

66
P50

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМЕНИ С. М. КИРОВА

66.048.5
На правах рукописи

Рикардо Роберто Гонзалез Гутеррез

УДК 621.177:66.048.54

ЗАКОНОМЕРНОСТИ УНОСА И СЕПАРАЦИИ КАПЕЛЬ В ВЫПАРНОМ
АППАРАТЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ

Специальность 05.17.08 – процессы и аппараты
химической технологии

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

Минск 1983

Работа выполнена в Белорусском ордена Трудового Красного Знамени технологическом институте им. С. М. Кирова.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор ЕРШОВ А. И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор ПЛЕХОВ И. М.,
доктор технических наук, профессор ГРИЧЕНКО А. А.

Ведущая организация: Белорусский филиал государственного проектного института Джипробсиосинтез (Белгипробсиосинтез).

Защита состоится "20" декабря 1983 г. в 10 часов на заседании специализированного совета К 056.01.03 по присуждению ученой степени кандидата наук в Белорусском технологическом институте им. С. М. Кирова по адресу: 220630, г. Минск, ул. Свердлова, 13а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского ордена Трудового Красного Знамени технологического института им. С. М. Кирова.

Автореферат разослан "10" ноября 1983 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
к. х. н., с. и. с.

ДЗЕБА Е. Д.

Актуальность проблемы. Задача интенсификации процессов выпаривания в химических, пищевых и смежных с ними производствах связана с проблемой брызгоуноса в выпарных аппаратах. Именно явление уноса капель при несовершенстве методов их сепарации часто становится узким местом, препятствующим увеличению единичной мощности установок и удешевлению процесса. Помимо потери целевого продукта, брызгоунос вызывает загрязнение теплопередающих поверхностей и окружающей среды при сбросе конденсата в открытые водоемы.

В последние годы в выпарных аппаратах были испытаны различные типы сепараторов (жалюзийные, насадочные, циклонные и т. д.), но рекомендации по их выбору весьма противоречивы, поскольку исследователи в своих работах не всегда указывают нагрузку сепараторов по жидкости, от которой зависит эффективность работы сепарационного устройства. В свою очередь нагрузка по жидкости зависит от высоты установки сепаратора над барботажным слоем, от условий генерации капель, которые специфичны в различных конструкциях аппаратов, от физических свойств парожидкостной системы и т. д.

Однако несмотря на отсутствие четких критериев по выбору сепараторов, многие авторы отдают предпочтение сепараторам центробежного типа, особенно когда речь идет о повышении скоростей пара в выпарном аппарате.

В данной работе для выпарных установок большой единичной мощности принята за основу конструкция центробежного сепаратора элементного типа. Следует отметить удобство моделирования таких конструкций: результаты исследования одиночного элемента можно использовать практически без переходных коэффициентов при проектировании многоэлементных конструкций. Среди многочисленных конструктивных вариантов центробежных элементов наиболее перспективным, на наш взгляд, является элемент с перфорированными стенками (дырчатый центробежный элемент - ДЦБЭ), способный работать как в прямооточном, так и противоточном режимах.

Малоизученность ДЦБЭ, а также полное отсутствие информации о работе этих элементов в условиях выпарных аппаратов, особенно с пенообразующими растворами, требует дополнительных его исследований.

Цель работы: определение эффективности сепарации ДЦБЭ в

Научный консультант - к. т. н., доц. Карпенков А. Ф.

68259p

БЕЛОРУССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
им. С. М. Кирова

зависимости от режимных и конструктивных параметров выпарного аппарата, определяющих нагрузку сепаратора по жидкости; разработка инженерной методики расчета центробежного элемента.

Объекты исследований. Объектами исследований являлись опытные установки, моделирующие работу выпарного аппарата на системе вода-воздух с добавками пенообразующих веществ (холодный стенд) и на системе сахарный раствор - водяной пар (горячий стенд). Сравнивались в одинаковых условиях работа ДЦБЭ и противоточного центробежного элемента (ПрЦБЭ).

Научная новизна. Впервые исследован применительно к условиям выпарных аппаратов и газлифтных реакторов дырчатый центробежный сепаратор. Доказана конкурентоспособность исследованной конструкции перед известными типами сепараторов.

Выявлена связь между нагрузкой сепаратора по жидкости в условиях выпарного аппарата и его эффективностью сепарации.

Впервые изучена работа ДЦБЭ в условиях пенообразования, даны рекомендации по его применению с пенящимися растворами.

На основании решения уравнений движения капли в закрученном потоке для различных вариантов полей скоростей газа (пара) и начальных скоростей капель предложена и обоснована упрощенная методика расчета высоты сепарационного элемента.

