

Нвт.
Д 93

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
Ордена Ленина институт общей и неорганической химии
им. Н.С. Курнакова

На правах рукописи

ДВЯЧЕНКО Юрий Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ
КОНДЕНСАЦИИ В ДИНАМИЧЕСКОМ ДВУХФАЗНОМ СЛОЕ НА
ОХЛАЖДАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

05.17.03-Процессы и аппараты химической технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА 1981 год

Работа выполнена в Новосибирском электротехническом институте.

Научный руководитель : к.т.н., доц. Хозе А.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Колыхан Л.И.,
кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Холпанов Л.П.

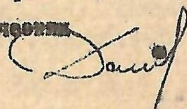
Ведущая организация: Институт теплофизики СОАН СССР

Защита состоится 10 декабря 1981г. на заседании
специализированного Совета К 002.37.02 по химии и
технологии неорганических веществ Ордена Ленина Ин-
ститута общей и неорганической химии им. Н.С.Курнакова,
АН СССР Москва, Ленинский проспект, 31/

Диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан 5 ноября 1981г.

Ученый секретарь специализированного совета,
кандидат химических наук



Г.П. Данилов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Процесс конденсации находит широкое применение в целом ряде отраслей современной промышленности, таких как химическая технология, энергетика, опреснительные установки, холодильная техника и т.д. Наиболее часто в промышленных аппаратах реализуется пленочная конденсация паров. При конденсации чистых паров веществ процесс протекает достаточно интенсивно, однако наличие в паре даже незначительных концентраций неконденсирующихся газов приводит к резкому уменьшению коэффициента теплоотдачи.

В промышленных аппаратах практически всегда в паре имеется неконденсирующийся газ, а в ряде химических процессов, таких как выпаривание, ректификация протекает процесс конденсации более легкокипящего компонента из бинарных и многокомпонентных паровых смесей.

В этих условиях задачи интенсификации процесса конденсации из парогазовых смесей, а также разработка и изучение принципиально новых способов организации процесса являются очень актуальными. Решение этих задач позволит увеличить единичную мощность конденсационных устройств, повысить их эффективность, уменьшить вес и габариты с соответствующей экономией дорогостоящих материалов.

Цель работы заключается в экспериментальном исследовании процесса конденсации из паровоздушных смесей в динамическом двухфазном слое с отводом теплоты фазового перехода охлаждающими элементами и получения количественных закономерностей процесса для расчета аппаратов данного типа.

Научная новизна. Впервые выполнено экспериментальное исследование нового способа организации процесса конденсации. В результате исследований доказано, что рассматриваемый способ имеет ряд преимуществ по сравнению с используемыми в настоящее время. В частности значение коэффициентов теплоотдачи к охлаждающим элементам соизмеримы с пленочной конденсацией чистого пара, однако отличительной особенностью является то, что в рассматриваемых усло-

Влияние интенсивности теплообмена не зависит от содержания в паре неконденсирующихся газов.

Экспериментально установлены основные закономерности процесса конденсации в динамическом слое, получены расчетные зависимости для коэффициента теплоотдачи к одиночным охлаждающим элементам и трубным пучкам.

Получены новые опытные данные о структуре и основных гидродинамических характеристиках пристенной области динамического двухфазного слоя.

Получены зависимости для расчета основных гидродинамических характеристик динамического двухфазного слоя при пониженных давлениях.

Практическая ценность. Полученные в работе экспериментальные данные и технические решения использованы при опытно-конструкторской разработке конденсационных устройств и эффективных воздухоотделителей, использующих предлагаемый способ организации процесса конденсации.

Автор защищает:

- а) способ организации процесса конденсации в динамическом двухфазном слое с отводом теплоты фазового перехода охлаждающими поверхностями;
- б) результаты экспериментальных исследований процессов теплообмена при конденсации в динамическом двухфазном слое паровоздушных смесей;
- в) результаты экспериментального исследования структуры и гидродинамических характеристик пристенной области двухфазного слоя;
- г) результаты экспериментального исследования основных гидродинамических характеристик двухфазного слоя.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на У Всесоюзной конференции по теплообмену (Минск, 1976 г.); на Всесоюзной конференции по теплообмену и гидравлическому сопротивлению в элементах энергетических установок (Ленинград, 1979 г.), на XXI теплофизическом семинаре (Новосибирск, ИТФ, СО АН СССР, 1978 г.), на конференции молодых специали-

алистов (Новосибирск, ИТФ, СО АН СССР, 1978 г.), на расширенном семинаре лабораторий ИЯЭ АН БССР, 1978 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано пять работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и приложений, содержит 161 страниц текста, 23 таблиц, 53 рисунка, в списке литературы, 77 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования конденсации в динамическом двухфазном слое, сформулированы основные цели исследования.

