

Автореферат
С 77

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Для служебного пользования

Экз. 063

А с п и р а н т

СТАРЧЕВСКИЙ Игорь Петрович

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВКИ АЗОТНОГО
ПРОГРАММНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ
ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

(Специальность 05.04.03. - гидравлические машины, машины
и аппараты холодильной и криогенной техники)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

XV 1007

Институт холода
ОНАХТ
Бібліотека

О д е с с а - 1974

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Для служебного пользования

А с п и р а н т

СТАРЧЕВСКИЙ Игорь Петрович

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВКИ АЗОТНОГО
ПРОГРАММНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ
ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

(Специальность 05.04.03. - гидравлические машины, машины
и аппараты холодильной и криогенной техники)

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

О д е с с а - 1974

Работа выполнена на кафедре холодильных установок Одесского технологического института холодильной промышленности.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ - доктор технических наук, профессор
С.Г. ЧУКЛИН.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ: доктор технических наук, профессор
В.А. НАЕР,
кандидат технических наук, доцент
А.В. КОЗЬМИНЫХ.

ВЕДУШАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ - Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского.

Автореферат разослан "___" _____ 1974 г.
Защита диссертации состоится "20 *Март*" 1974 г. в 15⁰⁰ часов
на заседании Совета факультетов холодильных машин, глубокого
холода и криогенной техники Одесского технологического инсти-
тута холодильной промышленности.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отдав на автореферат в двух экземплярах, заверенный печат-
ью учреждения, просим направлять в Совет института по адресу:
270000, г.Одесса, ГСП, ул. Петра Великого, 1/3.

Ученый Секретарь Совета,
канд. техн. наук, доцент

Г.В. ЛИХНИЦКИЙ

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ведущие индустриальные державы мира приступили к созданию нового поколения околозвуковых и сверхзвуковых пассажирских самолетов.

Конструкции сверхзвуковых самолетов подвергаются в полете значительному нестационарному нагреву и охлаждению. Вследствие аэродинамического нагрева температура обшивки самолета в процессе взлета, разгона и крейсерского полета увеличивается от значений, определяемых погодными условиями аэродрома, до некоторой установившейся величины, которая, например, при полете с числом $M = 2,2$ на высоте 20000 м изменяется от 100°C до 150°C для различных участков самолета. С уменьшением скорости при снижении самолета температура обшивки быстро уменьшается и при дозвуковых скоростях полета приближается к температуре окружающего воздуха. Внутренние поверхности конструкции самолета в течение полета прогреваются и охлаждаются медленнее обшивки. Поэтому на режимах взлета и крейсерского полета их температуры оказываются более низкими, а на режимах снижения и посадки - более высокими, нежели температура поверхности самолета. Соответственное неравномерное тепловое расширение конструкции приводит к возникновению в ней напряжений, являющихся одними из наиболее существенных для условий эксплуатации сверхзвуковых самолетов. Совместный эффект увеличения и уменьшения скорости и высоты полета создает циклы изменения температуры и температурных напряжений, органически свя-

заны с механическими нагрузками самолета. Причем большая часть изменений действующих в полете нагрузок происходит тогда, когда температура конструкции низка.

С целью всестороннего анализа влияния различных видов нагрузок на прочность и выносливость самолетов их подвергают сертификационным испытаниям. В процессе сертификации по результатам испытаний вносятся коррективы в конструкцию опытного самолета. Конечной целью сертификации является выдача самолету свидетельства (сертификата) на право эксплуатации. Довузовые самолеты испытывают в лабораторных условиях имитацией чередующихся взлетов и посадок с приложением соответствующих механических нагрузок.

Для организации испытаний конструкций сверхзвуковых самолетов на прочность и выносливость под действием температурных напряжений потребовалось создание новых методики и техники испытаний, в частности, установок программного нагрева и охлаждения.

В печати имеется ряд сообщений о проведении в Англии и Франции испытаний с воспроизведением температурных циклов планера, отсеков и панелей фюзеляжа и других элементов сверхзвукового транспортного самолета "Конкорд". Системы программного нагрева соответствующих установок основаны на применении конвективного и радиационного методов теплообмена, а программное охлаждение конструкций осуществляется преимущественно с помощью жидкого азота. Например, для выполнения програм-

мы усталостных испытаний носовой части фюзеляжа фирма "Air Products" (Англия) ежедневно поставляет примерно 40 т жидкого азота.

Системы азотного охлаждения работают при замкнутом либо разомкнутом воздушном тракте установки, охлаждение потока воздуха, направляемого к испытываемой конструкции, производится путем распыла в нем жидкого азота. Разомкнутый воздушный тракт применяется, как правило, при испытаниях небольших элементов авиационных конструкций с целью экономии жидкого азота за счет исключения теплопритоков от вентилятора установки, а также при статических испытаниях, в общей стоимости которых стоимость жидкого азота не является определяющей. В установках с конвективным методом нагрева и охлаждения конструкций воспроизводится программа изменения во времени температуры воздуха, обеспечивающая заданный температурный цикл обшивки самолета. В установках с радиационным методом нагрева мощность излучателей и расход жидкого азота регулируется по отстепкиванию программы изменения температуры в контрольной точке испытываемой конструкции. На режимах охлаждения точность воспроизведения программы корректируется радиационным нагревом. Управление отдельными циклами испытаний осуществляется оператором, а длительные циклические испытания полностью автоматизированы. Для уменьшения потребности в жидком азоте минимальная температура цикла испытаний конструкций во многих случаях повышается относительно минимальной температуры, до которой охлаждается самолет на режиме снижения.

Жидкий азот находит широкое применение в качестве источника холода также в пищевой, машиностроительной и других отраслях промышленности, когда его сравнительно высокая стоимость (в СССР 4-5 коп. за кг) окупается техническими и технологическими преимуществами установок азотного охлаждения перед установками с пароконденсационными и другими холодильными машинами.

В отечественной и зарубежной литературе по вопросам применения жидкого азота в качестве источника холода отсутствуют рекомендации по расчету и проектированию установок азотного охлаждения. Имеющаяся информация о применении жидкого азота для тепловых ресурсных испытаний авиационных конструкций практически ограничивается приведенными выше сведениями.

С учетом изложенного сформулированы основные задачи рефермируемой работы:

- выбор, теоретическое обоснование и экспериментальная проверка метода воспроизведения изменений во времени температуры обшивки самолета при моделировании в лабораторных условиях его снижения и посадки;
- проведение теоретических и экспериментальных исследований с целью определения основных закономерностей работы установок азотного охлаждения;
- разработка инженерной методики расчета и проектирования установок азотного программного охлаждения;

создание на основе выполненных исследований экспериментальной и промышленных установок программного охлаждения элементов авиационных конструкций с использованием оборудования и приборов, серийно выпускаемых отечественной промышленностью.

Ниже приведены результаты исследований.

