

Автор ер.

к

Министерство высшего и среднего специального образования УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

Инженер КОСТАНЖИ Иван Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ  
И НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ  
СИСТЕМЫ СОВМЕСТНО РАБОТАЮЩИХ  
ВЫПАРНЫХ И ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ  
С ЦЕЛЮ ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ

Специальность 05.13.07—Автоматическое управление  
технологическими процессами пищевой промышленности

АВТОРЕФЕРАТ  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

НЕТ КАРТ

ОДЕССА — 1975

он

Министерство высшего и среднего специального  
образования УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ  
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Инженер КОСТАНЖИ Иван Иванович

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ  
РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ СОВМЕСТНО РАБОТАЮЩИХ  
ВЫПАРНЫХ И ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ЦЕЛЬЮ  
ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ

Специальность 05.13.07. Автоматическое управление  
технологическими процессами пищевой промышленности.

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пересчет 19 81

4012551

Одесский технологический  
институт пищевой промыш-  
ленности им. . В. Ломоносова  
Б И Б Л И О Т Е К А

Одесса - 1975

Работа выполнена в Одесском технологическом институте пищевой промышленности им. М.В.Ломоносова и Одесском электротехническом институте им. А.С.Попова на кафедре "Основ автоматики и вычислительной техники". Экспериментальная часть работы проведена на II-ом им.Петровского сахарном заводе.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор П.Н.ПЛАТОНОВ.

Официальные оппоненты: заслуженный деятель науки и техники УССР, доктор технических наук, профессор М.Л.ВАРЛАМОВ; кандидат технических наук, доцент И.П.НИКУЛЬЧА.

Ведущее предприятие - Опытное производство "Сахпром-энергоналадка".

Автореферат разослан "26" мая 1975 г.

Защита диссертации состоится "27" июня 1975 г. на заседании Совета факультета автоматизации и приборостроения Одесского технологического института пищевой промышленности им. М.В.Ломоносова.

Отзыв на автореферат диссертации в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью учреждения, просим направить в Ученый Совет института по адресу: 270039, г.Одесса-39, ул. Свердлова, II2, ОТИПП им. М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института

Ученый секретарь Совета  
К.Т.Н.

Л.А.ЗАПОРОЖЕЦ

## В В Е Д Е Н И Е

Упаривание различных технологических растворов относится к наиболее распространенным процессам во многих отраслях народного хозяйства, в которых выпарные установки являются основным или вспомогательным оборудованием по переработке сырья, регенерации продукта и утилизации сточных вод.

От качественной работы выпарной установки зависит ритмичность производства, качество продукции и производительность всего предприятия.

Для обеспечения требуемых технологических режимов работы многокорпусных выпарных установок (МВУ) необходимы надежные системы их автоматизации, для разработки и совершенствования которых требуется достоверная информация о статических и динамических свойствах установок.

Настоящая работа направлена на решение вопросов изыскания эффективных режимов работы системы совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов при проектировании и эксплуатации с целью их автоматизации.

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для оптимизации режимов работы МВУ с внешними потребителями в настоящее время широкое распространение получили экономико-математические методы и математические модели с применением численных методов и ЭВМ.

Большую работу по составлению математических моделей и получению алгоритмов проектных проверочных и оптимизационных расчетов МВУ проделали ученые И.А.Тищенко, М.А.Кичигин, Г.Н.Костенко, Н.А.Ушатинский, Г.М.Клеев, Н.И.Гельперин, С.Ф.Жигалов, Т.А.Колач, Д.В.Радун, М.Я.Дикис, А.Г.Левачев, Р.Я.Ладиев, В.Ф.Коваленко, Н.Ю.Тобилевич, Б.А.Еременко, Б.И.Таубман, И.Г.Либерман, Г.А.Киженов и др.

Полученные математические модели в некоторой мере упрощенные направлены в первую очередь на снижение трудоемкости расчетов при обеспечении удовлетворительной точности и достоверности результатов.

Математические модели МВУ, работающей совместно с внешними потребителями, должны более полно учитывать закономер-

ности тепло- и массообмена в элементах установки, что повышает их качество за счет повышения точности и надежности результатов.

В этой связи приобретает большое значение разработка достаточно полной математической модели системы совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов, позволяющей моделировать переменные режимы работы системы. Поскольку полная математическая модель состоит из системы нелинейных уравнений, решение её возможно с применением численных методов вычислительной математики и вычислительных машин.

