

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР
КИЕВСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

На правах рукописи

ИТАНГЕЕВ КОНСТАНТИН ОСТАПОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА ИЗ ПАРОГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ
С ЦЕЛЮ РАЗРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНОГО КОНДЕНСАТОРА ДЛЯ
САХАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность 05.14.04 - Промышленная теплоэнергетика

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

Киев - 1980

Работа выполнена во Всесоюзном ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательском институте сахарной промышленности.

Научный руководитель: кандидат технических наук
В.Н.ГОРОХ

Официальные оппоненты: доктор технических наук
В.Р.БОРОВСКИЙ
кандидат технических наук
П.А.БАРАБАШ

Ведущее предприятие: ИТИ "Сахпроменергоналадка"

Защита состоится 15 апреля 1980 г. в 14 час. на заседании специализированного совета К.068.17.02 "Промышленная теплоэнергетика" при Киевском технологическом институте пищевой промышленности, 252601, Киев - 17 ГСП, Владимирская 68, КТИПП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан " . " марта 1980 г.

Ученый секретарь
специализированного совета

Б.А.МАТВИЕНКО

Актуальность работы. Одной из важнейших задач современности является охрана окружающей среды и, в частности, предотвращение загрязнения пресноводных водоемов. В СССР эти задачи нашли свое отражение в основном законе нашего общества - Конституции Союза Советских Социалистических Республик.

В сахарном производстве основным потребителем свежей воды и, одновременно, одним из источников ее загрязнения является конденсационная установка для конденсации пара из последнего корпуса выпарной станции и вакуум-аппаратов, оборудованная конденсаторами смешения. Содержащиеся в паре аммиак, уголекислота, сернистый ангидрид, сахар и прочие вещества переходят в охлаждающую воду.

Применение поверхностных конденсаторов исключает возможность химического загрязнения охлаждающей воды. Особенностью работы конденсаторов в сахарном производстве является необходимость конденсировать пар из смесей с весьма широким диапазоном содержания газов, оказывающих значительное влияние на работу конденсатора. Недостаточная изученность условий работы и процессов, протекающих в конденсаторах сахарного завода, отсутствие научно обоснованных требований к конструкции поверхностных конденсаторов и конденсационных установок препятствует широкому внедрению поверхностных конденсаторов в сахарном производстве.

Поэтому исследование процессов тепло- и массообмена в конденсаторах сахарного производства, имеющее целью разработку поверхностных конденсаторов и конденсационных установок, соответствующих условиям их работы в сахарном производстве, является весьма актуальной задачей, имеющей важное народнохозяйственное значение.

Целью и задачами настоящего исследования являются:

- экспериментальное исследование конденсации пара из потока парогазовой смеси в диапазоне концентраций неконденсирующихся газов характерном для сахарного производства (от 1 до 90%);
- получение расчетных зависимостей и разработка метода теплового расчета, необходимого для проектирования поверхностных конденсаторов сахарного производства;
- разработка рациональной конструкции поверхностного конденсатора и схемы конденсационной установки свеклосахарного завода.

Научная новизна. Установлено, что при конденсации чистого движущегося пара в шахматном пучке горизонтальных труб существует две области, отличающиеся характером влияния скорости пара и температурного напора на процесс теплообмена. Изменение величин местных температурных напоров, тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи отличается значительной неравномерностью по окружности трубы: температурный напор резко увеличивается на нижней части горизонтальной трубы, а тепловой поток - уменьшается. С ростом интенсивности теплообмена и скорости парового потока неравномерность распределения этих параметров возрастает.

Получена зависимость, описывающая влияние концентрации газов (в диапазоне от 1 до 90%), скорости потока, конструкции пучка и прочих факторов на массоотдачу пара при его конденсации из паровоздушной смеси.

Установлено, что для описания теплообмена в поверхностных конденсаторах со свободноконвективным движением парогазовой смеси может использоваться модель аппарата идеального смешения.

Предложен новый метод позонного теплового расчета поверхностного конденсатора с определением расходов паргазовой смеси по полосам тока исходя из условия равенства и минимума их аэродинамических сопротивлений.

С использованием математической модели конденсационной установки свеклосахарного завода с поверхностными конденсаторами определено влияние "внешних" факторов на ее экономичность и оценены параметры оптимальных режимов работы поверхностных конденсаторов.

Практическая ценность. Проведенные исследования позволили разработать методики тепловых расчетов поверхностных конденсаторов с организованным вынужденным и свободноконвективным движением парогазовой смеси в межтрубном пространстве.

Разработан поверхностный конденсатор для сахарного завода технической мощностью 3000 тонн переработки свеклы в сутки и рациональная схема конденсационной установки свеклосахарного завода с поверхностными конденсаторами.

Проведен анализ источников поступления неконденсирующихся газов в вакуумную систему сахарного завода и разработана методика их количественного определения.

Материалы работы использованы НПО "Сахар" при разработке по-

дегревателя диффузионного сока, обогреваемого утфальным паром (вторичный пар из вакуум-аппаратов).

Апробация работы. Результаты исследования докладывались на УІ Всесоюзной конференции по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энергетических машин и аппаратов (Ленинград, 1979 г.), Всесоюзной научно-технической конференции молодых специалистов сахарной промышленности (Яготин, 1979 г.), республиканском семинаре "Новое в выпарной и сушильной технике сахарного производства" (Киев, 1976 г.), "Смотре-конкурсе молодых специалистов ВНПО "Сахар" (1975 г.), конференции "Вопросы повышения эффективности сахарного производства" (1977 г.), на 42-45 научных конференциях Киевского технологического института пищевой промышленности (1976-1979 гг.).

Публикации. По материалам диссертационной работы имеется 8 печатных работ.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 140 страницах основного текста и состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы (150 наименований), содержит 5 таблиц и 47 рисунков. В приложении имеется акт испытаний межведомственной комиссией опытного образца поверхностного конденсатора ПКСП-1000 на Яготинском сахарном заводе им.Ильича.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе "Тепло- и массообмен в поверхностном конденсаторе" проведен анализ имеющихся сведений о процессах, протекающих при конденсации пара из парогазовых смесей в поверхностных конденсаторах, методы расчета теплообмена, а также данные об условиях работы конденсационных установок сахарных заводов.