ОСНОВЫ ПРОГРАММНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ ЖИДКОГО АЗОТА

Рассматриваются установки программного охлаждения, работающие по принципу обдува поверхности конструкций воздухом или воздушноазотной смесью, образующейся вследствие распыла и испарения в потоке воздуха жидкого азота. Их основными элементами являются замкнутый или разомкнутый канал, в котором последовательно размещены форсунки для распыла жидкого азота, испытуемый объект и вентилятор, и система подачи жидкого азота к форсункам. Участок канала, где образуется воздушноазотная смесь, назван азотным воздухоохладителем.

Теоретические положения основ разработаны применительно к конструкциям, которые для условий их теплообмена с воздухом или воздушноазотной смесью можно считать бесконечными пластинами при величине критерия Био $Bi < 0,1$. Эти условия отвечает обшивка самолета, а также практически вся часть его конструкции, подвергаемая в полете аэродинамическому нагреву и охлаждению, рассматриваемая как пластина с приведенной

толщиной

$$\delta_{пр} = \frac{G_K}{\rho_K F_K}, \quad (1)$$

где ρ_K , G_K и F_K - плотность материала конструкции, её масса и обдуваемая воздухом поверхность обшивки конструкции.

Показано, что точное воспроизведение программы охлаждения пластины, заданной в виде зависимости её температуры от времени: $T = f(t)$ достигается регулированием температуры воздушноазотной смеси по закону

$$T_c = f(t) + \frac{1}{K} \frac{d}{dt} [f(t)], \quad (2)$$

а в наиболее распространенном случае, когда

$$\frac{d}{dt} [f(t)] = -b = \text{const}, \quad (3)$$

$$T_c = (T)_{t=0} - b \left(t + \frac{1}{K} \right),$$

где $K = \frac{d}{\delta \rho c}$; d - коэффициент теплоотдачи от пластины к воздушноазотной смеси, величина которого принята постоянной; δ , ρ , c - толщина пластины, плотность и теплоемкость её материала.

Если изменением d за цикл испытаний пренебречь нельзя,

то величина разности температур пластины и воздушноазотной смеси, требуемая для охлаждения пластины в любой момент времени t программы с заданным темпом b_t , рассчитывается по зависимости

$$\Delta T = \frac{b_t}{\Gamma_t}. \quad (4)$$

Понижение температуры воздушноазотной смеси по выражению (2) требует плавного регулирования подачи жидкого азота в воздухоохладитель, что связано со значительными техническими затруднениями.

Например, для плавного регулирования расхода распыляемой жидкости наиболее приемлемы пневматические форсунок. Однако при работе для распыла жидкого азота на сжатом воздухе их сопла быстро перекрываются инеем. Использование для питания пневматических форсунок газообразного азота или воздуха, очищенного от влаги и двуокиси углерода, нецелесообразно по экономическим соображениям. Среди других типов распылителей жидкостей опытным путем выявлены преимущества центробежных форсунок применительно к условиям работы установок азотного программного охлаждения. Вместе с тем, выбор центробежных форсунок предопределяет, по крайней мере, одну ступень регулирования подачи жидкого азота в воздухоохладитель установки. Это связано с тем, что удовлетворительный распыл жидкого азота, обеспечивающий его быстрое и полное испарение, начинается при некотором минимальном давлении перед входными каналами

форсунок, величина которого в опытах составила $(1,5+1,8) \cdot 10^5$ Па.

Ступенчатое регулирование подачи жидкого азота в воздухоохладитель установки и, соответственно, ступенчатое понижение температуры воздушноазотной смеси приведет к отклонению действительной температуры пластины от программы испытаний. В диссертации даны зависимости, позволяющие рассчитать количество ступеней регулирования температуры воздушноазотной смеси, необходимых для воспроизведения программы охлаждения конструкций с заданной точностью. Повышение точности воспроизведения программы может быть достигнуто за счет увеличения числа ступеней регулирования расхода жидкого азота через форсунки, однако это вызовет усложнение установки.

В диссертации предложен метод программы многократного охлаждения элементов авиационных конструкций путем попеременного обдува их поверхности воздухом и воздушноазотной смесью, позволяющий реализовать наиболее простую схему установки с одной ступенью подачи жидкого азота в воздухоохладитель.

В установке с разомкнутым трактом и постоянным давлением подачи жидкого азота к форсункам применение этого метода сводится к попеременному обдуву конструкций наружным воздухом и воздушноазотной смесью постоянных температур. Расход жидкого азота через форсунки принимается постоянным и рассчитывается для момента времени, в который для охлаждения конструкции с

заданным темпом требуется минимальная температура T'_c воздушноазотной смеси при максимальных значениях температуры и влажности наружного воздуха. Аналитически указанная температура находится из выражения

$$T'_c \leq \left(T + \frac{I}{K} \frac{dT}{dt} \right) \min, \quad (5)$$

где значения температуры конструкции T и $\frac{dT}{dt}$ соответствуют моменту времени программы, когда правая часть неравенства принимает минимальное значение.

Для установки с замкнутым воздушным трактом требуемый расход жидкого азота через форсунки находится для момента времени, в который суммарная тепловая нагрузка на азотный воздухоохладитель максимальна.

Степень точности воспроизведения программы испытаний конструкции предложенным методом определяется, главным образом, временем запаздывания начала или прекращения обдува поверхности конструкций воздушноазотной смесью относительно моментов времени включения или выключения системы подачи жидкого азота в воздухоохладитель. Причем наибольшая точность достигается регулированием температуры конструкции путем включения и выключения системы подачи жидкого азота в моменты времени, когда действительная температура в контрольной точке объекта приходит в соответствие с заданной программой.

Анализ составляющих общего времени запаздывания установ-

ки азотного программного охлаждения показал, что наиболее существенными из них являются:

а) транспортное запаздывание, равное времени $t_{\text{тр}}$ перемещения охлажденного воздуха от места установки форсунок до испытуемой конструкции;

б) запаздывание магистрали жидкого азота, определенное как промежуток времени t_m от момента включения системы подачи жидкого азота в воздухоохладитель установки до начала его непрерывного истечения через форсунки.

Расчет величины $t_{\text{тр}}$ не вызывает затруднений, если известны производительность вентилятора и геометрические размеры воздухопроводов установки программного охлаждения.

Вторая составляющая t_m является основной частью запаздывания системы подачи жидкого азота в воздухоохладитель установки, определенного как промежуток времени t_c от момента включения системы до поступления в воздухоохладитель требуемой массы жидкого азота. В частном случае, когда давление подачи жидкого азота к форсункам постоянно, имеет место равенство

$$t_m = t_c. \quad (6)$$

Простейшая система подачи жидкого азота, отвечающая этому условию, состоит из форсунки, резервуара и магистрали жидкого азота. Неизолированный участок трубы магистрали размещается вертикально в резервуаре ниже уровня жидкого азота. На её

наружной, изолированной части устанавливается между форсункой и резервуаром двухпозиционный автоматический запорный клапан. В резервуаре поддерживается избыточное давление. Включение системы подачи жидкого азота в воздухоохладитель производится открытием запорного клапана. Жидкий азот под действием избыточного давления в резервуаре устремляется по магистрали к форсунке и через время t_m достигает её.