Практическая ценность. Полученные результаты исследований использованы на Гродненском ПО "Азот" при модернизации выпарных установок производства карбамида, а также предусмотрено их использование при проектировании новых и реконструкции действующих выпарных установок для производства сахара в Республике Куба.

Применение ДЦБЭ в виде многоэлементных тарелок позволяет повысить в 2-3 раза скорость вторичного пара в сепарационном пространстве выпарных установок и тем самым увеличить их производительность.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на научно-технических конференциях Белорусского ордена Трудового Красного Знамени технологического института имени С.М.Кирова (г.Минск, 1981, 1983 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликована 1 научная статья и две статьи приняты в печать в Республике Куба.

Объем работы. Диссертация изложена на 118 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, спис-

ка использованной литературы (74 наименования) и приложения. Иллюстрационный материал содержит 43 рисунка и 2 таблицы.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность данной работы, формируются цели и задачи исследований.

В первой главе приводится критический анализ литературных источников, касающихся брызгоуноса в выпарных аппаратах и технических решений по его устранению, рассматривается возможность повышения скорости вторичного пара в сепарационном пространстве аппарата. Отмечается, что жалюзийные, насадочные, циклонные и пр. сепараторы, в которых имеет место противоточное движение жидкой и паровой фаз, ограничивают повышение скоростей в аппарате. Предел повышения связан с инверсией фаз в самом сепараторе. Прямоточные центробежные сепараторы в принципе могут работать при любых скоростях пара, но на практике возникают частные ограничения, обусловленные потерями давления, нагрузками по L/G и т.д.

Очевидно, что появившийся в последние годы ДЦБЗ, способный работать в обоих режимах, требует всесторонней проверки в специфических условиях выпарных аппаратов.

В установках большой единичной мощности использование единственного центробежного сепаратора снаружи или внутри выпарного аппарата является неприемлемым, из-за больших его габаритов, обусловленных требованиями допустимых потерь давления. Более перспективной является идея мелкопоточности, которая реализуется, например, в батарейных циклонах или многоэлементных тарелках, нашедших применение в массообменных аппаратах. Последние могут оказаться оптимальным вариантом для выпарных аппаратов, при этом многоэлементная тарелка с центробежными элементами будет устанавливаться внутри аппарата непосредственно над кипятильной камерой.

В заключении главы рассматриваются характерные особенности центробежных сепараторов со статическими закручивателями. Анализируется гидродинамическая структура потока в элементе, способы формирования закрученного потока, критерии степени закрутки, причины вторичного уноса из сепаратора.

Вторая глава посвящена теоретическому изучению механизма сепарации капель внутри центробежного элемента. Рассматривается влияние различных вариантов поля скоростей на высо-

ту полета капль с целью определения высоты сепарационного элемента.

Дифференциальное уравнение движения капли в вихревом газовом потоке имеет вид:

$$\sum \vec{F}_i = m \frac{dV}{dt} \quad (I)$$

При решении уравнения учитывались сила тяжести капли, центробежная, кориолисова сила и сила аэродинамического давления.

При оценке силы, обусловленной радиальным градиентом статического давления, показано, что она сопоставима с центробежной силой только для случая, когда капля начинает разгоняться от $V = 0$ до $V_u = 0,025 C_u$ (система вода - воздух). Далее допускалось, что диаметр и масса капли постоянны. Коэффициент сопротивления капли учитывал режимы движения в диапазоне $Re = 0+2000$; радиальная компонента газа $C_r = 0$.

Тогда уравнение (I) в цилиндрических координатах для системы вода - воздух записывается:

$$\begin{aligned} (A B + D B W^{2/3} - 0,035 W^{0,5}) (C_x - V_x) - g &= \frac{dV_x}{dt} \\ (A B + D B W^{2/3} - 0,035 W^{0,5}) (C_u - V_u) &= \frac{dV_u}{dt} + \frac{V_u V_z}{R} \\ -(A B + D B W^{2/3} - 0,035 W^{0,5}) V_z &= \frac{dV_z}{dt} - \frac{V_u^2}{R} \end{aligned} \quad (2)$$

где $A = 1,71 \frac{V^{0,5}}{d^{0,5}}$; $B = 10,5 \frac{V^{0,5} \cdot \rho_g}{\rho_x \cdot d^{1,5}}$; $D = 0,33 \left(\frac{d}{V}\right)^{0,168}$

$$W = \sqrt{(C_x - V_x)^2 - (C_u - V_u)^2 + (C_z - V_z)^2}$$

Начальные условия имели вид: $t = 0$, $z = z_0$; $V_z = 0$,

$V_x = V_u = C_0$ и $V_x = V_0 = 0$.

