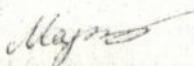


ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ УКРАИНЫ

На правах рукописи

ЖАРЧЕНКО АНАТОЛИИ ИВАНОВИЧ



РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ
ОЧИСТКИ И ОХЛАЖДЕНИЯ РАБОЧИХ СРЕД АППАРАТОВ ЛЕГКОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Специальность 05.02.13 - машины и агрегаты легкой
промышленности

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев - 1993



7В 20.200
Работа выполнена в Государственной академии легкой промышленности Украины

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Алексеев А.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Пибкоцкий Г.А.,
кандидат технических наук, доцент
Анцев Б.В.

Ведущая организация – Киевское арендное предприятие "КИСПО"

Защита состоится "1" декабря 1993 г. в 10 часов на заседании специализированного Совета Д.01.17.01 в Государственной академии легкой промышленности Украины по адресу: 252011, г. Киев-11, ул. Немировича-Данченко, 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственной академии легкой промышленности Украины.

Автореферат разослан "29" октября 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
доктор технических наук,
профессор

Пипа Б.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность проблемы. Наиболее распространенным теплоносителем и рабочей средой машин и аппаратов легкой промышленности является атмосферный воздух. Однако, забираемый из атмосферы воздух имеет меняющиеся в течение суток и времени года параметры, он также загрязнен различными видами естественных и промышленных аэрозолей. Для нормальной работы технологического оборудования легкой промышленности, использующего в качестве рабочей среды атмосферный воздух, необходимо производить стабилизацию температуры и влажности воздуха, а также очистку его от пыли и других аэрозолей. Те же процессы необходимо проводить и при выбросе отработанного воздуха, с целью соблюдения экологических требований. При этом целесообразно совмещать процессы теплообмена и фильтрации в одной установке - фильтре-теплообменнике, которые позволяют обеспечить стабильность параметров и чистоту рабочей среды при небольших габаритах аппарата и меньших энергозатратах по сравнению с раздельной организацией этих процессов. Несмотря на свои преимущества, фильтры-теплообменники пока не получили широкого распространения в легкой промышленности. Это объясняется отсутствием конструкций малогабаритных и эффективных фильтров-теплообменников для аппаратов легкой промышленности, а также малой изученностью процессов теплообмена и фильтрации при обработке рабочих сред, применяемых в этих аппаратах.

Кроме этого, для создания эффективной конструкции фильтра-теплообменника исключительно важным является правильный, научно обоснованный выбор насадок, применяемых в качестве фильтрующих материалов и теплообменных поверхностей. Поэтому разработка конструкций таких насадок, изучение процессов тепло-

массообмена и фильтрации в них и создание на этой основе фильтров-теплообменников, обладающих высоким качеством обработки рабочих сред аппаратов легкой промышленности при низких энергетических затратах, является актуальной задачей.

Цель работы. Целью работы является разработка и исследование основных элементов конструкции и режимов работы устройств для поддержания стабильности параметров и очистки влажного воздуха, как рабочей среды машин и аппаратов легкой промышленности, и создание на этой основе высокоэффективных фильтров-теплообменников; исследование основных характеристик движения паропылевоздушной смеси через основной элемент фильтра-теплообменника - насадку (гидравлическое сопротивление, эффективность очистки воздуха, тепло- и массообмен); разработка методик расчета и рекомендаций для проектирования фильтров-теплообменников для машин и аппаратов легкой промышленности.

Методы исследования. При решении поставленных задач в работе использовались методы общей теории подобия, методы физического и математического моделирования, теория теплообмена и фильтрации, статистические методы обработки экспериментальных данных.

Научная новизна. Получены математические модели в виде эмпирических критериальных уравнений, позволяющие определить коэффициенты гидравлического сопротивления, тепло- и массообмена при движении влажного воздуха в слое нерегулярной спиральной насадки. Получены эмпирические зависимости по определению эффективности пылеулавливания в слое сухой и орошаемой насадки. Разработана методика расчета основных конструктивных и режимных параметров насадочных фильтров-теплообменников.

Практическая ценность работы заключается в следующем:
- разработаны алгоритмы и реализующие их программы для обра-

ботки на ЭВМ опитних даних по определению гидродинамических и теплообменных характеристик насадок для теплообменных аппаратов, а также программы, для определения параметров фильтров-теплообменников с нерегулярной спиральной насадкой;

- разработаны (на уровне изобретений) две конструкции насадок для теплообменных аппаратов и две конструкции фильтров-теплообменников, которые могут быть использованы как в легкой промышленности так и в других отраслях техники;

- на основании проведенных исследований предложен и защищен авторским свидетельством способ предотвращения осаждения аэрозольных частиц на теплообменной поверхности;

- результаты исследований могут быть использованы при конструировании новых фильтров-теплообменников и воздухоочистительных устройств на основе исследованной спиральной насадки;

- получены данные о рациональных режимах работы насадки, которые позволяют на стадии внедрения оборудования в производство сократить количество наладочных испытаний;

- по материалам диссертации подготовлены методические указания к лабораторным работам по курсу "Защита окружающей среды", которые, вместе с разработанными экспериментальными установками, используются в учебном процессе при обучении студентов.