Если начальная температура T_0 трубы магистрали (в момент времени $t = 0$) не выше температуры насыщения T_r поступающего к форсунке жидкого азота, то при прочих равных условиях имеет место минимальное запаздывание $(t_m)_{\text{min}}$. В противном случае, когда $T_0 > T_r$, происходит кипение жидкого азота в отепленной магистрали, вследствие чего время t_m существенно увеличивается.

Для выяснения характера зависимости t_m от T_0 , температуры и массы трубы магистрали, давления перекачивания жидкого азота из резервуара и других параметров составлены дифференциальные уравнения, приближенно описывающие динамику тепло-гидравлических процессов в магистрали простейшей системы подачи жидкого азота. Их анализ позволил установить, что в течение времени t_m давление p перед входными каналами центробежной форсунки изменяется по волнообразному закону, периодически проходя через значения

$$p = p_p - p_x \varepsilon (x - x_0), \quad \text{где} \quad (7)$$

p_p - давление в резервуаре в точке входа жидкого азота в магистраль; ε - ускорение силы тяготения; $\rho_{ж}$, x_0 , x - плотность и уровень жидкого азота в магистрали в момент времени $t = 0$ и любой другой момент времени из промежутка t_m .

Давление перед входными каналами форсунки может быть осреднено за время t_m следующим образом

$$p = p_p - \frac{1}{2} \rho_{ж} \varepsilon L (L - x_0) \quad (8)$$

если противодействие $\rho_{ж} \varepsilon L$ вертикального столба жидкого азота в магистрали незначительно по сравнению с p_p .

С учетом выражений (7), (8) предложена зависимость для расчетной оценки времени запаздывания магистрали:

$$t_m = \frac{m c (\bar{T}_0 - \bar{T}_K)}{[c_p (T_T - T_p) + r] G_F''} + \frac{V_T \rho_0}{G_F''} \quad (9)$$

где c , m , \bar{T}_0 , \bar{T}_K - удельная теплоемкость материала трубы магистрали, её масса, начальная и конечная средняя температура, соответствующая началу режима течения жидкого азота без кипения к окончанию времени t_m ; c_p , r , T_T , T_p - удельная теплоемкость, теплота парообразования и температура насыщения жидкого азота при давлении p , температура жидкого азота в резервуаре; V_T , ρ_0 - объем парового пространства магистрали и плотность паров азота в ней в момент времени $t = 0$; G_F'' - расход через форсунку парообразного азота при давлении p .

При выводе (9) допускалось: 1) парообразный азот поступает к

форсунке в состоянии насыщения; 2) в течение времени t_m из форсунки вытекает только парообразный азот; 3) величина G_F'' меньше скорости парообразования в магистрали; 4) теплопритоками к жидкому азоту от изоляции магистрали можно пренебречь.

Также предложен графо-аналитический метод оценки величины t_m при переменном давлении в резервуаре, когда запорный клапан на магистрали отсутствует, а перекачивание жидкого азота к форсункам осуществляется наддувом резервуара, начиная с момента времени $t = 0$, сжатый газом.

Известные величины $t_{нр}$ и t_m позволяют рассчитать изменение температуры конструкции в процессе испытаний. Первое включение системы подачи жидкого азота производится в некоторый момент времени t_1 , когда темп охлаждения конструкции, обуславливаемой наружным воздухом с температурой T_B , становится равным заданному программой. Однако в течение времени $t_{нр}$ на конструкцию продолжает поступать наружный воздух, вследствие чего её температура, изменяясь по известной зависимости

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \exp(-\text{BiFo}) \quad (10)$$

в которой Fo - критерий Фурье, $\theta = (T)_{t_1} - T_B$, $\theta_0 = (T)_{t_1} - T_B$ отклоняется в сторону более высоких температур, чем предусмотрено программой. В установке с разомкнутым воздушным трактом при $p_p = \text{const}$, начиная с момента времени $t_2 = t_1 + t_{нр}$, конструкция в течение времени t_m охлаждается воздушно-азотной смесью с температурой T''_0 , образующейся в результате смешения

наружного воздуха и массы G'_f паровозобразного азота. При этом её температура изменяется также по зависимости (10), в которой $\theta = (T)_{t_1} - T'_C$ и $\theta_C = (T)_{t_2} - T''_C$. По истечении запаздывания магистральной, начиная с момента времени $t_3 = t_2 + t_m$, конструкция обдувается воздушно-азотной смесью с температурой T'_C , образующейся в результате испарения в потоке наружного воздуха массы G'_f жидкого азота. Так как $G'_f \gg G''_f$ темп охлаждения конструкции существенно увеличивается и в некоторый момент времени t_4 , когда её температура приходит в соответствие с программой, подача жидкого азота к форсункам прекращается. В следующий промежуток времени t_{np} , конструкция, обдуваемая холодной воздушной смесью, охладится до более низкой температуры, чем предусмотрено программой. Изменение температуры конструкции в течение времени $t_4 + t_{np} - t_3$ рассчитывается по зависимости (10) после подстановки $\theta = (T)_{t_1} - T'_C$ и $\theta_C = (T)_{t_2} - T'_C$. По истечении t_{np} конструкция вновь обдувается наружным воздухом. В момент времени, когда её температура вновь становится равной заданной программой, производится следующее включение системы подачи жидкого азота в воздухоохладитель.

Таким образом, в процессе испытаний температура конструкции будет совершать колебания, отклоняясь после каждого включения и выключения подачи жидкого азота к форсункам соответственно в сторону более высоких и более низких температур от значений, определяемых программой. Влияние нулевых составляющих времени запаздывания установки программного охлаждения

проявится в том, что волнообразная функция $T = f(t, t_{np}, t_m)$ будет носить плавный характер.

В работе дана методика расчета величин t_{np} и t_m , обеспечивающих требуемую точность воспроизведения программы охлаждения конструкций.

Для вычисления расхода жидкого азота через форсунки, необходимого для охлаждения наружного воздуха в азотном воздухоохладителе до температуры T'_C , получена зависимость

$$G_a = \frac{V_b G_a}{V_b + V_a G_a}, \quad (11)$$

в которой: V_b - производительность вентилятора установки, V_b , V_a - удельные объемы воздуха и газообразного азота, G_a - расход жидкого азота на охлаждение 1 кг воздуха, равный

$$G_a = \frac{i_H - i_0 + i_w (d_0 - d_H)}{i_a + i_w d_H - i_H}, \quad (12)$$

где i_0 и d_0 - энтальпия и влагосодержание наружного воздуха, i_H и d_H - энтальпия и влагосодержание насыщенного влагой воздуха при температуре T'_C , i_a и i_w - энтальпия жидкого азота и конденсата либо льда при температуре T'_C .