Значительное влияние на работу и эффективность конденсаторов оказывает некоонденсировавшиеся газы, содержащиеся в паре. Интенсивность теплообмена при конденсации пара из парогазовой смеси определяется процессами массообмена в парогазовой смеси и теплообменом в пленке конденсата. Теплообмен в пленке конденсата при конденсации чистого неподвижного пара изучен достаточно полно. В значительно меньшей степени изучен теплообмен при конденсации движущегося пара. Исследований в этой области

недостаточно, имеются разногласия о величине и характере влияния скорости, температурного напора и пр. факторов.

Исследования по конденсации пара из парогазовых смесей не охватывают весь диапазон концентраций неконденсирующихся газов, при которых происходит конденсация пара в конденсаторах сахарных заводов. Недостаточно данных и по влиянию других параметров.

Существующие методики расчета теплообмена в поверхностных конденсаторах можно разделить на интегральные и позонные. В первых рассчитывается средняя для всей поверхности интенсивность теплообмена. Такой метод расчета используется в случае, если конструкция конденсатора и условия его работы не отличаются от тех, при которых были получены эти расчетные зависимости. Позонные детальные методы расчета позволяют определить интенсивность теплообмена на отдельных участках поверхности теплообмена, а затем рассчитать суммарную производительность конденсатора и прочие его характеристики. Широкому использованию детальных позонных методов расчета препятствует недостаточная изученность процессов тепло- и массообмена при конденсации пара из парогазовых смесей, а также значительный объем и сложность вычислений. При расчете конденсаторов со сложной конструкцией трубных пучков затруднительно определить действительные линии тока и скорости смеси.

С целью правильного выбора конструкции поверхностного конденсатора для сахарной промышленности и расчета интенсивности теплообмена в нем, необходимо уточнить условия работы конденсаторов сахарных заводов. Данные о величине и влиянии отдельных источников поступления неконденсирующихся газов в вакуумную систему сахарного завода отсутствуют, что не позволяет рассчитать общее их количество.

Во второй главе дано описание экспериментальных установок, методик проведения опытов и обработки экспериментальных данных.

Изучение теплообмена при конденсации чистого движущегося пара и пара из потока парогазовой смеси проводились на экспериментальном стенде, изображенном на /рис.1/. Конденсация пара происходила на экспериментальной трубе 1, расположенной в рабочем канале 2. Длина рабочего участка трубы 0,5 м, наружный диаметр 22 мм, толщина стенки трубы 2 мм, материал - медь.

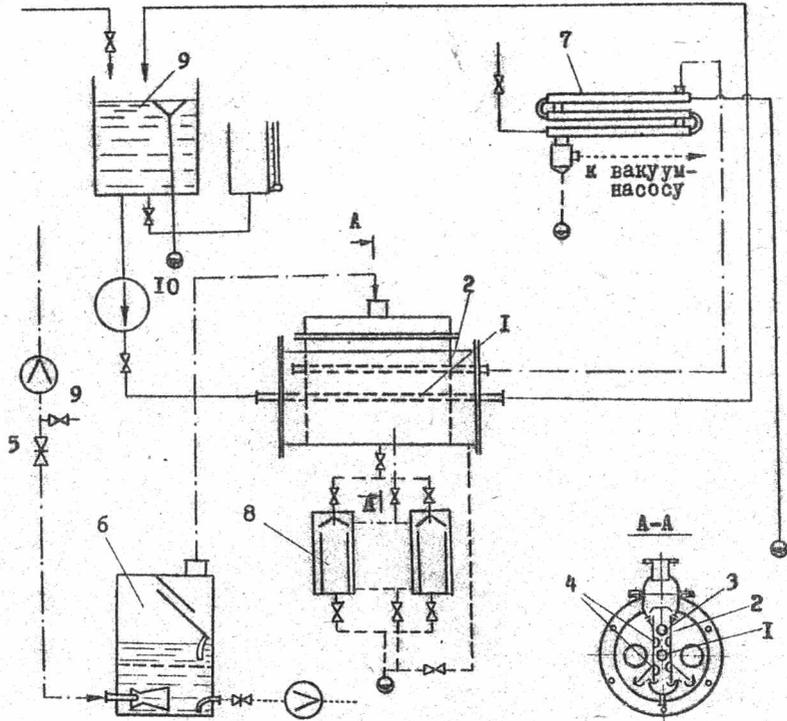


Рис. I. Схема экспериментального стенда.

I - экспериментальная труба; 2 - рабочий канал; 3 и 4 - вспомогательные трубы; 5 - редукционный вентиль; 6 - парохладитель; 7 - вспомогательный конденсатор; 8 - мерники конденсата; 9 - сборник воды; 10 - насос.

Условные обозначения:

- пар или парогазовая смесь,
- - - вода,
- воздух,
- · - · конденсат,
- дренаж,
- ⊗ расходомер.

Другие трубы 3 и 4, расположенные в рабочем канале служили для воспроизведения гидродинамики потока пара или парогазовой смеси в шахматном трубном пучке $S_3/d = 2,14$ и $S_2/d = 0,65$.

Пар с начальным давлением 3 + 4 бар редуцировался вентилем 5 до необходимого давления и поступал в парохладитель 6, в котором барботировал через слой конденсата и охлаждался до температуры насыщения. При проведении опытов по конденсации пара из парогазовой смеси в парохладитель подавался воздух. Насыщенный пар или парогазовая смесь проходили через рабочий канал 2 и отсасывались на вспомогательный конденсатор 7.