Первая глава содержит обзор работ по исследованию пленочной конденсации чистого пара и пара, содержащего неконденсируемый газ, а также способов конденсации при непосредственном контакте с охлаждающей жидкостью.

Конденсация является сложным процессом, сопровождающимся одновременным переносом тепла и массы в паровой фазе, переносом тепла в конденсате, тепловым и динамическим взаимодействием фаз и сложностью гидродинамической обстановки в целом.

В настоящее время имеется большое число работ, посвященных аналитическому и экспериментальному изучению процесса конденсации.

Впервые аналитическое решение задачи конденсации чистого неподвижного пара было выполнено Нуссельтом. В решении Нуссельта принят ряд допущений, позволяющих существенно упростить математическую формулировку задачи и получить аналитическое выражение для коэффициента теплоотдачи при пленочной конденсации.

Все последующие исследования были направлены в основном на определение границ применимости приближенного решения Нуссельта и получение уточненных решений. Результаты этих исследований приведены в работах Кружлина Г.Н. (1937 г.), *Sparrow E.M.*, *Gregg I.L.* (1959 г.), Дабунцова Д.А. (1956 г.), *Chen M.M.* (1961 г.), Бермана Л.Д. (1962 г.) и др.

Наличие вынужденного движения пара существенно усложняет гидродинамическую обстановку. В результате динамического взаимодействия фаз происходит перестройка режима течения пленки конденсата от ламинарного до волнового и затем к турбулентному.

Модели процесса конденсации движущегося пара были предложены в работах Шекриладзе И.Г. (1967г.) и Бермана Л.Д. (1971г.). Но, как показано в выполненном Берманом Л.Д. (1979г.) анализе, имеются расхождения между расчетными и экспериментальными данными, которые могут быть объяснены лишь на основе дальнейших исследований.

Влияние неконденсирующихся газов на процесс конденсации рассмотрено в работах Бермана Л.Д., Кутателадзе С.С., Исаченко В.П., Бобе Л.С., Малышева Д.Д. и др.

Процесс конденсации может быть организован при непосредственном контакте пара с охлаждающей жидкостью. В зависимости от способа организации процесса можно выделить конденсацию на диспергированной жидкости, на струях и в барботажном слое.

Сравнительная оценка двух последних способов приведена в работе Филаткина В.Н. и Пилип И.И. При сопоставимых условиях интенсивность процесса конденсации в барботажном варианте существенно больше.

В настоящее время имеется ограниченное число работ по исследованию конденсации в барботажном слое: Кутателадзе С.С., Зысин В.А. (1939 г.), Филаткин В.Н., Пилип И.И. (1974 г., 1975 г.), Бартоломей Г.Г., Горбунов В.И. (1969 г.).

В этих работах рассматривалась конденсация в проточном по жидкости барботажном слое и в слое недогретой жидкости. Такой способ организации конденсации возможен лишь когда конденсат и охлаждающая жидкость легко разделимы или однородны. Более универсальным с этой точки зрения является способ организации процесса конденсации в барботажном слое с отводом теплоты фазового перехода охлаждающими элементами, расположенными в слое. В этом случае охлаждающей средой может являться любая жидкость или газ. Несмотря на перспективность данного способа, в литературе отсутствуют данные о проведении подобных исследований.

Отсутствие литературных данных ставило необходимость экспе-

риментального исследования предлагаемого способа организации процесса конденсации в полном объеме, т.е. исследование процессов теплообмена и исследование гидродинамики динамического двухфазного слоя.

Вторая глава содержит результаты экспериментального исследования основных гидродинамических характеристик (среднего объемного газосодержания и гидравлического сопротивления) динамического двухфазного слоя при пониженных давлениях.

