

УДК 629.7.04

Моделирование полей температур и скоростей воздуха в салонах воздушных судов

В. В. Демкин

Аннотация

Статья посвящена физическому моделированию вентиляционных процессов в гидравлических лотках для имитации салонов воздушных судов. Рассматривается конструкция гидролотков, процесс исследования вентиляционного потока воздуха в салоне воздушного судна, что позволяет провести сравнение физического и математического моделирования.

Ключевые слова

поля температур; поля скоростей; салон воздушного судна.

Введение

Одним из основных показателей комфорта пассажирских самолетов является качество вентиляционного процесса. Воздух в кабинах не должен содержать вредных примесей и дурно пахнущих веществ. Правильно организованная вентиляция способствует созданию равномерного температурного поля в кабине и препятствует образованию застойных зон. На самолетах вентиляция осуществляется путем непрерывного подвода забираемого из атмосферы свежего воздуха, и сбрасывания отработанного из гермокабины через регулятор давления в атмосферу.

Параметры воздуха, которые должны контролироваться, и их предельные значения регламентированы в авиационных правилах и нормах летной годности самолетов.

Нормальное тепловое самочувствие человека, соответствующее данному виду работы достигается при определенной комбинации значений разности температур тела и окружающей среды, влажности и подвижности воздуха. Нормами предусмотрены комфортные значения температур и влажности, базирующиеся, на богатом экспериментальном материале и хорошо подтверждены практикой.

Определение расхода воздуха, подаваемого в кабину производится, исходя из условий обеспечения теплового режима и создания формируемой концентрации углекислого газа, что соответствует удельной подаче на одного человека 24 кг/час.

Процесс вентиляции является процессом сложного взаимодействия приточных вентиляционных струй с конвективными потоками внутри вентилируемого объема. Причем, в герметической кабине самолета картина усугубляется еще и стесненностью объема, большой плотностью людей в салоне, непостоянным давлением в течение полета и т.д.

Натурные испытания систем вентиляции пассажирских самолетов позволяет получить наиболее полные сведения о вентиляционном процессе в гермокабине (ГК). Однако летные испытания достаточно дороги и переделка, в случае необходимости, спроектированной и воплощенной на готовом изделии системы распределения воздуха (СРВ) требует значительных экономических затрат.

Наиболее эффективным методом исследования вентиляционных систем является метод физического моделирования на уменьшенных геометрически моделях, этот метод обладает большими экономическими преимуществами перед исследованиями на натуральных объектах, и позволяет изучать процессы, происходящие в невыполненных еще в натуре изделиях и изучать влияние на процесс того или другого фактора из всей их совокупности.

Другим методом определения параметров вентиляционной системы является математическое моделирование, при помощи описания сложных процессов и явлений, к которым относятся и процессы вентиляции, которое базируется на применении наиболее общих физических законов к столь малым объектам рассматриваемой среды или системы и в столь малые промежутки времени, что в их пределах можно считать все физические параметры неизменными и равными неким мгновенным значениям. Получаемые дифференциальные уравнения на данном этапе развития вычислительной техники возможно решать достаточно точно и в сжатые сроки. Так же большое значение в исследованиях имеют методы теории подобия, анализа размерностей и аналогий.

Сочетание этих методов, подтверждение расчетов экспериментальными исследованиями гарантирует точность и достоверность инженерных решений осуществленных в проекте системы. Результаты математического моделирования и экспериментальных исследований на модели могут лечь в основу проектирования СРВ, а также предоставить данные для расчета СКВ в целом, т.е. величину требуемого расхода воздуха и его температуру.

Целью работ по созданию эффективной системы кондиционирования воздуха является разработка методов математического моделирования вентиляционных процессов в ГК самолета, и по их результатам выдача рекомендаций по размещению вентиляционных (распре-

делительных) коробов, и параметров вентиляционного воздуха еще на этапе предварительного проектирования СКВ.