Реализация в народном хозяйстве. Опытно-промышленный образец фильтра-теплообменника с нерегулярной спиральной насадкой внедрен на Киевской фабрике выдощива обуви. Применение фильтра-теплообменника позволяет обеспечить нормальную длительную работу радиационно-вакуумной сушилки обуви с механическим вакуумным насосом. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения одной вакуумной сушилки обуви с насадочным фильтром-теплообменником, рассчитанный по ценам, действующим на 1.10.1993 г., составляет 1 млн. грн.

Защищаемые положения. 1. Конструкции нерегулярной спиральной насадки и фильтра-теплообменника для очистки и охлаждения рабочих сред аппаратов легкой промышленности.

2. Результаты экспериментального исследования гидродинамического сопротивления, эффективности очистки в сухой и орошаемой насадке и процессов теплообмена, происходящих в ней при взаимодействии воздушного потока с пленками жидкости, образующимися на поверхности насадки.

3. Математические модели процессов движения паровоздушной смеси и теплообмена в нерегулярной спиральной насадке, полученные в виде эмпирических критериальных уравнений, а также результаты их решения.

4. Методика и программа расчета параметров и режимов работы фильтров-теплообменников с нерегулярной спиральной насадкой.

5. Результаты экспериментальных исследований опытно-промышленного образца фильтра-теплообменника с нерегулярной спиральной насадкой.

Апробация работы. Основные положения работы доложены и получили положительную оценку: на Всесоюзной научной конференции по газовым и комбинированным установкам в ИВТУ им. Баумана, Москва, 1987 г.; на 2-й научной конференции молодых ученых и специалистов КТИЛП, октябрь 1988 г.; на 42...45-й научных конференциях профессорско - преподавательского состава Киевского технологического института легкой промышленности (КТИЛП), 1990...1993 гг.; на Семинаре-совещании "Проблемы безопасности жизнедеятельности на предприятиях легкой промышленности", КТИЛП, май 1993 г.

Экспериментальные исследования проводились в проблемной лаборатории инженерной теплофизики Киевского технологи-

ческого института легкой промышленности.

Публикации. По результатам диссертации имеется 15 научных работ в том числе 6 авторских свидетельств.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 117 страницах машинописного текста, иллюстрируется рисунками и таблицами на 46 страницах и состоит из введения, пяти разделов основного текста, заключения, списка литературы из 140 наименований и приложений на 80 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель и определены задачи исследований, приведены сведения о научной новизне и практической ценности полученных результатов, изложена структура и краткое содержание работы.

В первом разделе диссертации проведен анализ современного состояния вопросов очистки и стабилизации параметров рабочих сред аппаратов легкой промышленности. Рассмотрены источники поступления и состав загрязнений на предприятиях легкой промышленности, а также показано отрицательное влияние этих загрязнений на работоспособность технологического оборудования.

Атмосферный воздух, применяемый в пневмосистемах и сушилках в качестве рабочей среды, практически никогда не бывает в полной мере чистым. В нем присутствуют частицы пыли, масла, влаги и других загрязнений. Серьезным источником загрязнения атмосферного воздуха является, в частности, обувное производство. Это объясняется тем, что в обувном производстве все более широкое применение находят химические материалы, а также химические методы крепления деталей с использованием различных растворителей и пластификаторов, кислот и других вредных веществ. Кроме этого при производстве обуви происходит заг-

ряжение воздуха пылью различного состава (частицы кожи, полимеров и продукты их распада, а также абразивная пыль от механизмов заточки ножей обувных машин (например машин ИДВ-1-ДСГ-13-1-0)). Наличие в воздухе загрязнений приводит к засорению и износу пневматических и гидравлических систем дорого стоящего импортного и отечественного оборудования. Поэтому для очистки рабочих сред этого оборудования от конденсирующихся паров и пыли должны применяться специальные фильтры и теплообменные аппараты.

Так в частности накопленный опыт эксплуатации вакуумных сушилок обуви, работающих с механическими вакуумными насосами, показал, что в результате плохой очистки влажного воздуха отсасываемого из сушилки, от конденсирующихся паров и пыли, конденсация паров и осаждение пыли происходит в рабочей камере вакуумного насоса и он быстро выходит из строя, поэтому на входе насоса необходимо устанавливать фильтр-теплообменник для конденсации и удаления этих паров.

Применяемые в настоящее время для очистки рабочих сред ловушки и конденсаторы не обеспечивают полной очистки влажного воздуха, отсасываемого из сушилки от конденсирующихся паров и пыли, т.к. имеют низкую эффективность, малые поверхности теплообмена и фильтрации, а следовательно большие габариты. Нельзя также непосредственно применять известные фильтры-теплообменники, применяемые в других отраслях промышленности, так как они не учитывают специфику аппаратов легкой промышленности (небольшие габариты, малые энергозатраты, технологичность изготовления).