Расчет производился на ЭВМ для $C_0 = 2, 4$ и 6 м/с;

$d = 25, 50, 115, 230, 450$ мкм.

Наибольшую трудность представлял вопрос подстановки в систему уравнений (2) функций распределения скоростей C_x и C_u вдоль траектории капли. Необходимо прежде всего знать поле скоростей, которое пересекает капля от завихрителя до стенки. Оно может быть определено только путем трудоемкого экспериментального зондирования потока в нескольких сечениях элемента, начиная от верхнего среза завихрителя. Однако эти измерения не вполне надежны из-за дестабилизирующего влияния

вихревых следов от лопаток завихрителя. Если поле известно, то на него необходимо наложить траектории капли и снять значения скоростей газа вдоль ее траектории. Но траектория заранее неизвестна и потому задача должна решаться методом последовательных приближений. Такова методика определения функций C_x и C_u .

Прежде чем решать задачу таким способом, нами были заданы функции распределения C_x и C_u , соответствующие крайним случаям: одна функция имела отрицательные, другая - максимально возможные положительные величины приосевых скоростей C_x . Решение системы (2) при указанных начальных условиях привело к важному результату: высота полета всех капель оказалась мало чувствительной к изменениям поля скоростей в приосевой зоне ($\bar{z} = 0,1-0,5$).

Заштрихованная область на рис. 1а вмещает траектории капль всех перечисленных размеров, за исключением $d = 25$ мкм для функции с максимальными положительными значениями C_x .

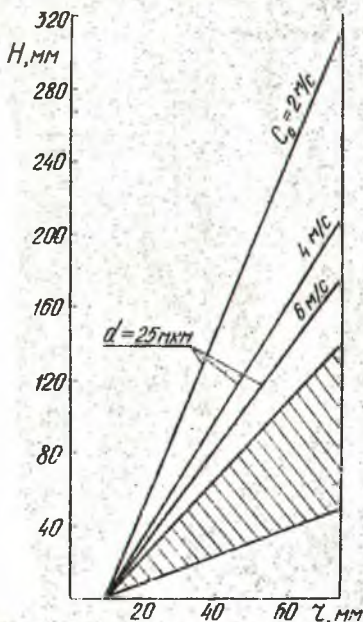


Рис. 1а. Расчетные траектории для 3-х распределений скоростей при $V_z = V_u = C_x, V_x = 0, C_x = 2, 4, 6$ м/с.
а) проекции траектории капль на меридиональную плоскость.

Рисунок 1б расшифровывает заштрихованную область, показывая, что высота полета крупных капль меньше, чем мелких.

Полученный результат позволяет существенно упростить методику расчета траектории капли. Предлагается использовать только один профиль скоростей газа в сечении, расположенном на расстоянии 1,5-2 диаметров элемента от завихрителя, где поле скоростей достаточно стабилизировано. Допускается этот профиль упростить, заменив кривые линии на прямые. Далее профиль закладывается в систему уравнений (2), при этом он рассматривается как функция распределе-

ния скорости газа вдоль траектории капли.

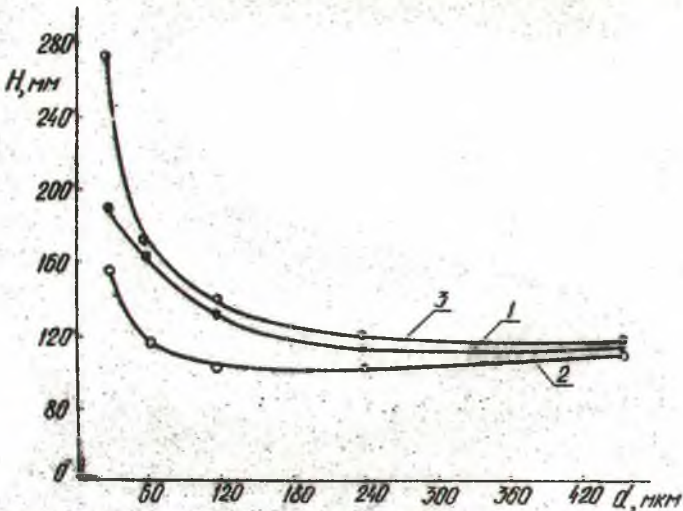


Рис.1. б) зависимость высоты полета капель от их диаметра.

Предлагаемая методика позволяет избежать трудоемкие измерения на начальном участке движения закрученного потока и метод последовательных приближений, при этом погрешность в определении высоты полета капель не превышает 10%.