Факторы влияющие на процессы вентиляции и методы их моделирования.

Обеспечение в условиях полета определенных физиолого-гигиенических параметров воздуха (давления, температуры, влажности, концентрации вредных примесей, скорости движения воздуха и др.) в кабинах самолетов гражданской авиации является актуальной задачей проектирования и эксплуатации указанных самолетов. Формирование полей таких параметров воздуха, как температура, скорость движения воздуха, концентрация вредных газовых примесей, непосредственно связано с картиной вентиляционных процессов, происходящих в кабине. Относительная простота конструктивного выполнения кабины с распределительными устройствами для поддержания заданных параметров еще не определяет простоты физических процессов, протекающих в ее объеме. Наоборот, процессы, имеющие место внутри кабин самолетов, чрезвычайно сложны и до настоящего времени практически не изучены. Как показывает практика, подача воздуха, удовлетворяющая санитарным нормам, еще не может обеспечить требуемых условий в гермокабинах, поэтому большее значение имеет правильное распределение воздуха по объему кабины, организация рациональной циркуляции и удаления воздуха. При выборе той или иной системы распределения и организации циркуляции воздуха в кабине инженер-конструктор еще на стадии проектирования должен располагать некоторыми сведениями о тепловых и гидродинамических процессах, протекающих в кабинах самолетов. В настоящее время получить эти сведения без проведения экспериментальных исследований в наземных, лабораторных условиях невозможно.

На расход воздуха, подаваемого в кабину, существенное влияние оказывает концентрация углекислого газа в зоне дыхания пассажиров, соответственно необходимо учесть этот параметр в процессе разработки методики моделирования.

Система вентиляции должна организовывать такую подачу воздуха в салон, при которой обеспечивалось бы наиболее равномерное распределение температуры и подвижности воздуха, отвечающих нормам. Необходимо оценить параметры движения приточных вентиляционных струй. Для салонов пассажирских самолетов характерна вентиляция плоскими приточными струями, особенностью которых является то, что во всех сечениях перпендикулярных приточной цели картина течения одна и та же, т.е. можно сказать, что тождественны профили скоростей и температур. Соответственно учитывая стационарность вентиляционного процесса, допуская, что обеспечено равенство выходных характеристик струи по длине

салона, можно допустить тождественность течений в различных сечениях салона, т.е. перейти от трехмерной к плоской задаче.

Наличие пассажиров на борту непосредственным образом влияет на характеристики и структуру систем кондиционирования и вентиляции салона. Человек, даже в спокойном состоянии, излучает тепло, которое является источником конвективного потока, влияющего на формирование и деформацию картины течения воздуха в салоне, на образование и смещение застойных зон.

Процессы вентиляции характеризуются состоянием полей температур у концентрации и скоростей движения воздуха в рассматриваемом объеме. В кабинах самолетов поля скоростей образуются, главным образом, под воздействием приточных струй и струй естественной конвекции. Влияние вытяжных устройств обычно ограничивается геометрически небольшой зоной, непосредственно примыкающей к этим устройствам. Влияние случайных факторов, таких как перемещение пассажиров или членов экипажа, носит нерегулярный характер, не оказывающий воздействия на установившуюся картину движения воздуха, и поэтому в первом приближении может не учитываться.

Характер полей температур и полей концентраций зависит от расположения ж типа источников тепла (или холода) и источников газовых примесей, их интенсивности и взаимодействия с существующими воздушными потоками. В общем случае все перечисленные поля в кабинах самолетов четырехмерны, т.е. конкретные значения параметров в них зависят от трех пространственных координат и от времени.