Выполнение гидродинамических экспериментов на газожидкостных системах водяной пар – вода связано с рядом технических трудностей, поэтому исследование основных закономерностей выполнялось первоначально на системах воздух – жидкость.

Схема экспериментальной установки показана на рис. I.

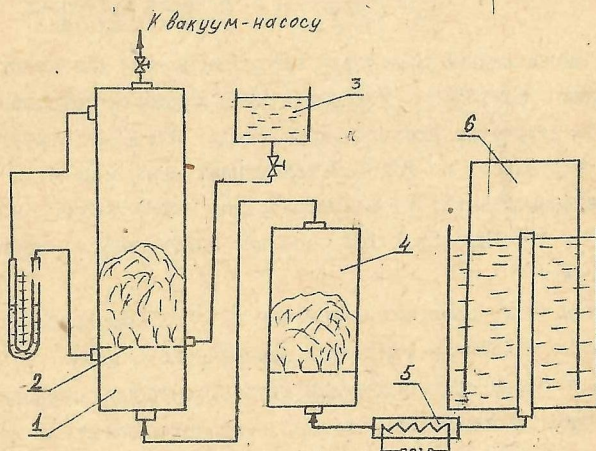


Рис. I. Схема экспериментальной установки для исследования гидродинамики динамического двухфазного слоя.
1 – рабочая колонная, 2 – газораспределительная решетка, 3 – бак с жидкостью, 4 – вспомогательная колонна для насыщения воздуха, 5 – электронагреватель, 6 – газгольдер для измерения расходов воздуха.

Для изучения влияния физических свойств жидкой фазы использовались вода, водные растворы глицерина и олеата натрия. Эксперименты выполнены при следующих исходных данных:

приведенная скорость газовой фазы - $W_0'' = 0,5 \div 3,0 \text{ м/с}$;

высота исходного слоя жидкости - $h_0 = 5 \div 250 \text{ мм}$;

давление в колонне - $P = 0,05 \div 1,0 \text{ бар}$.

При давлениях $P = 0,2 \div 1,0 \text{ бар}$ получены зависимости для среднего объемного газосодержания:

$$\bar{\varphi} = 1,45 K^{0,2} (h_0/l_0)^{0,17}, \text{ при } h_0/l_0 < 12; \quad (1)$$

$$\bar{\varphi} = 1,2 K^{0,2} (h_0/l_0)^{0,1}, \text{ при } h_0/l_0 > 12, \quad (2)$$

где

$$K = \frac{W_0'' \sqrt{\rho''}}{\sqrt{g \sigma (\rho' - \rho'')}} - \text{число подобия, характеризующее соотношение динамического напора газовой фазы с силами тяжести и поверхностного натяжения};$$

$$l_0 = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}} - \text{диаметр свободных образований газа в жидкости.}$$

Количественные изменения закономерностей для малых $h_0 < 40 \text{ мм}$ и больших $h_0 > 40 \text{ мм}$ исходных слоев жидкости обусловлены перестройкой структуры динамического слоя. Изучение структуры выполнялось визуально, по фотоснимкам динамического слоя.

Зависимость (2) удовлетворительно согласуется с известными данными и с точностью $\pm 15\%$ обобщает полученный экспериментальный материал.

Уменьшение давления в колонне до $P < 0,2 \text{ бар}$ приводит к изменению режима течения и структуры динамического слоя. В этих условиях весь объем слоя подвержен крупномасштабным периодическим пульсациям, имеющим форму вихря, распространяющегося на всю высоту слоя. Основной причиной структурных изменений является значительное уменьшение динамического напора газовой фазы.

При обработке экспериментальных данных для давлений $P < 0,2 \text{ бар}$ получена следующая зависимость для средней высоты пенного слоя:

$$\bar{H}_0/l_0 = 11,0 K^{0,3} (h_0/l_0)^{0,72}, \text{ при } h_0/l_0 < 12; \quad (3)$$

$$\bar{H}_0/l_0 = 6,2 K^{0,3} (h_0/l_0)^{0,9}, \text{ при } h_0/l_0 > 12 \quad (4)$$

Для расчета гидравлического сопротивления динамического слоя получены зависимости:

$$Eu = 3,0 K^{-2,0} (h_0/l_0)^{0,67}, \quad \text{при } h_0/l_0 < 12; \quad (5)$$

$$Eu = 1,5 K^{-2,0} (h_0/l_0)^{0,85}, \quad \text{при } h_0/l_0 > 12. \quad (6)$$

Зависимость (6) хорошо согласуется с зависимостью для гидравлического сопротивления динамического слоя полученной в работе Хозе А.Н., Шарова Ю.Н.