Цель работы. Целью настоящей работы является: а) разработка нелинейной математической модели системы совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов, отражающей практически все известные сведения о процессах в выпарных станциях с внешними потребителями; б) разработка системы алгоритмов для получения статических и динамических характеристик МВУ с помощью ЭВМ, а также оптимизации параметров проектируемых и эксплуатируемых МВУ; в) получение статических характеристик с помощью ЭВМ и установление степени соответствия полученной модели (проверка адекватности); г) получение динамических характеристик с целью определения границ применения линейных моделей и определение области, где необходимо использовать нелинейные модели; д) проведение оптимизации параметров работающих и проектируемых станций на основании многопараметрических функций.

Научная новизна. В работе выполнены теоретические и экспериментальные исследования, научная новизна которых заключается в следующем:

- разработана методика составления математических нелинейных моделей МВУ с внешними потребителями в отличие от традиционных, учитывающая переменные теплофизические свойства рабочих сред, изменение коэффициента теплопередачи по аппаратам;

- математическая модель МВУ с описанием локальной теплоотдачи и учетом, дополнительно к известным, ряда параметров состоит из подчиненных элементов - моделей греющей камеры, стенки кипяточной трубы, парожидкостного пространства, выпарного аппарата, МВУ в целом и внешних потребителей;

- адекватность математической модели устанавливается по-

элементно при работе системы в целом;

- обоснованы выборы методов вычислительной математики решения нелинейных систем уравнений статики и динамики при разработке методики моделирования математических моделей на ЭВМ;

- исследование нелинейной и упрощенных моделей МВУ с внешними потребителями с помощью ЭВМ дает возможность определить динамические свойства МВУ по различным каналам и при различных воздействиях, выявить главные и второстепенные нелинейные связи между режимными параметрами установки;

- при сравнении нелинейной и упрощенных моделей установлено, что существенные нелинейности и погрешности на последних корпусах таких параметров, как концентрация раствора, коэффициенты теплоотдачи, теплопередачи, температурный напор, погрешность моделирования по суммарной производительности МВУ невелика;

- при регулировании ряда режимных параметров МВУ уровня и концентрации раствора, производительности по пару либо температуры (давления) пара целесообразно применить комбинированную систему управления, при этом использование дополнительного канала по расходу пара на подпитку позволяет осуществить частично инвариантное управление, способствующее улучшению качества регулирования;

- учитывая невозможность одновременно регулировать эти параметры вследствие их взаимосвязанности, необходимо сосредоточить каналы управления таким образом, чтобы регулирование производительности по пару, температуры (давления) пара осуществлялось в аппаратах с развитым паротбором, используя при этом дополнительный канал по расходу пара на подпитку; регулирование уровней предпочтительней осуществлять расходами жидкости на входах в аппараты, так как в этом случае имеются более существенные регулирующие возможности (больше коэффициент усиления); регулирования концентрации раствора возможно осуществить на последнем аппарате МВУ;

- обоснован критерий эффективности работы МВУ и проведена технико-экономическая оптимизация основных параметров МВУ.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

- разработана нелинейная математическая модель системы работающих совместно выпарных и теплообменных аппаратов и

доказана возможность её применения для моделирования в широком диапазоне изменения эксплуатационных параметров;

- разработана методика моделирования на ЭВМ статических и динамических характеристик МВУ, а также и оптимизации эксплуатационных параметров при эксплуатации и проектировании МВУ;

- при помощи разработанных алгоритмов и программ для ЭВМ можно моделировать полную нелинейную систему, а также упрощенные с целью определения границ применения упрощенных моделей МВУ и определение области, где необходимо использовать нелинейные модели;

- определены технический и экономический показатели оптимизируемости МВУ, сформирован критерий оптимизации режимов работы и на основе моделей определены эффективные управляющие воздействия на выпарную станцию;

- разработаны программы на языке "Фортран" и "АКИ-Т" позволяют получить аналитические зависимости, описывающие теплофизические свойства раствора и пара с наперед заданной точностью, которые могут быть использованы исследователями при машинных расчетах режимов работы МВУ;

- показана возможность регулирования ряда режимных параметров МВУ комбинированной системой управления, при этом использование дополнительного канала по расходу пара на подпитку позволяет осуществить частично инвариантное управление, способствующее улучшению качества регулирования.

Реализация научно-технических результатов. Разработанные математические модели использованы нами для моделирования системы совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов и определения эффективных управляющих воздействий и режимов её работы.

Полученные линейная и нелинейная модели со сосредоточенными параметрами применены заводом "Сахавтомат" при изучении работы термотурбокомпрессора системы "Укрсахэнергоналадка" совместно с МВУ.

Результаты моделирования нелинейной модели и предложенный способ оптимального регулирования уровней легли в основу разработанной опытным производством "Сахпромэнергоналадка" и внедренной на сахарном заводе им. Артема установки оптимизации параметров выпарной станции.