Математическое описание сложных процессов и явлений, к которым относятся в том числе и процессы вентиляции, базируется на применении общих физических законов к столь малым элементам рассматриваемой среды или системы и в столь малые промежутки времени, что в их пределах можно считать все физические параметры неизменными и равными неким мгновенным значениям. В частности, применение второго закона механики и закона трения Ньютона к исследованию движения вязкой жидкости (газа) позволяет получить уравнение в векторной форме (уравнение Навье-Стокса) из которого выводятся дифференциальные уравнения описывающие процессы вентиляции. Также процессы, происходящие в ГК, можно смоделировать методом конечных элементов.

Проведенный анализ информационного массива в области конвективных потоков над человеком показал, что, несмотря на большой объем исследований в этой области, данные о закономерностях формирования конвективного потока над сидящим одетым человеком отсутствуют.

В результате различных проведенных экспериментальных исследований полей скоростей и температур в конвективном потоке над пассажиром получены профили скоростей и температур в зависимости от высоты при различных теплозащитных свойствах одежды человека, а также исходные данные для разработки математической модели конвективного факела.

Исследования позволили при описании параметров воздушного потока, возникающего при выдохе, использовать математический аппарат для турбулентных струй. Особенностью рассматриваемого процесса является периодичность истечения воздуха, при этом струя преодолевает сопротивление практически неподвижной среды. За счет этого падение параметров воздуха будет происходить более интенсивно, чем у стационарной струи. Зависимости для определения параметров турбулентных струй содержат коэффициенты, определяемые экспериментально, учесть особенности рассматриваемых струй предполагается за счет определения указанных коэффициентов по данным физического эксперимента. Построение математической модели предполагается осуществить в несколько этапов: математическое описание параметров и координат источников газовой выделений; математическое описание параметров воздушных потоков, образующихся в окружающей среде при дыхании; экспериментальные исследования параметров воздушной среды вблизи сидящего человека для определения констант, входящих в уравнения математической модели и определения ее точности.

Поля скоростей и методы регистрации скорости движения воздуха.

Одной из основных характеристик любой системы вентиляции и вместе с тем одной из наиболее трудно контролируемых является поле скоростей. Как правило для его исследования в настоящее время используют какой-либо из методов визуализации течений одновременно замеряют соответствующими измерительными приборами местные скорости воздуха в характерных точках объема.

Измерение местных скоростей воздуха может быть осуществлено одним из следующих методов:

- 1) механическим,
- 2) пневмометрическим,
- 3) тепловым,
- 4) электроразрядным,
- 5) акустическим,
- 6) лазерным,
- 7) кинематическим (время-пролетным).

Все перечисленные методы реализованы в соответствующих измерительных приборах.

Причем первые 4 из методов называются зондовыми, так как они реализуются с помощью приборов с датчиками, установленными непосредственно в интересующей точке потока и приборы называются анемометрами. Данному методу присущи достаточно большие недостатки, т.к. датчики устанавливаются непосредственно в потоке и возмущают его, на показания приборов действуют другие параметры среды: давление, температура, вязкость и т.д.

Многие вышеуказанные недостатки возможно устранить используя бесконтактные (беззондовые) методы: 5, 6, 7.

Все рассмотренные выше приборы предназначены для локальных измерений поэтому они позволяют контролировать скорости одновременно всего в нескольких точках (по числу датчиков). Когда же надо выявить застойные зоны, определить скорость смены воздуха в отдельных участках исследуемого объема, или проследить направления распространения вредных примесей, такие приборы вообще оказываются бесполезными.

Решить эти задачи можно вводя в поток легко обнаруживаемые индикаторы. Наименьшее воздействие на характер течения воздушных потоков оказывают газообразные индикаторы, например, такие как светильный газ. Очень удобным индикатор для воздуха являются радиоактивные изотопы инертных газов, которые химически пассивны, а главное - позволяют непрерывно контролировать концентрацию в точках установки счетчиков излучения. А также используя метод трассирующих частиц.

