

УДК 533.6.071

DOI: 10.15372/PMTF202315314

ОПИСАНИЕ МАЛОЙ КЛИМАТИЧЕСКОЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ТРУБЫ ИНСТИТУТА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ СО РАН

Ю. М. Приходько, А. А. Сидоренко, А. С. Шмаков,
А. М. Шевченко, А. М. Сорокин, А. А. Богданов, А. Н. Шиплюк

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия

E-mails: prih@itam.nsc.ru, sindr@itam.nsc.ru, shmakov@itam.nsc.ru, shevch@itam.nsc.ru,
am_sorokin@itam.nsc.ru, arkair@mail.ru, shplyuk@itam.nsc.ru

Представлено описание малой климатической аэродинамической трубы, разработанной в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН и предназначенной для исследования процессов обледенения. Использование такой трубы позволяет не только изучать физику процесса обледенения, но и отрабатывать методы противообледенительной защиты, проводить валидацию численных методов расчета процессов обледенения и др.

Ключевые слова: обледенение, проектирование аэродинамической трубы, аэроклиматическая труба

Введение. Опыт эксплуатации авиационной техники показывает, что обледенение является одним из наиболее опасных факторов воздействия внешней среды, который оказывает существенное влияние на безопасность полета. В России за период с 2001 по 2018 г. зафиксировано 24 летных происшествия, вызванных обледенением летательных аппаратов, из них 8 — с жертвами [1]. Согласно данным работы [2] за период с 2012 по 2015 г. аэропорты г. Томска и г. Новосибирска получили с бортов воздушных судов 212 и 812 сообщений об обледенении соответственно. Таким образом, исследование проблемы обледенения самолетов и разработка методов борьбы с ним являются актуальными задачами.

Обычно при проектировании и испытании противообледенительных систем требуется проводить многочисленные исследования в полете и на земле [3–6]. Для летных испытаний необходим поиск условий естественного обледенения, что приводит к значительным финансовым затратам и неприемлемому увеличению стоимости работ. Кроме того, условия естественного обледенения, как правило, кратковременны и неконтролируемы. Затраты и период разработки могут быть сокращены за счет проведения испытаний на наземных установках, в которых могут быть реализованы контролируемые условия обледенения.

Задача расчетно-теоретического моделирования процессов обледенения летательных аппаратов является достаточно сложной, поскольку характеризуется неравновесными двухфазными течениями с фазовыми переходами [5–8]. Исследование физических процессов, связанных с разрушением льда, также представляет большой интерес [9, 10].

Работа выполнена в рамках государственного задания Института теоретической и прикладной механики СО РАН.

© Приходько Ю. М., Сидоренко А. А., Шмаков А. С., Шевченко А. М., Сорокин А. М., Богданов А. А., Шиплюк А. Н., 2023

С учетом сложности летных испытаний и математического моделирования указанных выше процессов [4] наземные испытания остаются одним из основных способов изучения процессов обледенения. Наиболее часто используемым наземным испытательным оборудованием для исследования обледенения и борьбы с обледенением самолетов является аэроклиматическая труба. Начиная с 50-х гг. XX в. в США, Канаде, Италии, Китае, Франции и других странах было построено несколько десятков аэродинамических труб (АДТ), предназначенных для исследования обледенения.

Наиболее известной аэроклиматической трубой является Icing Research Tunnel (размеры рабочей части $1,83 \times 2,75 \times 15,30$ м, скорость потока $25 \div 180$ м/с), построенная в NASA Glenn Research Center. Система охлаждения мощностью 7385 кВт позволяет поддерживать температуру потока в диапазоне $+5 \div -40$ °С. Система впрыска воды, включающая 550 форсунок, позволяет получать поток с каплями размером $15 \div 50$ мкм и обводненностью $0,2 \div 5,0$ г/м³ [11]. Данная труба была построена одной из первых в мире, подвергнута модернизации и в настоящее время признана одной из наиболее совершенных аэроклиматических труб.

Аэроклиматическая труба CIRA Icing Wind Tunnel, созданная в Italian Aerospace Research Center, является важной базой для испытаний самолетов на обледенение в Европе. Существует три варианта ее рабочей части: $2,35 \times 1,15$ м, $2,35 \times 2,25$ м и $2,35 \times 3,60$ м, что позволяет создать поток с числом Маха в диапазоне $M = 0,25 \div 0,70$. Аэроклиматическая труба обеспечивает температуру в потоке до -40 °С. Для обводнения потока используется от 500 до 1000 форсунок, при этом обводненность варьируется в диапазоне $0,3 \div 2,0$ г/м³, размеры капель — в диапазоне $18 \div 40$ мкм. Используется рефрижераторная станция мощностью 6400 кВт [12]. Данная установка позволяет независимо регулировать давление в рабочей части для моделирования условий обледенения на различной высоте.