На основании анализа существующих способов и аппаратов для стабилизации параметров и очистки воздуха сформулированы основные требования к фильтрам-теплообменникам и сделано заклю-

чение о целесообразности применения в качестве теплообменников и фильтрующей среды насадки для теплообменных аппаратов, имеющей развитую поверхность контакта фаз. Это объясняется тем, что только насадки позволяют получить максимальную поверхность теплообмена при минимальной емкости аппарата. Поэтому именно насадочный фильтр-теплообменник будет наиболее полно соответствовать специфике легкой промышленности.

Во втором разделе на основании литературного и патентного обзора показана целесообразность использования в фильтрах-теплообменниках нерегулярных спиральных проволочных насадок, так как эти насадки обеспечивают высокую интенсивность теплообмена и фильтрации за счет развитой поверхности контакта фаз и имеют простую конструкцию, позволяющую изготавливать насадку в условиях ремонтно-механических цехов предприятий легкой промышленности.

На основании анализа существующих конструкций насадок разработана принципиально новая конструкция нерегулярной спиральной насадки [5]. Насадка представляет собой закрутку из отдельных элементов. Элемент насадки представляет собой отрезок проволочной спирали, каждый виток которой смещен относительно соседнего витка таким образом, что угол между осью симметрии элемента и плоскостью витка спирали равен $10...45^\circ$, а соотношение диаметра проволоки и внутреннего диаметра витка спирали равно $d_n / d_s = 0,25...1$. Благодаря такой конструкции каждый элемент насадки обладает равномерной проницаемостью во всех направлениях, что приводит к равномерному распределению рабочей среды по всему объему насадки, лучшей гомогенизации системы и устранению застойных зон. Это позволяет повысить эффективность процессов теплообмена и фильтрации, а следовательно - уменьшить габариты фильтра-теплообменника.

Разработана технология изготовления насадки из стандартной алюминиевой проволоки и определены основные характеристики насадки (удельная поверхность, свободный объем, эквивалентный диаметр).

Кроме описанной выше конструкции, разработана еще одна конструкция насадки [10]. Насадка отличается от предыдущей конструкции тем, что изготавливается из специальной проволоки, имеющей некруглое сечение. Так как круг по сравнению с любым другим сечением имеет наименьший периметр, то изготавливая насадку из проволоки с некруглым (например лепестковым) сечением можно значительно увеличить ее удельную поверхность не уменьшая свободный объем, т.е. повысить эффективность процесса теплообмена без увеличения гидравлического сопротивления.

В третьем разделе изложена методика экспериментальных исследований новой насадки, методика обработки экспериментальных данных и оценки погрешностей на ЭВМ, приведено описание экспериментальных установок и методики измерений.

Экспериментальные исследования проводились с целью получения необходимых данных для составления методики расчета насадочного фильтра-теплообменника, отработки конструкции и режимов его работы. Методика предусматривает проведение исследований в четыре этапа:

- а) исследование гидродинамических характеристик насадки;
- б) исследование теплообменных характеристик насадки;
- в) исследование процесса пылеулавливания в слое сухой и орошаемой насадки;
- г) исследование возможности предотвращения осаждения пыли на поверхность насадки;
- д) исследование опытно-промышленного образца фильтра-теплообменника с нерегулярной спиральной насадкой;

В настоящее время аналитическое решение системы дифференциальных уравнений, описывающих процессы движения воздушной среды и конвективного тепло- и массообмена при взаимодействии воздушного потока с пленками жидкости на поверхности насадки, не представляется возможным. Единственным методом решения подобного рода задач является обшая теория подобия. При этом связь между полученными безразмерными комплексами может быть определена экспериментальным путем. При проведении исследований в качестве определяемых критериев приняты критерии Ейлера (Eu), тепловой и диффузионный критерии Нуссельта (Nu , Nu_D). В качестве определяющих критериев приняты критерии Рейнольдса (Re), Гухмана (Su), тепловой и диффузионный критерии Прандтля (Pr , Pr_D), а также геометрический симплекс - отношение толщины слоя насадки к эквивалентному диаметру насадки (H/d_p). С целью сравнения результатов исследования с результатами других исследователей методикой предусмотрено также определение коэффициента гидравлического сопротивления насадки ($K \cdot 2 \cdot Eu \cdot d_p / H$) в зависимости от числа Рейнольдса. Кроме этого в процессе экспериментов определяются зависимости эффективности пылеулавливания от дисперсного состава улавливаемой пыли и режимных параметров фильтра-теплообменника (скорости потока воздуха, расхода орошающей жидкости, пылеемкости насадки и др.).

Исследование гидродинамических и пылевых характеристик насадки проводилось в процессе прохождения воздушного, а также дисперсного воздушно-водяного и воздушно-пылевого потоков через слой насадки. Для проведения этих исследований была разработана экспериментальная установка, представляющая собой аэродинамическую трубу разомкнутого типа. Основные элементы установки - рабочий участок в виде слоя насадки, ограниченной решетками, система подачи и распыления воды, система подачи пы-

ли, контрольный фильтр, установленный за рабочим участком, устройство для подогрева воздуха на входе в установку, а также комплекс измерительной аппаратуры, позволяющей проводить все необходимые измерения. Толщину слоя насадки можно изменять перестановкой решеток.

