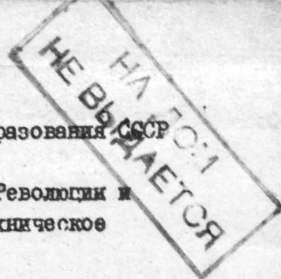


M 407169

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э. Баумана



На правах рукописи

НИКОЛАЕВ ВАЛЕНТИН ПЕТРОВИЧ

УДК 621.51:697 (088.86)

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ СБЕСПЕЧЕНИЯ
НЕЗАМЕРЗАЕМОСТИ РАЗВЕТВЛЕННЫХ ПНЕУМОСЕТЕЙ**

(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

Москва - 1982

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э. Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор БЕЛОВ С.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор ЮДАЕВ Б.Н.
кандидат технических наук,
доцент ГЛУХОВ С.Д.

Ведущее предприятие - ВНИИТАЗ

Защита диссертации состоится "18" апреля 1983 г.
на заседании специализированного Совета К 053.15.07 "Хриген-
ные, холодильные, гидравлические, вакуумные и компрессорные
машины и аппараты" МВТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005,
Москва, Лефортовская наб., д. 1, корпус факультета Энергома-
шиностроение, ауд. 406а.

С диссертацией
им. Н.Э. Баумана

Автор

Ваши
ба высылат
д. 5, спец

у
СПЕЦИАЛ

прось-
I.,

ОВ

M 407169

17407169

Актуальность темы. В решениях XXVI съезда КПСС большое внимание уделяется ускорению научно-технического прогресса и повышению эффективности производства. Высокие темпы роста промышленности тесно связаны с постоянно расширяющимся применением сжатого воздуха для осуществления разнообразных технологических процессов. Некоторые актуальные задачи в области повышения эффективности, надежности и безопасной эксплуатации промышленных пневмосистем и пневмоустановок могут быть решены путем повышения качества сжатого воздуха. Важность качественной подготовки сжатого воздуха обусловлена тем, что загрязнения сжатого воздуха, среди которых наибольшую часть составляют пары воды, снижают долговечность пневматических систем и устройств в 3-7 раз, а в некоторых условиях эксплуатации до 20 раз. Перекрещение воздухопроводов в холодный и холодно-переходный период года вымерзшим конденсатом водяных паров приводит к снижению мощности пневмооборудования, возникновению аварийных ситуаций или к простоям оборудования. Особенно актуальны эти недостатки для систем централизованного воздушоснабжения предприятий в переходное время года.

В связи с этим создание систем обеспечения незамерзаемости пневмосетей является актуальным.

Одним из направлений решения поставленной задачи может служить разработка систем осушки методом конденсации. По сравнению с методами абсорбции и адсорбции, метод конденсации обладает такими преимуществами как простота конструкции, малые эксплуатационные расходы, высокая надежность, большой ресурс работы. Эти преимущества особенно отчетливо проявляются при использовании конденсационных систем осушки с использованием холода окружающей среды для обработки сжатого воздуха в количестве, равном или превышающем 1-10 кг/с.

Недостатком конденсационных систем осушки с использованием холода окружающей среды является несколько более высокая точка росы осушенного воздуха и зависимость этого параметра, для некоторых типов установок, от окружающих климатических условий.

Цель работы. Теоретическое и экспериментальное исследование конденсационной системы осушки сжатого воздуха промышленных пневмосистем, использующей в качестве основного источника холода -



холод окружающей среды, и разработка рекомендаций по проектированию и практическому использованию подобных систем.

Методы исследования. В настоящей работе теоретические методы исследования сочетались с экспериментальными. При теоретических исследованиях применен метод теплового баланса.

Экспериментальные исследования проводились как на модели системы осушки, так и на опытно-промышленном образце.

Научная новизна. Разработан алгоритм расчета конденсационной системы осушки воздуха с использованием холода окружающей среды. Определены границы области применения конденсационной осушки воздуха с использованием холода окружающей среды. Разработан метод расчета трехпоточных теплообменных аппаратов, работающих в режиме осушки сжатого воздуха. Определена область туманообразования в трехпоточном теплообменном аппарате системы осушки.

Результаты работы. Исследование конденсационного способа осушки сжатого воздуха с использованием холода окружающей среды позволило выявить влияние основных факторов и отдельных конструктивных соотношений на эффективность осушки. Экспериментальные исследования подтвердили работоспособность схем конденсационной осушки сжатого воздуха, защищенных авторскими свидетельствами. Предложена методика расчета исследованных систем осушки.

