

Автореферат  
П 19

*проект Целиаку М.В.*  
ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

ПАСТУШЕНКО Борис Львович

УДК 628.165.048:536.248.2

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССОВ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ  
МИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ВОД И РАСТВОРОВ В УСТАНОВКАХ  
МГНОВЕННОГО ВСКИПАНИЯ

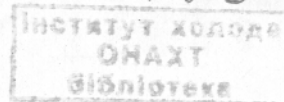
Специальность 05.14.05 - теоретические основы теплотехники

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

XV 1123



Одесса - 1988

Работа выполнена в Одесском технологическом институте  
холодильной промышленности

Научный руководитель : доктор технических наук,  
старший научный сотрудник  
Е.И. ТАУЕМАН

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Г.Ф. СМЕРНОВ

кандидат технических наук,  
доцент О.Л. ДАНИЛОВ

Ведущая организация: ВНИПИЭНЕРГОПРОМ (г.Москва)

Защита диссертации состоится " 30 " мар 1988 г.  
в 11.00 часов на заседании специализированного совета  
К.068.27.01 Одесского технологического института холодильной  
промышленности по адресу: 270057, г.Одесса, ул. Петра Велико -  
го, 1/3, ОТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОТИХП.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 1988 г.

Учёный секретарь  
специализированного совета  
К.Т.Н., доцент

Р.К. Никульшин

Х. Значений размеров в частици

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Установки мгновенного вскипания (УМВ) являются одним из перспективных средств решения задач обезвреживания минерализованных промышленных сточных вод, создания малоотходных энерготехнологических циклов с замкнутыми системами водопользования, восполнения дефицита пресной воды. Однако их применение для глубокого концентрирования минерализованных вод и растворов (МВР) сдерживается ограниченной степенью концентрирования, обусловленной накипеобразованием на поверхностях теплообмена, необходимостью предварительной химической обработки исходной воды, повышенными расходами теплоты, электроэнергии, дорогих антикоррозионных материалов. Это в значительной мере обусловлено недостаточной изученностью и сложностью процессов в основных элементах, недостаточной разработанностью схем УМВ для глубокого концентрирования МВР, методов расчетов соответствующих процессов и установок.

Работа выполнялась в соответствии с планами научно-исследовательских работ Одесского технологического института холодильной промышленности в период с 1975 по 1987 гг. Она является обобщением результатов исследований и разработок, выполненных при участии автора по заданиям 2.180.3.5.79 (15) (Постановление ГИИТ СССР от 03.05.79 № 180) и 0.Ц.002.0.01.02.Ц.07.Н2 (Постановление ГКНТ, ГОСПЛАНа и АН СССР от 29.12.81 № 516/272/174).

Целью работы является разработка методов повышения эффективности процессов в УМВ применительно к решению проблем деминерализации и глубокого концентрирования МВР.

Основные задачи работы: изучение процесса вскипания перегретой жидкости в камере испарения; совершенствование методов расчета УМВ; исследование энергетических и технико-экономических характеристик установок с разработкой на этой основе предложений по рационализации режимов действующих и созданию новых эффективных УМВ.

Научная новизна. Установлены характеристики процесса вскипания жидкости в вертикальных цилиндрических, продольных коротких камерах испарения и на начальном участке длинных проточных камер. Предложены новые методы расчета параметров и показателей, учитывающие уровни и остаточные перегревы жидкости в камерах испарения, оттяжки и перепуски парогазовой смеси для стационарных режимов работы УМВ и строящихся на основе разработанной методики определения количества независимых и зависимых переменных сложных теплотехнических систем. Впервые определены влияния режимов оттяжек и перепусков парогазовой

смеси, уровней жидкости на показатели эффективности УМВ, распределения уровней жидкости по камерам испарения. Установлены неизвестные ранее зависимости показателей УМВ от определяющих параметров в режимах глубокого концентрирования МВР. Разработаны новые схемы УМВ для глубокого концентрирования МВР и методы повышения эффективности процессов концентрирования в УМВ.

Научные положения, защищаемые в работе:

1. Степень прокипания жидкости в вертикальных цилиндрических, продольных коротких и на начальном участке длинных проточных камер испарения определяется в основном гидростатическим давлением жидкости. Кинетические характеристики процесса и время пребывания жидкости в камере оказывают на нее менее существенное влияние.

2. Рациональный выбор размеров проточных устройств и режимов оттяжек и перепусков парогазовой смеси устраняет экстремумы в распределении уровней жидкости по камерам испарения и обеспечивает поддержание во всех камерах минимально допустимых уровней, что приводит к уменьшению удельного расхода теплоты в УМВ на 5–10% и повышению качества получаемого дистиллята на 5–15%.