При проведении опытов замеряли расход пара и воздуха, температуру пара в рабочем канале. Температура стенки экспериментальной трубы измерялась 8-ю медь-константановыми термопарами, расположенными в двух сечениях трубы в точках с азимутами, считая от верхней образующей, $\varphi = 0^\circ; 90^\circ; 180^\circ$ и 270° . По количеству собранного в мерниках 8 конденсата определяли интенсивность теплообмена.

Стенд спроектирован с таким расчетом, чтобы при проведении опытов по конденсации чистого пара достигалась высокая степень его чистоты в рабочем канале. Для этого тракт от редукционного вентиля 5 до рабочего канала тщательно герметизирован, а свежий пар непрерывно продувал рабочий канал и препятствовал поступлению воздуха, проникающего через неплотности в остальной части стенда. Пар отсасывался из парового пространства между корпусом модели конденсатора и рабочим каналом. Это пространство выполняло также функции паровой рубашки для рабочего канала. Труба 3, расположенная в рабочем канале имела по верхней образующей отверстия и служила для отбора проб пара при анализе его чистоты.

В опытах по конденсации пара из парогазовой смеси можно было достигать концентрацию воздуха в смеси до 90%. Для определения температуры фазового перехода измеряли температуру стенки экспериментальной трубы и по данным, полученным при изучении конденсации чистого движущегося пара, рассчитывали перепад температур в пленке конденсата.

С целью изучения работы поверхностного конденсатора в условиях свеклосахарного завода на опытно-производстве Яготинского сахарного завода им. Ильича был установлен экспериментальный поверхностный конденсатор, конденсирующий пар из вакуум-

аппаратов и последнего корпуса выпарной станции первой линии опытного производства. Экспериментальный поверхностный конденсатор представляет собой кожухотрубный теплообменник с горизонтальным расположением труб и номинальной площадью поверхности теплообмена 191 м^2 . Охлаждающая вода подается внутрь труб. Конденсатор выполнен четырехходовым по охлаждающей воде. Пар поступает в верхнюю часть межтрубного пространства, а неконденсирующиеся газы и остаток пара отсасываются из конденсатора через четыре оттяжки, из которых две расположено в верхней части экспериментального поверхностного конденсатора, а две в нижней. Отсасываемая парогазовая смесь охлаждается в воздухоохладителе, представляющем собой секционный противоточный теплообменник площадью поверхности теплообмена $7,5 \text{ м}^2$.

При проведении испытаний измеряли расход, температуру, давление охлаждающей воды и отсасываемых газов, давление и температуру парогазовой смеси в поверхностном конденсаторе, количество сконденсировавшегося пара. С целью выявления влияния неконденсирующихся газов, выделяющихся при выпаривании сахарных растворов, испытания проводились с работой по трем схемам отвода неконденсирующихся газов из греющих камер выпарных аппаратов, подогревателей и вакуум-аппаратов: а/ по обычной - с отводом пара на ступень ниже по давлению; б/ с выводом газов в атмосферу в случае избыточного давления пара в греющей камере; в/ с включением всех оттяжек на вторую линию опытного производства. Кроме того, на экспериментальном поверхностном конденсаторе были проведены опыты по изучению влияния разрежения на величину притоков воздуха через неплотности.

В третьей главе приводятся основные результаты экспериментальных исследований.

А. Конденсация чистого движущегося пара.

Опыты проведены в диапазоне: $P_n = 10-115 \text{ кПа}$, $Re_n = 1600 + 11200$, $q = 38-310 \text{ кВт/м}^2$ и $\Delta T = 1,5-28 \text{ К}$. Анализы проб пара показали, что концентрация неконденсирующихся газов не превышала $0,02\%$. Согласно имеющимся данным, влиянием столь незначительных примесей неконденсирующихся газов можно пренебречь. По сравнению с конденсацией чистого неподвижного пара, величины коэффициентов теплоотдачи в опытах с конденсацией чистого движущегося пара были на $20-100\%$ выше. Причем было выявлено две области, для которых характерно различное влияние скорости

потока и температурного напора /рис.2/. В области умеренных тепловых потоков сказывается значительное влияние скорости пара. С ростом скорости пара или числа Re_n отрицательное влияние температурного напора уменьшается. Однако, достигнув некоторого, критического, для данной скорости, температурного напора, характер влияния скорости пара и температурного напора существенно меняется. Изменение скорости потока перестает сказываться на величине коэффициента теплоотдачи, а отрицательное влияние температурного напора превышает степень влияния этого фактора по сравнению со случаем конденсации чистого неподвижного пара. Так как влияние скорости пара в этой области в явном виде не сказывается, то линии для различных значений числа Re_n сливаются в одну, описываемую зависимостью вида:

$$Nu = A(Ga \cdot Pr)^{0,25} \cdot K^{0,45} \quad /1/$$

В области докритических температурных напоров ^{полученные} экспериментальные данные согласуются с расчетными значениями коэффициента теплоотдачи по формуле, предложенной Л.Д.Берманом и Ю.А.Тумановым:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_N} = 1 + 95 \cdot 10^{-3} \cdot Re_{наб}^{1/8} \sqrt{Nu_N} \quad /2/$$

Причем, согласование результатов опытов и формулы /2/ лучше в случае использования не скорости набегавшего потока, как принято в /2/, а скорости в узком сечении. Однако, имеющихся в настоящее время данных недостаточно для окончательного решения вопроса о влиянии конструкции пучка и выбора характерной скорости потока при конденсации чистого движущегося пара.

Судя по результатам проведенных опытов, формулу /2/ можно распространять на область больших чисел Re_n , чем исследована авторами.