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования запаздываний системы подачи жидкого азота показали, что действительное изменение в течение времени t_m давления p перед входными каналами форсунки

близко к определяемому выражением (7). Также подтверждены теоретические выводы о волнообразном характере изменения во времени скорости G_n жидкого азота в магистрали и средней температуры T трубы магистрали. Балансовой функцией времени оказалась и температура азота T_n перед форсункой. Вместе с тем колебания T_n , совершаемые с частотой колебаний p и G_n быстро затухают, а средняя температура трубы магистрали при $p_p = \text{const}$, удовлетворительно аппроксимируется линейными зависимостями от времени.

Визуальными наблюдениями установлено, что в течение времени t_n из форсунки вытекает в основном парообразный азот без видимых примесей жидкости. За некоторое время до окончания запаздывания магистрали имеют место всплески расхода паро-жидкостной эмульсии, длительность которых не превышала 1 с. В момент времени начала непрерывного истечения жидкого азота угол конусности факела форсунки минимальный, а затем в течение $2 + 7$ с плавно возрастает до постоянного значения. Одновременно увеличивается и количество жидкости в паро-жидкостной эмульсии. С полным раскрытием факела у среза сопла форсунки наблюдается истечение только жидкого азота.

Опыты проводились при горизонтальном и вертикальном расположении двух магистралей длиной 3 м и 5 м, выполненных из труб диаметром $\phi 25 \times 1,2$ мм, изготовленных из стали Х16Н9Т и изолированных (кроме участка длиной 0,5 м, размещенного в резервуаре жидкого азота) слоем капроновой ваты и гидроиоляцией.

Передавливание жидкого азота из резервуара КО-6103 емкостью $0,3 \text{ м}^3$, рассчитанного на рабочее давление до $3,5 \times 10^5 \text{ Па}$, к форсункам осуществлялось воздухом путем открытия в момент времени начала каждого опыта соленоидного вентиля, сообщающего паровое пространство резервуара с одним из четырех ресиверов, в которых автоматически поддерживались различные избыточные давления сетевого воздуха. Таким образом, в экспериментальном стенде реализована система с переменным давлением подачи жидкого азота к форсункам, отвечающая наиболее общему случаю работы установки программного охлаждения.

В процессе опытов измеряли с одновременной записью на шлейфный осциллограф К 20-21 массовую скорость жидкого азота на входе в магистраль, давление и температуру азота перед входными каналами форсунок, давление и температуру жидкого азота в резервуаре и температуру в 16 точках трубы магистрали. Использовались малогабаритные датчики давления индукционного типа ДМИ-6П и платиновые термометры сопротивления ИС 545В. В связи с тем, что промышленностью не выпускаются расходомеры, предназначенные для работы в криогенной жидкости, для измерений массовой скорости жидкого азота на входе в магистраль разработан и изготовлен специальный тахометрический расходомер. Турбина прибора устанавливалась в трубе магистрали, а вторичный преобразователь-магнитопровод-статор вне её в среде жидкого азота. На всем протяжении экспериментов опытный тахометрический расходомер работал устойчиво, обеспечивая измерение расхода жидкого азота от $0,010 \text{ кг/с}$ до $0,8 \text{ кг/с}$ при погрешности не бо-

иоо 3%.

Примеры осциллограмм сняты приведены на рис.1 и рис.2, где включение системы подачи жидкого азота и окончание запаздывания магистрали соответствуют моменты времени $t = t_0$ и $t = t_m$, а наблюдавшемуся визуально запаздыванию раскрытия факела форсунки - промежуток времени $t_f - t_m$.

В и я с н о, что истечение через центробежные форсунки паробразного азота с некоторым приближением подчиняется законам для истечения несжимаемой жидкости. Это позволило обобщить результаты опытов в виде следующих зависимостей отношения $\frac{G_p''}{G_f}$ расходов паробразного и жидкого азота от избыточного давления Δp перед форсунками:

$$\frac{G_p''}{G_f} = 0,074 - \frac{6,07}{\sqrt{\Delta p}} \quad (13)$$

при горизонтальном расположении магистрали и

$$\frac{G_p''}{G_f} = 0,077 - \frac{3,3}{\sqrt{\Delta p}} \quad (14)$$

при вертикальном расположении магистрали, необходимых для определения G_p'' при расчете t_m по формуле (9), представленных также на рис.3 кривыми линиями I и II. Погрешность вычисления t_m с использованием зависимостей (13) и (14), полученных для диапазонов изменения параметров: $T = -192^{\circ}\text{C} + 5^{\circ}\text{C}$, $p = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па} + 2,9 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и $G_f' = 0,1 \text{ кг/с} + 0,5 \text{ кг/с}$, уменьшается от 40% до 10% с увеличе-

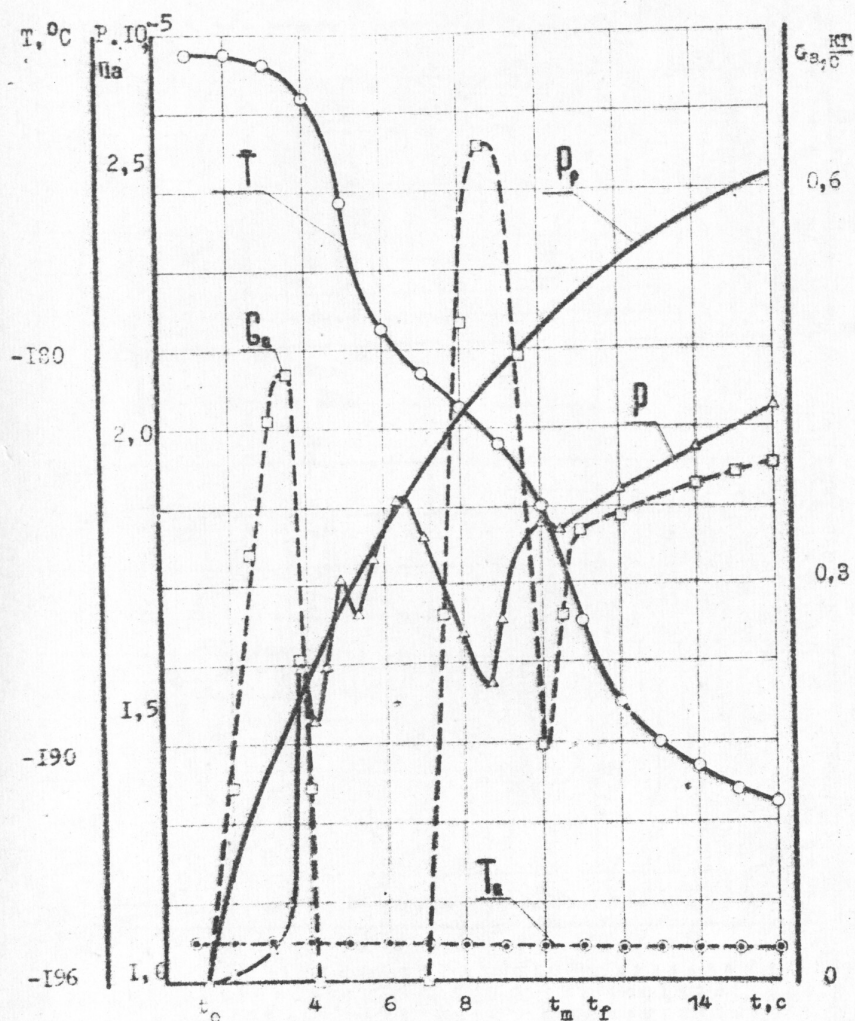


Рис.1 Динамика процесса подачи жидкого азота к центробежной форсунке при вертикальном расположении магистрали.