В этой же главе приводятся результаты измерений поля скоростей газа в элементе с помощью аэродинамического зонда, методика обработки данных и способы оценки погрешностей. Доказывается, что общеизвестный критерий закрутки потока является безразмерным моментом количества движения:

$$\frac{M}{K \cdot R} = \bar{M} = 2 \int \bar{c}_y |\bar{c}_x| \cdot \bar{r}^2 d\bar{r}$$

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований брызгоуноса и его сепарации на холодном стенде (система вода-воздух).

Опытная модель аппарата (рис.2) была выполнена из оргстекла и включала "кипятильную камеру", состоящую из 6 стеклянных трубок (\$d' = 25\$ мм, \$l = 1050\$ мм) и циркуляционной трубы (\$d' = 60\$ мм); сепарационной камеры (\$d' = 150\$ мм), внутри которой могли монтироваться съемные сепараторы. Наверху аппарата был постоянно закреплен объемный сепаратор.

При включении газодувки жидкость, предварительно зали-

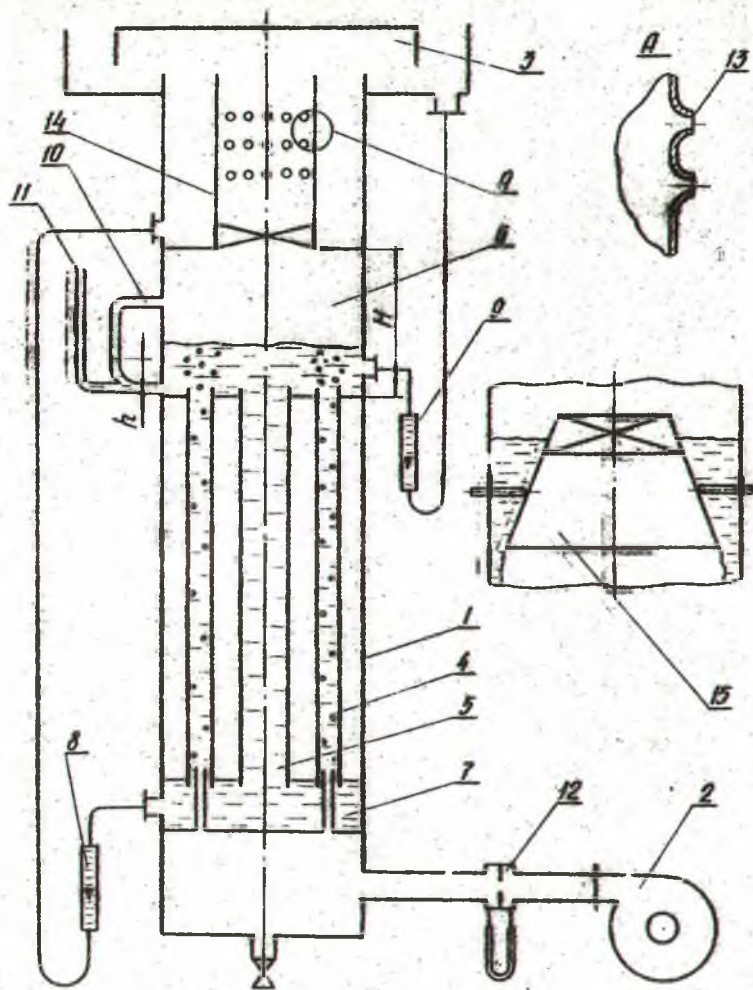


Рис.2. Схема экспериментальной установки.

1 - модель выпарного аппарата, 2 - газодувка, 3 - объемный сепаратор, 4 - трубка, 5 - циркуляционная труба 6 - сепарационная камера, 7 - камера для жидкости, 8,9 - ротаметры, 10 - уровнемер, II - пьезометр, 12 - диафрагма, 13 - отборочные отверстия, 14 - ДИВЭ, 15 - ПРЦБЭ.

тая в аппарат, увлекалась воздухом вверх по "кипятильным" трубкам и, в зависимости от расходных параметров, в трубках имели место пробковый, плечочный и др. режимы движения двухфазной смеси. Основная масса жидкости опускалась вниз по циркуляционной трубе, другая часть в виде капель выносилась в сепарационную камеру, где могла улавливаться сначала исследуемым и окончательно объемным сепараторами. Уловленная жидкость возвращалась в аппарат через ротаметры. Уровень жидкости над верхней трубной решеткой h измерялся по уровнемеру, поскольку барботажный слой не имеет четко выраженной верхней границы. Поддержание уровня при изменении скорости осуществлялось путем добавления жидкости в аппарат непосредственно во время его работы.

В задачи исследований входило сравнение показателей работы ДЦБЭ и хорошо известной конструкции - противоточного центробежного элемента (ПрЦБЭ). Размеры обоих сепараторов были рассчитаны по ранее изложенной методике.