При конденсации чистого движущегося пара, по окружности горизонтальной трубы происходит резкое изменение величин местных температурных напоров, тепловых потоков и, особенно, коэффициентов теплоотдачи. Следует отметить, что изменение величины местных температурных напоров /рис.3/ и тепловых потоков характеризуется значительной неравномерностью. В верхней половине трубы величина их изменения значительно меньше, чем

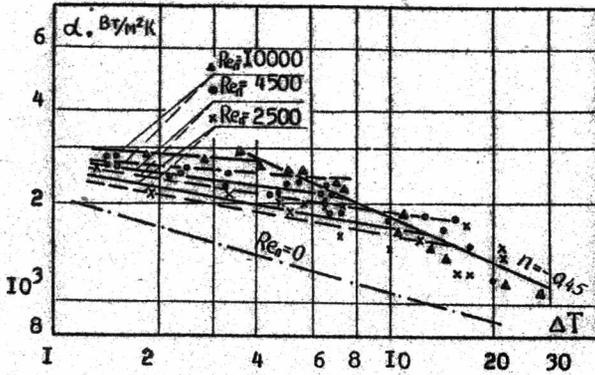


Рис.2. Влияние температурного напора на величину коэффициента теплоотдачи.

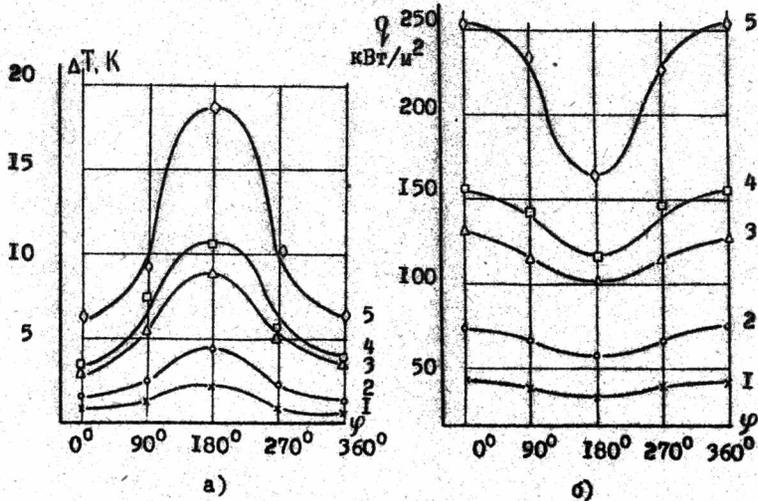


Рис.3. Изменение местных значений температурного напора (а) и теплового потока (б)

1) $q = 41,8 \text{ кВт/м}^2$; $W_n = 22 \text{ м/с}$; $t_n = 58,9 \text{ }^\circ\text{C}$
 2) $q = 69,96 \text{ кВт/м}^2$; $W_n = 20 \text{ м/с}$; $t_n = 54,9 \text{ }^\circ\text{C}$
 3) $q = 117,8 \text{ кВт/м}^2$; $W_n = 20 \text{ м/с}$; $t_n = 58,2 \text{ }^\circ\text{C}$
 4) $q = 142,6 \text{ кВт/м}^2$; $W_n = 20 \text{ м/с}$; $t_n = 57,2 \text{ }^\circ\text{C}$
 5) $q = 218,15 \text{ кВт/м}^2$; $W_n = 36 \text{ м/с}$; $t_n = 62,9 \text{ }^\circ\text{C}$

в нижней. С ростом интенсивности теплообмена и скорости парового потока, величина неравномерности распределения этих параметров возрастает. Это говорит о накоплении конденсата в кормовой части трубы за счет подтормаживания стекающей пленки конденсата вихрем, образовавшимся при отрыве парового пограничного слоя.

Исходя из результатов экспериментального изучения теплоотдачи при конденсации чистого движущегося пара можно предложить следующую картину протекающих при этом процессов. На части поверхности трубы от лобовой точки до точки отрыва пограничного слоя происходит интенсификация теплообмена в пленке конденсата под воздействием спутного парового потока. В этой части интенсивность теплообмена растет с ростом скорости пара. Увеличение температурного напора играет двойную роль. С одной стороны, увеличивается количество стекающего конденсата и растет термическое сопротивление пленки конденсата. Но при этом, с ростом поперечного потока вещества возрастает влияние скорости пара. Кроме того, точка отрыва пограничного слоя смещается дальше в кормовую часть трубы, увеличивая поверхность теплообмена, на которой проявляется интенсифицирующее влияние парового потока.

После отрыва пограничного слоя стекание конденсата термовитается встречным потоком пара. Этим и объясняется резкое уменьшение интенсивности теплообмена в кормовой части. Следует отметить, что с ростом азимута точки отрыва пограничного слоя, ее дальнейшее смещение в кормовую часть постепенно затрудняется. Причем, чем выше скорость пара, тем тяжелее смещение точки отрыва. Поэтому с ростом скорости пара величина критического температурного напора уменьшается. В закритической области температурных напоров рост величины коэффициента теплоотдачи в верхней части горизонтальной трубы компенсируется увеличением количества скапливающегося конденсата в кормовой части. Этим и объясняется отсутствие влияния скорости парового потока на величину среднего по окружности трубы коэффициента теплоотдачи.

Б. Конденсация пара из потока парогазовой смеси.

Фактором, в наибольшей степени влияющим на интенсивность массоотдачи пара из паровоздушной смеси является величина концентрации неконденсирующихся газов. При обработке опытных данных было установлено, что зависимость интенсивности массоотдачи

от концентрации неконденсирующихся газов в исследованном диапазоне от 1 до 90% не может быть описана степенной зависимостью вида: $Nu_D \sim \epsilon^n$. Такая функция хорошо описывает экспериментальные данные при объемном содержании газов до 40%. При содержании газов выше 40%, для описания влияния концентрации газов более пригодна показательная функция. При обобщении экспериментальных данных по массоотдаче пара из потока парогазовой смеси во всем исследованном диапазоне концентраций воздуха была использована составная показательно-степенная функция вида: $Nu_D = a \epsilon^n / \text{рис.4/}$. Зависимость, обобщающая опытные данные по массоотдаче пара имеет вид:

$$Nu_D = a Re_{см}^{0,6} \pi_D^{-0,4} \frac{0,2 \epsilon_0}{\epsilon_0^{0,47}} \quad /8/$$

В области $\epsilon_0 = 0,01-0,5$ расчет по /8/ дает значения числа Nu_D на 25% выше, чем по зависимости, полученной в ВТИ Л.Д.Берманом и С.Н.Фуксом, при вычислении числа $Re_{см}$ по скорости набегающего потока. При расчете по скорости в узком сечении расхождения уменьшаются до 15%. Причиной расхождений является различие в конструкции трубных пучков, исследованных в наших опытах и опытах ВТИ.