Практическая ценность. Теоретические и экспериментальные исследования конденсационных систем осушки проводились автором в рамках научно-исследовательской работы. Доказана возможность высокоэффективной, надежной и безаварийной работы пневмосетей в холодный и холодно-переходный период года. Результаты теоретического и экспериментального исследований использованы при проектировании систем осушки воздуха. Разработан параметрический ряд систем конденсационной осушки сжатого воздуха производительностью 0,2; 1,0; 5,0; 10 кг/с. Созданные в процессе исследований системы конденсационной осушки сжатого воздуха приняты в эксплуатацию на ряде предприятий. По результатам работы получен экономический эффект 20 тыс. руб. Применение предложенных систем осушки сжатого воздуха в условиях горнодобывающего предприятия позволит получить экономии до 300 тыс. руб в год.

Абстракция работ. Основные положения и результаты работы

докладывались на научно-технических семинарах кафедры "Охрана труда" МВТУ им. Н.Э. Баумана, на Московском общегородском научно-техническом семинаре "Защита окружающей среды" (1977), на Всесоюзных научно-технических конференциях "Совершенствование процессов, машин и аппаратов, холодильной, криогенной техники и кондиционирования воздуха" (Ташкент, 1977), "Холодильное машиностроение" (Мелитополь, 1978), "Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении" (Москва, 1980).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ. Получено два авторских свидетельства. Основные разделы диссертации изложены также в четырех научно-исследовательских отчетах.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 178 страницах машинописного текста, включает введение, пять глав, выводы, приложение 5 стр иллюстрирована 54 рисунками на 54 страницах и 3 таблицами на 5 страницах. Список литературы содержит 89 наименований работ.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дан краткий обзор известных методов осушки сытого воздуха промышленных пневмосистем, проведено их технико-экономическое сопоставление, определены области рационального применения различных схем осушки сытого воздуха, сформулированы конкретные задачи теоретического и экспериментального исследований.

Как показал проведенный анализ традиционных методов осушки сытого воздуха — абсорбции и адсорбции, применение их для общепромышленных пневмосистем нерационально из-за высокой стоимости, сложности схем и больших эксплуатационных затрат. Кроме того, при применении методов абсорбции и адсорбции возможен унос из системы осушки частиц сорбента, что может быть причиной выхода из строя пневмооборудования, т.е. требуются дополнительные устройства очистки сытого воздуха.

Наиболее перспективным методом осушки сытого воздуха общепромышленных пневмосистем по производительности I .. 10 и более кг/с является метод конденсации. Высокая эффективность этого метода обусловлена тем, что даже небольшое понижение температуры сытого воздуха приводит к достаточно глубокой его осушке.

Так, охлаждение сжатого воздуха, имеющего давление $7 \dots 8 \cdot 10^5$ Н/м², до температуры $2-7^\circ\text{C}$ приводит к снижению его влагосодержания до $0,6 - 0,8$ г/кг сухого воздуха, что соответствует точке росы атмосферного воздуха около -20°C .

В настоящее время имеется ряд работ, посвященных исследованиям и методам расчета конденсационного метода осушки воздуха. Наиболее полно вопросы теории, расчета и конструирования систем конденсационной осушки сжатого воздуха представлены в работах Воронина Г.И., Гоголина А.А., Прохорова В.И., Миняева Ю.И. и др. Однако большинство работ связано с разработкой и исследованием конденсационных систем осушки, в которых охлаждение сжатого воздуха происходит в специальных холодильных машинах. Применение таких схем охлаждения сжатого воздуха, особенно при больших производительностях промышленных пневмосистем связано с использованием достаточно сложного оборудования, что снижает надежность и долговечность системы. Кроме того, такие установки требуют значительных капитальных затрат, наличия охлаждающей воды, и для их эксплуатации необходим специально обученный обслуживающий персонал.

Осушка воздуха промышленных пневмосистем особенно актуальна в холодно-переходный период года, когда возможно замерзание воздухопроводов и выход из строя пневмооборудования в процессе транспортировки сжатого воздуха от компрессорной станции до потребителя. В этом случае наиболее рациональным методом обеспечения незамерзаемости пневмосетей является конденсационная осушка с использованием холода окружающей среды, предложенная в МВТУ им. Н.Э. Баумана и защищенная авторскими свидетельствами.