ДЦБЭ представляет цилиндрический патрубок ($D = 100$ мм, $H = 250$ мм), в стенках которого имеются отбортованные отверстия $d = 5$ мм (выбор такой формы^{1/} перфорации стенок объясняется простотой и доступностью ее изготовления). В нижней части патрубка закреплен плосколопачный завихритель с углом установки лопаток к горизонту $\alpha = 30^\circ$.

ПрЦБЭ представляет цилиндрический патрубок (здесь роль патрубка выполняет сепарационная камера), внутри которого закреплен завихритель ($d = 140$ мм) с конической обечайкой, которая служит для образования гидравлического затвора и обеспечения стекания пленки жидкости вниз по внутренней стенке патрубка.

Принцип сепарации капель в обоих сепараторах аналогичен, различие состоит лишь в способе отвода отсепарированной жидкости за пределы элемента: в ПрЦБЭ через гидрозатвор, в ДЦБЭ - через отверстия в стенке.

Сначала производились измерения брызгоуноса с барботажного слоя без установки сепараторов внутри сепарационной камеры. Унесенные из камеры капли улавливались объемным сепаратором. Высота камеры изменялась от 200 до 800 мм через

^{1/} А.с. № 601017 (СССР). Массообменный аппарат / Булкин В.А., Николаев Н.А. - Опубл. в Б.И., 1978, № 3.

каждые 200 мм. Скорость газа в камере изменялась от 0,6 до 3,6 м/с. Полученные данные предназначались для оценки нагрузки сепараторов по жидкости в зависимости от высоты их установки над поверхностью барботажа и для сравнения с расчетными значениями брызгоуноса.^{1/} Спытные данные оказались примерно на порядок выше расчетных. Это расхождение можно объяснить тем, что в наших опытах при истечении газа из кипяточных труб преобладал струйный режим, в отличие от барботажного в указанной работе. Кроме того у нас заметное влияние на унос оказывала высота слоя жидкости h на трубной решетке. Так при изменении h от 10 до 50 мм унос увеличивался от 0,1 до 0,6 кг жидкости/кг газа ($W_g = 1,6$ м/с, $H = 0,6$ м).

Работа ДЦБЭ исследовалась в диапазоне скоростей $W_g = 3 \pm 13$ м/с, что соответствовало скоростям в сечении сепарационной камеры $1,3 \pm 6$ м/с. Сепаратор устанавливался на расстоянии $H = 200$ мм от трубной решетки, нагрузка сепаратора по жидкости определялась, как суммарное количество жидкости, измеренное обоими ротаметрами. Результаты опытов показаны на рис.3 и 4. Для сравнения на рис.3 показан унос ϵ после ПриЦБЭ.

Как видно из графика 3, ДЦБЭ существенно превосходит по эффективности ПриЦБЭ. Кривые уноса после ДЦБЭ $\epsilon = f(W_g)$ имеют три характерных участка, соответствующих противоточному ($W_g < 8$ м/с), переходному ($W_g = 8 \pm 10$ м/с) и прямоточному ($W_g > 10$ м/с) режимам работы сепаратора. Величины нагрузок ДЦБЭ по жидкости (рис.4) позволяют объяснить эти кривые. В выпарном аппарате нагрузки по жидкости растут плавно (в диапазоне исследованных скоростей). При малых скоростях газа, несмотря на небольшой центробежный фактор разделения, эффективность сепарации весьма высокая, поскольку невелики нагрузки по жидкости. При высоких скоростях (прямоточный режим) существенно возрастает центробежный фактор, но при этом одновременно заметно повышается и нагрузка по жидкости. В результате сепарационный эффект остается примерно постоянным. И только в переходном режиме на один неблагоприятный фактор (пульсации пристенной пленки жидкости) накладывается другой (повышение нагрузки по жидкости), кривая $\epsilon = f(W_g)$ имеет резкий

^{1/} Розен А.М., Голуб С.И., Давыдов И.Ф. Об уносе влаги на малых расстояниях от зеркала барботажа. - Доклады АН СССР, 1974, т.216, № 6, с.1277-1280.