Моделирование потоков

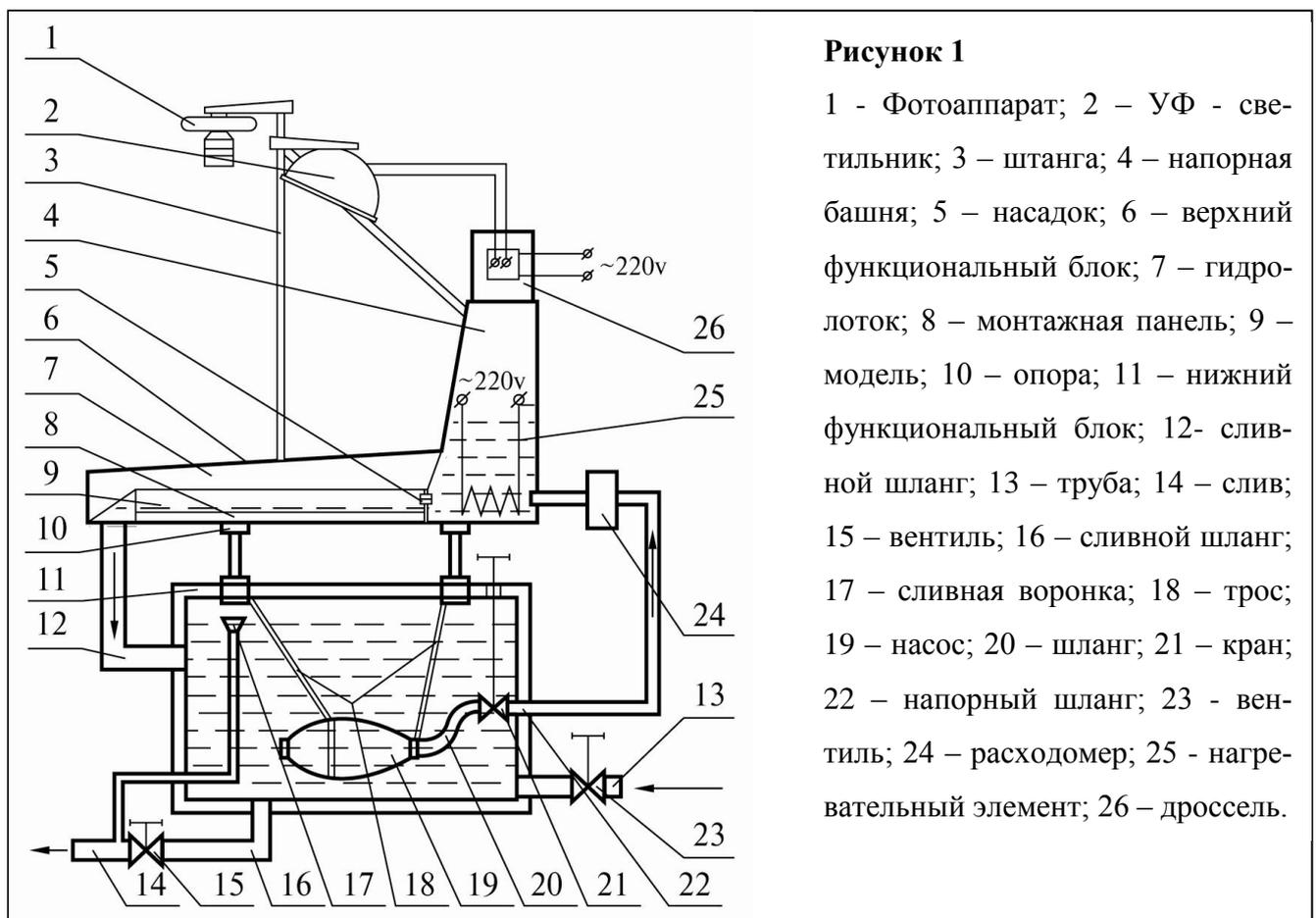
Для исследования скоростных полей сложных течений, к которым относятся в общем случае и течения в вентилируемых объемах, нужны средства, позволяющие контролировать скорости одновременно как можно в большем числе точек. Анализ данных, опубликованных в различных источниках, свидетельствует о том, что эта задача не может быть решена достаточно полно ни одним из существующих измерительных приборов. Наибольшую информацию о структуре сложных течений дают методы визуализации потоков и особенно - метод трассирующих частиц.