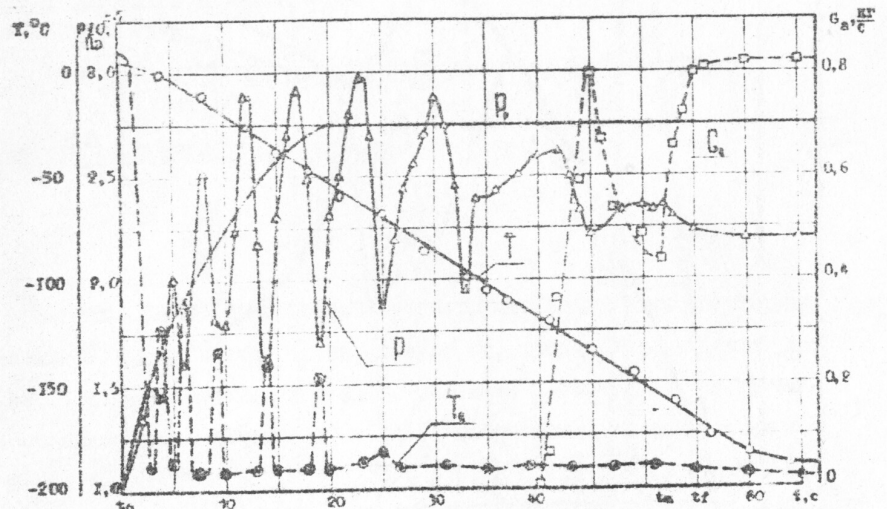
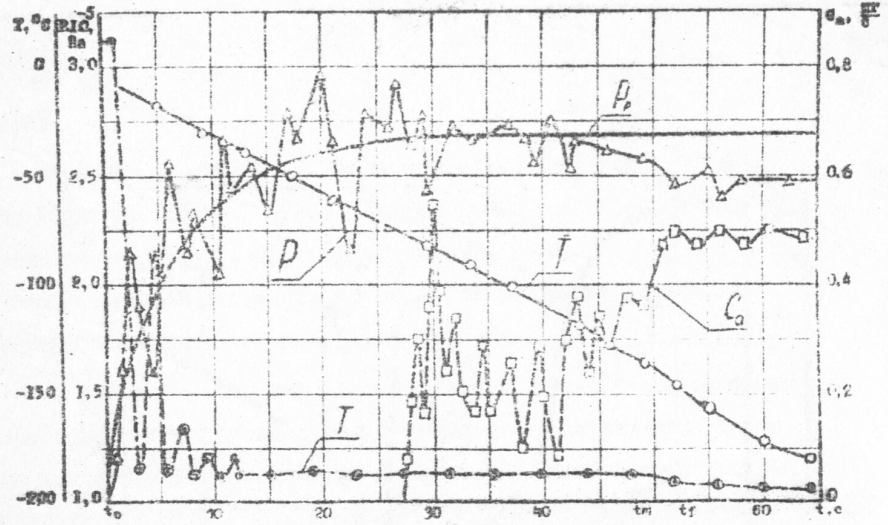


Рис. 2 Динамика процесса подачи жидкого азота к центробежной форсунке при горизонтальной (а) и вертикальной (б) расположении магистралей.

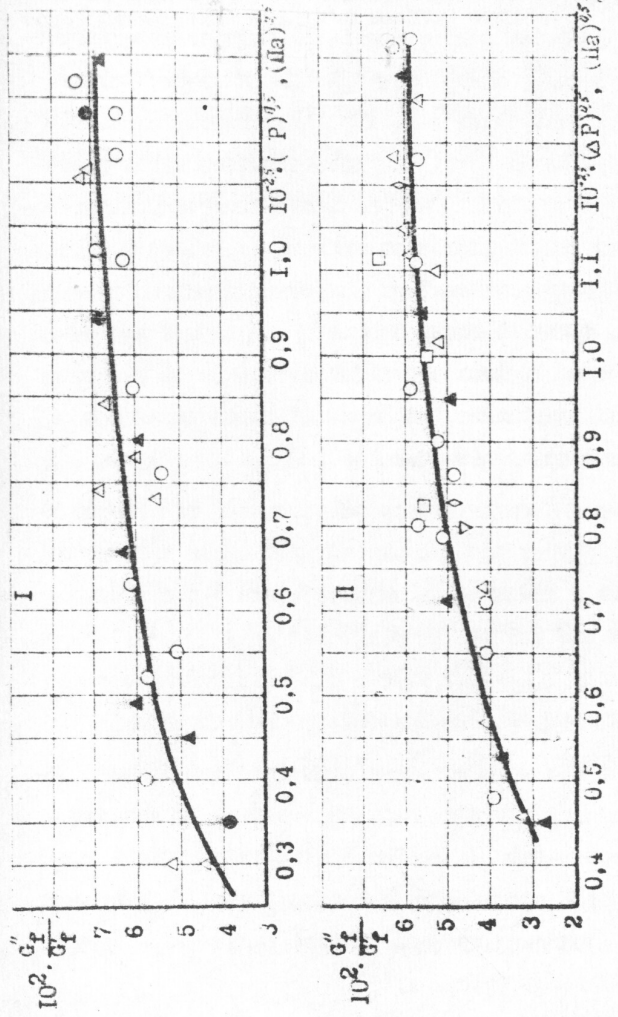


Рис. 3. Относительный расход паробразного азота через центробежные форсунки при вертикальной (I) и горизонтальной (II) расположении магистралей. Опытные точки: \bullet , \blacktriangle , \square , ∇ соответственно для форсунок: I (D = 0,01 м, M = 0,3); 2 (D = 0,022 м, M = 0,53); 3 (D = 0,03 м, M = 0,2); 4 (D = 0,01 м, M = 0,16) и 5 (D = 0,01 м, M = 0,45) при длине магистралей 3 м; \circ , \triangle - соответственно для форсунок I и 2 при длине магистралей 5 м. D - диаметр выходного сопла форсунки.

нием $t_{\text{д}}$ от 3 с до 30 с.