Годовой экономический эффект от внедрения для сахзаво-

да мощностью 3,0 тыс. тонн свеклы в сутки составляет 23,4 тыс. рублей.

Указанные работы выполнены на основании планов внедрения новой техники Укрглавсахара Минпищепрома УССР.

В дальнейшем, при широком внедрении в сахарную промышленность средств вычислительной техники, математические модели могут быть использованы при разработке АСУ-ТШ и АСУ-ТК сахарного завода.

Математические модели использованы также Донецким филиалом ВНИИчерметэнергоочистка при проектировании установки для опреснения промышленных стоков на Коммунарском металлургическом заводе МЧМ СССР.

При внедрении этой установки годовой экономический эффект составит 50 тыс. руб.

Апробация работы. Результаты настоящей работы доложены и одобрены на научно-технических конференциях Одесского технологического института пищевой промышленности им. М. В. Ломоносова 1969, 1970.

На городском семинаре по кибернетике и автоматическому управлению, Одесса, 1968.

На республиканских семинарах по динамике тепловых процессов, Киев, 1969, 1970, 1971, 1972 г.г.

На республиканском семинаре по алгоритмизации расчетов процессов и аппаратов химических производств, Киев, 1971.

На III Республиканской конференции "Повышение эффективности и совершенствование процессов и аппаратов химических производств" в 1973 г. (г. Львов).

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 159 страницах машинописного текста, состоит из введения, пяти глав, выводов и приложений, Рисунков - 33, библиографий - 143.

В первой главе приведен анализ методов расчета установившихся и переходных процессов в выпарных установках.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей для расчета и оптимизации выпарных установок.

В третьей главе изложены вопросы разработки системы алгоритмов для расчета характеристик и оптимизации выпарных установок, получены: математическая модель для установившихся

ся режимов установки; статические характеристики и определена адекватность модели.

Четвертая глава содержит результаты исследования переходных процессов МВУ; получен алгоритм расчета переходных процессов на ЭВМ, исследовано влияние нелинейных связей между параметрами на динамические характеристики; динамики МВУ, работающей совместно с теплообменными аппаратами.

В пятой главе дана математическая модель критерия оптимизации МВУ, алгоритм комплексной технико-экономической оптимизации основных параметров МВУ и проведена комплексная оптимизация параметров МВУ.

В приложении даны аналитические зависимости теплофизических свойств для сахарных растворов, разработанные программы на языках "АКИ-Т" и "Фортран", таблицы исходных данных и данные, полученные при расчете для выбранной установки, акты внедрения.

#### МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА И ОПТИМИЗАЦИИ ВЫПАРНЫХ УСТАНОВОК

Система уравнений, описывающая МВУ с внешними потребителями, состоит из системы уравнений элементов установки, которые дополнены уравнениями связей между элементами. Выпарной и теплообменными аппаратами можно разделить на три основных звена: греющая камера, стенки кипяtilьных трубок и парожидкостное пространство.

Процессы, протекающие в этих звеньях, описываются уравнениями: сохранения массы, энергии, количества движения, состояния и другими.

Нелинейная математическая модель для прямоточной МВУ с пароотбором и взаимосвязанных с ней теплообменников, включенных параллельно по расходу пара и последовательно по расходу раствора, имеет следующий вид:

уравнения для температуры пара в греющей камере аппаратов МВУ:

$$a_{ii} \frac{dt_{ii}}{dt} = (D_{i-1} - D'_{i-1}) q_i - F_i q_{ii} \quad (1)$$

Уравнения для температуры стенки кипяtilьных трубок аппаратов МВУ:

$$c_H G \frac{dt_{ci}}{dt} = F_i (q_{ii} - q_{zi}) \quad (2)$$

Уравнения для уровней раствора в аппаратах МВУ:

$$a_{zi} \frac{dh_i}{dt} + a_{\theta i} \frac{d\theta_i}{dt} + a_{bi} \frac{db_i}{dt} = S_{i-1} + D_{i-1}'' - S_i - D_i'' - (D_i - D_i') - \sum_{j=1}^m E_j \quad (3)$$

Уравнения для температуры парожидкостного пространства аппаратов МВУ:

$$a_{zi} \frac{dh_i}{dt} + a_{\theta i} \frac{d\theta_i}{dt} + a_{bi} \frac{db_i}{dt} = q_{\theta} F_i + S_{i-1} c_{\theta} \theta_{i-1} + D_{i-1}'' i_{i-1}'' - S_i c_{\theta} \theta_i - [D_i'' + (D_i - D_i') + \sum_{j=1}^m E_j] i_i \quad (4)$$