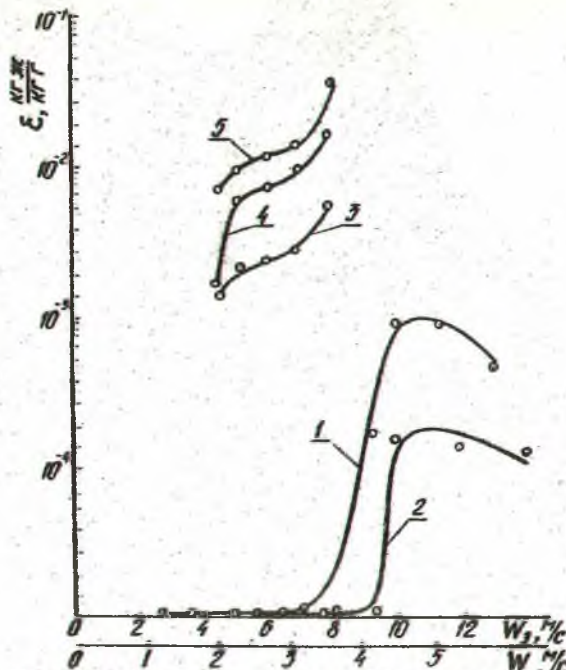


Рис. 3. Зависимость уноса жидкости ϵ от скорости газа в элементе W_g .

- 1 - высота установки ДБЭ $H = 0,2$ м, $h = 50$ мм;
- 2 - ДБЭ $H = 0,2$ м, $h = 15$ мм;
- 3 - ДБЭ $H = 0,7$ м, $h = 15$ мм;
- 4 - ДБЭ $H = 0,5$ м, $h = 15$ мм;
- 5 - ДБЭ $H = 0,3$ м, $h = 15$ мм.

слачок. Однако максимальная величина ϵ не превышала 0,1%. Следует подчеркнуть, что обсуждаемые результаты соответствуют весьма жестким условиям работы ДБЭ ($H = 200$ мм). Для $H = 0,4$ и $0,6$ м величина ϵ имела порядок 10^{-6} и 10^{-7} .

Эффективность ДБЭ при работе с пенящимися жидкостями (когда пена "подпрыгает" сепаратор) в целом ниже, чем с водой (рис. 5), при этом кривые уноса одинаковы для $H = 0,2$ и $0,6$ м. Однако достаточно небольшого расстояния между пеной и сепаратором, чтобы унос резко снизился до величин порядка 10^{-8} , что объясняется незначительной нагрузкой на сепаратор (кривая 2, рис. 5).

Таким образом, ДБЭ является вполне конкурентоспособной конструкцией, способной эффективно работать как при низких,

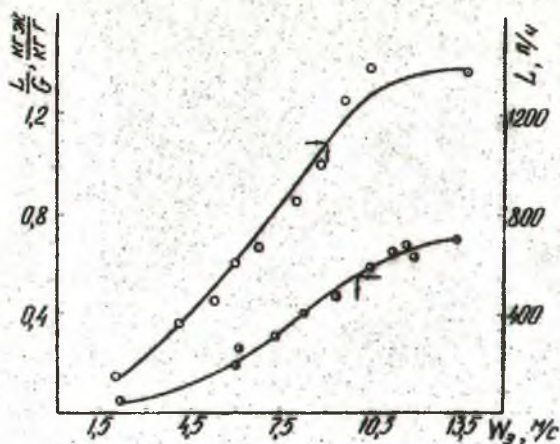


Рис.4. Зависимость нагрузки ДЦБЭ по жидкости L и L/G от скорости газа W_g при $H = 0,2$ м, $h = 15$ мм.

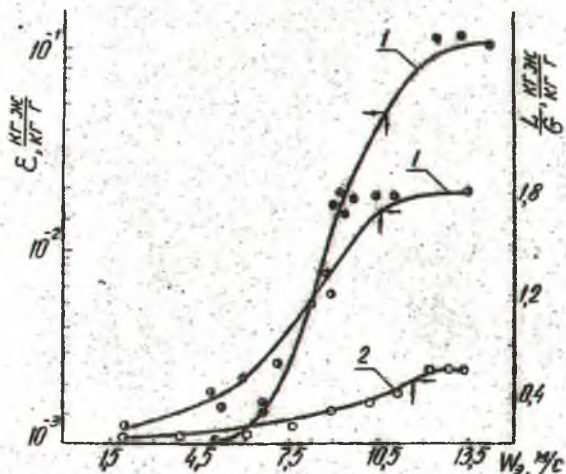


Рис.5. Зависимость уноса ϵ и L/G от скорости газа W_g
 1 - при подпоре пены;
 2 - между пеной и сепаратором промежутком 100 мм.

так и высоких скоростях газа в сепарационной камере, достигающих 6 м/с, и при $L/G \leq 2$.

В четвертой главе представлены результаты испытаний ДДБЭ и ПрЦБЭ на опытно-промышленной установке, изготовленной и смонтированной на Гродненском ПО "Азот". Диаметр сепарационной камеры, размер ДДБЭ и ПрЦБЭ были точно такими же, как на холодном стенде. Кипятильная камера с греющей поверхностью $F = 2 \text{ м}^2$, образованной трубками ($d = 25 \text{ мм}$, $l = 2,3 \text{ м}$), была подключена к цеховой линии пара $P = 10 \text{ ати}$. Вторичный пар, включающий унесенные капли раствора, конденсировался в холодильнике и в виде конденсата через ротаметр возвращался в аппарат. Таким образом выпарная установка работала, как и на холодном стенде, сама на себя.