Исследование тепломассообменных характеристик насадки проводилось в процессе испарения воды с поверхности предварительно смоченной насадки в движущийся через нее воздушный поток без дополнительного орошения. Такая методика позволяет определять коэффициенты тепло- и массообмена при максимальном использовании поверхности насадки, в то время как при постоянном орошении точно определить активную поверхность контакта фаз практически невозможно. Для реализации данной методики была разработана специальная экспериментальная установка также представляющая собой аэродинамическую трубу разорванного типа. Основное отличие данной установки в том, что специальная решетка со смоченной насадкой навинчивается на вход аэродинамической трубы, что позволяет ускорить проведение экспериментов. Температура и влагосодержание воздуха на входе установки регулировалось изменением этих параметров внутри помещения, выброс воздуха из установки производился за пределы помещения. Такая конструкция установки и методика исследований позволяет обеспечить постоянство параметров на входе установки и равномерность поля температур в слое насадки.

При исследованиях проводились измерения расхода воздуха и расхода воды (при орошении), температуры "сухого" и "мокрого" термометров и влагосодержания воздуха на входе и выходе установки, а также гидравлического сопротивления слоя насадки. При исследованиях процесса пленочного увлажнения в слое насадки кроме этого производились измерения веса поданной и уловленной

в контрольном фильтре пыли.

Эксперименты проводились по традиционной методике - один из параметров изменяется при постоянных остальных параметрах.

Для обработки экспериментальных данных была разработана методика, позволяющая получить математические модели процессов в виде степенной функции двух аргументов ($y = c \cdot x^a \cdot z^b$), которая записывается в следующем. По результатам эксперимента подсчитываются значения определяющих и определяемых критериев подобия, которые являются первичными данными для дальнейшей обработки. Далее методикой предусмотрено логарифмирование первоначальных данных и двойная обработка их методом наименьших квадратов с промежуточным логарифмированием и решением систем линейных уравнений методом Гаусса. Производится также подсчет среднеквадратичной погрешности расчетов по полученным формулам в сравнении с экспериментальными данными.

Для реализации методики были разработаны алгоритмы и программа, позволяющая производить весь процесс обработки экспериментальных данных на ЭВМ за один просчет программы.

В четвертом разделе приведены результаты экспериментальных исследований нерегулярной спиральной насадки как основного элемента фильтра-теплообменника, приведен анализ полученных результатов и даны рекомендации по рациональным режимам работы исследованной насадки.

В результате исследований гидродинамических характеристик насадки, после обработки результатов более 400 опытов, были получены следующие критериальные зависимости описывающие движение воздуха в слое сухой насадки в диапазоне $H/d = 6,7 \dots 26,6$:

$$Eu = 5,95 Re^{-0,287} (H/d)^{0,227} \quad (1)$$

$$Eu = 13,77 Re^{-0,287} (H/d)^{0,493} \quad (2)$$

Зависимость (1) справедлива для переходного и турбулентного режимов течения в диапазоне $Re = 300 \dots 1510$, а зависимость (2) - для режима развитой турбулентности в диапазоне $Re = 1510 \dots 3030$. Среднеквадратичные погрешности расчета по этим зависимостям по сравнению с экспериментальными данными составляют соответственно 6,8% и 2,56%.

Кроме этого были получены эмпирические зависимости для определения коэффициента гидравлического сопротивления насадки в диапазоне $H/d_n = 11,1 \dots 26,6$:

$$K = 13,15 Re^{-0,246} \quad \text{при } Re = 300 \dots 1510 \quad (3);$$

$$\text{и } K = 15,9 Re^{-0,377} \quad \text{при } Re = 1514 \dots 3027 \quad (4)$$

Среднеквадратичные погрешности расчета по этим зависимостям по сравнению с экспериментальными данными составляет соответственно 4,26% и 4,63%.

Анализ полученных данных и сравнение их с данными различных авторов, исследовавших нерегулярные насадки, показал, что исследованная насадка имеет наиболее низкий коэффициент гидравлического сопротивления по сравнению с другими нерегулярными насадками. Это объясняется большим свободным объемом исследованной насадки и равномерностью распределения пустот по всем направлениям.

Исследования гидродинамических характеристик насадки при потопном орошении позволяют определить рациональные режимы работы насадки, т.е. такие режимы работы, при которых обеспечивается отсутствие бризгоблоса и пленочный режим движения жидкости при практически полном смачивании всей поверхности насадки.

Было установлено, что при скорости воздушного потока $v \leq 2$ м/с и толщине слоя насадки $H \geq 50$ мм бризгобнос отсутствует, причем при увеличении значения удельного орошения B от

0 до 0,06 кг/кг гидравлическое сопротивление насадки возрастает примерно в 1,5 раза (по сравнению с "сухим" режимом), а при дальнейшем увеличении B – гидравлическое сопротивление остается примерно постоянным. Наблюдения показали, что это значение B соответствует развитому пленочному режиму движения жидкости, при котором практически вся поверхность насадки покрыта пленкой жидкости. Дальнейшее увеличение удельного орошения до $B = 0,06$ кг/кг не приводит к увеличению пленки, так как дополнительное количество влаги, поданной на орошение, расходуется на испарение и рециркуляцию. Поэтому для исследованной насадки рациональными режимами работы являются скорость воздушного потока $v = 2$ м/с и удельное орошение $B = 0,06$ кг/кг ($\mu = 0,05$ л/м³).