Расход через форсунки парообразного азота согласно выражениям (13) и (14) больше при вертикальном расположении магистрали. С другой стороны опытные значения $G_{\text{г}}$ оказались значительно меньше, чем следует из теории эффекта Ранга-Хилла применительно к центробежной форсунке, рассматриваемой как прямая вихревая труба. Одна из причин этого заключается, по-видимому, в частичном перекрытии входных каналов (соли) форсунок жидким азотом, сепарируемым из парожидкостной эмульсии в течение времени $t_{\text{д}}$. Причем в горизонтальной магистрали входные каналы форсунок перекрываются в большей степени, чем в вертикальной магистрали, так как горизонтальный поток парожидкостной эмульсии богаче примесями жидкости.

П о л и ч е н ы основные экспериментальные характеристики центробежных форсунок при распыле жидкого азота в области изменения давления и температуры жидкого азота перед входными каналами форсунок $p = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па} + 2,7 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и $T_{\text{а}} = -193^{\circ}\text{C} + -195^{\circ}\text{C}$, его расхода $G_{\text{г}} = 0,1 \text{ кг/с} + 0,5 \text{ кг/с}$ и геометрических характеристик форсунок $A = 1,3 + 7,5$.

С целью более обоснованного сопоставления экспериментальных и расчетных данных опытные форсунки выполнены с возможным приближением к схеме центробежной форсунки для идеальной жидкости, теория которой разработана Г.Н.Абрамовичем. В частности, высота камеры завихривания принята близкой к диаметру тангенциальных входных каналов форсунок.

Распыл жидкого азота осуществлялся в условиях естественной конвекции окружающего воздуха. Использовались те же методы и средства измерений, что и в опытах по исследованиям запатентованной системы подачи жидкого азота.

У с т а н о в л е н о, что из-за малой вязкости жидкого азота не происходит увеличения его расхода через форсунки по сравнению с идеальной жидкостью, что вытекает из теории распыла вязкой жидкости, разработанной Д.А.Хлячко.

О п ы т ы не подтвердили теории К.Н.Красотова и Е.Г.Николаевой о термодинамически равновесном истечении из центробежных форсунок перегретой жидкости, согласно которой коэффициент расхода форсунок является переменной величиной. Перегрев жидкого азота относительно температуры его насыщения при атмосферном давлении, достигавший 2,5 град, не сказывается заметным образом на уменьшении коэффициентов расхода форсунок, что может быть объяснено метастабильным состоянием жидкого азота в сопле форсунки, наблюдавшемся также Л.Н.Мигалинской, А.И.Мороз и Л.С.Аксельродом при истечении жидких кислорода и азота через вентили, насадки и диафрагмы.

Данные по расходу жидкого азота через форсунки, полученные в опытах, с точностью $\pm 8\%$ аппроксимируются уравнением

$$G_{\text{г}} = 0,85 \mu_{\text{ид}} f_c \sqrt{2\rho\Delta p}, \quad (15)$$

где $\mu_{\text{ид}}$ — коэффициент расхода форсунки при распыле идеальной жидкости, f_c — площадь выходного сопла форсунки, ρ — плотность

жидкого азота.

Визуальные наблюдения показали, что в установившемся режиме работы из форсунки вытекает прозрачная закрученная струя жидкого азота, а на расстоянии 2 ± 3 см от сопла форсунки факел распыленного азота приобретает характерную молочную окраску. Это явление вызвано, очевидно, объемным вскипанием вне форсунки перегретых струй (капель) жидкости, восстанавливающим термодинамическое равновесие между температурой и давлением жидкого азота, а также влаговыпадениями из окружающего воздуха. По длине факел азота состоит из устойчивого конусообразного и размытого участков. У форсунок с экспериментальными значениями коэффициентов расхода $\mu_{\text{экс}} < 0,2$ граница между указанными участками факела видна четко, причем к концу первого участка испарение жидкости практически завершается. Объемное вскипание и быстрое испарение капель жидкого азота в большой степени компенсирует проигрыш центробежных форсунок перед пневматическими форсунками по дисперсности распыла жидкостей.

Угол конусности γ_f факела распыленного азота, измеренный у среза сопла форсунок, оказался выше расчетных значений по зависимости Г.Н.Абрамовича, что объясняется полученным соотношением $\mu_{\text{экс}} < \mu_{\text{ид}}$. Вместе с тем, величина γ_f в средней устойчивой части факела и соответственно размеры факела, сведения о которых нужны при проектировании азотного воздухоохладителя, могут быть с некоторым приближением определены по теории центробежной форсунки для идеальной жидкости. Постепенное

уменьшение γ_f с увеличением расстояния от форсунки происходит, по-видимому, вследствие более быстрого испарения наружных струй (капель) факела распыленного азота.

Проведены поисковые экспериментальные исследования по выбору конструкции и режимов работы азотного воздухоохладителя, обеспечивающих полное испарение распыленного жидкого азота и выравнивание температуры воздушноазотной смеси, направляемой к испытываемой конструкции.

Испытывались воздухоохладители, выполненные в виде горизонтальных воздухопроводов прямоугольного сечения, в которых устанавливались одна либо несколько центробежных форсунок. В опытах скорость потока наружного воздуха, создаваемого вентилятором, менялась от 1 м/с до 10 м/с, расход жидкого азота через форсунки достигал 0,5 кг/с, а величина подохлаждения воздуха - 80 град.

Выяснено, что испарение жидкого азота в воздухоохладителе завершается на расстоянии, не большем 4 м от места установки форсунок, а распределение по высоте воздухоохладителя температуры воздушноазотной смеси, установившееся через следующие 1 + 3 м, в дальнейшем изменяется медленно. Практическое выравнивание температуры воздушноазотной смеси достигается в случае равномерного орошения воздуха жидким азотом или подаче его в верхнюю половину воздухоохладителя на 20 + 30% больше, чем в нижнюю, при скорости воздуха, не меньшей 5 м/с. Наблюдалось явление, ограничивающее возможную величину подохлаждения воздуха

жидким азотом. При некоторых соотношениях производительности вентилятора и расхода жидкого азота через форсунки в нижней части воздухоохлаждителя постепенно накапливалась холодная воздушноазотная смесь, которая вначале циркулировала по замкнутому контуру, а затем вытекала из воздухоохлаждителя навстречу потоку воздуха. В опытах с одиночными форсунками большой производительности, факелы которых соприкасались со стенками воздухоохлаждителя, наблюдался залив воздухоохлаждителя жидким азотом. Небольшое скопление жидкого азота на нижней стенке воздухоохлаждителя имело место в опытах с форсунками с $\mu_{эк} < 0,2$.

