4,08	2,91	1,91	6,75	6,04
5	0,83	0,4	0,32	0,36	0,52	0,26	0,61

Таблица 3

**Режимы работы системы распределения воздуха при моделировании и проведении стендовых испытаний**

Расход воздуха в системе распределения, %	Режим работы системы				
	1	2	3	4	5
От левой установки охлаждения	32,6	23,3	0	43,6	32,3
От правой установки охлаждения	32,3	23,2	43,9	0	32,9
От левого вентилятора рециркуляции	17,6	19,2	0	25,0	0
От правого вентилятора рециркуляции	17,5	19,1	25,2	0	0
Общий расход в систему	100	84,8	69,1	68,6	65,2

Анализируя величины относительных отклонений (см. табл. 2), можно заметить, что на режимах 3 и 4 относительные отклонения превышают 5 % и доходят до 8,09 %, а это является неприемлемым для инженерных расчетов. Причина таких отклонений заключается в неравномерности подачи воздуха в смеситель на этих режимах, что приводит к изменению расходной характеристики смесителя (рис. 5). В остальных режимах, когда воздух в смеситель подается равномерно, отклонения не превышают 2,4 %.

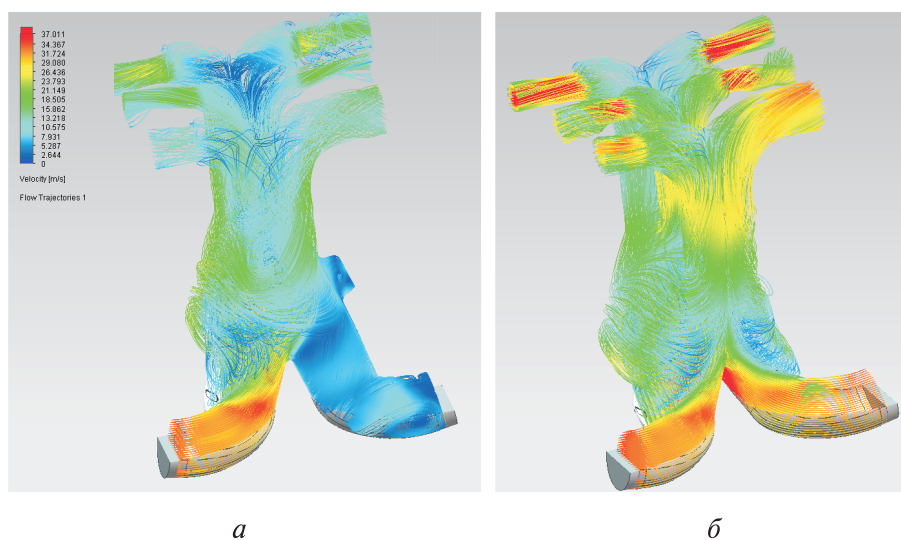
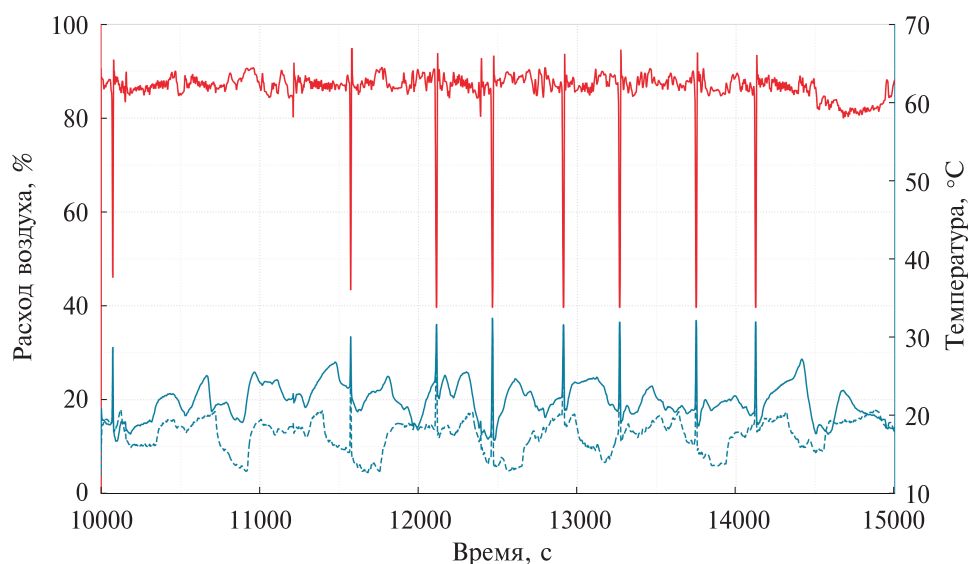