Практическая ценность работы. Разработаны новые схемы, инженерные методы расчета и рекомендации по повышению эффективности УМВ. Предложены технические решения по созданию опытно-промышленных установок для глубокого концентрирования МВР на базе УМВ с промежуточным газовым теплоносителем и каскадного типа. Результаты работ переданы ряду научно-исследовательских, проектных институтов и предприятий и использованы в проектных разработках. В частности, с использованием результатов диссертации ВНИИЭнергопром (г. Москва) выполнен проект опытно-промышленной установки, которая строится на Сумгаитской ТЭЦ-I для концентрирования сточных вод водоподготовительных установок на базе утилизации уходящих газов котлоагрегатов. Ожидаемый экономический эффект от внедрения установки – 43 тыс. руб. в год. Институт титана (г. Запорожье) использовал результаты работы в проекте строящегося в настоящее время участка обессоливания стоков Запорожского титано-магниевого комбината. Предотвращаемый экономический ущерб от сброса – 75 тыс. рублей в год.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на Всесоюзных научно-технических конференциях и совещаниях по вопросам безотходных производств, охраны и рационального использования природных ресурсов (Москва, 1977 г.; Челябинск, 1981 г.), повышению эффективности и математическому моделированию сложных химико-техно-

логических систем (Ташкент, 1983 г.; Одесса, 1985 г.; Харьков, 1985 г.), перспективам промышленной теплоэнергетики (Москва, 1977 г., 1983 г.), утилизации вторичных энергоресурсов (Киев, 1977 г.; Ленинград, 1979 г.; Баку, 1985 г.), термическим методам обработки воды на тепловых электростанциях (Челябинск, 1977 г.), а также на ежегодных научных конференциях ОТИХП (1977–1983 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 работ, в том числе 3 авторских свидетельства на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, библиографии из 223 наименований и 5 приложений на 50 страницах. Содержит 150 страниц машинописного текста, 64 рисунки и 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе анализируются особенности процессов мгновенного вскипания жидкости, приводятся классификации схем и конструкций УМВ и их основных элементов. На основе анализа состояния вопроса в областях исследования рабочих процессов и разработки методов расчета УМВ формируются задачи диссертационной работы.

Исследование характеристик процесса вскипания жидкости в камере испарения

Для расчета УМВ необходимы данные о характеристиках процесса вскипания перегретой жидкости в камере испарения (КИ). Вертикальная цилиндрическая, продольная короткая камера испарения и начальный участок длинной проточной камеры могут быть представлены состоящими из трех зон (рис. I): входной (I), выходной (II), циркуляционной (III). В зоне III, в результате неравномерности паросодержания по сечению, возникает циркуляционное движение с подъемным потоком в центре (зона IIIa) и опускным в периферийной части (IIIб). По данным Э.З. Шульца и В.В. Дильмана, сечения зон IIIa и IIIб практически равны, а профиль вертикальной составляющей скорости жидкости является плоским. В слоях малой толщины на верхней и нижней границах зоны III предполагается идеальное смешение потоков.

В качестве характеристик процесса исполь-

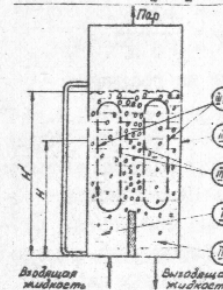


Рис. I. Схема вертикальной цилиндрической камеры испарения.  
Н, Н' – массовый и видимый уровни жидкости

зуются степенью прокипания  $\beta = (t_{\text{вк}} - t_{\text{всн}}) / [t_{\text{вк}} - (t_s + \Delta t_n)]$ , остаточный перегрев по сравнению с температурой насыщения  $\Delta t_n = t_{\text{вк}} - (t_s + \Delta t_n)$ , интенсивность вскипания  $J = Sc' \frac{dq}{dt}$ , видимый уровень жидкости. Для определения величин  $\beta$ ,  $\Delta t_n$  и  $J$  необходимы данные о распределениях температур в камере. С целью их расчета предложена математическая модель, учитывающая наличие циркуляционного контура в зоне III с продольным перемешиванием в зонах I, II, III и поперечным теплообменом между зонами IIIa и IIIб. Модель строится при следующих допущениях: вертикальные составляющие скорости жидкости и градиента температуры существенно больше горизонтальных составляющих этих величин, температура жидкости на свободной поверхности равна температуре насыщения, стенки камеры теплоизолированы, количество испарившейся в камере жидкости существенно меньше количества подаваемой на испарение. При этом температуры жидкости в зонах IIIa и IIIб равны:

$$t_{IIIa} = C_1 \left[ \frac{Pe_{II}}{H^2} (1 + \bar{y} \cdot Pe_{II}) + \bar{y} \right] + C_2 (\sin H \bar{y} - \frac{Pe_{II}}{H} \cos H \bar{y}) + C_3 (\cos H \bar{y} + \frac{Pe_{II}}{H} \sin H \bar{y}) + C_4; \quad (1)$$

$$t_{IIIb} = C_1 \left[ \frac{Pe_{II}}{H^2} (\bar{y} \cdot Pe_{II} - 1) + \bar{y} \right] - C_2 (\sin H \bar{y} + \frac{Pe_{II}}{H} \cos H \bar{y}) + C_3 \left( \frac{Pe_{II}}{H} \sin H \bar{y} - \cos H \bar{y} \right) + C_4, \quad (2)$$

$$\text{где } H = \sqrt{K_2 - Pe_{II}^2}; \quad \bar{y} = \frac{y}{d}; \quad Pe_{II} = \frac{w_{II} \cdot d}{\alpha}; \quad K_2 = \frac{4\sqrt{2} \cdot d}{g' c' \alpha} \cdot K_2'$$

$C_1 - C_4$  — константы интегрирования, определяемые из граничных условий.