При изучении гидродинамических характеристик на газожидкостной системе водяной пар – вода установлено, что расчет среднего объемного газосодержания и гидравлического сопротивления динамического слоя можно выполнять по зависимостям (1,2,5,6) для давлений $p > 0,2 \text{ бар}$.

Для давлений $p < 0,2 \text{ бар}$ среднее газосодержание и гидравлическое сопротивление меньше рассчитанных по (1,2,5,6) на $15 \pm 20\%$ и обобщается аналогичными зависимостями.

В третьей главе приведены результаты экспериментального исследования гидравлических характеристик пристенной области динамического двухфазного слоя.

Исследование структуры и гидродинамических характеристик пристенной области проведено с помощью датчиков электропроводности, установленных на охлаждающем элементе.

Исследования выполнялись на специальной экспериментальной установке; охлаждающий элемент представлял из себя одиночную горизонтальную трубку с наружным диаметром $d = 12 \text{ мм}$, помещенную в объеме динамического слоя. Датчики электропроводности размещались на нижней, боковой и верхней образующей поверхности трубки в среднем сечении.

Сигнал с датчиков фиксировался быстродействующим самопишущим прибором Н-338. Расшифровка записей позволяла получать данные о толщине пленки жидкости на поверхности элемента при прохождении в зоне действия датчика паровых образований, а также данные о средней частоте прохождения паровых образований на различных расстояниях от поверхности охлаждающего элемента.

Для сопоставления частотных характеристик дополнительно использовались датчики электропроводности игольчатого типа, установленные за пределами пристенной области. Анализ записи сигналов этих датчиков позволял получить данные о средней частоте прохождения паровых образований в основном объеме динамического слоя.

Эксперименты выполнялись в неизотермических условиях, при конденсации паровой фазы, в диапазоне давлений в колонне $P = 0,1 - 1,05 \text{ бар}$, приведенных скоростях пара $W_0'' = 0,8 - 3,5 \text{ м/с}$, средней разности температур между паром и поверхностью охлаждающего элемента $\Delta t = 10^\circ \text{C}$.

На рис. 2 приведена характерная гистограмма распределения относительной частоты прохождения (в каждом интервале расстояний) по расстоянию от поверхности элемента.

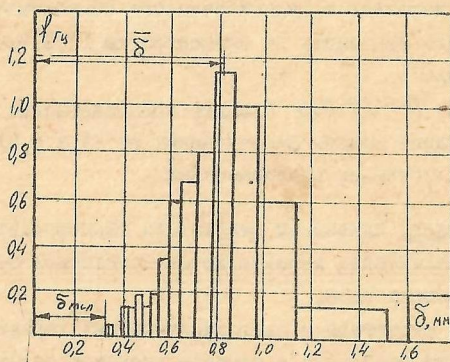


Рис. 2. Характер изменения относительной частоты прохождения по расстоянию от поверхности.

Эти данные относятся к лобовой образующей цилиндрической поверхности по отношению основного (подъемного) движения паровых образований.

Как следует из рисунка по виду распределение относительной частоты прохождения подчиняется нормальному закону распределения. Расстояние $\bar{\delta}$, соответствующее максимуму относительной частоты ϕ_{max} , характеризует среднее расстояние между поверхностью проходящих образований и поверхностью элемента для данных условий. Расстояние δ_{min} соответствует толщине невозмущаемой пленки жидкости на поверхности элемента.

Для боковой и кормовой образующих элемента значение τ_{max} непрерывно уменьшается, что объясняется затенением их относительно основного направления движения паровых образований.

Такой характер изменения частоты прохождения определяет и изменение коэффициента теплоотдачи по периметру элемента, который имеет максимальное значение в лобовой части и минимальное в кормовой.