Система осушки работает следующим образом. Сжатый воздух поступает во входной коллектор трехпоточного теплообменного аппарата, откуда он, проходя по кольцевым пространствам, образованным наружными и внутренними трубами, поступает в дополнительный коллектор. При этом воздух охлаждается за счет обдува атмосферным воздухом наружных труб и за счет теплообмена с потоком осушенного сжатого воздуха, который из дополнительного коллектора через влагоотделитель обратным потоком течет по внутренним трубам. При течении осушенного воздуха по внутренним трубам происходит его подогрев, после чего воздух поступает в пневмосеть. Вследствие подогрева в пневмосети на более дальнем расстоянии выпадает оставшаяся влага, ее количество значительно

меньше и тем самым повышается эксплуатационная надежность, так как уменьшается опасность выпадения влаги и замерзания воздухопроводов. Кроме того, подогрев сжатого воздуха, который наряду с осушкой осуществляется в данной системе, позволяет удовлетворять потребности потребителя меньшим расходом сжатого воздуха.

Проведенный анализ состояния вопроса позволил сформулировать основные задачи исследования следующим образом:

1. Разработка теории и метода расчета трехпоточного теплообменного аппарата системы конденсационной осушки сжатого воздуха.

2. Анализ совместной работы системы конденсационной осушки сжатого воздуха и магистрального воздухопровода.

3. Разработка, создание и экспериментальное исследование системы конденсационной осушки сжатого воздуха, использующей холод окружающей среды. Поиск путей совершенствования отдельных узлов и агрегатов систем осушки сжатого воздуха.

4. Разработка параметрического ряда теплообменных аппаратов для систем конденсационной осушки сжатого воздуха.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию трехпоточного теплообменника-конденсатора системы осушки сжатого воздуха (СОСВ). Отличительной особенностью рассматриваемого аппарата является наличие трех потоков теплоносителей и то, что охлаждение одного из теплоносителей-влажного сопровождается образованием жидкой фазы в рабочей полости теплообменного аппарата.

Исследованиям трехпоточных теплообменных аппаратов посвящены работы Марфениной И.В., Рабяновича Г.Д., Фроловой Н.И., и ряда других авторов. Обзор выполненных работ показал, что дальнейшее совершенствование процессов теплообмена в трехпоточных теплообменниках-конденсаторах должно выполняться с учетом физических параметров потоков в зависимости от температуры и давления, с учетом соблюдения определенных температур теплоносителей на холодном и теплом концах аппарата и с учетом возможной конденсации водяных паров.

Отличие метода расчета рассматриваемого трехпоточного теплообменного аппарата СОСВ состоит в необходимости учета тепла конденсации при образовании жидкой фазы. Решение этой задачи было найдено при допущениях, что течение газа и температурный режим установившиеся, удельные теплоемко-

ти атмосферного и осушенного воздуха постоянны по времени и по длине аппарата. Тепло, затрачиваемое на охлаждение влажного воздуха, было условно рассмотрено как сумма тепла, идущего на охлаждение сухого воздуха и тепла на конденсацию влаги. Исходя из этого было найдено выражение для определения водяного эквивалента потока влажного воздуха:

$$W_2 = \left[1 + \frac{G_{сж} \cdot (d_{вх} - d_p) \cdot \tau}{W_1 \cdot (T_{20} - T_{2K})} \right] \cdot W_1$$

где $G_{сж}$ — расход сжатого воздуха; $d_{вх}$, d_p — соответственно влагосодержание сжатого воздуха на входе в систему осушки и выходе из нее; τ — тепло фазового перехода; T_{20} , T_{2K} — температура входа и выхода осушаемого воздуха; $W_1 = G_{сж} \cdot c_p$ — водяной эквивалент осушенного воздуха. Принималось также, что влагоотделитель имеет эффективность 100%, т.е. обеспечивает полную сепарацию находящегося в потоке сжатого воздуха конденсата.

В соответствии с принятой физической моделью получена система уравнений, описывающих процесс теплообмена в трехпоточном теплообменнике-конденсаторе СОСВ как для параллельного, так и для перекрестного течения потоков. Для последнего случая система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial \bar{x}} = NTU_1 \cdot (T_2 - T_1) \\ \frac{\partial T_2}{\partial \bar{x}} = \frac{W_1}{W_2} NTU_1 (T_2 - T_1) + \frac{W_3}{W_2} NTU_3 (T_2 - T_3) \\ \frac{\partial T_3}{\partial \bar{y}} = NTU_3 \cdot (T_2 - T_3) \end{cases}$$

где $NTU_1 = k_{12} \cdot F_{12} / W_1$ и $NTU_3 = k_{23} \cdot F_{23} / W_3$ — число единиц переноса тепла; k_{12} и k_{23} — коэффициент теплопередачи соответственно между осушенным и влажным потоками и между влажным и атмосферным потоками; F_{12} и F_{23} — соответственно площадь теплообмена между потоками: $\bar{x} = x/L$ и $\bar{y} = y/B$ — безразмерные координаты, где L и B — соответственно длина и ширина трехпоточного теплообменника-конденсатора.