Для установления зависимостей  $\Delta t_n$ ,  $\beta$ ,  $J$ ,  $\frac{H'}{H}$  от определяющих параметров и проверки адекватности моделей выполнены экспериментальные исследования процесса. Они проводились на установке (рис. 2), основным элементом которой является камера испарения, выполненная из цилиндрической стеклянной трубы диаметром 67x5 и высотой 1700 мм. Для изучения полей температур в жидкостное и паровое пространство камеры помещены 2 измерительных зонда, содержащих 18 индивидуально тарированных медь-константановых термопар. Независимые параметры процесса варьировались в следующих диапазонах:  $H = 0,1 - 1,4$  м;  $S = 0,028 - 0,222$  кг/с;  $t_s = 30 - 95^\circ\text{C}$ ;  $\Delta t_s = 1,7 - 15,0^\circ\text{C}$ . Вертикальные переливные перегородки имели высоту  $H_n = 0,2$  м,  $0,4$  м

и  $0,6$  м. Исследовалось вскипание воды и раствора  $NaCl$  с концентрацией  $\beta = 5 - 25\%$ .

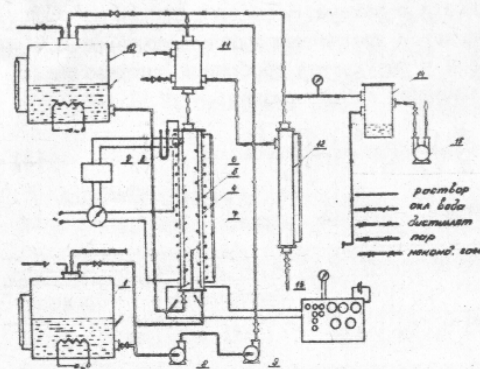


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1, 10 — емкости; 2, 3 — насосы; 4 — камера испарения; 5 — нихромовая нить; 6 — термопары; 7 — перегородка; 8 — дифференциальная термопара; 9, 13 — потенциометры; 11 — конденсатор; 12 — сборник дистиллята; 14 — сепаратор; 15 — вакуум-насос

Установлено, что увеличение уровня жидкости ведет к значительному ухудшению характеристик процесса, что связано с повышением гидростатического давления, угнетающего кипение (рис. 3). Темп увеличения  $\Delta t_n$  и уменьшения  $\beta$  снижается по мере роста уровня жидкости, и при  $H > 0,8 - 1,0$  м эта зависимость становится незначительной.

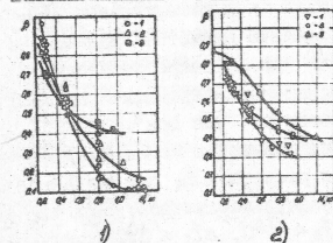


Рис. 3. Зависимость величины  $\beta$  от определяющих параметров  
1)  $H_n = 0,2$  м;  $t_s, ^\circ\text{C}$ : 1 — 40,8; 2 — 59,6; 3 — 82,3  
2)  $t_s = 84,1^\circ\text{C}$ ;  $H_n, \text{ м}$ : 1 — 0,0; 2 — 0,2; 3 — 0,4

Рост исходного перегрева  $\Delta t_s$  сопровождается линейным ростом  $\Delta t_n$  (при этом  $\beta$  практически не зависит от  $\Delta t_s$ ). Введение перегородок в испаряемую жидкость позволяет снизить остаточные перегревы. Так, при  $H = 0,5$  м,  $\Delta t_s = 5^\circ\text{C}$  и  $t_s = 60^\circ\text{C}$  введение перегородки высотой  $0,2$  м позволяет уменьшить  $\Delta t_n$  на 16%.  
Влияние высоты переливной перегородки усиливается с ростом  $t_s$ . Увеличение  $t_s$  способствует повышению  $\beta$  при  $H > 0,3 - 0,4$  м. Влияние  $t_s$  на  $\beta$  усиливается при увеличении высоты перегородки. При  $H < 0,3 - 0,4$  м  $\beta$  уменьшается с ростом  $t_s$ , что обусловлено снижением удельного объема пара и, соответственно, менее интенсивным перемешиванием жидкости из-за меньших скоростей пара в КИ. Величина  $\beta$  практически не зависит от расхода

жидкости, поскольку его рост с одной стороны приводит к дополнительному увеличению интенсивности перемешивания, а с другой - уменьшает время пребывания жидкости в камере.