В результате исследований тепло-массообменных характеристик насадки, после обработки результатов 216 опытов, были получены следующие критериальные зависимости, описывающие процесс тепло-массообмена в слое насадки:

$$Nu = 0,39E Re^{0,81} Cu^{0,45} Pr^{0,33} \quad (5)$$

$$Nu_D = 0,65I Re^{0,8} Cu^{0,33} Pr^{0,33} \quad (6)$$

Зависимости справедливы в диапазоне $Re = 300 \dots 1900$ и $Cu = 0,008 \dots 0,04$. Их среднеквадратичная погрешность по сравнению с экспериментальными данными составляет соответственно 2,0% и 9,4%.

Для расчета коэффициентов тепло и массообмена и критериев Nu и Nu_D по результатам эксперимента была разработана специальная программа ТМ.ВАС. Программа позволяет определять также физические характеристики влажного воздуха и воды в зависимости от начальных параметров, количества передаваемой теплоты и массы в процессе тепло-массообмена, среднеарифметические движущие силы процесса и другие параметры.

Нужно отметить, что полученные результаты хорошо согласуются с многочисленными исследованиями процессов тепло и массообмена в неподвижных слоях нерегулярных насаждений. Некоторое количественное расхождение данных различных исследователей и результатов наших экспериментов объясняется различиями в конструкциях и материалах насаждений.

Исследование процесса пылеулавливания в слое насадки проводилось с целью решения вопроса о возможности совмещения процессов охлаждения и очистки в насадочном фильтре - теплообменнике. Исследование проводилось при удельном орошении $w = 0,05 \text{ л/м}^2$ и скорости потока воздуха $v = 2 \text{ м/с}$. При этих режимах работы и концентрации пыли в воздухе до 1 г/м^3 происходит эффективная саморегенерация насадочного фильтра.

В результате исследования получены фракционные коэффициенты очистки воздуха от пыли. Было установлено, что в слое орошаемой насадки эффективно улавливаются частицы с эквивалентным диаметром $20 \dots 60 \text{ мкм}$. Эффективность плавления этих частиц составляет $91 \dots 97\%$. Эффективность улавливания частиц с эквивалентным диаметром менее 10 мкм и крупнее 250 мкм составляет соответственно 70% и 64% .

Необходимо отметить, что аналогичные насадочные фильтры с поперечным орошением обычно работают при высоких значениях удельного орошения ($0,15 \dots 0,5 \text{ л/м}^2$), а в нашем случае высокая эффективность пылеулавливания была достигнута при значительно меньшем удельном орошении ($0,05 \text{ л/м}^2$), что позволяет значительно снизить энергозатраты на очистку. Данный факт объясняется тем, что исследуемая насадка имеет хорошо смачиваемую поверхность, а ее конструкция обеспечивает равномерное распределение газопылежидкостной смеси по всему объему слоя.

В связи с тем, что секция фильтра-теплообменника на не-

которых установках может работать в режиме сухого фильтра с неподвижной или движущейся насадкой, было проведено также исследование процесса пылеулавливания в сухой насадке.

В процессе эксперимента было установлено, что фракционный состав пыли в диапазоне $d_p = 20 \dots 63$ мкм значительно влияет на эффективность пылеулавливания в сухой насадке. Поэтому результаты полученные для пыли с эквивалентным диаметром 40 мкм с точностью $\pm 5\%$ можно отнести ко всему этому диапазону.

В результате исследования получена экспериментальная зависимость эффективности пылеулавливания от скорости воздуха:

$$\zeta = 53,7 + 83,7 v - 1,91 v^2 \quad (7)$$

Среднеквадратическая погрешность этой зависимости по сравнению с экспериментальными данными составляет $\approx 0,9\%$.

Анализ полученных данных показывает, что эффективность пылеулавливания достигает максимума при $v = 3$ м/с и при дальнейшем увеличении скорости воздуха эффективность остается примерно постоянной, так как наступает динамическое равновесие между количеством осевшей и сдуваемой пыли. Опты проводились в диапазоне $v = 1 \dots 5$ м/с при постоянной пылеемкости фильтра равной 40 г/м³.

Была получена также экспериментальная зависимость эффективности пылеулавливания от объемной пылеемкости насадки:

$$\zeta = 82,6 - 0,35 \Pi + 3,71 \cdot 10^{-5} \Pi^2 - 6,38 \cdot 10^{-6} \Pi^3 \quad (8)$$

Зависимость (4.16) справедлива в диапазоне $\Pi = 20 \dots 240$ г/м³. Среднеквадратичная погрешность по сравнению с экспериментальными данными составляет $6,8\%$.