Рис. 5. Характер смешения воздуха в смесителе:  
*a* — неравномерная подача; *б* — нормальная работа

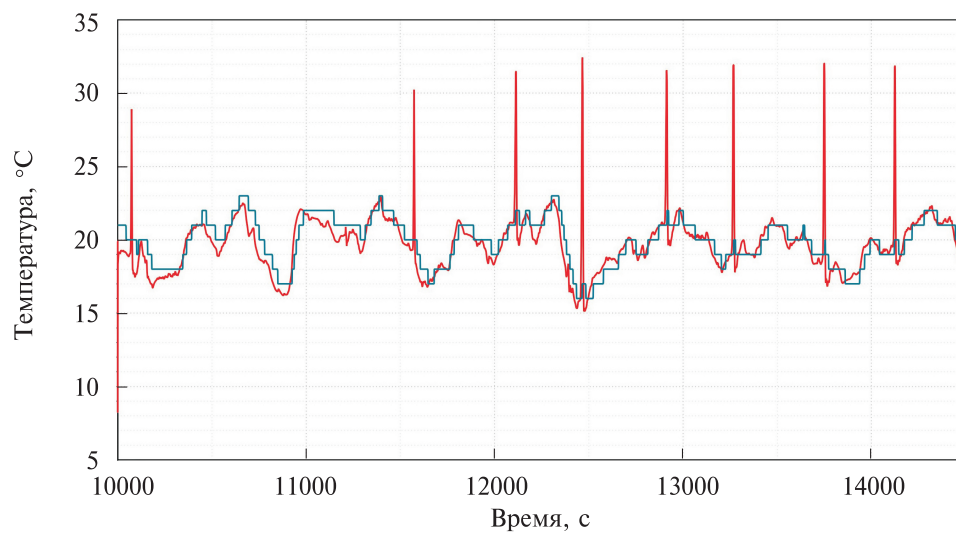
В дальнейшем авторы настоящей статьи планируют проработать способ построения двухкритериальной характеристики для смесителя в целях обеспечения более высокой точности моделирования при неравномерной подаче воздуха в систему.

**Динамическое моделирование системы.** Для того чтобы расширить область применения полученной модели, было проведено моделирование на нестационарных режимах, где граничными условиями работы модели стали данные, полученные в процессе летных испытаний системы распределения воздуха (рис. 6). Граничными условиями на входе были данные о расходе и температуре воздуха, поступающего в систему, а на выходе из сети — давление в гермокабине.

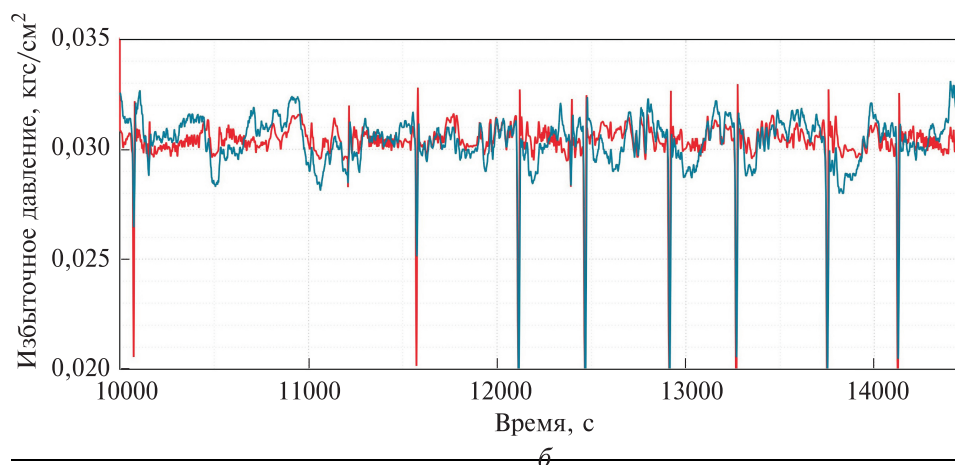
Для сравнения на рис. 7 показаны температура и избыточное давление в смесителе системы распределения воздуха, полученные по данным летных испытаний, и результаты моделирования.