Модель процесса дополняется уравнением для определения величины  $H'/H$ , полученным на ЭВМ в результате обобщения опытных данных (см. табл.) в форме, предложенной Л.С.Стерманом:

$$\frac{H'}{H} = B \left(1 + \frac{H_n}{d}\right)^{b_1} \cdot F_2^{b_2} \cdot \left(\frac{S''}{S'}\right)^{b_3} \quad (3)$$

Результаты обобщения опытных данных

Среда	Величины коэффициентов				Относительная погрешность	
	$B$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	Максимальная	Средняя
Вода	2,698	-0,063	0,054	0,080	17,1	6,0
Раствор NaCl $\epsilon = 5-15\%$	1,939	-0,018	0,037	0,032	19,5	7,2

Расчеты на основе разработанной модели проводились с использованием данных по коэффициентам турбулентной диффузии в барботажных аппаратах при  $Le = 1$  (сплошные линии на рис.4) и при  $Le$ , восстановленных по экспериментальным данным (пунктирные). Сопоставление расчетных данных (при содержании воздуха на единицу паропроизводительности  $\epsilon = 0,03$ , типичном для промышленных УМВ) с экспериментальными показывает, что при  $Le = 1$  модель, с относительной погрешностью менее 25%, может быть использована для расчета  $\Delta t_n$  при  $H > 0,6$  м в следующих областях изменения параметров:  $39^\circ\text{C} < t_s < 50^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_s < 6^\circ\text{C}$ ;  $50^\circ\text{C} < t_s < 90^\circ\text{C}$ ,  $\Delta t_s < 3^\circ\text{C}$  (соответствует реализуемым в многоступенчатых УМВ). При  $Le$ , восстановленных по экспериментальным данным, максимальное относительное отклонение расчетных величин от опытных при  $H > 0,4$  м равно 24,2%, а среднее - 12,7%.

Рис.4. Зависимость остаточных перегревов от исходных ( $H = 0,5$  м)  $t_s$ : 1 - 41,2; 2 - 40,8; 1 - без перегородки; 2 - с перегородкой ( $H_n = 0,2$  м)

На основе теории подобия с использованием ЭВМ проведено обобщение опытных данных (вскипание воды и раствора NaCl с  $\epsilon = 5-15\%$ ):

$$\beta = \exp \left[ -7,577 \cdot 10^{-3} \left(\frac{H}{d}\right)^{-1,874} \left(1 + \frac{H_n}{d}\right)^{-0,185} \cdot Eu^{0,080} \cdot Pe^{-0,039} \cdot X^{0,088} \right], \quad (4)$$

где  $X = (Ku-1)^{0,9} \left(\frac{S''}{S'}\right)^{0,5} \left(\frac{\mu''}{\mu'}\right)^{0,1}$  - параметр Локкарта-Мартинелли.

Диапазоны изменения параметров составляют:  $1,754 \leq \frac{H}{d} \leq 14,035$ ;  $0 \leq \frac{H_n}{d} \leq 7,018$ ;  $5,318 \cdot 10^3 \leq Eu \leq 3,620 \cdot 10^6$ ;  $1,210 \cdot 10^3 \leq Pe \leq 1,837 \cdot 10^4$ ;  $34,920 \leq Ku \leq 726,700$ ;  $4,308 \cdot 10^{-5} \leq \frac{S''}{S'} \leq 4,781 \cdot 10^{-4}$ ;  $1,312 \cdot 10^{-2} \leq \frac{\mu''}{\mu'} \leq 3,950 \cdot 10^{-2}$ . Средняя относительная погрешность аппроксимации - 9,1%, максимальная - 24,9%, причем погрешность свыше 20% дают 17,3% от общего числа экспериментальных точек.

Методы расчета УМВ

Для адекватного математического описания УМВ разработана методика определения количества независимых и зависимых переменных сложных теплотехнических систем. Методика базируется на известном подходе Дж.В.Гиббса и работах П.Венедека и И.Ласло. При условии, что состояние  $i$ -того из  $N_s$  элементов системы определяется состоянием сосуществующих в нем  $\psi_j$  фаз вещества,  $j$ -тая из которых содержит  $K_{ij}$  компонентов, минимальное число независимых переменных составляет:

$$P = \sum_{i=1}^{N_s} P_i = 3 \sum_{i=1}^{N_s} \psi_i + \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=1}^{\psi_i} K_{ij} - \sum_{i=1}^{N_s} \psi_i \quad (5)$$

С использованием указанной методики разработана математическая модель стационарных режимов работы УМВ и, на её основе, методы расчета параметров и показателей, отличающиеся учетом уровней, остаточных перегревов жидкости в КИ, оттяжек и перепусков парогазовой смеси. Например, получено соотношение для расчета температуры испаряемой жидкости в  $i$ -той ступени испарения (СИ), включающей камеру испарения, сепаратор, конденсатор, устройство для сбора дистиллята:

$$t_i = \frac{1}{N+1} \left\{ \left\{ (N-i+1) \left[ \theta_0 + \sum_{k=1}^i \Delta_k - \gamma \left[ \sum_{k=1}^{i-1} K E_k' - \sum_{k=1}^{i-2} E_k'' + (i-1) E_{i-1}'' \right] \right] \right\} + i \left\{ \theta_0 - \sum_{k=1}^N \Delta_k - \gamma \left[ \sum_{k=1}^N (N-k+1) E_k' + \sum_{k=1}^{N-1} E_k'' - (N-i+1) E_{i-1}'' \right] \right\} \right\}, \quad (6)$$

где  $\Delta_k = \Delta t_{nk} + \Delta t_{dk} + \Delta t_{pk}$ ;  $\gamma = \frac{\bar{v}}{S \bar{c}}$ ;  $E_0'' = 0$ ;  $E_N'' = 0$ .