Турбулизирующее влияние движущихся паровых образований в пристенной области определяется абсолютной частотой прохождения (суммарной частотой, с учетом образований проникающих на меньшее расстояние).

Характер изменения абсолютной частоты прохождения в пристенной области динамического слоя показан на рис.3.

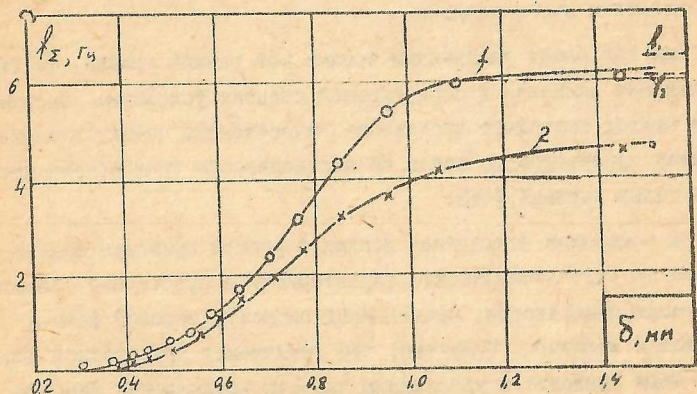


Рис.3. Характер изменения абсолютной частоты прохождения по расстоянию от поверхности.

- I - лобовая образующая,
- II - кормовая образующая,
- f_1, f_2 - средние частоты прохождения в основном объеме динамического слоя.

Анализ полученных данных позволяет выделить в пристенной области динамического слоя наиболее характерные по структуре зоны.

К первой зоне можно отнести невозмущаемую жидкостную пленку на поверхности элемента толщиной $\delta_{\text{тл}}$. Перенос тепла в ней осуществляется в основном теплопроводностью, поэтому именно в ней сосредоточена основная доля общего термического сопротивления.

Второй зоной является пленка жидкости с толщиной δ . В этой зоне происходит наиболее интенсивное увеличение частоты прохождения паровых образований и наряду с теплопроводностью происходит конвективный перенос тепла.

В третьей зоне абсолютная частота прохождения увеличивается и на границе пристенной области становится равной средней частоте прохождения в основной массе динамического слоя. В этой зоне преобладает молярный перенос тепла и её термическое сопротивление незначительно.

Так как между указанными зонами нет резких границ, то такое деление является в определенной степени условным. Однако такой подход позволяет произвести качественную оценку влияния основных параметров процесса на интенсивность теплообмена при конденсации паровой фазы.

На основании полученных данных в работе проведен анализ влияния на гидродинамические характеристики пристенной области ориентации поверхности, приведенной скорости паровой фазы и давления в колонне. Получено, что увеличение приведенной скорости пара приводит к увеличению частоты прохождения паровых образований и вызывает некоторое увеличение среднего коэффициента теплоотдачи к охлаждающей поверхности.

Увеличение давления и соответствующее увеличение температуры насыщенного пара приводит к увеличению частоты прохождения паровых образований и уменьшению толщины невозмущаемой пленки жидкости. Интенсивность теплообмена при этом увеличивается за счет уменьшения термического сопротивления пристенной области.

В данных исследованиях жидкой фазой является конденсат водяного пара, электропроводность которого очень низка. Поэтому погрешность измерения толщины жидкой пленки довольно значительна и в работе выполнен лишь качественный анализ полученных результатов.

В четвертой главе представлены результаты исследования теплообмена между динамическим слоем и охлаждающими элементами при конденсации паровой фазы, а также влияние неконденсирующегося газа.

Исследования выполнялись на специальной экспериментальной установке. Схема установки показана на рис. 4.

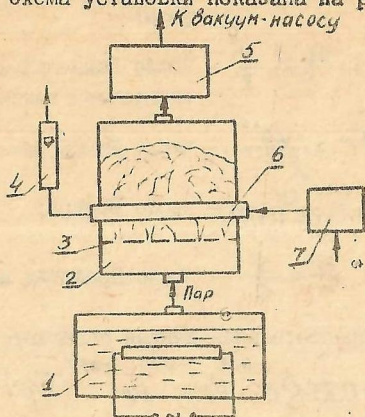


Рис. 4. Схема экспериментальной установки.
1 - парогенератор; 2 - рабочая колонна; 3 - газораспределительная решетка; 4 - ротаметр; 5 - вспомогательный конденсатор; 6 - охлаждающий элемент; 7 - термостат.