Полученные экспериментальные данные позволяют получить оптимальные режимы движения насадки в фильтрах с движущейся средой, например, оптимальную скорость движения насадки:

$$v_{opt} = h / T_{opt} \quad (9)$$

где h — высота слоя насадки в фильтре, м;

T^{opt} — оптимальное время нахождения насадки в запыленном потоке, которое определяется по формуле:

$$T^{opt} = \Pi^{opt} U / [(Y_0 - Y_k) Q_{\text{в}}] \quad (10)$$

где Π^{opt} — объемная пылеемкость насадки, соответствующая максимальному значению коэффициента очистки,

Y_0 и Y_k — концентрация пыли в воздухе соответственно до и после слоя насадки, г/м³;

$Q_{\text{в}}$ — объемный расход воздуха, м³/с;

U — объем насадочного фильтра, м³.

В результате исследований было установлено, что мелкодисперсные частицы пыли (частицы с эквивалентным диаметром $d_{\text{э}} < 3$ мкм и плотностью $\rho_v < 3$ г/см³) в слое насадки улавливаются плохо, однако они интенсивно осаждаются на поверхности насадки, загрязняя ее. Это может привести к снижению эффективности теплообмена в случае использования насадки в регенеративных теплообменниках. Основным механизмом осаждения мелкодисперсных частиц является турбулентная диффузия. Основным механизмом препятствующим осаждению частиц на нагретых поверхностях в теплообменных аппаратах является термофорез, т.е. движение частиц под действием градиента температуры. Было сделано предположение, что если сила термофореза превисит силу турбулентной диффузии, то осаждения частиц на нагретой поверхности не будет. Приравняв зависимости для расчета скорости движения частиц под действием силы термофореза и силы турбулентной диффузии была выведена формула для расчета критического градиента температур в потоке, выше которого осаждения частиц на нагретой поверхности не будет:

$$(\text{grad } T)_{\text{кр}} = (\partial T / \partial z)_{\text{кр}} = K_T \cdot K_d \cdot T_c \cdot v^* / \sqrt{D_p} \leq \text{grad } T \quad (11)$$

где K_T — коэффициент, учитывающий теплопроводность частиц и

газа;

K_α – коэффициент, зависящий от диаметра канала (эквивалентного диаметра насадки).

T_r – температура газа, К;

ν_r – кинематическая вязкость газа, $\text{м}^2/\text{с}$;

u^* – скорость турбулентных пульсаций, $\text{м}/\text{с}$.

Была разработана методика и программа расчета на ЭВМ условий предотвращения осаждения мелкодисперсных частиц на теплообменные поверхности [8]. В основу методики положена зависимость (11).

С целью практического подтверждения выведенных теоретических положений был проведен эксперимент. В связи с большими трудностями равномерного подвода теплоты к каждому элементу насадки, а также трудностями точного замера значения температуры на расстоянии $z = d_9/2$ от поверхности насадочного элемента, в качестве теплообменной поверхности была использована цилиндрическая трубка диаметром 10 мм с смонтированным нагревательным элементом и было принято допущение о линейности градиента температуры в пределах расстояния $z = 0 \dots 1,5$ мм от теплообменной поверхности. Трубка устанавливалась в аэродинамической трубе, через которую пропускался поток запыленного воздуха. В процессе эксперимента проводились измерения температуры поверхности трубки и температуры воздуха на расстоянии 1,5 мм от поверхности. Было установлено, что при $Re \leq 24000$ и температуре теплообменной поверхности выше 145 С, осаждения пыли на ней не происходит. Значение градиента температуры при этом равно $4,7 \cdot 10^4$ К/м.

Полученные результаты подтвердили реальность осуществления термодинамического способа предотвращения осаждения мелкодисперсной пыли на поверхности насадки и других теплообмен-

ных поверхностях высокотемпературных технологических аппаратов. На этот способ получено авторское свидетельство на изобретение б.ч.б.

В пятом разделе приводится описание двух новых конструкций насадочных фильтров-теплообменников, приведены результаты исследований одного из них в производственных условиях, изложена методика расчета основных конструктивных и режимных параметров насадочных фильтров-теплообменников, разработанных для очистки и охлаждения рабочих сред аппаратов легкой промышленности, с применением расчетных зависимостей, полученных в четвертом разделе.

На базе предложенной нерегулярной спиральной насадки разработана конструкция фильтра-теплообменника, предназначенного для очистки и охлаждения рабочих сред, отсасываемых из сушильных аппаратов, а также для конденсации паров из этих сред и удаления конденсата [7].

Указанный фильтр-теплообменник содержит корпус, в котором размещен решетчатый каркас, заполненный нерегулярной спиральной насадкой. Внутри решетчатого каркаса с насадкой размещены также теплообменные трубки для подачи внешнего теплоносителя (например, фреона из холодильной установки). На теплообменных трубках закреплены дугообразные отражательные пластины, концы которых введены в нижнюю камеру сбора конденсата.

Процесс очистки отсасываемой парогазовой смеси от аэрозолей и конденсирующихся паров протекает следующим образом. Поток парогазовой смеси проходит через слой насадки, в которой происходит объемное фильтрование. Одновременно теплообменные трубки охлаждают отражательные пластины и насадку. При этом на развитой поверхности насадки конденсируются пары. Капли сконденсированной влаги под действием сил тяжести сте-

кают по слою насадки и отражательным пластинам, увеличиваясь в размерах, и удаляются в камеру сбора конденсата.