Следует отметить, что для случая конвективного теплообмена в сравниваемых пучках, величина поправки на влияние конструкции равна 12%. С введением поправочного множителя, учитывающего влияние конструкции трубного пучка - K_s , и расчетом числа $Re_{см}$ по скорости в узком сечении, расчетные значения Nu_D по /8/ и формуле Л.Д.Бермана и С.Н.Фука, в области $\epsilon_0 = 0,01+0,5$ практически совпадают.

Влияние скорости смеси и конструкции трубного пучка на интенсивность массоотдачи аналогично влиянию этих параметров на интенсивность конвективного массообмена в шахматных трубных пучках, что подтверждает существование приближенного их подобия. С учетом сказанного, величина поправки на конструкцию трубного пучка принимается равной аналогичной поправке в случае конвективного теплообмена. Тогда в уравнении /8/ коэффициент $a = 0,89 K_s$.

В исследованном диапазоне концентраций газов, их влияние на величину условного коэффициента теплоотдачи от парогазовой смеси достаточно хорошо описывается зависимостью в виде показатель-

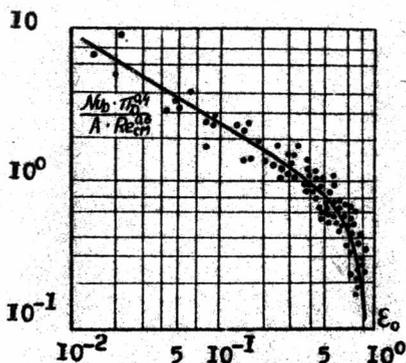


Рис. 4. Массоотдача при конденсации пара из потока паровоздушной смеси.

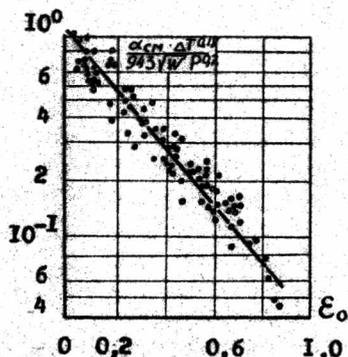


Рис. 5. Интенсивность теплообмена при конденсации пара из потока парогазовой смеси.

ной функции, которая удовлетворяет требованиям $\alpha_{см} \rightarrow \alpha_1$ при $\epsilon_0 \rightarrow 0$ и $\alpha_{см} \rightarrow \alpha_{комб}$ при $\epsilon \rightarrow 1$. В результате обработки экспериментальных данных получена зависимость:

$$\alpha_{см} = 943 \cdot \sqrt{W_{см}} \cdot 0,043 \epsilon_0^{0,2} \rho_{см}^{0,2} \Delta T^{-0,18} \quad /4/$$

Обобщение экспериментальных данных по условному коэффициенту теплоотдачи при конденсации пара из потока парогазовой смеси зависимости /4/ представлено на рис. 5.

В. Производственные испытания экспериментального поверхностного конденсатора.

Испытания подтвердили значительное отрицательное влияние неконденсирующихся газов, поступающих вместе с паром, на интенсивность теплообмена в конденсаторе. Начальная массовая концентрация газов колеблется в пределах 1,5-6%. При этом не было обнаружено заметного влияния схемы отвода газов из границ камер выпарных аппаратов, подогревателей и вакуум-аппаратов ни на

расход отсасываемых газов из конденсатора, ни на интенсивность теплообмена в нем. Основную массу неконденсирующихся газов, порядка 90-95%, составляет воздух, проникающий через неплотности.

Экспериментальное исследование влияния разрежения на величину присосов показало, что они изменяются с ростом разрежения по тому же закону, который имеет место при истечении газов через отверстия или суживающиеся сопла.

Величина коэффициента теплопередачи в конденсаторе изменялась в пределах от 100 до 500 Вт/м²·К. Низкие значения коэффициента теплопередачи в конденсаторе объясняются тем, что конденсация пара происходила в условиях свободной конвекции при значительной концентрации газов. При этом было отмечено, что температура парогазовой смеси мало изменяется по объему конденсатора. Отсос неконденсирующихся газов только через верхние или нижние оттяжки практически не сказывался на распределении температур, а следовательно и концентраций газов, по паровому пространству конденсатора. Конденсатор соответствует модели аппарата идеального смешения.

Четвертая глава посвящена разработке методики тепловых расчетов поверхностных конденсаторов, расчета количества газов, поступающих в вакуумную систему сахарного завода и анализу работы поверхностных конденсаторов различных типов в условиях сахарного производства.

Для конденсаторов, в межтрубном пространстве которых не имеется устройств для организации движения парогазовой смеси, конденсация пара происходит в условиях свободной конвекции. Методика расчета конденсаторов со свободным движением парогазовой смеси основана на том, что в этом случае концентрация газов практически постоянна во всем объеме парового пространства и конденсатор такого типа соответствует модели аппарата идеального смешения. Из баланса неконденсирующихся газов получена формула для определения концентрации газов в конденсаторе:

$$\epsilon_m'' = \epsilon_m' / [1 - X(1 - \epsilon_m')] \quad /5/$$

Формула /5/ и зависимости для расчета теплообмена при конденсации пара из парогазовой смеси в условиях свободной конвекции, при вынужденном движении жидкости в трубах и теплообмену в цилиндрических трубах легли в основу разработанных методов проектного и поверочного расчетов конденсаторов со свободным

движением парогазовой смеси.