Рекомендован к применению азотный воздухоохлаждитель, выполненный в виде воздухопроводов большого и малого поперечного сечения, соединенных конфузуром, предназначенных соответственно для испарения жидкого азота и выравнивания температуры воздушноазотной смеси, с равномерным размещением форсунок в одном или нескольких поперечных сечениях аппарата.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА АЗОТНОГО ПРОГРАММНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

С использованием результатов выполненных исследований, создана экспериментальная установка азотного программного охлаждения элемента панели фюзеляжа, являющегося типичным элементом конструкции самолета. Принципиальная схема установки дана на рис.4. Объект охлаждения I попеременно обдувается наружным воздухом и воздушноазотной смесью, просасываемых венти-

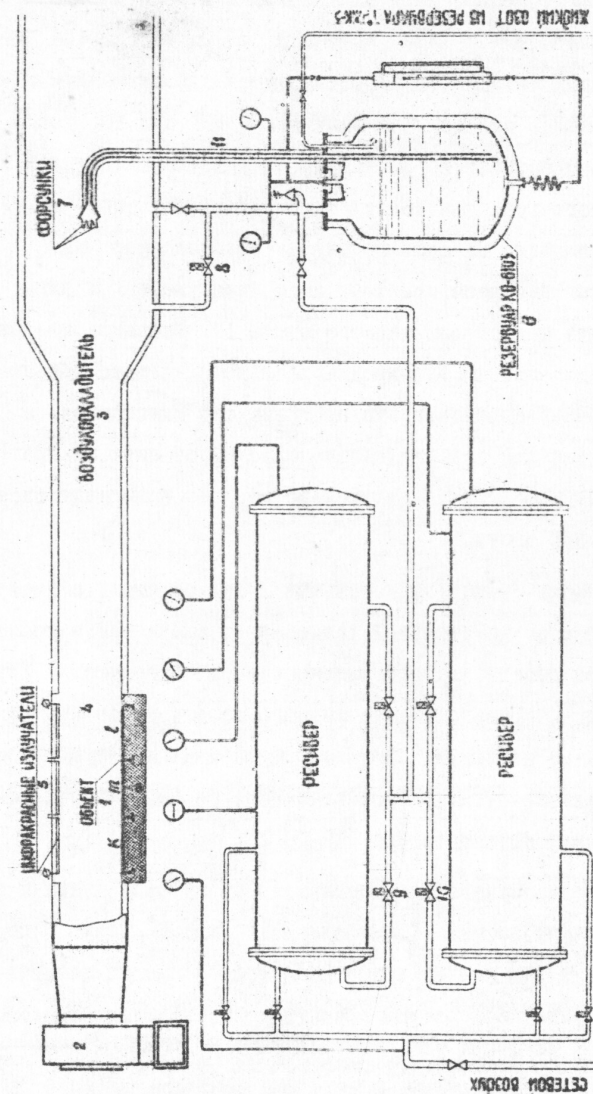


Рис.4 Принципиальная схема экспериментальной установки азотного программного охлаждения элемента панели фюзеляжа самолета.

30.

лятором 2 через азотный воздухоохладитель 3 и воздуховод 4. Включение и выключение подачи жидкого азота из резервуара 6 в распылительное устройство 7 производится одновременным закрытием и открытием соленоидных вентилей 8 и 9 или 10, сообщающих паровое пространство резервуара с воздухоохладителем и ресивером сжатого воздуха. Конструкция распылительного устройства, представляющего из себя группу центробежных форсунок, объединенных коллекторной камерой, позволила уменьшить длину и металлоемкость магистрали жидкого азота II. Инфракрасные излучатели 5 предназначены для предварительного нагрева объекта перед опытами по воспроизведению программы его охлаждения, а также для компенсации отклонений температуры объекта от программы при его обдуве наружным воздухом до первого включения системы подачи жидкого азота.

Регулирование температуры объекта в соответствии с программой производится по контрольной точке m , выбранной в геометрическом центре объекта на его изолированной поверхности. Управление системами нагрева и подачи жидкого азота ручное при помощи соответственно реостата плавного регулирования и тумблеров на пульте установки путем отслеживания программы, заранее нанесенной на ленту потенциометра ЭНП-09 МЗ.

Примеры воспроизведения линейных программ охлаждения и выдержки температуры объекта I, приведены на рис.5. Точки в пересечении программ I-III с волнообразной кривой линии действительного изменения температуры объекта соответствуют моментам

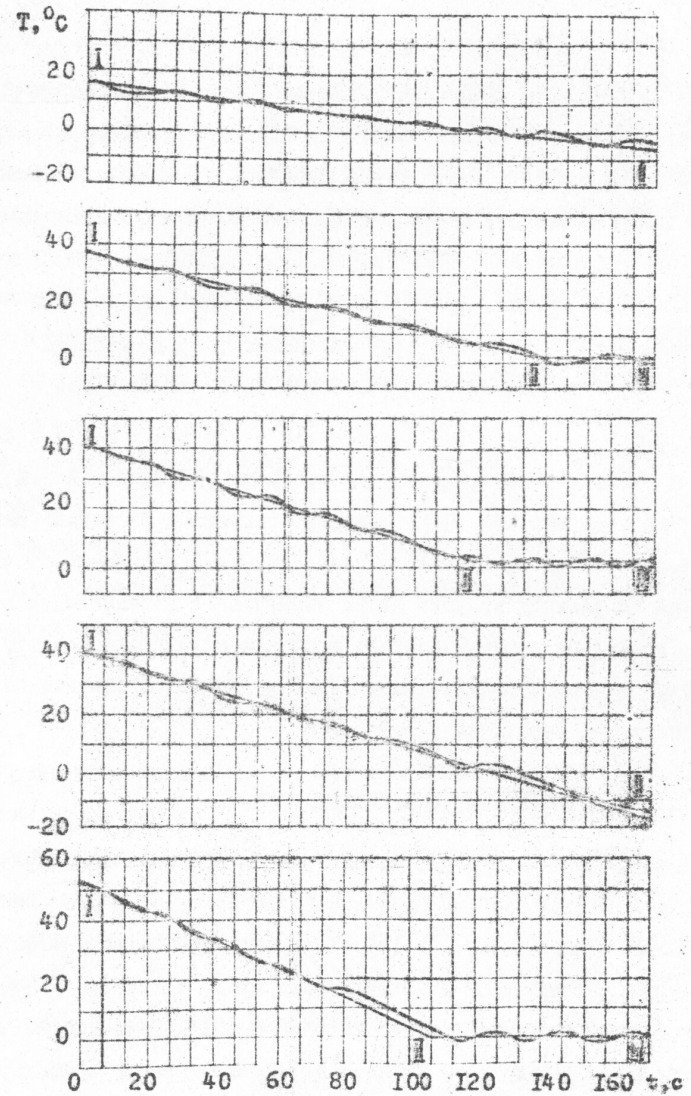


Рис.5 Примеры воспроизведения программ охлаждения и выдержки температуры элемента панели фюзеляжа самолета при помощи экспериментальной установки азотного программного охлаждения.

времени включения и выключения системы подачи жидкого азота установки. Скорость потока воздуха у объекта, равная 20,5 м/с, параметры наружного воздуха ($T_H = 17,4^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 0,64$) и температура воздушноазотной смеси, равная -40°C в установившемся режиме работы форсунок, были одинаковыми при проведении всех представленных опытов. Транспортное запаздывание установки составило 2 с, а величина t_m изменялась от 2,5 с до 17 с в зависимости от начальной температуры трубы магистрали.