Несмотря на то что явление обледенения плохо масштабируется [5, 8], широкое распространение получили аэроклиматические трубы малого размера, такие как NRC Altitude Icing Wind Tunnel (Institute for Aerospace Research National Research Council of Canada) с размерами рабочей части $0,57 \times 0,57 \times 1,83$ м и скоростью потока до 100 м/с [13]. Также имеется специальная вставка, позволяющая уменьшить размеры рабочей части до $0,52 \times 0,33 \times 0,60$ м, что приводит к увеличению скорости потока до 180 м/с. Температура потока достигает -40 °С. Используется от 30 до 42 форсунок, размер капель составляет $8 \div 120$ мкм, обводненность — $0,1 \div 3,0$ г/м³. Мощность холодильника равна 420 кВт. Также имеется возможность создать в контуре пониженное (до 42 кПа) давление для имитации высотных полетов.

Braunschweig Icing Wind Tunnel (Германия) — АДТ замкнутого типа (размеры рабочей части $0,5 \times 0,5 \times 1,5$ м, скорость потока до 40 м/с) [14]. Температура потока достигает -20 °С. Используется 25 форсунок, размер капель составляет $15 \div 100$ мкм, обводненность — $0,1 \div 3,0$ г/м³. Мощность холодильника равна 80 кВт.

В настоящее время в России аэроклиматические трубы имеются в Центральном институте авиационного моторостроения (ЦИАМ) [15] и в Центральном аэрогидродинамическом институте (ЦАГИ) [16]. В ЦИАМ это “Стенд Ц-1А”, предназначенный для испытаний турбореактивных двигателей в различных высотно-скоростных и климатических условиях (в том числе в условиях обледенения). Высотно-климатический “Стенд Ц-2” предназначен для проведения комплексных научно-исследовательских, опытно-доводочных и сертификационных испытаний во всем диапазоне эксплуатационных характеристик летательного аппарата (в том числе в условиях обледенения). “Стенд УВ-3К” и “Стенд У-9М” используются при испытаниях двигателей в различных имитированных высотно-скоростных и климатических условиях.

В ЦАГИ имеется три аэроклиматические установки [16].

1. Аэрохолодильная труба сезонного действия (АХТ СД) с закрытой рабочей частью размером $1 \times 1 \times 3$ м, обеспечивающая скорость воздушного потока до 150 м/с. Исследование процессов обледенения в АХТ СД проводится в холодное время года с использованием холодного воздуха, засасываемого из атмосферы.

2. Эжекторная установка сезонного действия ЭУ-1, состоящая из аэродинамического канала с многосопловым эжектором, водораспылительной системы с вихревыми форсунками, системы подачи и регулирования давления эжектирующего воздуха. Эжектируемый воздух забирается из атмосферы в холодное время года. Общая длина канала трубы равна 2910 мм, размеры его поперечного сечения 200×200 мм. Скорость потока в канале трубы регулируется в диапазоне $10 \div 100$ м/с. Установка оснащена системой охлаждения потока за счет добавления в него капель жидкого азота. Это позволяет проводить испытания при температуре наружного воздуха до $+10$ °С, охлаждая поток до $-30 \div -40$ °С.

3. Всесезонный стенд искусственного обледенения (ВСИО), представляющий собой помещение, в котором установлены АДТ вентиляторного типа с разомкнутым контуром, системы инъекции кристаллов и распыла воды. Требуемая для исследований обледенения температура воздуха в камере достигает -18 °С и устанавливается за счет нагнетания в нее холодного воздуха, охлаждаемого в холодильной машине. Объем помещения 360 м³ обеспечивает работу АДТ с выходным сечением сопла размером 250×250 мм при скорости потока до 80 м/с.

Большинство установок, существующих в России в настоящее время, являются сезонными либо имеют высокую стоимость эксплуатации при выполнении фундаментальных и поисковых работ для изучения процессов обледенения. Вместе с тем такие исследования очень актуальны, что обусловлено проектированием новых магистральных и региональных самолетов, а также развитием ветроэнергетики в приполярных районах. Создаваемая авиационная техника, а также энергетические установки и гражданские сооружения нуждаются в новых противообледенительных системах и покрытиях. Отработка этих систем не требует проведения экспериментов с конструкциями реальных размеров и может эффективно выполняться на установках малого класса. Достаточно подробное обоснование выбора размеров малой климатической АДТ приведено, например, в работе [14]. Следует отметить, что основными причинами наличия ограниченного числа АДТ с захолаживанием потока в России и в мире являются высокая стоимость холодильного оборудования и его значительное энергопотребление.

Таким образом, создание аэроклиматических установок в России актуально и востребовано. В Институте теоретической и прикладной механики (ИТПМ) СО РАН исследовалась возможность создания аэроклиматической трубы открытого типа с использованием холодного воздуха улицы в зимнее время года. В работе [17] выполнен анализ и предложен вариант дозвуковой аэроклиматической трубы с разомкнутым контуром, рабочей частью длиной 6 м, сечением со скошенными углами размером $4,0 \times 2,3$ м и скоростью потока до 100 м/с. В тех случаях, когда в распоряжении имеется турбокомпрессорная станция, можно рассматривать эжекторный вариант такой трубы и, следовательно, не использовать вентиляторный привод. Данная труба более проста в процессе создания и эксплуатации, но стоимость каждого цикла испытаний выше. Остальные элементы таких труб идентичны [17]. Кроме того, в 2018 г. в рамках программы “Междисциплинарный исследовательский комплекс аэрогидродинамики, машиностроения и энергетики” рассматривался проект многорежимной климатической АДТ со следующими параметрами: размеры рабочей части $0,6 \times 0,6$ м, число Маха потока $M = 1,5$, давление в диапазоне $0,25 \div 1,00$ атм. Такие параметры позволяют создавать натурные условия, соответствующие высотам вплоть до $H = 10$ км, с соблюдением норм АП-25.