В частности при проектировании систем вентиляции наземных объектов широко используется метод приближенного моделирования. Для исследования качественной картины процессов вентиляции в гермокабинах самолетов применяется методика приближенного моделирования, разработанная в лаборатории 103 МАИ.

Используя эти методики можно выявить общую картину циркуляции воздуха в моделируемом объеме и ориентировочно оценить величины основных параметров вентиляции (скорости в отдельных точках, направления потоков, распределение температур, требуемые подачи воздуха и т.д.). Точность получаемых результатов повышается по мере приближения модели к реальному объекту. Окончательные выводы о качестве выбранной схемы вентиляции можно сделать только по результатам натурных испытаний. Но на всех стадиях исследования, начиная от мелкомасштабных моделей и кончая натурными объектами очень многое зависит от используемых средств измерения.

Описание экспериментальной установки.

. Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования процессов вентиляции в салоне пассажирских самолетов на плоской гидравлической модели представлена на рисунке 1.



Как видно из рисунка, экспериментальная установка включает в себя верхний и нижний функциональные блоки, систему ультрафиолетовой засветки и регистрирующую аппаратуру.

Нижний функциональный блок предназначен для размещения воды и вибронасоса и обеспечивает подачу в верхнюю часть установки рабочей жидкости заданного расхода и представляет собой дюралевый бак емкостью 150 л. Внутри бака размещен электровибронасос НЭБ – 1/20 мощностью 220 Вт. Насос работает от электрической сети переменного тока 220 В и обеспечивает максимальный расход воды 3м³/час, что вполне соответствует требованиям. При помощи гибкого шланга водяной бак соединен с водопроводной сетью. Установкой переливной воронки предусмотрено ограничение водяного уровня жидкости в баке, гарантирующего устойчивую работу насоса. Рабочая жидкость подается насосом через кран регулирования расхода и расходомер в верхнюю часть установки – гидрлоток.

Верхний функциональный блок монтируется при помощи соответствующих силовых элементов на нижнем блоке и состоит из напорной башни и гидрлотка (рисунок 2).