Для выявления основных закономерностей теплообмена при конденсации в динамическом слое были проведены эксперименты на одиночной цилиндрической поверхности.

Эксперименты выполнялись при давлении в колонне $P = 0,05 - 10 \text{ атм}$, приведенной скорости пара $W_0 = 1,4 - 8,5 \text{ м/с}$, разности температур $\Delta t = 10^\circ \text{C}$.

При изучении распределения локальных коэффициентов теплоотдачи по периметру охлаждающего элемента получено, что максимальное значение соответствует лобовой образующей, а минимальное - кормовой. Эти данные согласуются с полученными в третьей главе результатами.

Для обработки экспериментальных данных использовалась, полученная в работах Хозе А.Н., функциональная зависимость для теплообмена между поверхностями и жидким слоем при воздушной

испарительном охлаждении в виде:

$$St^* = f[Re^*, Fr^*, We, Pr', (\frac{\rho' - \rho''}{\rho'})], \quad (7)$$

где

$$St^* = \frac{I}{W_0'' C_p \rho'} - \text{число Стантона, отнесенное к приведенной скорости паровой фазы};$$

$$Re = \frac{W_0'' d}{\nu'} - \text{Число Рейнольдса в сочетании с комплексом вязкости};$$

$$Fr = \frac{W_0''^{*2,0}}{g d} - \text{число Фруда для паровой фазы};$$

$$We = \frac{\sigma}{(\rho' - \rho'') d^2} - \text{число Вебера};$$

$$Pr' = \frac{\nu'}{a'} - \text{число Прандтля для жидкой фазы}.$$

Полученные экспериментальные данные обобщаются зависимостью:

$$St^* = 0,75 Re^{*-0,29} Fr^{*-0,29} Pr'^{-0,58} (\rho'/\rho'')^{0,17} \quad (8)$$

Отклонение экспериментальных точек от обобщающей зависимости не превышает $\pm 15\%$. В качестве характерного размера принят диаметр охлаждающего элемента d . Все физические свойства отнесены к средней температуре пристенной области $\bar{t} = (t_{\text{пар}} - t_{\text{ст}})/2$

Практическая реализация данного метода конденсации основана на использовании системы охлаждающих элементов, скомпонованных в трубный пучок. Поэтому на экспериментальной установке, схема которой приведена на рис. 4, было проведено исследование теплообмена к трубному пучку при конденсации паровой фазы. Эксперименты выполнялись на ряде шахматных трубных пучков с различным числом рядов и различным диаметром трубок. Характеристики пучков приведены в табл. I.

Таблица I

№ п/п	Число рядов	Относительный шаг		Диаметр трубки, мм	Сечение колонны, мм ²
		вертик.	горизонт.		
1	2	3	4	5	6
1	7	2,0	2,0	12	100 x 100
2	6	2,0	2,0	10	80 x 80
3	5	2,0	2,0	12	80 x 80

1	2	3	4	5	6
4	10	2,0	2,0	10	100 x 100
5	4	2,25	2,25	20	200 x 200

В работе рассматривалось изменение коэффициента теплоотдачи по рядам трубных пучков. На основании полученных данных можно сделать вывод, что интенсивность теплообмена практически не зависит от расположения элемента по высоте динамического слоя.

Для рядов труб, расположенных в основной массе слоя, изменение коэффициентов теплоотдачи незначительное (в пределах 6%).^а В этом случае, с достаточной степенью точности, теплообмен трубного пучка можно характеризовать средним для всех рядов коэффициентом теплоотдачи.

Эти данные относятся к конденсации пара содержащего воздух, при этом гидродинамические характеристики динамического слоя не претерпевают существенных изменений по мере конденсации пара.

При конденсации чистого пара, особенно в режимах полной конденсации, коэффициент теплоотдачи может изменяться по рядам в широких пределах. За пределами длины пути конденсации ряды расположены в однофазной среде (конденсате), и коэффициент теплоотдачи к ним уменьшается в 2 ÷ 2,5 раза.