**Рис. 6.** Результаты летных испытаний системы распределения воздуха:  
 — общий расход воздуха в систему распределения воздуха, %; — температура подачи воздуха в систему от вентилятора рециркуляции и установки охлаждения, расположенной справа по борту, °C; — температура подачи воздуха в систему от вентилятора рециркуляции и установки охлаждения, расположенной слева по борту, °C



**Рис. 7 (начало).** Температура воздуха, °C, (a) в смесителе по данным летных испытаний (—) и при моделировании (—)



**Рис. 7 (окончание).** Избыточное давление воздуха, кгс/см<sup>2</sup>, (б) в смесителе по данным летных испытаний (—) и при моделировании (—)

При анализе графика температуры (рис. 7, а) замечен недостаток модели системы распределения воздуха — сверхчувствительность датчика температуры. Это обусловлено тем, что в реальных условиях, в отличие от расчетного значения температуры в модели, этот датчик обладает определенной тепловой инерцией. Поэтому для более точного моделирования нестационарных режимов необходимо определять степени чувствительности реальных датчиков, используемых при летных испытаниях исследуемой системы, и вводить обработку сигнала температуры в модель [8].

На графике избыточных давлений (рис. 7, б) видно, что при летных испытаниях датчик давления регистрирует много локальных изменений давления, в то время как модель считает точное давление в выбранном объеме.

В итоге относительное отклонение результатов моделирования от испытания в некоторых моментах времени составило около 5...7 %.

**Заключение.** Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными подтверждает возможность применения разработанного метода для проведения балансировочных расчетов системы распределения воздуха при внесении изменений в конструкцию гидравлической сети системы без проведения стендовых испытаний. Для уточнения модели на режимах неравномерной подачи в смеситель следует разработать способ построения двухкритериальной характеристики.