Уровни жидкости в КИ с переточными устройствами в виде затопленной щели могут быть рассчитаны по соотношению:

$$H_i = H_j + \frac{1}{g \rho} \sum_{j=2}^i \Delta p_j - \frac{1}{2g(\rho')^2} \sum_{j=2}^i \frac{S - \sum_{k=1}^j W_k}{\mu_{ij} \cdot F_{ij}} \quad (7)$$

Получены формулы для расчета параметров и показателей различных типов УМВ (одно- и многоконтурных, каскадных и с промежуточным

газовым теплоносителем). Например, для каскадной УМВ температура испаряемой жидкости на входе в первую КИ  $j$ -того каскада равна:

$$t_{nj} = t_{n1} \prod_{k=1}^{j-1} \frac{n_k}{n_{k+1}} + \sum_{k=1}^{j-1} \frac{1}{n_{k+1}} \prod_{l=1}^{j-1} \frac{n_k}{n_{k+1}} (\theta_0 - \sum_{k=1}^{n_k} \Delta_{kl}). \quad (8)$$

Анализ характеристик УМВ. Пути повышения эффективности

Рассмотрены характеристики одно- и многоконтурных, каскадных УМВ и УМВ с промежуточным газовым теплоносителем. Показано, что увеличение оттяжек парогазовой смеси приводит к небольшому увеличению производительности УМВ (до 11% в случае оттяжек из всех ступеней порядка 25% их паропроизводительности) при существенном (на 30% и более) росте удельного расхода теплоты  $q$ , приходящегося на единицу получаемого дистиллята. Наиболее сильное влияние на производительность по дистилляту оказывает оттяжка из последней СИ, наименьшее - из первой. Увеличение величин  $E'$  из всех СИ, кроме последней, приводит к росту  $q$ , который наиболее существенен при оттяжках из первых ступеней. Так, при возрастании оттяжки из первой СИ от 1% до 30% величина  $q$  возрастает на 5%, а при аналогичном увеличении оттяжки из пятнадцатой (для 30-ступенчатой УМВ) - на 2%. Рост  $E'$  из последней ступени расширяет общий располагаемый перепад температур, что обуславливает (наряду с увеличением производительности) снижение величины  $q$ . Установлено, что введение перепусков между СИ вызывает незначительное снижение производительности (до 1% при перепусках порядка 25% от паропроизводительности ступеней) при увеличении удельного расхода теплоты - на 5% и более. Показано также, что повышение величин  $E'$  вызывает значительный рост перепадов температур и давлений между первыми ступенями и их уменьшение между последними.

Получены распределения уровней жидкости по камерам испарения и разработана методика расчета площадей поперечных сечений переточных устройств  $F_{pi}$ , обеспечивающих нормальную работу УМВ при заданных ограничениях. Показано, что распределение величин  $H_i$  может иметь один или несколько (при аварийных режимах) экстремумов. Величины  $F_{pi}$ , обеспечивающие устранение указанных экстремумов и поддержание во всех камерах равных между собой уровней жидкости, возрастают от высоко- к низкотемпературным КИ (пунктирная линия на рис. 5). Распределения величин  $H_i$  зависят от режима стяжек и перепусков парогазовой смеси. Увеличение оттяжек приводит к существенному росту уровней жидкости, особенно в первых КИ (рис.5). Например, возрастание  $E'$  от

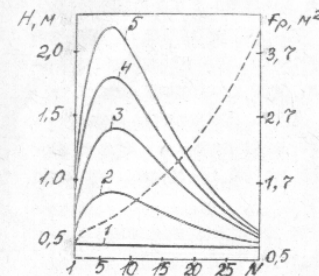


Рис.5. Распределение уровней жидкости по камерам испарения ( $S = 5500$  т/ч;  $E_i = 0$ ;  $t_N = 100^\circ\text{C}$ ;  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ ;  $\Delta t_g = 1^\circ\text{C}$ ;  $\Delta t_n = 1^\circ\text{C}$ ;  $E'_i$ , %: 1 - 1; 2 - 5; 3 - 10; 4 - 20; 5 - 30

1% до 10% вызывает увеличение  $H$  в 5-й КИ на 1 м. Величины  $H_i$  рассчитывались при условии равенства поверхностей теплопередачи  $F_i$  конденсаторов ( $F_i = 500$  м<sup>2</sup>), а  $F_{pi}$  - из условий обеспечения уровней жидкости 0,5 м во всех КИ при оттяжках  $E' = 1\%$ .