Достигнута удовлетворительная точность воспроизведения программ охлаждения и выдержки температуры объекта. Сопоставление опытных и расчетных данных показало, что экспериментальная установка программного охлаждения по расходу жидкого азота экономичнее установок, основанных на методе воспроизведения программ охлаждения конструкций путем плавного регулирования температуры воздушноазотной смеси согласно выражению (2).

ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

В заключительной главе диссертации приводятся инженерная методика и рекомендации по проектированию установок азотного программного охлаждения и краткое описание полностью автоматизированных промышленных установок программного охлаждения, созданных с использованием результатов выполненных исследований. В частности, приведена принципиальная схема крупной комбинированной установки, работающей с использованием аккумуляции холо-

да в жидком азоте и в водном растворе хлористого кальция, предназначенной для одновременных испытаний нескольких элементов конструкции самолета. Рассольная система охлаждения отводит большую часть теплоспиритов, поступающих к воздушноазотной смеси в замкнутом контуре установки, а регулирование температуры конструкций в соответствии с заданным законом производится при помощи азотной системы охлаждения, что позволяет в несколько раз снизить расход жидкого азота в установке.

Показаны пути дальнейшего совершенствования установок азотного программного охлаждения. Например, значительное снижение расхода жидкого азота на цикл испытаний конструкций может быть достигнуто включением в схему установки с разомкнутым трактом теплообменника для предварительного охлаждения наружного воздуха холодной воздушноазотной смесью, выбрасываемой в атмосферу.

ВЫВОДЫ

- I. Применение жидкого азота для испытаний элементов конструкций сверхзвуковых пассажирских самолетов позволяет осуществить простые и надежные в эксплуатации установки программного охлаждения, отличающиеся возможностью регулирования в широких пределах холодопроизводительности и воспроизведения с высокой точностью различных программ изменения во времени температуры конструкций.

2. Разработаны теоретические основы программного охлаждения элементов авиационных конструкций при помощи воздуха, охлаждаемого жидким азотом.

Даны зависимости для определения параметров воздуха и воздушноазотной смеси, требуемых для воспроизведения с заданной точностью программы охлаждения пластины при плавном и ступенчатом регулировании подачи жидкого азота в воздухоохладитель установки;

Предложен и обоснован теоретически метод программного охлаждения элементов авиационных конструкций путем попеременного обдува их поверхности воздухом и холодной воздушноазотной смесью, позволяющий реализовать наиболее простую схему установки программного охлаждения с одной ступенью подачи жидкого азота в воздухоохладитель;

Выполнен теоретический анализ параметров установки, влияющих на точность воспроизведения программ охлаждения конструкций, на основе исследования динамики тепло-гидравлических процессов в магистрали подачи жидкого азота к форсункам предложена инженерная методика оценки времени запаздывания поступления воздушноазотной смеси к испытываемой конструкции;

Даны зависимости для расчета расхода жидкого азота на плавное и ступенчатое понижение температуры сухого и влажного воздуха в установке программного охлаждения.

3. Опыт по выбору типа распылителя жидкого азота выявил практические преимущества центробежных форсунок по сравнению с

пневматическими, струйными и другими форсунками применительно к условиям их работы в установке азотного программного охлаждения. Центробежные форсунки обеспечивают дисперсность факела жидкого азота достаточную для быстрого и полного его испарения в условиях естественной циркуляции и вынужденного движения воздуха.

4. Установлено, что вязкость жидкого азота и его перегрев относительно температуры насыщения при давлении окружающей среды не сказываются заметным образом на соответственно увеличении или уменьшении коэффициента расхода центробежных форсунок. Получена экспериментальная зависимость для определения расхода жидкого азота через центробежные форсунки в области изменения давления перед входными каналами форсунок $p = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па} - 2,7 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и расхода жидкого азота $G'_f = 0,1 \text{ кг/с} \div 0,5 \text{ кг/с}$.

Исследована геометрия факелов распыленного жидкого азота. Выяснено, что диаметр середины устойчивой части факела может быть определен по теории форсунки для идеальной жидкости.

5. Запаздывание системы подачи жидкого азота в основном определяется временем истечения из центробежных форсунок массы парообразного азота, образующейся за счет охлаждения охлажденной трубы магистрали до температуры, соответствующей режиму течения в ней жидкого азота без кипения.

Получены экспериментальные зависимости для определения расхода парообразного азота через центробежные форсунки при горизон-

тальном и вертикальном расположении магистрали жидкого азота.

6. Экспериментальная установка азотного программного охлаждения, основанная на применении метода воспроизведения программ охлаждения элементов авиационных конструкций путем переменного обдува их поверхности воздухом и воздушноазотной смесью, отличается простотой и высокой надежностью в работе. Достигнута удовлетворительная точность воспроизведения программ охлаждения типичного элемента конструкции самолета — панели фюзеляжа с темпом от 0,1 до 0,5 град/с. После завершения опытной эксплуатации установка передана для промышленного использования.
7. Поискные исследования азотного воздухоохладителя позволили выработать основные рекомендации по проектированию аппаратов, обеспечивающих полное испарение распыленного жидкого азота в потоке воздуха и выравнивание температуры воздушно-азотной смеси, направляемой на охлаждение испытуемого объекта.
8. Разработана инженерная методика и рекомендации по проектированию установок программного охлаждения элементов авиационных конструкций с помощью жидкого азота.
9. С использованием результатов диссертационной работы созданы промышленные установки азотного программного охлаждения, а также комбинированная установка программного охлаждения авиационных конструкций с использованием аккумуляции холода в жидком азоте и водном растворе хлористого кальция.

ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛУ, ИЗЛОЖЕННОМУ В ДИССЕРТАЦИИ

1. Чуклин С.Г., Мнацаканов Г.А., Старчевский И.П. Холодильная установка для программного охлаждения элементов конструкции сверхзвуковых пассажирских самолетов. Об. "Холодильная техника и технология", вып. 14, Киев, "Техника", 1972.
2. Масляк А.М., Деглева Н.И., Матвиенко В.И., Старчевский И.П. Типовой стенд программного нагрева и охлаждения конструкций. "Авиационная промышленность", № 10, 1972.
3. Чуклин С.Г., Старчевский И.П., Гончарук А.И. Исследование и разработка установки программного охлаждения конструкций с помощью жидкого азота. "Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР", серия машиностроение и металлообработка, вып. 12, Киев, "Вида школа", 1973.

Материалы диссертации доложены и обсуждены на межотраслевом научно-техническом совещании по вопросам создания установок программного охлаждения элементов авиационных конструкций в г.Москве (1971г.), на научно-технической конференции Министратства авиационной промышленности СССР по проблемам испытаний самолетов на прочность и выносливость (1972г.), на 41-й (1972г.) и 43-й (1973г.) отчетных научных конференциях Одесского технологического института холодильной промышленности.

Д Л Я З А М Е Т О К