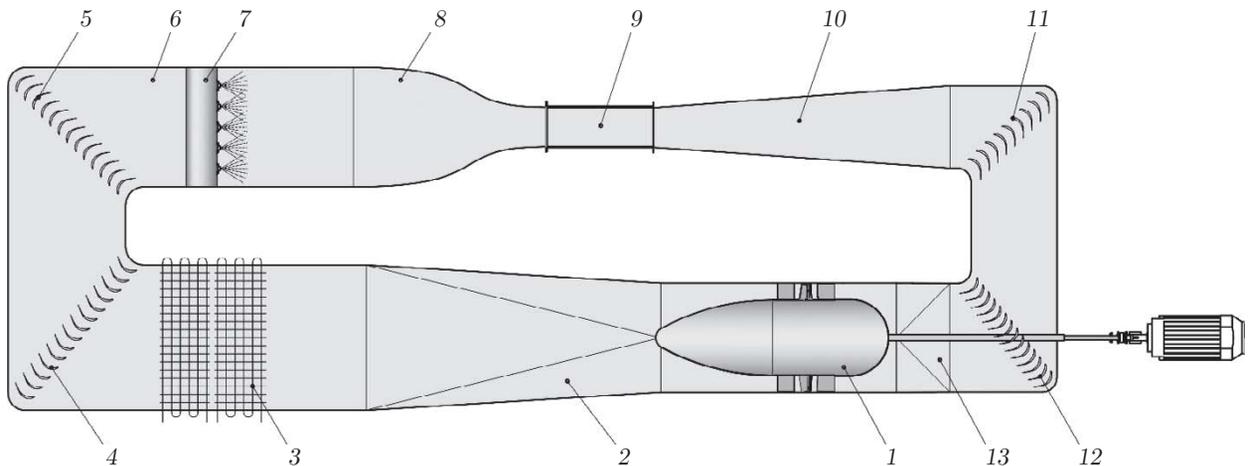


Рис. 1. Схема МКАТ:

1 — вентилятор с электроприводом, 2 — переход с круглой формы сечения на квадратную, 3 — блок испарителей холодильника, 4, 5 — поворотные лопатки, 6 — форкамера, 7 — блок обводнения потока, 8 — сопло, 9 — рабочая часть, 10 — диффузор, 11, 12 — поворотные лопатки, 13 — переход с квадратной формы сечения на круглую

В настоящее время в ИТПМ СО РАН завершается строительство малой климатической аэродинамической трубы (МКАТ), предназначенной для исследования процессов обледенения.

1. Описание установки. МКАТ представляет собой охлаждаемую АДТ замкнутого типа размером 9700×3160 мм с закрытой рабочей частью. На рис. 1 представлена схема МКАТ, имеющей следующие характеристики: размеры рабочей части $360 \times 500 \times 1000$ мм, скорость потока в рабочей части $5 \div 50$ м/с, степень обводненности потока $0,1 \div 3,0$ г/м³, среднегеометрический размер капель $10 \div 80$ мкм, температура потока в рабочей части $-30 \div +5$ °С, отклонение от заданной температуры ± 1 °С, продолжительность эксперимента не менее 60 мин.

Выбор параметров МКАТ, как и любой другой экспериментальной установки, имеет ряд ограничений. При выполнении исследований процесса обледенения желательно, чтобы эксперименты проводились при натуральных значениях числа Рейнольдса, реальных значениях температуры, степени обводнения потока и дисперсности водной фазы. Для этого необходимы рабочая часть максимально возможного размера и натуральный диапазон значений скорости потока. Поэтому установка малого класса не позволяет проводить, например, работы по сертификации авиационной техники, но позволяет решать типичные задачи, связанные с проблемой обледенения:

- исследование физики процесса обледенения;
- отработка методов и средств противообледенительной защиты летательных аппаратов;
- исследование обледенения датчиков (приемников воздушного давления и т. п.);
- валидация численных методов расчета процессов обледенения;
- исследование процессов обледенения элементов промышленных конструкций (кабелей, тросов, элементов мачт и мостов);
- развитие экспериментальных методов изучения процессов обледенения, отработка методик для использования на полноразмерных установках;
- градуировка датчиков, отработка экспериментальных методик для режимов без захлаживания и обводнения потока.