Увеличение уровней жидкости в КИ приводит к ухудшению показателей эффективности УМВ. Снижение энергетической эффективности обусловлено, например, возрастанием величин  $\Delta t_n$  и составляет до 10% при повышении  $H$  от 0,5 до 1,0 м (при этом содержание дистиллята увеличивается на 5-15%). При увеличении числа ступеней влияние  $H$  на  $q$  усиливается, что связано с увеличением "веса"  $\Delta t_n$  в температурных потерях ступеней.

Проведен анализ влияния определяющих параметров на показатели эффективности УМВ различных типов. На рис.6 приведены зависимости приходящихся на единицу получаемого дистиллята удельных расходов теплоты  $q$ , поверхности нагрева  $f$ , электроэнергии  $e$  и переменной части удельных приведенных затрат  $z_{пер}$  от степени концентрирования  $\omega$  для концентрирования черноморской воды в двухконтурной УМВ (штриховые линии ограничивают максимальные значения  $\omega$ , соответствующие минимально допустимым значениям  $t_n$ ). Расчеты выполнены при  $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ ;  $\beta = 0,9$ ;  $\Delta t_n = 2^\circ\text{C}$ ; температурном напоре на горячем конце головного подогревателя  $\Delta t_{гп} = 10^\circ\text{C}$ ; числе ходов трубных пучков конденсаторов и головного подогревателя  $X = 2$  и внутренних и наружных диаметрах их трубок  $d_{вн} = 0,034$  м,  $d_n = 0,038$  м; стоимостях единиц теплоты, электроэнергии и поверхностей нагрева  $C_q = 1,2$  руб/ГДж,  $C_e = 0,01$  руб/кВт.ч,  $C_f = 50$  руб/м<sup>2</sup>; средней норме амортизации  $\psi_a = 0,12$  и нормативном коэффициенте эффективности капитальных вложений  $\psi_n = 0,15$ ; числе часов работы установки в году  $T = 7900$  ч. Из графиков видно, что увеличение  $\omega$  сопровождается ухудшением удельных показателей. Так, увеличение  $\omega$  от 2 до 5 (при  $N = 30$ ) ведет к росту  $q$  на 9,2%,  $f$  - на 10,7%,  $e$  - на 1% и  $z_{пер}$  - на 9,6%. В многоконтурных УМВ удельные показатели зависят от степени концентрирования гораздо меньше, чем в одноконтурных (их возрастание начинается лишь при приближении  $\omega$  к макси-

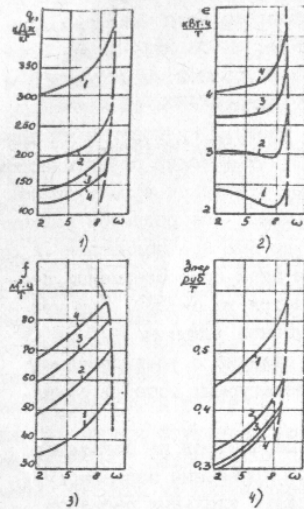


Рис.6. Зависимость удельных показателей многоконтурных УМВ от степени концентрирования:  
 $N$ : 1-10; 2-20; 3-30; 4-40

валяет на существование оптимальной температуры нагрева газа  $t_r$  на входе в контактный нагреватель раствора, при которой величина  $q$  минимальна. Это обусловлено тем, что при повышении  $t_r$  с одной стороны увеличивается температура нагрева раствора  $t_n$ , а с другой — возрастает его недогрев  $\delta t = t_r - t_n$ . Влияние степени концентрирования на показатели УМВ-ГТ незначительно.

Рассмотрен ряд направлений повышения эффективности процессов в УМВ. Разработаны новые схемы и технические предложения по созданию ряда опытно-промышленных КУМВ для глубокого концентрирования сточных вод водоподготовительных установок ТЭЦ на базе утилизации уходящих газов котлоагрегатов (производительностью до 20 т/ч). Обоснован способ выбора рациональной схемы УМВ при повышении степени концентрирования и сопровождающем его снижении энергетической и технико-экономической эффективности. Показаны преимущества УМВ-ГТ по

малым, для данного типа раствора, значениям). Это определяет повышение эффективности УМВ при увеличении числа контуров, что особенно ощутимо при больших  $\omega$ . Например, при  $\omega = 5$  и  $N = 30$  величина  $q$  для трехконтурной УМВ на 34,6% ниже, чем для одноконтурной.

Повышение степени концентрирования в каскадных УМВ (КУМВ) также сопровождается возрастанием  $q$ ,  $f$ ,  $e$  и  $z_{пер}$ . Так, увеличение  $\omega$  от 2 до 10 (при числе ступеней в первом каскаде  $n_1 = 30$ ) повышает  $q$  на 23%,  $f$  — на 20%,  $e$  — на 18%,  $z_{пер}$  — на 20%. Наиболее существенное ухудшение удельных показателей наблюдается при малых степенях концентрирования. Темп этого ухудшения снижается с возрастанием  $\omega$ .