Для расчета конденсаторов с организованным вынужденным движением парогазовой смеси предложен метод детального позонного теплового расчета. Он заключается в том, что поверхность теплообмена с помощью линий тока разбивается на полосы, которые делятся на зоны, для каждой из которых можно считать постоянной интенсивность теплообмена и параметры теплоносителей. Так как в трубных пучках сложной конструкции нельзя заранее знать действительные линии тока и скорости смеси в различных точках /зонах/ пучка, предложено уточнять линии тока и расходы смеси по отдельным полосам исходя из принципа минимума и равенства аэродинамического сопротивления всех полос тока.

Для расчета теплообмена в отдельных зонах используются зависимости, выведенные из уравнений /1/-/3/.

Для расчета диффузионного термического сопротивления:

$$R_{\text{диф}} = \frac{4204 \cdot 10^{10} \cdot q^{2/3}}{Re_{\text{см}} \left(\nu \frac{K_s}{d_n} \cdot \frac{Q_2 \epsilon_0}{\epsilon_0^{0.47}} \right)^{5/3} \cdot T^{4/3} (1 - \epsilon_0)} \cdot f(T) \quad /6/$$

Термического сопротивления пленки конденсата:

$$R_{\text{пл}} = \frac{2795 \cdot 10^{-6} \sqrt{q} \cdot d_n (\sum G/G_i)^{-0.07}}{t^{0.359} [1 + 0.0095 \varphi (Re, Nu_n)]} \quad /7/$$

Термические сопротивления стенки трубы, теплоотдача от внутренней поверхности трубы к охлаждающей воде определяются также как и при расчете конденсаторов со свободным движением парогазовой смеси. Интенсивность теплообмена в данной зоне находится по формуле:

$$q = (T_{\text{см}} - T_b) / (R_{\text{диф}} + R_{\text{пл}} + R_{\text{ст}} + R_{\text{загр}} + R_2) \quad /8/$$

Расчет теплообмена в отдельной зоне проводится методом последовательных приближений, после чего определяется количество конденсировавшегося пара в данной зоне и параметры смеси на входе в следующую зону.

Так как количество неконденсирующихся газов является одним из важнейших факторов, определяющих работу конденсационной

установки и может значительно изменяться в зависимости от мощности завода, аппаратного оформления, условий работы и пр. факторов, разработана методика приближенного расчета поступления неконденсирующихся газов в вакуумную систему сахарного завода. Методика заключается в определении величин отдельных источников неконденсирующихся газов. Общее количество присосов воздуха определяется путем суммирования его поступления через отдельные элементы оборудования и трубопроводов с учетом величины разрежения. Рассчитаны суммарные присосы в типовое оборудование, используемое в сахарной промышленности.

С применением разработанных методик тепловых расчетов поверхностных конденсаторов проведен анализ их работы в различных условиях. Изменение значений коэффициентов теплопередачи в конденсаторах со свободным движением парогазовой смеси в зависимости от ϵ'_m и X представлено на рис.6. Для аналогичных условий проведены расчеты коэффициентов теплопередачи с организованным вынужденным движением смеси при различных конструкциях трубных пучков. Результаты расчета для конденсатора с пучком постоянной скорости парогазовой смеси приведены на рис.7.

При малых значениях начальной концентрации газов различие в величинах коэффициентов теплопередачи сравниваемых конденсаторов невелико. Однако при условиях, соответствующих работе конденсаторов сахарного завода, т.е. при $\epsilon'_m = 0,01+0,05$, конденсаторы со свободным движением парогазовой смеси по своим показателям значительно уступают конденсаторам с организованным вынужденным движением парогазовой смеси.

С использованием детального позонного метода теплового расчета конденсаторов с организованным движением парогазовой смеси были рассчитаны параметры смеси и ход процессов, протекающих при движении смеси вдоль поверхности теплообмена. На рис.8 представлены некоторые результаты расчета пучка постоянной скорости при $\epsilon'_m = 0,05$, $X = 0,995$ и $Re_{cm} = 4200$. Аналогичные расчеты проведены при различных ϵ'_m в пучках постоянной скорости смеси и постоянного сечения. Результаты расчетов показывают, что в условиях, соответствующих работе конденсаторов сахарного завода, наибольшим изменениям /более чем на три порядка/ подвергается величина $R_{диф}$. В начальной части пучка влияние $R_{диф}$ незначительно. Однако, при достижении вы-

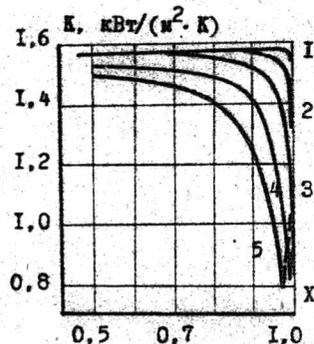
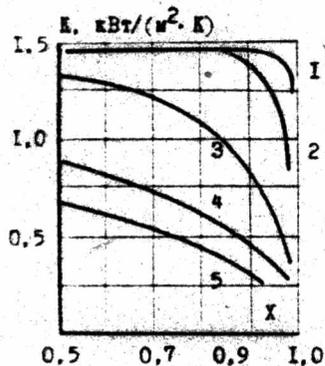


Рис.6. Коэффициент теплопередачи в поверхностном конденсаторе при свободном движении парогазовой смеси в межтрубном пространстве.

1 - $\varepsilon'_M = 10^{-4}$; 2 - $\varepsilon'_M = 10^{-3}$;

3 - $\varepsilon'_M = 10^{-2}$; 4 - $\varepsilon'_M = 5 \cdot 10^{-2}$;

5 - $\varepsilon'_M = 0.1$.

Рис.7. Коэффициент теплопередачи в конденсаторе с организованным вынужденным движением парогазовой смеси в пучке постоянной скорости при $Re_{см} = 4200$.

Обозначения см.рис.6.