Рис. 2. Проточный тракт МКАТ до установки теплоизоляции

1.1. *Проточный тракт (контур) АДТ.* Проточный тракт (рис. 2) изготовлен из стали и покрыт антикоррозионным покрытием. Для того чтобы свести к минимуму приток тепла через стенки, снаружи они покрыты теплоизолятором из вспененного полиэтилена толщиной 80 мм. Также между корпусом и опорной рамой установлены теплоизолирующие проставки, обеспечивающие компенсацию температурных деформаций. Контур разделен на секции, соединяемые между собой через резиновые уплотнения. В каждом из четырех поворотных колен расположены профилированные поворотные лопатки. В колене, находящемся за рабочей частью, поворотные лопатки обогреваются теплоносителем для предотвращения образования льда. В форкамере трубы предусмотрена возможность установки хонейкомба и детурбулизирующих сеток. Перед вентилятором установлена улавливающая решетка для защиты основных агрегатов установки от оторвавшихся в ходе эксперимента осколков льда.

Конфузор АДТ обеспечивает степень поджатия, равную 8,2, и спроектирован с учетом минимизации эффекта сепарации капель при ускорении и движении по криволинейным линиям тока. Контур сопла задавался полиномами третьей степени (во взаимно перпендикулярных плоскостях) и был гладко сопряжен с контурами входного и выходного участков.

Ширина рабочей части, изготовленной из листового поликарбоната, равна 360 мм, высота — 500 мм, длина — 1000 мм. Доступ осуществляется через две боковые двери. Расчетное значение скорости потока в рабочей части составляет $5 \div 50$ м/с. При необходимости скорость может быть увеличена за счет использования сменных элементов проточного тракта: рабочей части меньших размеров, диффузора и конфузора.

1.2. *Вентиляторный блок.* Поток создается одноступенчатым осевым вентилятором ОВ-8 (рис. 3) с направляющим и спрямляющим аппаратами, который приводится в действие асинхронным электродвигателем АИР 180 М4 мощностью 25 кВт, оснащенным частотным регулятором. Согласно расчетам запас мощности для компенсации потерь полного давления вследствие образования льда внутри контура АДТ составляет 25 %. Диаметр вентилятора равен 1 м, скорость вращения его ротора — до 1100 об/мин. Вентилятор обеспечивает расход воздуха до $9 \text{ м}^3/\text{с}$ при напоре 2 кПа.

1.3. *Система захлаживания потока.* Система захлаживания потока предназначена для охлаждения и поддержания заданной температуры воздуха, циркулирующего в замкнутом контуре АДТ. При расчете холодильной мощности учитываются все источники

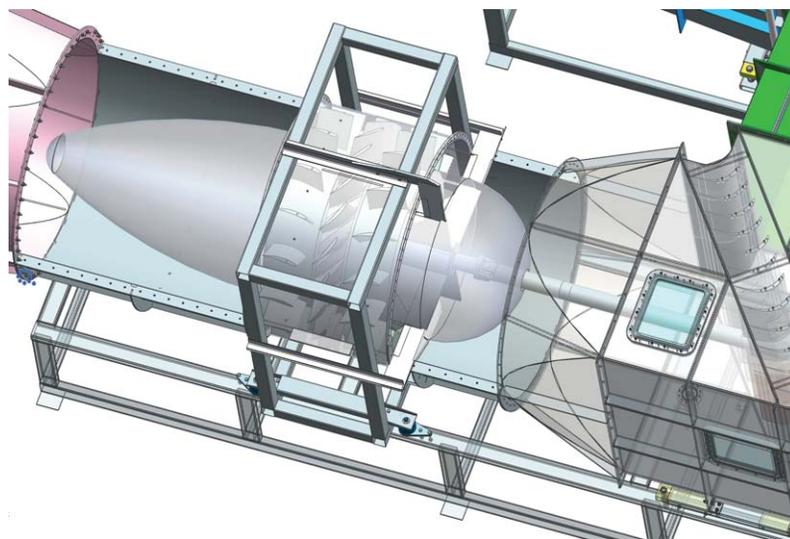


Рис. 3. Вентилятор



Рис. 4. Теплообменник-испаритель

тепла, расположенные в контуре трубы, в частности потоки тепла через стенки, а также вследствие нагрева поворотных лопаток, трения воздуха, кристаллизации впрыскиваемой воды и т. д. Еще одной функцией системы захлаживания является удаление из воздушного потока излишней влаги, которая оседает в виде льда на теплообменных трубках испарителя.

Холодильная установка состоит из двух блоков, трубопроводов и системы управления.

Первый блок представляет собой теплообменник (рис. 4), встроенный в контур АДТ. Размеры теплообменника в тракте АДТ $1130 \times 1370 \times 1409$ мм, общая площадь поверхности теплообмена 250 м^2 . Теплообменник представляет собой два двухконтурных испарителя, расположенных один за другим и помещенных в общий корпус. Последовательное расположение секций позволяет лучше контролировать температуру воздуха при различных

температурных режимах посредством регулирования расхода хладагента для каждой секции. Теплообменник изготовлен из медных труб диаметром 12 мм с алюминиевыми ребрами. Расстояние между ребрами составляет 8,5 мм. Максимальная скорость воздуха на входе в теплообменник равна 5 м/с, при этом потери полного давления в теплообменнике не превышают 300 Па. Большое расстояние между ребрами способствует незначительному увеличению гидравлического сопротивления теплообменника в процессе намерзания льда. Встроенные нагреватели позволяют при необходимости осуществлять оттаивание теплообменника. Для сбора жидкости предусмотрен теплоизолированный сливной поддон с отводом жидкости в дренаж.