Граничными условиями для системы уравнений являются температура влажного воздуха T_{20} на входе в теплообменник-конденсатор, температура атмосферного воздуха T_{30} и равенство темпера-

тур осушаемого и осушенного воздуха на холодном конце теплообменника-конденсатора.

Решение для температуры каждого потока в зависимости от безразмерных переменных $\bar{x}$ и $\bar{y}$ имеет вид:

$$T_1 = T_{20} + (T_{30} - T_{20}) \left(1 - \frac{NTU_1}{K_2 + NTU_1} \cdot \frac{e^{K_2 \bar{x}} - \frac{K_2}{K_1} e^{K_1 \bar{x}}}{me^{K_1} + e^{K_2}} \right) \cdot \exp \left(- \frac{me^{K_1 \bar{x}} + e^{K_2 \bar{x}}}{me^{K_1} + e^{K_2}} \cdot NTU_3 \cdot \bar{y} \right),$$

$$T_2 = T_{20} + (T_{30} - T_{20}) \left(1 - \frac{me^{K_1 \bar{x}} + e^{K_2 \bar{x}}}{me^{K_1} + e^{K_2}} \right) \cdot \exp \left(- \frac{me^{K_1 \bar{x}} + e^{K_2 \bar{x}}}{me^{K_1} + e^{K_2}} \cdot NTU_3 \cdot \bar{y} \right),$$

$$T_3 = T_{20} + (T_{30} - T_{20}) \cdot \exp \left(- \frac{me^{K_1 \bar{x}} + e^{K_2 \bar{x}}}{me^{K_1} + e^{K_2}} \cdot NTU_3 \cdot \bar{y} \right).$$

Полученные выражения позволяют определить локальные температуры потоков в любой точке трехпоточного теплообменника-конденсатора системы осушки. Средняя температура осушаемого потока, устанавливающаяся после смешения этого потока на выходе из теплообменника-конденсатора, т.е. точка росы, достигаемая в СОСВ, определяется как:

$$\bar{T}_2 = T_{20} + (T_{30} - T_{20}) \cdot \left(1 - \frac{m+1}{me^{K_1} + e^{K_2}} \right) \cdot \frac{1 - e^{-F}}{F}$$

Средняя температура, до которой происходит подогрев осушенного потока определяется выражением:

$$\bar{T}_1 = T_{20} + (T_{30} - T_{20}) \left[1 - \frac{NTU_1}{K_2 + NTU_1} \cdot \frac{e^{K_2} - \frac{K_2}{K_1} e^{K_1}}{me^{K_1} + e^{K_2}} \right] \cdot \frac{1 - e^{-F}}{F}$$

где

$$F = NTU_3 \cdot \frac{m+1}{me^{K_1} + e^{K_2}}$$

На основе полученного решения установлено, что точка росы сжатого воздуха, достигаемая в системах осушки данного типа, является линейной функцией температуры атмосферного воздуха.

Проанализировано влияние соотношения расходов атмосферного G_3 и сжатого G_2 воздуха на температуру точки росы $\bar{T}_2$ и

на величину повышения температуры осушенного воздуха. При соотношении расходов $4 < G_3/G_2 < 8$ точка росы осушенного воздуха превышает температуру атмосферного воздуха на величину $6-10^\circ\text{C}$. Подогрев осушенного воздуха при таком соотношении расходов атмосферного и сжатого воздуха происходит до температуры на $20-25^\circ$ ниже, чем температура сжатого воздуха на входе в теплообменник-конденсатор СОСВ.

В третьей главе проведен анализ совместной работы системы осушки и магистрального воздухопровода. Основной задачей настоящего исследования было определение расстояния от системы осушки воздуха до точки начала выпадения конденсата, т.е. максимального допустимого расстояния от системы осушки до потребителя, и определение времени до полного замерзания воздухопровода.

В результате анализа эффективности применения СОСВ с трехпоточными теплообменниками-конденсаторами в общепромышленных пневмосистемах было установлено, что предложенная система осушки позволяет сконденсировать до 70-80% паров воды, используя при этом низкотемпературный потенциал атмосферного воздуха.