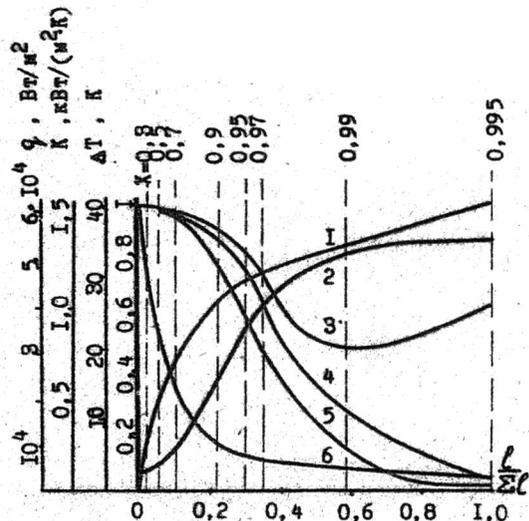


Рис.8. Изменение параметров процесса в пучке постоянной скорости ($Re_{см} = 4200$)

- 1 - относительная поверхность пучка, пройденная парогазовой смесью;
- 2 - массовая концентрация газов;
- 3 - коэффициент теплопередачи;
- 4 - температурный напор;
- 5 - тепловой поток;
- 6 - поперечное сечение пучка.

соких значений степени конденсации пара из смеси, интенсивность теплообмена резко уменьшается как за счет увеличения $R_{\text{диф}}$, так и за счет быстрого падения температурного напора.

Сравнение пучков постоянного сечения и постоянной скорости показывает, что последний является более эффективным. При одинаковых скоростях смеси на входе пучек постоянной скорости имеет значительно меньшую площадь поверхности теплообмена. Для повышения интенсивности теплообмена в пучке постоянного сечения следует увеличивать скорость смеси. Однако при этом значительно увеличивается аэродинамическое сопротивление пучка. Несмотря на все преимущества пучка постоянной скорости, изготовление конденсатора с таким пучком не всегда возможно ввиду сложности его конструкции.

В пятой главе сформулированы основные требования к конструкции поверхностного конденсатора для сахарной промышленности. В частности, эти требования использованы при разработке поверхностного конденсатора НКСП-1000 для сахарного завода мощностью 3000 тонн переработки свеклы в сутки.

Описана предложенная схема конденсационной установки свеклосахарного завода с поверхностными конденсаторами. Достоинством схемы является возможность обеспечения работы поверхностного конденсатора в оптимальном режиме при подаче необходимого для производственных нужд количества воды, нагретой до требуемой температуры без увеличения расхода тепла на технологические нужды.

Составлена математическая модель предложенной конденсационной установки с поверхностными конденсаторами. В результате ее реализации на ЭЦВМ уточнено влияние различных "внешних" факторов на экономичность конденсационной установки /рис.9/. Влияние этих факторов исследовалось при оптимальных значениях кратности охлаждения, скорости охлаждающей воды и степени конденсации пара из смеси. При изменении величин "внешних" факторов меняются значения оптимальных режимов работы поверхностного конденсатора, например, кратности охлаждения /рис.10/.

Опытный образец поверхностного конденсатора НКСП-1000 прошел промышленные испытания и был сдан межведомственной комиссии на Яготинском сахарном заводе им.Ильича в производственный сезон 1978-79 гг.

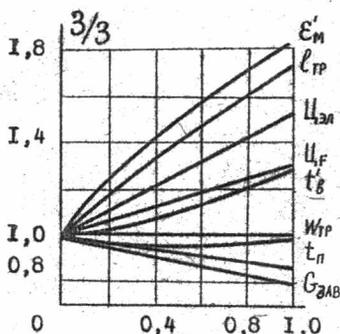


Рис. 9. Влияние "внешних" факторов на экономичность конденсационной установки

$\epsilon_m = 0,1 \pm 3,0\%$
 $\epsilon_{гр} = 1,0 \pm 5,0\%$
 $\text{Ц}_{эл} = 0,7 \pm 2,0 \text{ коп./кВт-ч}$
 $\text{Ц}_{ф} = 20 \pm 50 \text{ руб./м}^2$
 $t'_г = 0 \text{ -- } + 20 \text{ }^\circ\text{C}$
 $W_{гр} = 1,0 \pm 2,0 \text{ м/с}$
 $t_п = 55 \pm 65 \text{ }^\circ\text{C}$
 $G_{зав} = 0 \pm 120\% \text{ к м. с.}$

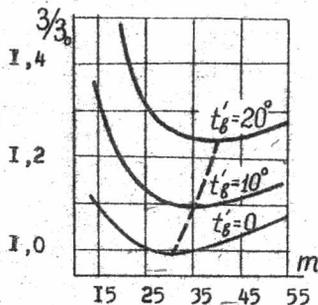


Рис. 10. Зависимость относительных приведенных затрат от кратности охлаждения и начальной температуры воды.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

1. Проведено экспериментальное исследование конденсации пара в горизонтальном шахматном пучке труб из потока паровоздушной смеси с концентрацией неконденсирующихся газов до 90%. Экспериментальные данные обработаны в виде уравнения подобия массоотдачи пара из смеси и формулы для условного коэффициента теплоотдачи.

Характер влияния скорости потока парогазовой смеси и конструкции трубного пучка свидетельствует о наличии приближенного подобия процессов конвективного переноса тепла и вещества.

2. Исследована конденсация чистого движущегося пара в шахматном пучке горизонтальных труб. Спутный поток пара интенсифицирует теплообмен в пленке конденсата в области от лобовой точки до точки отрыва пограничного слоя и уменьшает поле отрыва пограничного слоя.

3. Для коэффициента теплопередачи при конденсации чистого движущегося пара на горизонтальной трубе выявлено две области с различным характером влияния скорости пара и температурного напора. В первой, с ростом скорости пара коэффициент теплоотдачи возрастает, причем, степень влияния скорости увеличивается с ростом температурного напора. Во второй области влияние скорости парового потока в явной форме не проявляется и коэффициент теплоотдачи определяется величиной температурного напора.

4. При конденсации чистого движущегося пара на горизонтальной трубе происходит значительное изменение по окружности трубы местных значений параметров процесса: температурного напора, теплового потока и коэффициента теплопередачи. Величина изменений возрастает с ростом скорости пара и температурного напора.