Второй блок — модуль захлаживания. В модуле располагаются две независимые холодильные централи, которые состоят из двух компрессоров. Каждая холодильная централь обеспечивает работу своего двухконтурного испарителя и имеет свой конденсатор, расположенный на крыше модуля. Модуль захлаживания позволяет регулировать производительность в диапазоне от 10 до 100 % во всех температурных режимах работы. Данная схема обеспечивает возможность поддержания температуры воздуха в тракте АДТ в диапазоне $-30 \div +5$ °С с погрешностью ± 1 °С. Суммарная холодильная мощность системы составляет приблизительно 44 кВт, что позволяет ей выйти на любой рабочий режим за время, не превышающее 30 мин. Система управления модулем захлаживания имеет режим автономной работы с настройкой всех параметров работы холодильной установки. Теплообменники соединяются с холодильным агрегатом с помощью теплоизолированных трубопроводов. В качестве хладагента используется экологически чистый газ R-507A.

1.4. Система обводнения потока. Аэроклиматическая труба предназначена для имитации условий, способствующих процессу обледенения летательных аппаратов. Эти условия определяются в “Стандартах летной годности FAR-25” и “Авиационных правилах”, которые устанавливают сертификационные параметры для летных испытаний в реальных условиях обледенения. Параметры включают температуру, диаметр капель воды и количество воды в облачной массе, выраженное в граммах на кубический метр, а также продолжительность испытания.

Система обводнения потока аэроклиматической трубы предназначена для равномерной подачи в поток заданного количества капель воды заданного размера в соответствии с сертификационными требованиями. Для этого в контуре установлена секция с набором форсунок. Наиболее подходящим типом форсунок для аэроклиматических труб являются пневматические форсунки с внутренней камерой смешения, в которой струя жидкости разбивается с помощью потока сжатого воздуха. Такие форсунки позволяют независимо регулировать расход воды и дисперсность распыла за счет изменения соотношения давления воды и воздуха. Давление воздуха, в первую очередь, определяет размер капель, а разность давлений воздуха и воды определяет расход воды.

Для стабильной работы форсунок, а также для создания в контуре трубы потока мелкодисперсных капель переохлажденной жидкости требуется проводить предварительную подготовку распыляемой жидкости — очистку от загрязняющих частиц, необходимую для стабильной работы системы обводнения в целом. Используемая в системе обводнения жидкость должна быть подвергнута процессу дистилляции, что позволяет уменьшить количество центров кристаллизации при охлаждении распыляемой жидкости.

Адиабатическое расширение воздуха в камере форсунки и ее факеле приводит к резкому уменьшению температуры до значения ниже уровня кристаллизации воды. Основным способом борьбы с этим явлением заключается в предварительном нагреве воды, подаваемой в форсунки, и корпуса самой форсунки. Нагрев воды осуществляется проточным нагревателем, а циркуляцию обеспечивает циркуляционный насос. Циркуляция горячей воды необходима для нагрева внутреннего пространства штанг и предотвращения замерзания