Анализ совместной работы системы осушки и магистрального воздухопровода, проведенный при допущении, что температура атмосферного воздуха $T_{30} = \text{const}$ и начало конденсации соответствует условию $\varphi = 1,0$, позволил получить зависимости для определения максимально-допустимого расстояния от СОСВ до потребителя, когда воздухопровод будет работать в "сухом" режиме:

$$L_{\varphi=1} = \frac{G_{\text{сж}} \cdot c_p}{\alpha_{\text{тр}} \pi D_{\text{тр}}} \cdot \ln \left\{ \frac{1}{\Delta t_x + \Delta t_n} \left[T_{30} - \frac{P_2 (T_{30} + \Delta t_x)}{P_2 + \Delta p (T_{30} + \Delta t_x)} \right] \right\}$$

где $\alpha_{\text{тр}}$ — коэффициент теплоотдачи от стенки воздухопровода в окружающую среду; $D_{\text{тр}}$ — наружный диаметр воздухопровода; Δt_x — разность между точкой росы, достигаемой в теплообменнике-конденсаторе, и температурой атмосферного воздуха; Δt_n — величина подогрева обратного потока в СОСВ; P_2 — давление сжатого воздуха на входе в воздухопровод; Δp — потеря давления в воздуховоде на расстоянии

Анализ полученных зависимостей показал, что применение системы осушки сжатого воздуха с использованием холода окружающей среды позволяет увеличить "безопасную", с точки зрения обмерзания, длину магистрального воздухопровода в 2-3 раза, а при использовании теплоизоляции с термическим сопротивлением $R =$

— 10 .. 20 м⁰/Вт в 3-10 раз.

Эффективность системы осушки сжатого воздуха существенно зависит от системы отделения, сбора и отвода конденсата. Учитывая, что при работе разработанной системы осушки возможен частичный унос образовавшегося конденсата, а также образование конденсата при охлаждении сжатого воздуха ниже точки росы, достигаемой в системе, был проведен анализ схем и конструкций сепараторов влаги и влагомаслоотделителей. Была предложена конструкция горизонтального центробежного сепаратора влаги для промышленных пневмосетей, отличительной особенностью которого является коагуляция капель конденсата на входе, большая величина и продолжительность действия центробежной силы, возникающей при вращательном движении потока, по сравнению с известными конструкциями.

Учитывая, что при дальнейшем охлаждении сжатого воздуха ниже точки росы, достигнутой в СОСВ, происходит дальнейшая конденсация паров воды, существует и вероятность обмерзания воздухопровода. При исследовании замерзания поперечного сечения воздухопровода были рассмотрены два предельных случая.

В первом случае анализировался процесс обмерзания при подаче в воздухопровод воздуха от компрессорной станции без его предварительной осушки. В этом случае при охлаждении воздуха в воздухопроводах до температуры окружающей среды в холодный период года происходит выпадение конденсата в количестве 4 .. 10 г/кг сухого воздуха, т.е. в воздухопроводах имеется вода. При анализе предполагалось, что скорость роста слоя льда определяется процессом теплообмена между потоком воздуха и слоем намерзающего льда. При таком подходе задача наиболее близка к случаю намерзания льда на стенки труб при движении в них жидкости, который рассмотрен в работах Хиршберга, Лыкова А.В. и др. При анализе процесса были приняты следующие допущения: осевой теплопроводностью в слое льда пренебрегаем, изменение толщины слоя льда, как в течение времени, так и вдоль оси трубы достаточно мало, т.е. процесс квазистационарный; физические свойства воздуха и льда постоянны; сжатый воздух и конденсат находятся в термодинамическом равновесии; течение — одномерное.

Согласно принятой физической модели и допущениям получено уравнение, описывающее процесс замерзания воздухопровода:

$$\bar{L}^* \rho_l \frac{d\bar{\tau}}{d\tau} = \lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial R} \right|_{R=R_0-\bar{\tau}} + K(T - T_{30})$$

где $\bar{L}^*$ - удельная теплота образования льда; λ_1 - удельная теплоемкость льда; ρ_l - плотность льда; $\bar{\tau}$ - текущая высота слоя льда, отсчитываемая от внутренней поверхности воздухопровода; R - текущее значение радиуса переменного сечения воздухопровода; K - коэффициент теплопередачи между сжатым воздухом и окружающей средой; T_1 - температура слоя льда; T - текущее время.