В результате обработки полученного экспериментального материала получена зависимость для расчета среднего коэффициента теплоотдачи по рядам трубного пучка в виде:

$$St^* = 0,27 Re^{*-0,3} Fr^{*-0,3} Pr^{*-0,17} \quad (9)$$

Эта зависимость обобщает экспериментальные данные с точностью ± 20%. В качестве характерной скорости принята скорость парогазовой смеси, отнесенная к узкому сечению пучка. Характерным размером является диаметр теплообменного элемента.^б Все теплофизические характеристики отнесены к средней температуре \bar{t} .

Зависимость (9) получена для давлений $P = 0,03 - 0,3$ бар, приведенных скоростей парогазовой смеси $W_0^* = 4,5 - 23$ м/с. Диапазон изменения чисел подобия:

$$St^* = (0,57 - 4,0) \cdot 10^{-3}; \quad Re^* = (0,1 - 1,7) \cdot 10^4;$$

$$Fr^* = 2,1 - 700; \quad Pr^* = 1,5 - 7,2.$$

Полученная зависимость позволяет рассчитывать для конкретных условий интенсивность теплообмена между динамическим слоем и трубным пучком. Так как процесс конденсации определяется интенсивностью отвода тепла фазового перехода, то по величине отводимого теплового потока можно рассчитывать степень конденсации паровой фазы.

Данная зависимость может быть использована только для расчета конденсации парогазовых смесей. При конденсации чистого пара, особенно в режимах полной конденсации, она неприменима.

В работе проведено исследование влияния неконденсирующегося газа (воздуха) на процесс конденсации в динамическом слое. Эксперименты выполнялись на установке, схема которой показана на рис. 4. Парогазовая смесь требуемого состава подготавливалась путем подвода воздуха в слое воды в парогенераторе.

Для получения сравнительных характеристик были проведены эксперименты по влиянию воздуха на интенсивность теплообмена при пленочной конденсации и конденсации в динамическом двухфазном слое в сопоставимых условиях. Эти данные приведены на рис. 5 для одиночной цилиндрической поверхности.

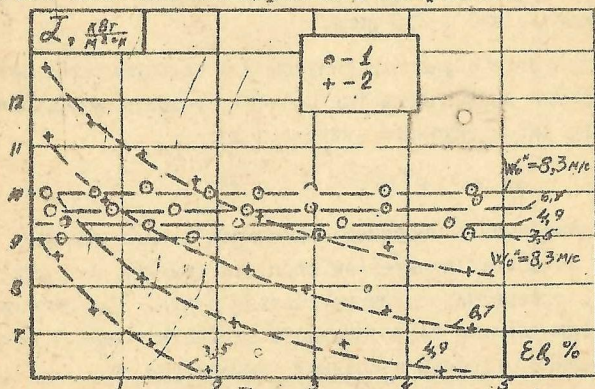


Рис. 5. Зависимость α от относительного содержания воздуха в паре при различной приведенной скорости парогазовой смеси в случае конденсации в динамическом двухфазном слое (1) и при пленочной конденсации (2).

Данные получены на одной и той же поверхности при $P=0,15 ат$,

$t = 10^\circ\text{C}$. Для пленочной конденсации полученные данные аналогичны известным по литературным источникам. При организации процесса конденсации в динамическом слое влияние примесей воздуха на коэффициент теплоотдачи в рассмотренном диапазоне содержания воздуха не обнаружено.

Аналогичные результаты получены и при исследовании теплообмена трубного пучка при конденсации парогазовых смесей. В этих экспериментах рассматривалось начальное содержание воздуха в паре до $\varepsilon_0 = 3,5\%$. В процессе конденсации содержание воздуха на выходе увеличилось до $16,4\%$.

При этом характер распределения коэффициента теплоотдачи по рядам трубного пучка и численные значения его остаются без изменения.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что в рассматриваемом диапазоне содержания в паре воздуха, он не оказывает влияния на интенсивность теплообмена при организации процесса конденсации в динамическом двухфазном слое. В этом случае процесс конденсации определяется только отводом теплоты фазового перехода охлаждающими поверхностями.