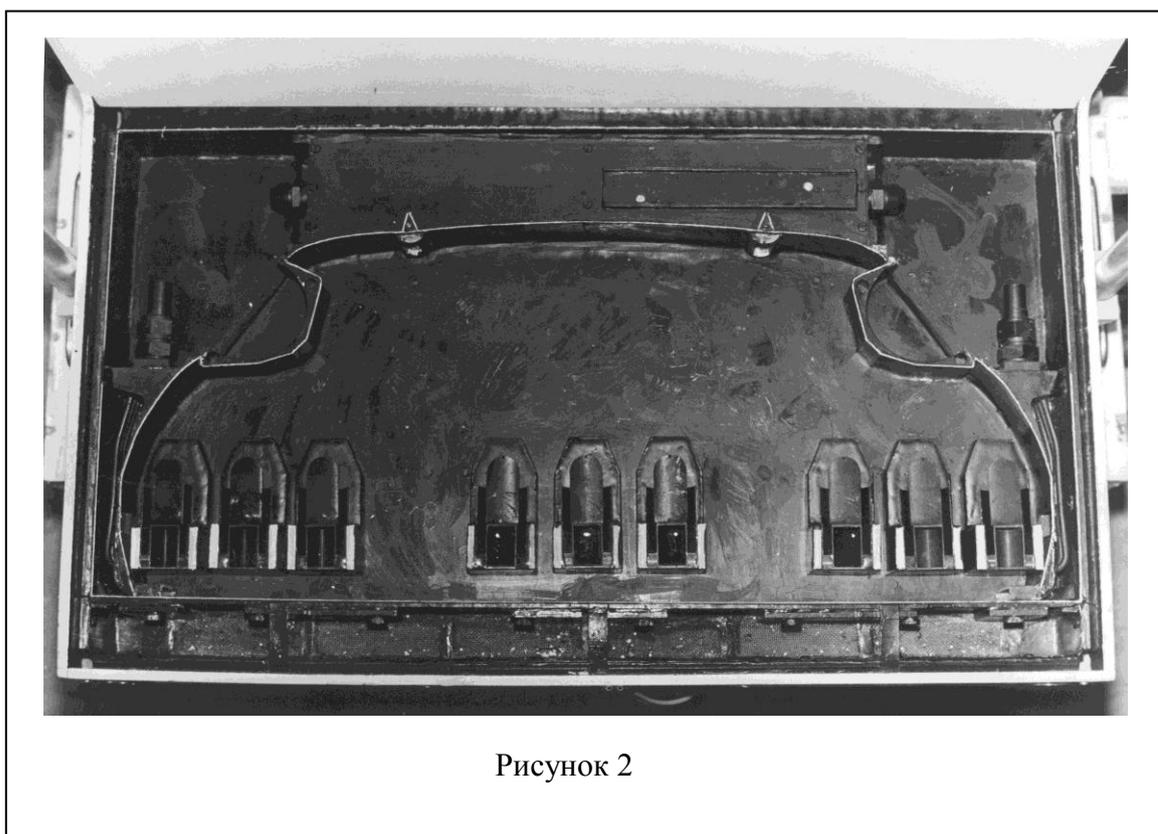
При моделировании процессов вентиляции на модели одним из важнейших требований является обеспечение симметричной картины течения (следствие симметрии салона, симметрии геометрии системы входных и выпускных патрубков). Это достигается установкой напорной башни, которая выравнивает расходы и скорости подаваемой в модели жидкости через входные патрубки.

В напорной башне устанавливаются также электронагревательные элементы типа ТЭН-1250 (1250Вт – 220В) и датчики системы автоматического регулирования температуры. Установка электронагревательных элементов позволяет менять температуру воды, подаваемую в модель в пределах от +10°С до +80°С.

Исследуемая модель установлена в гидросистеме на монтажной плите. Непосредственно модель и ее установка в лотке показаны на рисунке 3. Модель представляет собой копию поперечного сечения салона самолета в масштабе 1:8. Отметим что технические возможности установки позволяют проводить экспериментальные исследования процессов вентиляции воздуха в салонах различных пассажирских и грузовых самолетов при соответствующих масштабах исследуемых моделей в пределах 1:5...1:8; например для исследования вентиляционных процессов в гермокабине самолета Ту-144 модель необходимо выполнить в масштабе 1:6, для Ту-154 – 1:7 и т.д.

Рабочее поле установки имеет размеры 750х390 мм. Что касается глубины модели, то ее размер должен быть таким, чтобы избежать ее влияния на получаемую картину вентиляции, т.к. при относительно малых ее размерах начинают сказываться силы трения в жидкости. Руководствуясь этими соображениями, глубина модели была выбрана равной 50 мм.

Модель разбита на отдельные функциональные участки: пол, стенки салона, багажные полки, потолок и имитаторы пассажиров в креслах. Все участки состыкованы между собой с сохранением геометрии внутреннего контура самолета и расположения кресел. Все стыки между участками загерметизированы. Таким образом, обеспечивая геометрическое подобие сечения салона, расположения кресел, входных и выходных патрубков мы приходим к соблюдению граничных условий.



Модели окрашены светопоглощающей краской. Это позволяет снизить фон и, таким образом полнее выделить полезную информацию. Для выделения формы салона, а, следовательно, и границ течения, контур салона окрашен люминисцентной краской.