Необходимо подробно исследовать поведение описанной модели при моделировании нестационарных задач для ее доработки в целях включения в состав комплексной модели системы кондиционирования воздуха самолета.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шустров Ю.М., ред. *Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха*. Москва, Машиностроение, 2006, 384 с.
- [2] Дьяченко Ю.В., Спарин В.А., Чичиндаев А.В. *Системы жизнеобеспечения летательных аппаратов*. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2003, 512 с.
- [3] Абрамович Г.Н. *Прикладная газовая динамика*. 5-е изд., перераб. и доп. Москва, Наука, 1991, 304 с.
- [4] Eero-Matti S., Holopainen R. A PQ-formulation for ventilation duct system flow analyses. *International Journal of Ventilation*, 2008, vol. 7 (3), pp. 251–265. DOI: 10.1080/14733315.2008.11683816
- [5] Волков А.А. Расчет интенсивности вентиляции гермоотсеков самолета. *Труды МАИ*, 2011, № 42. URL: <https://mai.ru/upload/iblock/ca5/raschet-intensivnosti-ventilyatsii-germootsekov-samolyeta.pdf> (дата обращения 16.09.2020).
- [6] Волков А.А. Нестационарные режимы работы системы терморегулирования гермокабины. *Вестник МАИ*, 2011, т. 18, № 3, с. 5–9.
- [7] Старостин К.И. Математическое моделирование авиационных систем кондиционирования воздуха с учетом влажности. *Вестник МАИ*, 2009, т. 16, № 2, с. 141–145.
- [8] Волков А.А. *Исследование нестационарных режимов работы систем вентиляции герметичных отсеков пассажирских самолетов и их влияние на выбор рациональных параметров системы кондиционирования воздуха*: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.02. Москва, МАИ, 2013, 174 с.
- [9] Tu Y., Zeng Y. One-dimensional and three-dimensional computational thermal fluid hybrid analysis-aided air distribution pipeline system design. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2020, vol. 14:1, pp. 436–446. DOI: 10.1080/19942060.2020.1717996
- [10] Sanderson M. *Noise generation and propagation within an aircraft air distribution system*. Engineering and the Environment, Master Thesis. University of Southampton, 2015, 197 pp. URL: <http://eprints.soton.ac.uk/390682/> (дата обращения 16.09.2020).
- [11] *SAE/TP 2009-01-3264–2009. Achieving an Improved Understanding of the Factors Affecting an Aircraft Environmental Control System by Coupling a 1D Cabin Air Distribution System Model with a 3D Passenger Cabin Model using Co-Simulation Middleware*. DOI: 10.4271/2009-01-3264
- [12] Chen X., Yang J., Yu T., Yang S. A Coupled 1D/3D co-simulation approach in simulating aircraft cabin temperature field. *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology*, 2016, vol. 17 (40). URL: <http://ijssst.info/Vol-17/No-40/paper11.pdf> (дата обращения 16.09.2020).
- [13] Müller C., Scholz D., Giese T. Dynamic simulation of innovative aircraft air conditioning. *First CEAS European Air and Space Conference*, 2007. URL: [https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/FLECS/FLECS\\_Paper\\_CEAS\\_07-09-10.pdf](https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/FLECS/FLECS_Paper_CEAS_07-09-10.pdf) (дата обращения 16.09.2020).
- [14] Pang L., Xu J., Fang L., Gong M., Zhang H., Zhang Y. Evaluation of an improved air distribution system for aircraft cabin. *Building and Environment*, 2013, vol. 59 (59), pp. 145–152. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012/08/015
- [15] *Simcenter Amesim 17 Gas Mixture Library User's guide*. Siemens Industry Software NV, 2018. URL: <http://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/> (дата обращения 16.09.2020).

Статья поступила в редакцию 14.10.2020

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Гусаркин С.В., Скиданов С.Н. Моделирование системы распределения воздуха пассажирского самолета. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 2.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-2-2054>

**Гусаркин Сергей Николаевич** — аспирант кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники» МАИ. e-mail: [gusarkin.sergei@yandex.ru](mailto:gusarkin.sergei@yandex.ru)

**Скиданов Сергей Николаевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники» МАИ. e-mail: [sns11321@yandex.ru](mailto:sns11321@yandex.ru)

## **Simulating air distribution system for civil aircraft**

© S.N. Gusarkin, S.N. Skidanov

Moscow Aviation Institute (National Research University),  
Moscow, 125993, Russia

*The paper considers an air distribution system for a pressurized cabin in a civil aircraft. We propose a method for simulating this system that involves developing a one-dimensional model based on hydraulic computation results for the three-dimensional geometry of the distribution system structure. This approach makes it possible to recompute air distribution in large branching systems relatively quickly and with sufficient accuracy when making changes to their design. The advantages of this method include lower computing costs and lower labour intensity compared to using a modern CFD software package to simulate a full three-dimensional flow in the distribution system structure. The paper describes the operation of the air distribution system prototype and presents the schematic diagram and the functional flow block diagram of the system. We show how to use three-dimensional simulation to determine the discharge characteristics of system pipelines. We present the numerical model constructed for the system and display the capabilities of this model in static and dynamic simulation modes. We analysed the simulation results and confirmed the possibility of using the method proposed for engineering computations. We validated the numerical model using experimental investigation results obtained by means of an empirical test bench simulating the air distribution system prototype.*

**Keywords:** *air distribution system, one-dimensional simulation, three-dimensional simulation, discharge characteristic*