Скорость вторичного пара W и количество унесенной жидкости определялись из уравнений материального баланса:

$$G_{\text{кон}} = G_{\text{ун}} + G_{\text{п}}; G_{\text{кон}} \cdot C_{\text{к}} = G_{\text{ун}} \cdot C_{\text{р}}$$

откуда

$$\epsilon = \frac{G_{\text{ун}}}{G_{\text{п}}} = \frac{C_{\text{к}}}{C_{\text{р}} - C_{\text{к}}} \quad \frac{\text{кг жидкости}}{\text{кг пара}}$$

$$W = \frac{G_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}} \cdot S} = \frac{V}{S} \cdot \frac{\rho_{\text{кон}}}{\rho_{\text{п}}} \left(1 - \frac{C_{\text{к}}}{C_{\text{р}}}\right) \text{ м/с}$$

Концентрации $C_{\text{к}}$ и $C_{\text{р}}$ определялись рефрактометром УРЛ-1 по общепринятой методике. Тарировка ротаметров осуществлялась с учетом температуры и вязкости исследуемых растворов.

Исследования проводились с изменением концентрации сахарного раствора в диапазоне $8,6 \pm 21,5\%$ масс. при скоростях пара в сепарационной камере $1,3 \pm 6 \text{ м/с}$ ($W_2 = 3 \pm 13,5 \text{ м/с}$). Вследствие склонности сахарного раствора к интенсивному пенообразованию, все опыты проводились с подпором пены, причем по условиям помещения не было возможности увеличить высоту аппарата, чтобы установить сепараторы выше слоя пены.

Исследования подтвердили преимущество ДДБЭ перед ПрЦБЭ, однако унос после сепараторов оказался выше, чем на холодном стенде по причине более высокой нагрузки по жидкости, что можно объяснить в свою очередь различием в физических свойствах пенного слоя. Несмотря на количественное различие, основные закономерности процесса сепарации на холодном и горячем стенде сохраняются: резкое возрастание уноса в координатах $\epsilon = f(W_2 \sqrt{\rho_{\text{п}}})$ приходится на диапазон $W_2 \sqrt{\rho_{\text{п}}} = 6 \pm 10$.

Проведенные исследования показывают, что ДДБЭ могут быть эффективно использованы в виде многоэлементной тарелки в вы-

парном аппарате в широком диапазоне скоростей в сепарационной камере 0,5-6 м/с, что позволит поднять производительность существующих аппаратов в 2-3 раза. При величине нагрузки $4/6 <$ ≤ 2 унос после сепарационной тарелки не будет превышать 2%. Диаметр элементов должен находиться в пределах 100-150 мм при шаге между ними 1,25 $D_{элемент}$.

В ы в о д ы

1. На эффективность работы выпарных установок в химической, пищевой и смежных с ними отраслях промышленности существенное влияние оказывает унос капель с вторичным паром из зоны кипения раствора. С одной стороны брызгоунос приводит к потере ценных продуктов, а с другой - загрязнение коммуникаций в аппаратурно-технологических схемах и окружающей среды.

2. В СССР и в Республике Куба уделяется большое внимание совершенствованию технологических процессов и охране окружающей среды. Сложность решения задачи по устранению уноса капель при выпарке заключается в том, что объемный расход вторичных паров очень велик, а концентрация уноса составляет несколько процентов и существующие устройства для очистки, как правило, громоздки, энергоемки и неэкономичны. Поэтому назрела необходимость дальнейшего исследования явления уноса и сепарации капель, а также разработки совершенных, простых по устройству сепараторов, обеспечивающих высокую пропускную способность и степень очистки.

3. В результате сравнительного анализа различных методов сепарации установлено, что эффективное разделение фаз достигается при движении парожидкостной системы в закрученном потоке. Поскольку эффективность разделения фаз обратно пропорциональна радиусу вращения, при выборе объекта исследования принят конструктивный вариант сепараторов элементного типа (ПрЦБЭ и ДЦБЭ), в которых размеры и число элементов определяются расходом пара.

4. Теоретический анализ механизма сепарации капель выполнен с учетом особенностей структуры закрученного потока и геометрических параметров элементов.