В результате предварительных исследований была определена максимальная допустимая скорость подачи воды в гидрлоток, она равна 0,5 м/сек, и расход жидкости через модель, которого лежит в пределах 0,1...2, мм³/час. Как видно, характеристики установки вполне удовлетворяют условиям, необходимых для синхронного моделирования вентиляции в гермокабине самолета на гидравлической модели.

Четыре регулируемые по высоте вертикальные опоры, на которых установлен верхний функциональный блок, позволяют добиться горизонтальности расположения модели.

Слив из гидрлотка осуществляется самотеком из выходных патрубков модели через собирающую воронку и гибкий шланг в дюралевый бак нижнего функционального блока.

На специальных штативах установлен светильник СВТУ-1 с ртутной трубчатой лампой ДРТ-1000 и фотоаппарат со светофильтрами ЖС-4 и ССЭС-21. Лампа подключена через пусковое устройство к сети переменного тока 220 В. Для выделения ультрафиолетовой части спектра лампы в светильник установлен блок с двадцатью светофильтрами УРС-6.

Для проведения эксперимента на установке необходимо выполнить следующий ряд операций:

Проверить герметичность стыков в модели и соединений трубопроводов.

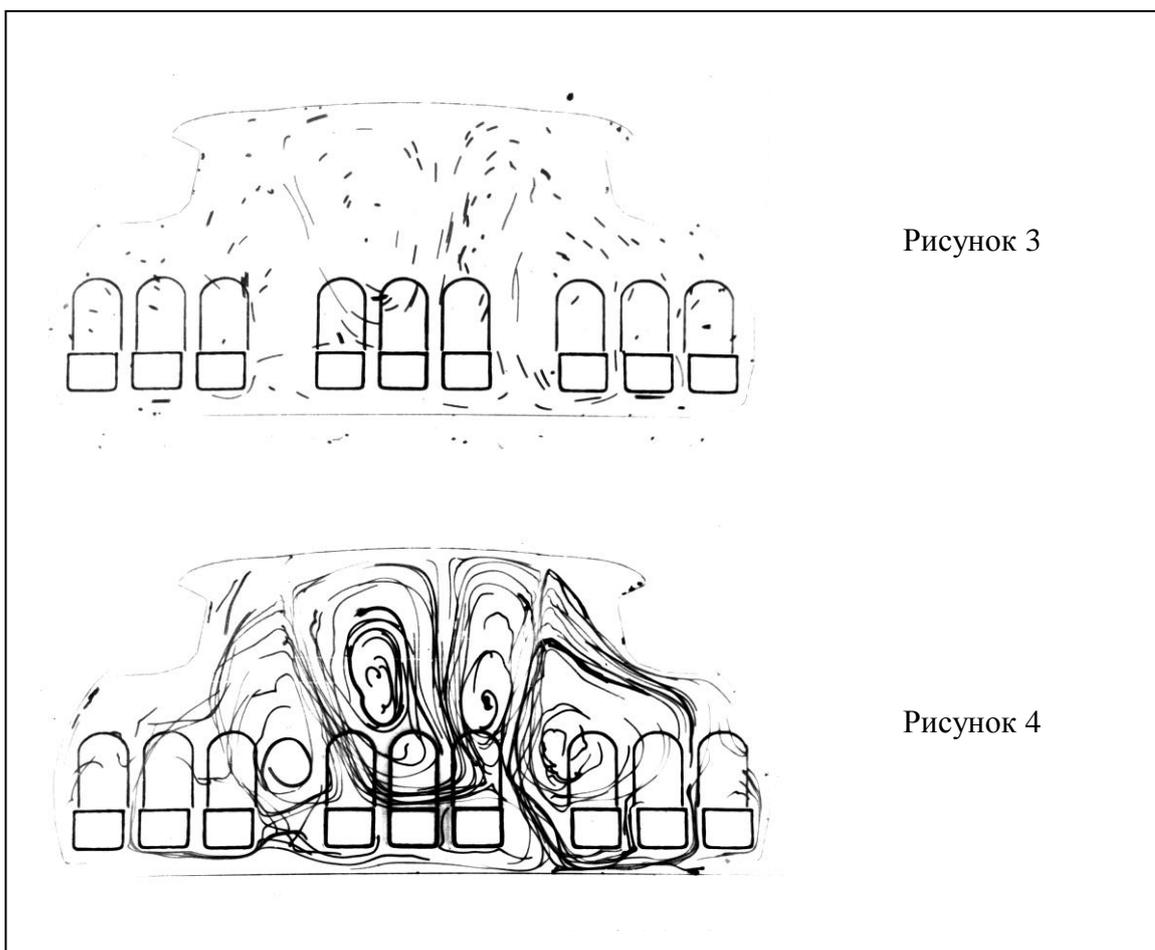
Залить нижний бак водой. Для контроля уровня воды в баке проделаны два смотровых окна.