Граничными условиями являются значение T_{30} на наружной поверхности ледяного слоя и температура фазового перехода воды на внутренней поверхности ледяного слоя.

В результате решения вариационным методом уравнения совместно с уравнениями течения сжатого воздуха по воздухопроводу переменного сечения была получена зависимость перекрытия сечения от времени:

$$F_0 = \frac{\bar{\tau}}{K_2} - \frac{K_3}{K_2} \frac{1}{\sqrt{4K_3+1}} \ln \frac{\bar{\tau}(1+\sqrt{4K_3+1})+2K_3}{\bar{\tau}(1-\sqrt{4K_3+1})+2K_3}$$

где $F_0 = \lambda_1 t / (C_1 \rho_l R_0^2)$ - безразмерное время (критерий Фурье); K_2 и K_3 - коэффициенты, зависящие от расходных и конструктивных параметров воздухопровода; C_1 - удельная теплоемкость льда.

Сравнение результатов расчетов для расхода воздуха $G_{сж} = 10$ кг/с и диаметра воздухопровода $D_{вн} = 0,5$ м с результатами натурных наблюдений за временем прекращения подачи сжатого воздуха по причине перемерзаний для района Восточной Сибири показало их достаточно хорошее совпадение, расхождение результатов не превышало 19%.

Во втором случае, при течении воздуха после СОСВ, процесс обмерзания будет определяться как:

$$\frac{dR}{d\tau} = -\frac{\beta}{\rho_l} (p_s - p_{nn})$$

где β - коэффициент массоотдачи от сжатого воздуха к поверхности льда; p_s - парциальное давление насыщенного водяного пара в сжатом воздухе; p_{nn} - парциальное давление насыщенного водяного пара при температуре поверхности льда.

При этом связь между R и p_{nn} определялась уравнением

теплового баланса для поверхности льда. Процесс при этом считался также квазистационавшимся.

Сравнение времени перекрытия проходного сечения для второго случая с временем для первого случая показало, что в наиболее опасный с точки зрения обмерзания холодно-переходный период года продолжительностью 3 месяца уменьшение проходного сечения составит 12%, т.е. применение СОСВ позволяет обеспечить бесперебойную работу пневмосетей в это время года.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию конденсационной системы осушки сжатого воздуха. В ней изложены задачи эксперимента, методика проведения экспериментальных исследований, даны описания конструктивных особенностей созданных экспериментальных и опытно-промышленных образцов и экспериментального стенда. Дана характеристика приборов и схем для измерения основных параметров системы осушки. Проведена оценка погрешностей измерений.

В задачу экспериментального исследования входило:

- 1) проверка результатов аналитических исследований;
- 2) выявление оптимальных режимов работы и определение путей повышения эффективности установок;
- 3) отработка отдельных конструктивных узлов и системы в целом.

Лабораторный образец системы осушки был выполнен по противоточной схеме движения потоков, являющейся частным случаем перекрестно-точечной схемы, и представлял собой трубчатый кожух, в котором был помещен элемент теплообменника типа "труба в трубе". В качестве источника холодного атмосферного воздуха использован роторный воздушный кондиционер.

Экспериментальный стенд был укомплектован контрольно-измерительными приборами для контроля и регистрации основных параметров, характеризующих работу системы осушки сжатого воздуха: давление воздуха, температур, расходов сжатого и атмосферного воздуха, влагосодержания сжатого воздуха.

В процессе экспериментов принимались меры для получения достоверных результатов. Максимальная погрешность в определении основных параметров системы осушки не превышала 12,5%.

В результате испытаний лабораторного образца системы осушки было установлено, что точка росы, достигаемая в СОСВ, является линейной функцией температуры атмосферного воздуха. Про-

веденное исследование влияния отношения расходов продувочного и осушаемого потоков на достигаемую точку росы позволило установить, что оно должно находиться в пределах 4 ... 8.

В результате серии экспериментов по установлению минимально возможной точки росы для СОСВ такого типа было выяснено, что перекрытие проходного сечения элемента трехпоточного теплообменника типа "труба в трубе" льдом обычно наступало при точке росы 0,5 ... 1°C, поэтому был сделан вывод, что для СОСВ точка росы не должна быть ниже 2,5 ... 3°C во избежание перекрытия проходного сечения твердой фазой.