Проведены исследования опытно-промышленного образца данного фильтра-теплообменника в промышленных условиях. При этом фильтр-теплообменник монтировался в системе отсоса паровоздушной смеси из рабочей камеры радиационно-вакуумной сушилки обуви перед механическим вакуумным насосом, а теплообменные трубки подключались к бытовой холодильной установке. В процессе испытаний производились измерения времени откачки паровоздушной смеси из сушилки, количества собранного конденсата и гидравлического сопротивления фильтра-теплообменника.

В результате испытаний определены основные технические характеристики фильтра-теплообменника:

- производительность по конденсату - 1 л/смену (0,125 л/ч);
- гидравлическое сопротивление - 450 Па (при расходе рабочей среды - 0,0157 м³/с),

Установлено, что фильтр-теплообменник работает достаточно эффективно и надежно, обеспечивает практически полную очистку паровоздушной смеси от конденсирующихся паров и пыли. При осмотре рабочей камеры вакуумного насоса после испытаний конденсата в ней не обнаружено. Конструкция фильтра-теплообменника проста, удобна в эксплуатации и не требует коренной реконструкции радиационно-вакуумной сушилки.

Данная конструкция может эффективно применяться и в других технологических процессах, связанных с двухфазными потоками, например, в процессах газификации жидкостей в газовой и химической промышленности, в частности, в разработанной с участием автора топливной системе газотурбинного двигателя [2].

Разработана также другая принципиально новая конструкция

фильтра-теплообменника, которая может быть применена для очистки и охлаждения воздуха на предприятиях легкой промышленности [6]. Данный фильтр-теплообменник имеет простую конструкцию и низкое гидравлическое сопротивление, и может быть применен в системах кондиционирования воздуха предприятий легкой промышленности.

В пятом разделе разработана также методика расчета основных конструктивных и режимных параметров фильтров-теплообменников, в состав которых входит нерегулярная спиральная насадка. Методика основана на полученных эмпирических зависимостях (1)...(8). Для ее реализации разработана специальная программа, позволяющая производить расчет на ЭВМ. В программу вводятся параметры рабочей среды на входе в фильтр-теплообменник и трубчатые параметры на выходе. В результате расчета получаем основные конструктивные и режимные параметры фильтра-теплообменника (площадь проходного сечения, толщина слоя насадки, грабущей расход обрабатываемой воды, гидравлическое сопротивление). Разработанная методика и программа позволяют спроектировать и применить фильтр-теплообменник с нерегулярной спиральной насадкой для очистки и охлаждения рабочих сред аппаратов легкой промышленности.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ воздействия конденсирующихся паров и пыли на работу технологического оборудования легкой промышленности и на его основании показана необходимость создания специальных средств для очистки и стабилизации параметров рабочих сред аппаратов легкой промышленности.

2. Проведен анализ существующих методов охлаждения и

очистки воздуха и на его основании сделан вывод о целесообразности совмещения процессов теплообмена и фильтрации в одном устройстве и составлены требования к фильтрам-теплообменникам для машин и аппаратов легкой промышленности. Сделан вывод о целесообразности создания насадочного фильтра-теплообменника, как наиболее полно соответствующего специфике легкой промышленности.

3. Выполнен литературный и патентный обзор конструкций насадок для теплообменных аппаратов и на его основании разработана новая конструкция нерегулярной спиральной насадки.

4. Разработана методика исследований насадки и обработки экспериментальных данных. Проведены исследования гидродинамических и теплообменных характеристик насадки, а также исследования процесса пылеулавливания в слое насадки. Рассмотрен вопрос о возможности предотвращения осаждения мелкодисперсных частиц на поверхность насадки, при ее использовании в высокотемпературных технологиях в регенеративных теплообменниках, и проведены эксперименты, подтверждающие такую возможность.

5. Получены математические модели в виде эмпирических критериальных уравнений, позволяющие определить коэффициенты гидравлического сопротивления, тепло- и массообмена при движении влажного воздуха в слое нерегулярной спиральной насадки.

6. Получены эмпирические зависимости по определению эффективности пылеулавливания в слое сухой и орошаемой насадки.

7. На основании проведенных экспериментальных исследований определены рациональные режимы работы нерегулярной спиральной насадки при использовании ее в фильтрах-теплообменниках:

- скорость потока воздуха через насадку - $v = 2$ м/с;
- удельное орошение - $m = 0,05$ л/м²;

- плотность орошения - $\Pi_{ж} = 0,1$ кг/(м²·с);
- а также при ее использовании в качестве сужого фильтра с движущейся средой:
- скорость потока воздуха через насадку - $v = 3$ м/с;
- оптимальная пылеемкость - $\Pi = 25$ г/м³.

8. На основании проведенных исследований разработаны методика и программа расчета на ЭВМ основных конструктивных и режимных параметров насадочных фильтров-теплообменников, в состав которых входит нерегулярная спиральная насадка и даны рекомендации по их расчету проектированию и рациональным режимом работы.

9. Разработаны на уровне изобретений две конструкции насадочных фильтров-теплообменников, одна из которых внедрена в производство на Киевской фабрике индпошива обуви.