В результате решения дифференциальных уравнений движения капли в закрученном потоке для различных вариантов поля скоростей и начальных скоростей капли предложена и обоснована упрощенная методика расчета высоты сепарационного элемен-

та, которая отличается от ранее предложенных меньшей трудоемкостью. Опытным путем с помощью аэродинамического зонда подтверждено, что относительная стабилизация профилей скоростей газового потока наступает на расстоянии 1,5 диаметров элемента от верхнего среза лопастного закручивателя.

5. Экспериментально установлена величина уноса и зависимость эффективности сепарации капель от режимных и конструктивных параметров выпарного аппарата с внутренней циркуляцией жидкости. При этом выявлено, что расчетные зависимости, теоретически выявленные Розеном и Голубом, дают заниженные результаты по брызгоуносу для случая малого расстояния от поверхности барботажного слоя.

При определении эффективности сепарации, как обязательное условие, необходимо учитывать нагрузку сепаратора по жидкости.

6. На основе экспериментальных данных выявлено преимущество варианта сепаратора с ДДБЭ перед вариантом с ПЦБЭ. Вариант с ДДБЭ способен сепарировать капли в условиях пенообразования в диапазоне низких скоростей пара (противоточный режим) независимо от высоты установки сепаратора над трубной решеткой кипяточной камеры. В диапазоне высоких скоростей (прямоточный режим) указанный вариант способен надежно сепарировать только при условии, когда высота установки сепаратора над трубной решеткой превышает высоту слоя пены на решетке.

7. Опытно-промышленные испытания показали, что пенообразование существенно влияет на эффективность работы сепараторов с ДДБЭ в прямоточном режиме и подтвердили необходимость их установки в выпарных аппаратах выше слоя пены.

8. Результаты исследования закономерностей уноса и сепарации капель использованы при реконструкции выпарных установок в производстве карбамида на Гродненском ПО "Азот" и будут реализованы в Республике Куба при совершенствовании существующих и проектировании новых выпарных установок в производстве сахара.

Условные обозначения

ρ , ρ_n , ρ_k - плотность газа, пара и капли; Re - критерий Рейнольдса; C_x , C_r , C_u - осевая, радиальная и тангенциальная скорости газа; V_x , V_r , V_u - осевая, радиальная и тангенциаль-

ная скорость капли; C_0 - среднерасходная скорость газа в сепарационной камере, м/с; $\bar{C}_x = C_x/W_3$; $\bar{C}_u = C_u/W_3$; $\bar{z} = z/R$; W_3 - скорость газа в элементе, м/с; W - общее обозначение скорости газа (пара) в аппарате, м/с; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; z - радиус капли либо текущий радиус элемента, м; R - радиус сепарационного элемента, м; L/R - параметр, характеризующий нагрузку сепаратора по жидкости и газу (пару), кг/кг; d - диаметр капли, м; ε - относительный унос жидкости, кг жидкости/кг газа (пара); H - высота установки сепаратора над трубной решеткой кипяточной камеры либо высота сепарационной камеры (без сепаратора), м; h - высота уровня жидкости над трубной решеткой, мм; ν - кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$; τ - время, с; K - количество движения, кгм/с^2 ; M - безразмерный момент количества движения; C_x - массовая концентрация жидкости после конденсатора, кг сахара/кг раствора; C_p - массовая концентрация раствора над верхней трубной решеткой, кг сахара/кг раствора; $G_{\text{кон}}$ - количество жидкости после конденсатора, кг/с; $G_{\text{ун}}$ - количество раствора, унесенного вторичным паром в конденсатор, кг/с; G_p - количество вторичного пара, кг/с; V - объемный расход вторичного пара, $\text{м}^3/\text{с}$; S - поперечное сечение сепарационной камеры, м^2 .

Основное содержание диссертации опубликовано в работе:

Г. Гонзалес Р.Р., Ершов А.И., Карпенков А.Ф. Исследование брызгоуноса и сепарации капель в модели выпарного аппарата. Ред. ж. Изв. ВУЗов. - Энергетика. Минск. Рук. деп. 07.04.83 № 1890-83-деп.

Соискатель

Рикардо Р. Гонзалес Г.

Рикардо Роберто Гонзалез Гутеррез
ЗАКОНОМЕРНОСТИ УНОСА И СЕПАРАЦИИ КАПЕЛЬ В ВЫПАРНОМ
АППАРАТЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РЕЖИМНЫХ И КОНСТРУКТИВНЫХ
ПАРАМЕТРОВ

Подписано в печать 31.10.83. Формат 60x84 $\frac{1}{16}$.
Печать офсетная. Усл.печ.л.0,93. Уч.-изд.л.1,0. Тираж 100 экз.
Заказ 611 Бесплатно.

Отпечатано на роталпринте Белорусского ордена Трудового
Красного Знамени технологического института им.С.М.Кирова.
220630. Минск, Свердлова, 13.