Анализ результатов изменения температуры потока сырого воздуха и температуры стенки трубы, разделяющей поток сырого и поток продувочного воздуха, от площади элемента теплообменника показал, что пересыщение воздуха водяным паром, приводящее к появлению тумана отсутствует. Это объясняется тем, что для испытаний использовался воздух от компрессорной станции, в котором всегда имеются мелкие частицы пыли, рябчины и т.д., которые являются центрами конденсации при достижении сырым воздухом состояния насыщения.

На основе анализа полученных экспериментальных данных, подтвердивших результаты теоретического исследования, были получены рекомендации для проектирования опытно-промышленного образца системы осушки с трехпоточным теплообменником-конденсатором.

Опытно-промышленный образец системы осушки производительностью I ... 1,25 кг/с был спроектирован по перекрестноточной схеме движения потоков. Испытания образца проводились в весеннее и осеннее время года при изменении температуры атмосферного воздуха от +10°C до -10°C. Температура сырого воздуха на входе в опытно-промышленный образец системы осушки поддерживалась 55°C, т.е. близкой к средней температуре сырого воздуха после конечных холодильников компрессорных станций.

Испытания показали, что точка росы осушенного воздуха превышает температуру атмосферного воздуха на величину 6 ... 11°C. При этом до 80% выделившейся капельной влаги сепарировалось непосредственно в трехпоточном теплообменнике-конденсаторе опытного образца. Экспериментально подтверждена линейная зависимость точки росы, достигаемой в опытном образце системы, от температуры атмосферного воздуха. Расхождение экспериментальных значений с теоретическими, полученными по разработанной методике, ле-

жит в пределах $0,5 \dots 1,4^{\circ}\text{C}$.

Проведенные испытания опытно-промышленного образца СОСВ показали, что перекрытие проходного сечения осушаемого потока льдом, наблюдавшееся в лабораторном образце, в этом случае не происходит. Это объясняется тем, что при образовании льда в одной или нескольких трубах теплообменника происходит повышение температуры обратного потока воздуха и образовавшийся лед тает, и проходное сечение осушаемого потока восстанавливается, т.е. предложенная система осушки является незамерзающей.

В ходе испытаний было выяснено, что значительное количество сконденсированной влаги (до 95%) собиралось в отводящем коллекторе осушенного потока, т.е. трехпоточный теплообменник СОСВ не только конденсирует парн воды, но и достаточно хорошо отделяет образовавшийся конденсат.

Таким образом, экспериментально подтверждена работоспособность метода конденсационной осушки сжатого воздуха в трехпоточных теплообменниках-конденсаторах. При этом достигаемая точка росы на $6 \dots 11^{\circ}\text{C}$ превышает температуру атмосферного воздуха.

В пятой главе проведен технико-экономический анализ систем осушки сжатого воздуха, представлены методики и алгоритм расчета системы осушки, а также практическая реализация результатов работы.

Технико-экономические исследования систем осушки сжатого воздуха проводились с учетом капитальных и эксплуатационных затрат применительно к компрессорным станциям производительностью от 1 до 12 кг/с. Анализ результатов исследования показал, что применение систем осушки с использованием холода окружающей среды, наиболее эффективно для расходов $9 \dots 10$ кг/с. При этом снижение затрат на осушку составляет $0,50$ руб. на 1000 м^3 сжатого воздуха за счет снижения расхода электроэнергии и воды по сравнению с системой осушки холодильным циклом. Предлагаемый экономический эффект от эксплуатации систем осушки с трехпоточными теплообменниками производительностью 10 кг/с составил до 300 тыс. руб. в год.

На основе проведенного теоретического и экспериментального исследования была разработана методика и алгоритм расчета систем осушки. Исходными для расчета являются геометрические параметры трубного пучка. В результате расчета определяется поверхность теплообмена и длина магистрального воздухопровода, где $\varphi = 1$.

Алгоритм реализован на ЭВМ ЕС-1022.

По разработанной методике был рассчитан и спроектирован ряд систем осушки сжатого воздуха с трехпоточными теплообменниками на производительность 0,2 кг/с, 1 кг/с, 5 кг/с и 10 кг/с. Бюджетные испытания промышленного образца на одном из предприятий позволило получить экономический эффект 20 тыс. рублей в год.

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что для исключения обмерзания пневмосетей в переходный период года наиболее приемлема осушка сжатого воздуха с использованием холода окружающей среды. Применение систем осушки с использованием холода окружающей среды наиболее эффективно для расходов сжатого воздуха 9...10 кг/с.