Анализ характеристик УМВ с промежуточным газовым теплоносителем (УМВ-ГТ), в которых отсутствует контакт раствора с поверхностями теплопередачи и обеспечивается высокая степень концентрирования МВР, указы-

сравнению с другими типами УМВ при глубоком концентрировании МВР. Разработаны новые схемы и технические задания на проектирование опытно-промышленных УМВ-ГТ (производительностью до 15 т/ч) для глубокого концентрирования сточных вод Запорожского титано-магниевого комбината, шахтных и других вод. Рассмотрены варианты комбинирования УМВ с установками, реализующими другие методы деминерализации. Разработаны технологические регламенты на проектирование комбинированных установок концентрирования сточных вод титано-магневых производств (производительностью до 150 т/ч), в которых рассолы установок, используемых на стадии предварительного концентрирования (электродиализная, дистилляционная выпарная с пленочными аппаратами или вынесенной зоной кипения), доупариваются в УМВ-ГТ, где из них производится товарный жидкий хлорид кальция (концентрация 38%). Возможность получения такого продукта подтверждена экспериментально. Приводятся данные по технико-экономическим характеристикам различных комбинированных установок.

#### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведенные исследования процесса вскипания перегретой жидкости показывают, что характеристики процесса в вертикальных цилиндрических, продольных коротких и на начальном участке длинных проточных камер испарения в наибольшей степени зависят от гидростатического давления жидкости. Остаточный перегрев жидкости в указанных условиях линейно зависит (а степень прокипания практически не зависит) от её исходного перегрева. Прочие факторы оказывают менее существенное влияние на указанные характеристики. Полученные данные позволяют рассчитывать остаточные перегревы, степени прокипания, интенсивности вскипания и видимые уровни жидкости в указанных камерах в широком диапазоне изменения определяющих параметров.

2. Разработанные методы расчета параметров и показателей УМВ, учитывающие уровни и остаточные перегревы жидкости в камерах испарения, оттяжки и перепуски парогазовой смеси, обеспечивают расчет различных типов УМВ деминерализации вод и концентрирования растворов. Они строятся с учетом разработанной методики определения количества зависимых и независимых переменных сложных теплотехнических систем, базирующейся на известном подходе Дж.В.Гиббса.

3. Увеличение оттяжек парогазовой смеси из ступеней испарения обеспечивает повышение, а перепусков — незначительное понижение производительности УМВ, сопровождающиеся существенным ростом уровней жидкости, особенно в первых ступенях (на I м и более), и удельного

расхода теплоты (на 5-30%). Наибольшее влияние на производительность оказывают оттяжки из последней, а наименьшее - из первой ступени, а вызываемое этим повышение удельного расхода теплоты особенно велико при увеличении оттяжек из первых ступеней. Оттяжки из последней ступени испарения способствуют снижению удельного расхода теплоты.

4. Распределение уровней жидкости по камерам испарения может иметь один или несколько экстремумов, определяемых размерами переточных устройств и режимом оттяжек и перепусков парогазовой смеси. Это приводит к повышению удельного расхода теплоты на испарение и снижению качества получаемого дистиллята. Предложенные способы выбора размеров переточных устройств и режимов оттяжек и перепусков парогазовой смеси обеспечивают поддержание во всех камерах минимально допустимых уровней жидкости, что позволяет уменьшить удельный расход теплоты на 5-10% и повысить качество получаемого дистиллята на 5-15%.

5. Выбор рациональной схемы УМВ при повышении степени концентрирования и сопровождающем его снижении энергетической и технико-экономической эффективности определяется тем, что это снижение является незначительным для УМВ с промежуточным газовым теплоносителем, для многоконтурных установок наблюдается лишь при приближении степени концентрирования к максимальным для данного типа раствора значениям, а для каскадных - при малых степенях концентрирования. Это определяет повышенную эффективность УМВ с промежуточным газовым теплоносителем при глубоком концентрировании МВР по сравнению с другими типами УМВ.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

1. Комбинирование холодильных и дистилляционных методов концентрирования минерализованных вод / Е.И.Таубман, В.А.Горнев, Ю.П.Денисов, В.Л.Пастушенко // Холодильная техника и технология: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - 1978. - Вып. 27. - С. 58-61.
2. Таубман Е.И., Пастушенко В.Л., Горнев В.А. Определение степени концентрирования растворов в установках мгновенного испарения // Изв. Вузов. Сер. Энергетика. - 1979. - № 12. - С. 52-56.
3. Таубман Е.И., Пастушенко В.Л. Определение числа параметров состояния сложных теплотехнических систем // Изв. Вузов. Сер. Энергетика. - 1980. - № 8. - С. 122-126.
4. Анализ технико-экономических показателей выпарной установки с промежуточным газовым теплоносителем / Е.И.Таубман, В.А.Горнев,