Это объясняется специфическими условиями протекания процесса в рассматриваемых условиях. Собственно процесс конденсации протекает на межфазной поверхности динамического слоя, а теплота конденсации отводится через жидкую фазу охлаждающими поверхностями.

Величина суммарной межфазной поверхности динамического слоя намного больше поверхности охлаждающих элементов. Кроме того, интенсивность протекания процесса тепломассообмена на межфазной поверхности также существенно больше за счет высокой степени турбулентности слоя и неустойчивости межфазной поверхности. Таким образом, основным фактором, лимитирующим протекание процесса конденсации в рассматриваемых условиях является отвод теплоты фазового перехода через пристенную область динамического слоя к охлаждающей поверхности.

В пятой главе рассмотрены особенности работы и компоновки конденсационных аппаратов, исполняющих принцип конденсации в

динамическом слое, а также составлена методика расчета этих аппаратов на основе полученных зависимостей.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведены систематические исследования гидродинамики непроточного динамического слоя при пониженных давлениях. Выявлены различия в структуре динамического слоя при небольших исходных слоях жидкости $h_0 < 40 \text{ мм}$ и слоях $h_0 > 40 \text{ мм}$. Получены зависимости для расчета среднего объемного газосодержания газожидкостных систем воздух - жидкость при давлениях $P = 0,2 \div 1,0 \text{ бар}$.
2. Изучено изменение структуры и режимов течения газожидкостной смеси при давлении $P < 0,2 \text{ бар}$ в рассматриваемых исходных условиях. Получены зависимости для расчета средней высоты пенного слоя и гидравлического сопротивления.
3. Выполнены исследования гидродинамики газожидкостных систем водяной пар - вода при пониженных давлениях. Получены зависимости для расчета средней высоты пенного слоя и его гидравлического сопротивления при давлениях $P < 0,2 \text{ бар}$.
4. Проведено исследование гидродинамических характеристик пристенной области динамического слоя. Установлено качественное влияние на структуру пристенной области ориентации поверхности, приведенной скорости газовой фазы, давления.
5. Выполнено исследование теплообмена между динамическим слоем и охлаждающими поверхностями при конденсации паровоздушной смеси. Получены зависимости для расчета теплообмена односторонней поверхности и шахматных трубных пучков при давлении $P = 0,03 \div 0,8 \text{ бар}$.
6. Проведено исследование влияния неконденсирующегося газа на процесс конденсации в динамическом двухфазном слое. Установлено, что в рассматриваемом диапазоне содержания воздуха он не оказывает влияния на процесс конденсации.
7. Составлена методика расчета конденсационных устройств данного типа.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Козе А.Н., Дьяченко Ю.В., Захаров А.С. Исследование конденсации водяного пара в случае поверхностей, помещенных в динамический двухфазный слой. - В кн.: Теплообмен - У. Минск, 1976, т.3, ч.2, с.148-151.
2. Козе А.Н., Шаров Ю.И., Дьяченко Ю.В. Корреляционная зависимость для среднего газосодержания непроточного пенного слоя. - "Изв. вузов, Энергетика", 1978, №10, с.145-147.
3. Козе А.Н., Дьяченко Ю.В. Исследование конденсации в динамическом двухфазном слое на горизонтальной трубке. - "Изв. вузов, Энергетика", 1978, №11, с.140-143.
4. Козе А.Н., Дьяченко Ю.В., Захаров А.С. Теплообмен при конденсации в динамическом двухфазном слое. - В кн.: Теплообмен и гидродинамика при кипении и конденсации. Новосибирск, 1979, с.320-325.
5. Козе А.Н., Дьяченко Ю.В. Исследование конденсации парогазовых смесей в динамическом двухфазном слое. - Тезисы докл. и сообщ. VI Всесоюз. конф. по теплообмену и гидравлич. сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энерг. машин и аппаратов. Л., 1978, с. 91-92.

Помещено в печать 12.10.1981 г. МН 12 883 Формат 840 x 600 1/16
Бумага оберточная. Тираж 100 экз. Усл.-печ. л. I, II.
Уч. изд. л. 0,82. Заказ № 110 Бесплатно.

Отпечатано на ротапринте Новосибирского электротехнического
института
630687, г.Новосибирск, пр.К.Маркса, 20