2. Установлено, что при соотношении расходов $4 < G_3/G_2 < 8$ точка росы осушенного воздуха превышает температуру атмосферного воздуха на 6...1 °С, при этом точка росы является линейной функцией температуры атмосферного воздуха. Осушка сжатого воздуха в трехпоточных теплообменниках - конденсаторах позволяет сконденсировать до 80% паров воды.

3. В трехпоточных теплообменниках отсутствует образование тумана, что позволяет достаточно просто сепарировать образующийся конденсат.

4. Применение системы осушки сжатого воздуха с трехпоточными теплообменниками-конденсаторами позволяет увеличить "безопасную", с точки зрения обмерзания, длину магистрального воздухопровода в 2-3 раза.

5. Разработана методика расчета трехпоточных теплообменных аппаратов, работающих в режиме осушки сжатого воздуха. Методика позволяет проводить конструктивный расчет и оптимизацию систем осушки с использованием низкотемпературного потенциала атмосферного воздуха.

6. На основе проведенных исследований разработаны системы осушки сжатого воздуха с трехпоточными теплообменниками-конденсаторами, производительностью 0,2; 1; 5 и 10 кг/с, обладающие простотой и достаточно высокой эффективностью -

ностью. Экономический эффект от внедрения опытно-промышленного образца системы осушки производительностью 1 кг/с и точкой росы сжатого воздуха, превышающей температуру атмосферного воздуха на 9°C, составил 20,0 тыс.руб. Эта система осушки удаляет до 80% паров воды.

7. Применение предложенных систем осушки сжатого воздуха, обеспечивающих незамерзаемость пневмосетей в переходное время в условиях предприятия отрасли позволит получить экономию до 300 тыс. рублей в год.

Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Сивков В.П., Николаев В.П. Осушка воздуха вымораживанием. - Ташкент: Всесоюзная конференция по холоду, секция IV: Тезисы докладов, 1977. с. 44.

2. Сивков В.П., Николаев В.П. Очистка воздуха промышленных систем. Учебное пособие. - М., МВТУ, 1977, 32 с.

3. Николаев В.П. Расчет степени осушки воздуха. - Труды / МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1978, № 277, Защита окружающей среды, - с. 63-71.

4. Николаев В.П., Сивков В.П., Суслов А.Д. Исследование трехпоточных теплообменных аппаратов систем осушки сжатого воздуха. - П. Всесоюзная конференция по холодильному машиностроению, тезисы докладов, М.: ЦИНТИХИМНЕЙТЕМАШ, 1978, - с. 71-72.

5. Расчет теплообменных аппаратов систем осушки сжатого воздуха. /В.П. Николаев, Б.А. Макаров, В.П. Сивков и др.- ИВУЗ. Машиностроение, 1978, № 9, - с. 85-88.

6. А.С. 694741 (СССР). Устройство для осушки сжатого воздуха. /Авт.изобрет. В.П. Николаев, В.П. Сивков, Ю.Д. Фролов, А.Д. Суслов, Ю.А. Новосельский, С.С. Гудзяк. - Заявл. 25.05.78, № 2613751/06; Опубл. в Б.И., 1979, № 40. МКИ F 24F 3/14.

7. А.С. 943486 (СССР). Устройство для осушки сжатого воздуха. /Авт.изобрет. В.П. Николаев, И.В. Теннов, Ю.А. Новосельский, Б.Д. Чижов. - Заявл. 29.12.80, № 3254686/29-06; Опубл. в Б.И., 1982, № 26. МКИ F 24F 3/14.

8. Николаев В.П., Сивков В.П. Очистка сжатого воздуха в трехпоточных теплообменниках. - Всесоюз.научно-техн.конф."Научно-технический прогресс в машиностроении и приборостроении", посвящ. 150-летию МВТУ: тезисы докл., М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1980, - с. 59-60.

9. Николаев В.П., Сивков В.П., Белов С.В. Снижение вредных выбросов промышленных пневмосистем. - Всесоюз. научно-техн. семинар "Защита воздушного бассейна от вредных выбросов предприятий машиностроения": Тезисы докладов, - М., ЦИТИХИМНЕФТЕМАШ, 1982, - с. 47-48.

10. Николаев В.П., Сивков В.П. О длительности безопасной эксплуатации промышленных пневмосистем. - IV Всесоюз. научно-техн. конф. по проблемам охраны труда: Тезисы докладов. - Каунас, 1982, с. 93.

Видеоскоп

Д-99190 от 21.01.83 Заказ № 127 Объем I п.л. Тираж 100 экз.

Ротапринт МВТУ. 107005, Москва, 2-я Бауманская, 5.