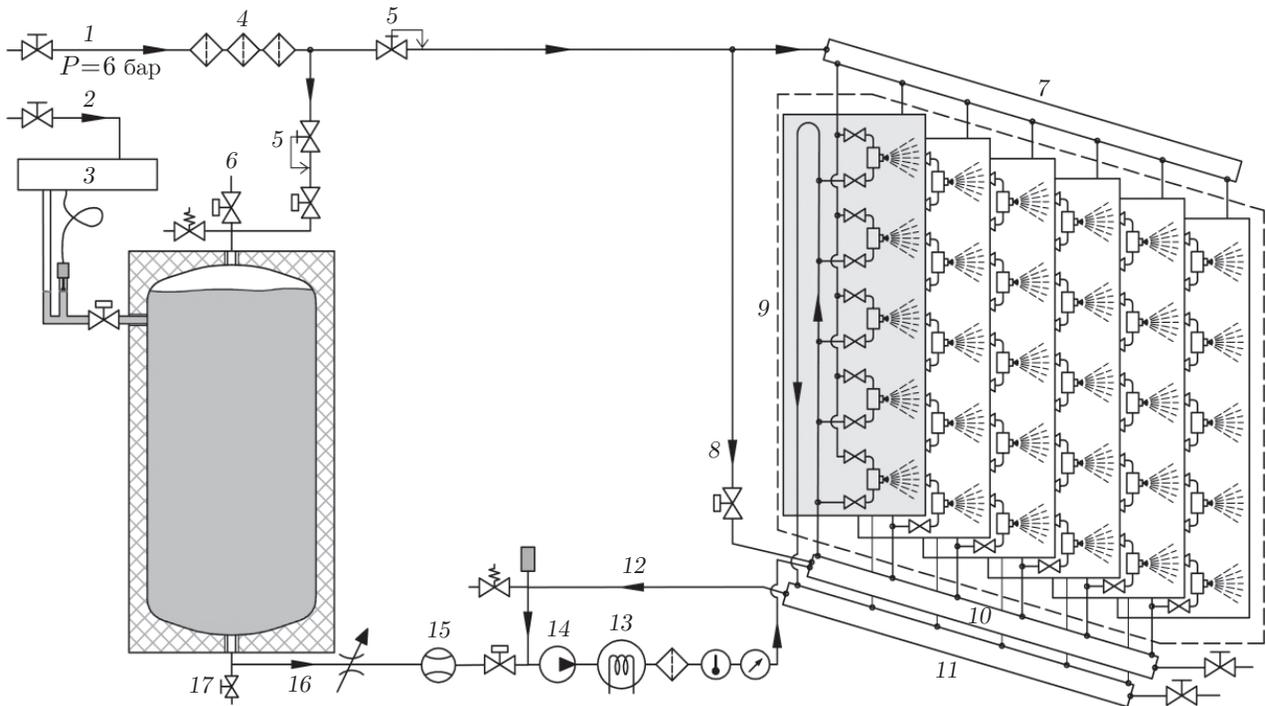


Рис. 5. Схема системы обводнения потока:

1 — подача воздуха, 2 — подача воды, 3 — дистиллятор, 4 — фильтры, 5 — редуктор, 6 — отвод воздуха, 7 — воздушный коллектор, 8 — продувка водяной трассы воздухом, 9 — секция впрыска воды, 10 — водяной коллектор-подача, 11 — водяной коллектор-обратка, 12 — циркуляция горячей воды, 13 — нагреватель, 14 — насос, 15 — расходомер, 16 — регулятор расхода, 17 — слив

ния самих форсунок. Кроме того, при таком принципе работы вода требуемой температуры всегда находится максимально близко к форсункам, что позволяет минимизировать время с момента запуска форсунок до момента выхода их на нужный режим. На рис. 5 представлена схема системы обводнения потока.

Система обводнения потока состоит из трех блоков: системы водоподготовки и подачи воды, системы подачи сжатого воздуха и секции впрыска воды.

Система водоподготовки и подачи воды включает дистиллятор; накопительную емкость объемом 150 л; редуктор, задающий в емкости требуемое давление за счет подачи сжатого воздуха ($0,7 \div 5,0$ бар); регулятор расхода и расходомер ($3 \div 100$ л/ч); водонагреватель для получения температуры в диапазоне $20 \div 90$ °С с погрешностью $\pm 0,5$ °С; водяной фильтр (10 мкм); циркуляционный насос; датчики для измерения температуры и давления жидкости; коллекторы, распределяющие поток по штангам; электромагнитные клапаны для управления потоком воды.

Система подачи сжатого воздуха от линии содержит воздушные фильтры (до 5 мкм); редуктор, задающий требуемое давление ($0,7 \div 5,0$ бар); коллекторы, распределяющие поток по штангам; электромагнитные клапаны для управления потоком воздуха.

Секция впрыска воды (рис. 6) расположена в форкамере на расстоянии 3 м от начала рабочей части, что обеспечивает достижение теплового равновесия капель с потоком воздуха. Секция содержит шесть горизонтальных штанг, имеющих хорошо обтекаемую форму и низкое сопротивление. Загромождение форкамеры не превышает 25 % площади ее сечения, что допустимо при скорости потока в форкамере менее 5 м/с. При такой скорости штанги не вносят существенной неоднородности в поле скорости в рабочей ча-

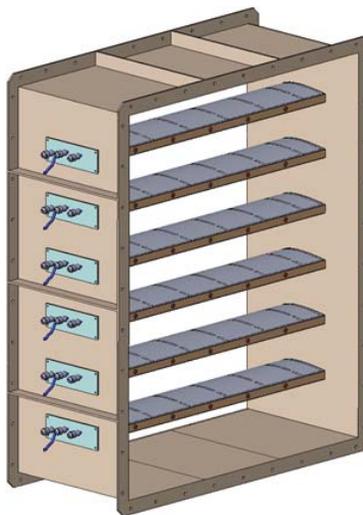


Рис. 6. Секция впрыска воды

сти и не создают неприемлемых потерь на гидравлическое сопротивление тракта АДТ. Каждая штанга снабжена пятью двухфазными форсунками 1/4J-SU11, которые создают мелкодисперсный туман путем смешивания жидкости и сжатого воздуха. Размер создаваемых капель варьируется в диапазоне $10 \div 80$ мкм в зависимости от расхода жидкости, а также от расхода и давления сжатого воздуха. Общий расход жидкости через форсунки $3,24 \div 97,20$ л/ч обеспечивает степень обводненности потока в диапазоне $0,1 \div 3,0$ г/м³.

С использованием пакета ANSYS Fluent при численном моделировании двухфазного течения с учетом гравитации, инерции капель и их дисперсного состава было исследовано распределение капель в потоке рабочей части. Расстояние от верхней, нижней и боковых стенок до крайних форсунок было выбрано таким образом, чтобы минимизировать образование льда на поверхности конфузора и стенках рабочей части. Остальные форсунки распределены равномерно по высоте и ширине рабочей части.