- В.Л.Пастушенко и др. // Химическая промышленность. - 1981. - № 1. - С. 41-43.
5. А.с. 904722 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 01D 1/26, 3/06. Установка для выпаривания растворов / Е.И.Таубман, В.А.Горнев, В.Л.Пастушенко и др. (СССР). - № 2858947/23-26; Заявлено 25.12.79; Опубл. 1F.02.82. Бюл. № 6. - 3 с.: ил.
6. Пастушенко В.Л., Таубман Е.И. Анализ показателей многоконтурных дистилляционных установок мгновенного испарения // Промышленная теплотехника. - 1982. - Т.4. - № 3. - С. 71-76.
7. Установки концентрирования сточных вод титано-магниевого производства / Е.И.Таубман, В.Л.Пастушенко, Ю.И.Калишевский и др. // Химия и технология воды. - 1982. - Т.4. - С. 381-384.
8. Таубман Е.И., Пастушенко В.Л. О влиянии уровней жидкости в испарителях на показатели эффективности установок мгновенного вскипания // Изв. Вузов. Сер. Энергетика. - 1983. - № 4. - С. 61-67.
9. Пастушенко В.Л., Таубман Е.И. Исследование показателей процесса вскипания жидкости в вертикальной камере испарения // Тепло - энергетика. - 1985. - № 7. - С. 70-72.
10. Таубман Е.И., Пастушенко В.Л., Лезнова С.И. Анализ показателей каскадных установок мгновенного вскипания // Промышленная теплотехника. - 1985. - Т. 7. - № 2. - С. 51-59.
11. Пастушенко В.Л. Влияние оттяжек парогазовой смеси на уровни жидкости в установках мгновенного вскипания // Химия и технология воды. - 1985. - Т. 7. - № 6. - С. 74-75.
12. А.с. 1243758 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 01D 3/06, 1/26. Установка мгновенного вскипания / Е.И.Таубман, В.Л.Пастушенко, В.И.Савинкин (СССР). - № 3658036/23-26; Заявлено 03.11.83; Опубл. 15.07.86, Бюл. № 26. - 3 с.: ил.
13. Таубман Е.И., Пастушенко В.Л. Влияние оттяжек парогазовой смеси на показатели установок мгновенного вскипания // Изв. Вузов. Сер. Энергетика. - 1986. - № 8. - С. 61-67.
14. А.с. 1261682 СССР, МКИ<sup>3</sup> В 01D 1/14, С 02 F 1/04. Выпарная установка / Е.И.Таубман, В.А.Горнев, В.Л.Пастушенко, В.И.Савинкин. - № 3432294/31-26; Заявлено 04.05.82; Опубл. 07.10.86, Бюл. № 37. - 2 с.: ил.
15. Пастушенко В.Л. Распределение температур в вертикальной камере испарения опреснительной установки мгновенного вскипания // Промышленная теплотехника. - 1987. - Т. 9. - № 3. - С. 32-36.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$\alpha, \bar{\alpha}$  - молекулярный и эффективный коэффициенты температуропроводности;  $c$  - удельная изобарная теплоемкость;  $\bar{D}$  - эффективный коэффициент диффузии;  $d, \ell$  - диаметр и текущая длина КИ;  $E', E''$  - расходы парогазовой смеси на оттяжку и перепуск;  $g$  - ускорение свободного падения;  $K_r$  - радиальный коэффициент теплопередачи между зонами Ша и Шб;  $m, N, n, z$  - числа контуров рециркуляции, ступеней испарения, ступеней испарения в одном каскаде, каскадов;  $p, t$  - давление и температура испаряемой жидкости;  $S$  - расход испаряемой жидкости на входе в первую КИ;  $W$  - производительность СИ по дистилляту;  $w_{\text{ш}}$  - скорость циркуляции в зоне Ш;  $\Delta t, \Delta p$  - перепады температур и давлений;  $\Delta t_s, \Delta t_n, \Delta t_g$  - исходный перегрев жидкости по сравнению с температурой насыщения в СИ, недогрев до неё охлаждающей жидкости в конденсаторе, физико-химическая температурная депрессия;  $\theta$  - температура жидкости, охлаждающей конденсатора;  $\mu, \rho$  - коэффициент динамической вязкости и плотность;  $\mu_r$  - гидравлический коэффициент расхода переточного устройства;  $\psi$  - число ограничений;  $\varepsilon$  - удельная теплота парообразования.

$$Eu = \frac{\rho + \rho' g H}{\rho' (w')^2}; \quad Re = \frac{w' d}{\alpha}; \quad Ku = \frac{z}{c' \Delta t_s}; \quad Fz = \frac{(w'')^2}{g d}; \quad Le = \frac{\bar{D}}{\alpha}.$$

## ИНДЕКСЫ

вх, вых - вход и выход; ('), (") - жидкость и пар; о - исходная вода; н - нагретая жидкость на входе в первую ступень контура, каскада; S - состояние насыщения.

*Зак*