### REFERENCES

- [1] Shustrov Yu.M., ed. *Proektirovanie aviatsionnykh sistem konditsionirovaniya vozdukh* [Design of aviation air conditioning systems]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2006, 384 p.
- [2] Dyachenko Yu.V., Sparin V.A., Chichindaev A.V. *Sistemy zhizneobespecheniya letatelnykh apparatov* [Aircraft life support systems]. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 2003, 512 p.
- [3] Abramovich G.N. *Prikladnaya gazovaya dinamika* [Applied gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1969, 824 p.
- [4] Eero-Matti S., Holopainen R. *International Journal of Ventilation*, 2008, vol. 7 (3), pp. 251–265. DOI: 10.1080/14733315.2008.11683816
- [5] Volkov A.A. *Trudy MAI — Trudy MAI Journal (Proc. of the Moscow Aviation Institute)*, 2011, no. 42. Available at: <https://mai.ru/upload/iblock/ca5/raschet-intensivnosti-ventilyatsii-germootsekov-samolyeta.pdf> (accessed September 16, 2020).
- [6] Volkov A.A. *Vestnik MAI — Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 5–9.
- [7] Starostin K.I. *Vestnik MAI — Aerospace MAI Journal*, 2009, vol. 16, no. 2, pp. 141–145.
- [8] Volkov A.A. *Issledovanie nestatsionarnykh rezhimov raboty sistem ventilyatsii germetichnykh otekov passazhirskikh samoletov i ikh vliyanie na vybor ratsionalnykh parametrov sistemy konditsionirovaniya vozdukh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Investigating non-steady operation modes of ventilation systems in sealed compartments of passenger aircraft and their effect on selecting efficient param-

- eters for the air conditioning system. Cand. Eng. Sc. Diss.]. Moscow, Moscow Aviation Institute, 2013, 174 p.
- [9] Tu Y., Zeng Y. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2020, vol. 14:1, pp. 436–446. DOI: 10.1080/19942060.2020.1717996
- [10] Sanderson M. *Noise generation and propagation within an aircraft air distribution system. Master Thesis*. University of Southampton, Engineering and the Environment, 2015, 197 p. Available at: <http://eprints.soton.ac.uk/390682/> (accessed September 16, 2020).
- [11] *SAE/TP 2009-01-3264-2009. Achieving an Improved Understanding of the Factors Affecting an Aircraft Environmental Control System by Coupling a 1D Cabin Air Distribution System Model with a 3D Passenger Cabin Model using Co-Simulation Middleware*. United States, SAE International, 2009. DOI: 10.4271/2009-01-3264
- [12] Chen X., Yang J., Yu T., Yang S. *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology*, 2016, vol. 17 (40). Available at: <http://ijssst.info/Vol-17/No-40/paper11.pdf> (accessed September 16, 2020).
- [13] Müller C., Scholz D., Giese T. Dynamic Simulation of Innovative Aircraft Air Conditioning. *First CEAS European Air and Space Conference*, 2007. Available at: [https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/FLECS/FLECS\\_Paper\\_CEAS\\_07-09-10.pdf](https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/FLECS/FLECS_Paper_CEAS_07-09-10.pdf) (accessed September 16, 2020).
- [14] Pang L., Xu J., Fang L., Gong M., Zhang H., Zhang Y. *Building and Environment*, 2013, vol. 59 (59), pp. 145–152. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012/08/015
- [15] *Simcenter Amesim 17 Gas Mixture Library User's guide*. Siemens Industry Software NV, 2018. Available at: <http://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/simcenter/> (accessed September 16, 2020).

**Gusarkin S.N.**, post-graduate student, Department of Design and Certification of Aviation Equipment, Moscow Aviation Institute (National Research University).  
e-mail: [gusarkin.sergei@yandex.ru](mailto:gusarkin.sergei@yandex.ru)

**Skidanov S.N.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Design and Certification of Aviation Equipment, Moscow Aviation Institute (National Research University).  
e-mail: [sns11321@yandex.ru](mailto:sns11321@yandex.ru)