В каждую форсунку подаются горячая дистиллированная вода под давлением и сухой сжатый воздух. Каждая линия подачи воды и воздуха на форсунки оснащена электромагнитным клапаном для индивидуального дистанционного включения форсунок. Система впрыска обеспечивает возможность продувки линий подачи воды сжатым сухим воздухом для предотвращения перемерзания после окончания эксперимента. Заданные условия обводнения потока могут быть достигнуты в течение 4 с с момента начала распыления, поскольку стабилизация параметров имеет решающее значение при испытаниях на обледенение.

На рис. 7 показана схема одной распылительной штанги, которая содержит пять форсунок, 10 электромагнитных клапанов, трубку для циркуляции воды и подачи ее на форсунки, а также трубку для подвода воздуха. Клапаны позволяют включать и отключать любую форсунку и управляются модулями дискретного вывода ОВЕН МУ-110. Клапаны расположены максимально близко к форсункам, что позволяет минимизировать время с момента открытия клапана до момента выхода горячей воды из сопла форсунки. Оболочка штанги изготовлена из стеклопластика и представляет собой аэродинамический профиль НАСА 0018 с максимальной толщиной, приблизительно равной 52 мм, и срезанной задней кромкой. Достаточно большая относительная толщина данного профиля позволила разместить внутри штанги все необходимое оборудование.

2. Система измерения параметров потока и управления АДТ. Система измерения и контроля параметров потока используется для мониторинга условий испытаний

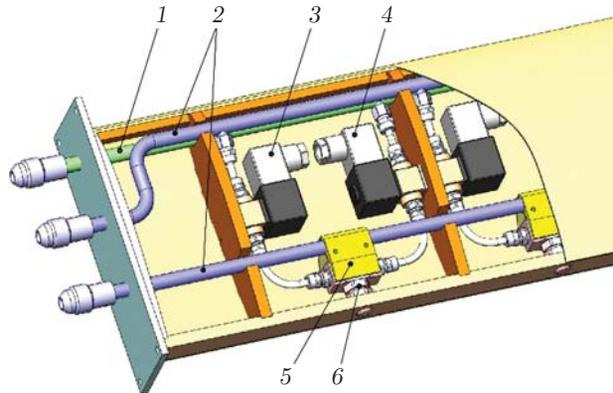


Рис. 7. Схема распылительной штанги:

1 — трубка, по которой подается сжатый воздух, 2 — трубка, в которой циркулирует нагретая вода, 3 — клапан для перекрытия воздуха, 4 — клапан для перекрытия воды, 5 — крепеж форсунки с функцией передачи тепла от горячей трубки, в которой циркулирует вода, 6 — двухфазная форсунка

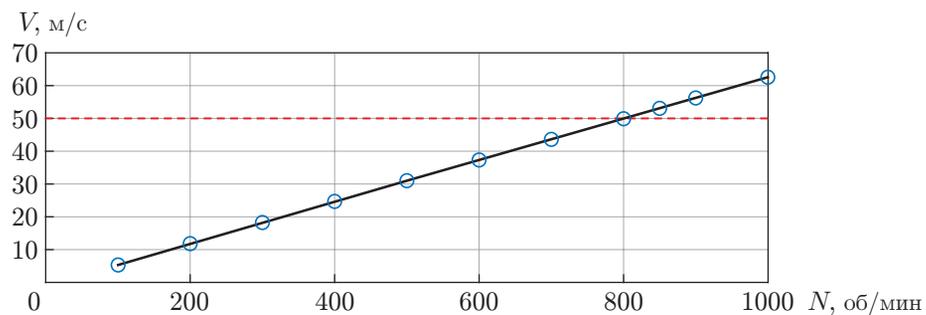


Рис. 8. Зависимость скорости потока в рабочей части от частоты вращения вентилятора (штриховая линия — проектная скорость $V = 50$ м/с)

и управления различными компонентами АДТ. Эта система включает датчики, системы сбора данных и программное обеспечение.

Для определения скорости потока АДТ используются датчики Метран-150, измеряющие давление в форкамере и рабочей части. Датчик температуры и влажности воздуха ПВТ 100-Н5.2 установлен перед секцией впрыска воды. Кроме того, для контроля параметров в контуре АДТ установлены датчики перепада давления на вентиляторе и теплообменнике ПД 150-ДД4, а также дополнительные датчики температуры, используемые для управления холодильной установкой.

Все датчики включены в систему контроля параметров установки. Система управления холодильной установкой, система впрыска воды, а также частотный преобразователь электропривода вентилятора имеют возможность обмена данными по протоколу MODBUS, что позволяет интегрировать все элементы оборудования в единый комплекс, управляемый системой SCADA.

3. Результаты пусконаладочных испытаний. Были осуществлены пробные запуски установки для подтверждения проектных параметров воздушного потока в рабочей части МКАТ. На рис. 8 представлена зависимость скорости потока в рабочей части от числа оборотов ротора вентилятора. Видно, что достигнута скорость, составляющая 60 м/с. Некоторый запас скорости обеспечит требуемую скорость потока в ходе эксперимента, когда сопротивление контура будет увеличиваться вследствие обмерзания теплообменника.