5. Разработана методика детального позонного теплового расчета поверхностного конденсатора с организованным вынужденным движением парогазовой смеси. Предложено уточнять линии тока и скорости парогазовой смеси исходя из условия равенства и минимума перепадов давления для всех полос тока при прохождении смеси через трубный пучок.

6. Установлено, что конденсаторы со свободным движением парогазовой смеси могут быть представлены как аппараты идеального смешения /в стационарном режиме работы/. Исходя из этого условия разработана методика теплового расчета поверхностных конденсаторов со свободноконвективным движением парогазовой смеси.

7. Численный анализ работы поверхностных конденсаторов различных конструкций показывает, что в условиях сахарного производства более эффективными являются конденсаторы с организованным вынужденным движением парогазовой смеси. Причем, сечение трубного пучка должно суживаться по ходу смеси с целью поддержания ее постоянной скорости.

8. На основании экспериментальных исследований, анализа литературных данных и расчетов, установлено, что в стационарных условиях работы конденсационной установки сахарного завода основную массу неконденсирующихся газов /до 90-95%/ составляет воздух проникающий через неплотности - присосы. Концентрация неконденсирующихся газов в исходном паре, колеблется в пределах $\pm 5\%$ к массе смеси и зависит от конструкции вакуумной системы, подключенного к ней оборудования и режима его работы.

Предложена методика расчета количества неконденсирующихся газов, поступающих в вакуумную систему сахарного завода.

9. Разработана рациональная схема конденсационной установки свеклосахарного завода с поверхностным конденсатором, которая позволяет максимально использовать тепло вторичных паров из вакуум-аппаратов и последнего корпуса выпарной станции, а также обеспечивает возможность работы поверхностного конденсатора в оптимальном режиме.

10. Составлена математическая модель конденсационной установки сахарного завода с поверхностным конденсатором, с помощью которой сделана оценка величин оптимальных параметров работы поверхностного конденсатора и проведен анализ влияния различных "внешних" факторов.

11. Разработан, испытан в производственных условиях и принят межведомственной комиссией опытный образец поверхностного конденсатора ПКСП-1000 для сахарного завода мощностью 3000 тонн переработки свеклы в сутки. Экономический эффект от применения поверхностного конденсатора ПКСП-1000 составляет 13,61 тыс.руб. в год.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$Nu = \alpha d / \lambda$ - число Нуссельта; $Mu_D = \beta d / D$ - Нуссельта диффузионное; $Pr = \nu / a$ - Прандтля; $Re = Wd / \nu$ - Рейнольдса; $Gal = g l^3 / \nu^2$ - Галлилея; $K = \gamma / C \Delta T$ - фазового перехода; $T_D = \Delta P_n / P_{cm}$ - учитывающее влияние поперечного потока вещества; $\epsilon_m = M_r / M_{cm}$; $\epsilon_v = P_r / P_{cm}$ - массовая и объемная концентрации газов; $X = G_k / G_n$ - степень конденсации пара; q - удельный тепловой поток, Вт/м²; α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); β - коэффициент массоотдачи, м/с; D - коэффициент диффузии, м²/с; R - термическое сопротивление, (м²·К/Вт); P - давление, Па; W - скорость, м/с; d - диаметр, м; S_1, S_2 - поперечный и продольный шаги, м; γ - теплота конденсации, Дж/кг; C - теплоемкость, Дж/(кг·К); λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с; M - масса, кг; G - расход, кг/с; γ - азимут, град.

Индексы: п - пар; г - газ; к - конденсат; см - парогазовая смесь; наб - набегавший; / - по теории конденсации чистого неподвижного пара; ' , '' - начальное и конечное состояние.

По материалам диссертации опубликованы работы:

1. Исследование конденсации вторичных паров последнего корпуса выпарной станции и вакуум-аппаратов в кожухотрубном поверхностном конденсаторе/ А.В.Карпенко, Ф.Т.Тимошенко, А.С.Тимошенко, В.Н.Филоненко, К.О.Штангеев. - Тезисы докладов смотря - конкурса молодых специалистов ВНПО "Сахар" и сахарных заводов, Киев: 1974, с.162.

2. Горюх В.Н., Штангеев К.О. Количество газов, поступающих в конденсаторную установку сахарного завода. - Сахарная промышленность, 1976, № 4, с.60-64.

3. О применении поверхностных конденсаторов на свеклосахарных заводах./ В.Н.Горюх, А.И.Левицкая, А.П.Пархомец, А.И.Сорокин, О.М.Сорокина, Ф.Т.Тимошенко, Б.Ф.Ус, К.О.Штангеев. - Сахарная промышленность, 1976, № 9, с.43-47.

4. К.О.Штангеев, Исследование конденсации пара из паровоздушных смесей. - В кн. Вопросы повышения эффективности сахарного производства, Киев: 1977, с.67.

5. Горюх В.Н., Штангеев К.О. Экспериментальное изучение тепло-и массообмена при конденсации пара из потока паровоздушной смеси. - Тезисы VI Всесоюзной конференции по теплообмену и гидравлическому сопротивлению в элементах энергетических машин и аппаратов. Секция П. Л.: 1978, с.80-81.

6. Штангеев К.О. Исследование теплообмена при конденсации чистого движущегося пара в горизонтальном трубном пучке. В кн. Вопросы повышения эффективности сахарного производства. М. : 1979, с.108-109.

7. Штангеев К.О. Расчет конденсаторов с организованным движением парогазовой смеси. - В кн. Вопросы повышения эффективности сахарного производства. М. : 1979, с.126-128.

8. Горюх В.Н., Штангеев К.О. Об оценке эффективности поверхностных конденсаторов для сахарных заводов. - В кн. повышение эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в сахарной промышленности. М.: Пищевая промышленность, 1979, с.40-49.

ВФ 28895 Подписано и печати 10.03.80г. Заказ № 392
Тираж 120 Объем I п.л. Формат 60x84 1/16

Ротапринт СММ НПО "Сахар", Киев-24, Энгельса, 20