Включить электровибронасос. Расход контролируется по расходомеру 24.

Включить электронагревательные элементы.

Установить входные патрубки (коробка вентиляции) под углом к вертикальной оси сечения салона, соответствующем последующему варианту вентиляции.

Установить заданную ширину входного и выпускных патрубков, соответствующих



натурным расходам воздуха.

При достижении заданной температуры воды установившейся картины течения включить ультрафиолетовый светильник. Для визуализации течения в жидкость вводятся визуализирующие частицы (примерно 10...20 штук на 1 дм²). Фотографированием получается твердая копия результата эксперимента показанная на рисунке 3, а на рисунке 4 показана обработанная модель с линиями тока воздуха.

Перестройку модели на другой режим или вариант вентиляции можно производить на работающей установке.

После завершения эксперимента необходимо отключить электроприборы и слить воду из установки.

Выводы

Сопоставление результатов модельного исследования с имеющимися данными по определению полей скоростей натуральных объектов в случаях стационарного вентиляционного режима показало хорошую сходимость результатов, как с качественной стороны, так и в количественном отношении.

Анализ результатов эксперимента по определению полей скоростей в поперечном сечении самолета, проведенный для различных типов салонов – (пассажирского, самолета-аэробуса и транспортного самолета) позволяет сделать следующие выводы:

1. Качественная картина вентиляции (количество и форма циркуляционных колец, места расположения застойных зон) устойчива на всех исследованных режимах и не зависит от величины расхода подаваемого воздуха при сохранении соотношений между расходами, подаваемыми из верхних и нижних коробов.

2. Расположение выпускных отверстий практически не оказывает влияния на картину течения.

3. Увеличение скорости на выходе их приточного насадка до максимально допустимой (при сохранении величины расхода) приводит к увеличению скоростей по сечению салона и небольшой деформации кольцевых течений, не влияя на их структуру.

Библиографический список

1. Отчет о научно-исследовательской работе кафедры 103 №629.7.023. Теоретические и экспериментальные исследования систем кондиционирования воздуха пассажирских самолетов. Москва 1984.

2. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции. М.: Стройиздат, 1963.

3. Теория и расчет вентиляционных струй. Сборник под ред. М.И.Гримитлина. Л. Профиздат, 1965.
4. Системы оборудования летательных аппаратов / Под ред. А.М.Матвеевко и В.И.Бекасова. М.: Машиностроение, 1995. 496 с.
5. Шустров Ю.М., Старостин К.И. Решение задач проектирования авиационных систем кондиционирования воздуха на ПЭВМ. М.: МАИ, 1998. 136 с.

Сведения об авторах

Демкин Владимир Вячеславович, ведущий инженер Московского авиационного института (государственного технического университета), телефон: +7 499 158-41-61, E-mail: vdv103@mai.ru