В эксперименте температура потока в контуре МКАТ уменьшалась до значения, равного $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, и поддерживалась в течение 60 мин. Результаты испытаний позволяют сделать вывод, что требуемые параметры потока обеспечиваются.

Заключение. В работе представлено подробное описание малой климатической аэродинамической трубы, спроектированной и построенной в ИТПМ СО РАН. Эта установка имеет рабочую часть с размерами $500 \times 360 \times 1000$ мм и позволяет получить скорость потока до 50 м/с при температуре воздуха до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Большинство аэроклиматических установок, существующих в России в настоящее время, являются сезонными или имеют высокую стоимость эксплуатации. МКАТ ИТПМ СО РАН, имеющая небольшие размеры и невысокую стоимость эксплуатации, позволяет решать задачи, связанные с процессами обледенения (изучение физики процесса, валидация численных методов расчета, отработка методов и средств противообледенительной защиты различных аппаратов и конструкций).

Первые пробные запуски МКАТ показали, что проектные значения скорости и температуры воздушного потока достигнуты.

Авторы выражают благодарность коллективу кафедры аэрогидродинамики Новосибирского государственного технического университета за участие в проектировании и создании малой климатической аэродинамической трубы ИТПМ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Анализ** состояния безопасности полетов в гражданской авиации Российской Федерации в 2018 году. М.: Федер. агентство воздушн. трансп.: Упр. инспекции по безопасности полетов, 2019. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: https://rostransnadzor.gov.ru/storage/img/avia/analiz_po_bezopasnosti_poletov_2018.pdf.
2. **Мордус Д. П.** Методика определения вертикального распределения зон обледенения воздушных судов в нижнем километровом слое атмосферы в районе аэродромов: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2019.
3. **Сао Y., Тан W., Wu Z.** Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety // *Aerospace Sci. Technol.* 2018. V. 75. P. 353–385.
4. **Себеси Т., Кафьеке F.** Aircraft icing // *Annual Rev. Fluid Mech.* 2003. V. 35, N 1. P. 11–21.
5. **Yamazaki M., Jemcov A., Sakaue H.** A review on the current status of icing physics and mitigation in aviation // *Aerospace.* 2021. V. 8, N 7. 188.
6. **Кашеваров А. В., Стасенко А. Л.** Моделирование нарастания льда на поверхности крылового профиля в потоке воздуха, содержащем частицы льда // *ПМТФ.* 2018. Т. 59, № 4. С. 80–88.
7. **Кашеваров А. В., Миллер А. Б., Потапов Ю. Ф., Стасенко А. Л.** Влияние ледяных кристаллов на эволюцию барьерного льда на модели крыла // *Теплофизика и аэромеханика.* 2021. Т. 28, № 1. С. 21–28.
8. **Кашеваров А. В., Стасенко А. Л.** Эволюция пленки воды и барьерного льда на поверхности тела при плоском обтекании воздушным потоком // *Теплофизика и аэромеханика.* 2019. Т. 26, № 2. С. 237–245.
9. **Герасимов С. И., Зубанков А. В., Калмыков А. П. и др.** Экспериментальное исследование движения ударника в соленом льду // *ПМТФ.* 2020. Т. 61, № 4. С. 54–58.
10. **Краус Е. И., Мельников А. Ю., Фомин В. М., Шабалин И. И.** Пробитие ледяных преград конечной толщины стальными ударниками // *ПМТФ.* 2019. Т. 60, № 3. С. 146–153.
11. **Potarczuk M.** Aircraft icing research at NASA Glenn Research Center // *J. Aerospace Engng.* 2013. V. 26, N 2. P. 260–276.

12. **Vecchione L., De Matteis P. P., Leone G.** An overview of the CIRA icing wind tunnel. Reno, 2003. (Paper / AIAA; N 2003-900).
13. **Oleskiw M. M., Hyde F. H., Penna P. J.** In-flight icing simulation capabilities of NRC's altitude icing wind tunnel. Reno, 2001. (Paper / AIAA; N 2001-0094).
14. **Bansmer S., Baumert A., Sattler S., et al.** Design, construction and commissioning of the braunschweig icing wind tunnel // Atmospher. Measurement Techniques. 2018. V. 11, N 6. P. 3221–3249.
15. **Браилко И. А., Горячев А. В., Павлюков Е. В. и др.** Стенды для исследования противообледенительных систем крыла и других элементов планера в условиях искусственного обледенения // Вестн. Моск. энергет. ин-та. 2008. № 4. С. 21–27.
16. **Жбанов В. А., Кашеваров А. В., Миллер А. Б. и др.** Исследования обледенения в различных условиях // Тр. Моск. авиац. ин-та. 2019. № 105. С. 6. EDN: QJITJH.
17. **Клеменков Г. П., Приходько Ю. М., Пузырев Л. Н., Харитонов А. М.** Моделирование процессов обледенения летательных аппаратов в аэроклиматических трубах // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, № 4. С. 563–572.

*Поступила в редакцию 25/V 2023 г.,
после доработки — 6/VII 2023 г.
Принята к публикации 4/VIII 2023 г.*