10. Промышленное применение насадочного фильтра теплообменника в системе отсоса паровоздушной смеси из радиационно-вакуумной сушилки обуви обеспечило практически полную очистку этой смеси от конденсирующихся паров и надежную длительную работу вакуумного насоса.

11. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения одной радиационно-вакуумной сушилки обуви с насадочным фильтром-теплообменником, рассчитанный по ценам, действующим на 1.10.1993 г., составляет 1 млн. крб.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Алексеев А.В., Иванова Д.В., Марченко А.И., Прокофьева Г.Н., Цатуряц А.Б., Якушева Т.А. Способы и средства повышения эффективности использования топлива в ТЭУ: Отчет по НИР. Киев: КТИП, 1985, № гос.регистрации 001830054482, 142 с.

2. А.с. СССР N 1287684, МКИ F 02 C 7/22. Топливная система газотурбинного двигателя. - А.В.Алексеев, А.Б.Цатурянц, П.В.Зайцев, В.С.Каштан, В.И.Никишин, А.И.Марченко, В.Ф.Будко. - Опубл. 05.03.87.

3. Алексеев А.В., Марченко А.И. Использование явления термофореза для обеспечения технической чистоты систем охлаждения ГТУ. / Газотурбинные и комбинированные установки. Всесоюз. науч. конф. Тезисы докладов. - М.: МВТУ, 1987.

4. А.с. СССР N 1302134, МКИ F 28 C 3/00. Способ предотвращения осаждения аэрозольных частиц теплоносителя на поверхность изделия. - А.В.Алексеев, А.И.Марченко. - 07.04.87, Бюл. N13.

5. А.с. СССР N 1311768, МКИ B 01 D 53/20, Насадка для теплообменных аппаратов. - А.В.Алексеев, А.И.Марченко, П.В.Зайцев. - Опубл. 23.05.87, Бюл. N19.

6. А.с. СССР N 1378308, МКИ B 01 D 46/30. Фильтр для очистки воздуха. - А.В.Алексеев, А.И.Марченко, А.С.Карев. - 22.10.87.

7. Алексеев А.В., Марченко А.И.; Зайцев П.В. Насадки для теплообменных аппаратов. / Нефтяная и газовая промышленность. - 1989. - N1. - изд. Техника, Киев.

8. Алексеев А.В., Цатурянц А.Б., Марченко А.И. Методика расчета условий предотвращения осаждения мелкодисперсных аэрозолей в каналах систем охлаждения. / Энергетика. (Изв. высш. учеб. заведений). - 1989. - N9. - изд. БПИ. - Минск.

9. Алексеев А.В., Цатурянц А.Б., Марченко А.И. Определение коэффициентов тепло- и массопереноса при испарении воды с поверхности насадки. / Тезисы докладов юбилейных 42-й научной и 10-й научно-методической конференций профессорско-преподавательского состава. - Киев: КТИАП, 1990.

10. А.с. СССР N 1382021, МКИ B 01 D 53/20, Насадка для теплообменных аппаратов. - А.В.Алексеев, А.И.Марченко,

П.В.Зайцев, Е.Л.Макаришева. Опубл. 07.05.90. Бюл. №17.

11. А.с. СССР № 1604428, МКИ В 01 В 46/30. Фильтр-теплообменник. - А.В.Алексеев, А.И.Марченко, П.В.Зайцев, В.А.Матвиенко, М.И.Бурдаков, В.И.Демьянчук. - Опубл. 07.11.90. Бюл. №41.

12. Матвиенко О.А., Мусиенко В.А., Марченко А.И. Разработка оптимальных технологических режимов и конструкций для ускоренной основной сущки обуви: Отчет по НИР. - Киев: КТИП, 1990, № гос.регистрации 01.86.0127202, 114 с.

13. Алексеев А.В., Бурдаков М.И., Зайцев П.В., Карев А.С., Кавтан В.С., Марченко А.И., Цатурянц А.Б. Использование материалов отходов и побочных продуктов легкой и химической промышленности в системах газо- и воздухоподготовки различных отраслей техники: Отчет по НИР. - Киев: КТИП, 1990, № гос. регистрации 01.86.0127198, 212 с.

14. Алексеев А.В., Зайцев П.В., Марченко А.И. Методические указания для самостоятельной подготовки студентов к лабораторным работам по курсу "Охрана окружающей среды (основы экологии)": - К.: КТИП, 1990.

15. Марченко А.И. Исследование теплофизических и гидродинамических характеристик витой нерегулярной насадки. / Тезисы докладов 44-й научной и 12-й научно-методической конференций профессорско - преподавательского состава института. - Киев: КТИП, 1992.

Подп. к печ. 05.10.93г. Формат 60x84 1/16. Бумага тип. №2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,63. Усл. кр.-отт. 1,74. Уч.-изд. л. 1,27. Тираж 100. Звк. 1625. Бесплатно.

Учесток оперативной полиграфии при Государственной академии легкой промышленности Украины.
252011, Киев-11, ул. Немировича-Данченко, 2.

AB 28.286

AB 28.286

Бесплатно

Бил. 1625