Уравнения для концентрации раствора в аппаратах МВУ:

$$a_{zi} \frac{dh_i}{dt} + a_{\theta i} \frac{d\theta_i}{dt} + a_{bi} \frac{db_i}{dt} = S_{i-1} b_{i-1} - S_i b_i \quad (5)$$

Уравнения состояния для параметров в греющих камерах аппаратов МВУ:

$$P_i = \sum_{k=0}^N C_k t_{ni}^k \quad (6)$$

$$P_i' = \sum_{k=0}^N A_k t_{ni}^k \quad (7)$$

$$L_i = \sum_{k=0}^N B_k t_{ni}^k \quad (8)$$

$$Z_i = \sum_{k=0}^N R_k t_{ni}^k \quad (9)$$

$$U_i = \sum_{k=0}^N H_k t_{ni}^k \quad (10)$$

Уравнения состояния для параметров парожидкостного пространства аппаратов МВУ:

$$P_i' = \sum_{k=0}^N C_k (\theta_i - \Delta_i)^k \quad (11)$$

$$P_i'' = \sum_{k=0}^N A_k (\theta_i - \Delta_i)^k \quad (12)$$

$$L_i' = \sum_{k=0}^N B_k (\theta_i - \Delta_i)^k \quad (13)$$

$$U_i' = \sum_{k=0}^N H_k (\theta_i - \Delta_i)^k \quad (14)$$

$$P_i' = \sum_{k=0}^N \theta_i^k \sum_{k=0}^M Z_k \theta_i^k \quad (15)$$

$$C_i = 1 - A_1 \theta_i - A_2 \theta_i^2 \quad (16)$$

Уравнения для расхода пара в греющие камеры аппаратов

МВУ:

$$D_{i-1} = C_{2i-1} (A_{52} + A_{53} \frac{P_i}{P_{i-1}}) \sqrt{P_{i-1} (P_{i-1} - P_i)} \quad (17)$$

$$D_i = C_{2i} (A_{52} + A_{53} \frac{P_{i+1}}{P_i}) \sqrt{P_i (P_i - P_{i+1})} \quad (18)$$

либо

$$D_i = \frac{a_{i+1}}{z_{i+1}} \frac{dt_{ni+1}}{dt} + \frac{q_{i+1} F_{i+1}}{z_{i+1}} + D_i' \quad (19)$$

Уравнения для расхода раствора в аппараты МВУ:

$$S_{i-1} = C_{1i-1} \sqrt{P_{i-1} [P_{i-1}' - P_i' - P_i' (h_i + \beta_i)]} \quad (20)$$

$$S_i = C_{1i} \sqrt{P_i [P_i' + P_i' (h_i + \beta_i) - P_{i+1}' - P_{i+1}' (h_{i+1} + \beta_{i+1})]} \quad (21)$$

Уравнения для расходов пара на подпитку аппаратов МВУ:

$$D_{i-1}'' = C_{3i-1} (A_{52} + A_{53} \frac{P_i'}{P_{i-1}'}) \sqrt{P_{i-1}' (P_{i-1}' - P_i')} \quad (22)$$

$$D_i'' = C_{3i} (A_{52} + A_{53} \frac{P_{i+1}'}{P_i'}) \sqrt{P_i' (P_i' - P_{i+1}')} \quad (23)$$

Уравнение для удельных тепловых потоков к поверхности нагрева аппаратов МВУ:

$$q_{ii} = \frac{t_{ni} - t_{ci}}{\frac{1}{\alpha_{ii}} + \frac{\delta_{ii}}{2\lambda_{ii}}} \quad (24)$$

При выборе соотношений для определения коэффициентов теплоотдачи от греющего пара к поверхности нагрева  $\alpha_{ii}$  был произведен анализ формул Костенко Г.Н., Нуссельта В., Лабунцова Д.А., Кутателадзе С.С. и др.

В результате сопоставления численных данных, полученных на основе этих формул, было установлено, что в диапазоне температур 65-140°C и температурном напоре между греющим паром и поверхностью нагрева  $\Delta t = 1,0 - 3,2^\circ\text{C}$  результаты отличаются не более чем на 11%. В качестве расчетной зависимости выбрана преобразованная формула Костенко Г.Н., так как в ней учитывается в явном виде зависимость коэффи-

циента теплоотдачи  $\alpha_{ii}$  от температурного напора и температуры конденсата.

Уравнение для коэффициентов теплоотдачи при конденсации

$$\alpha_{ii} = \frac{A_{43} (A_{44} + A_{45} t_{ni} + A_{46} t_{ni}^2)^{0,75}}{[(t_{ni} - t_{ci}) L_i]^{0,25}} \quad (25)$$

Вопросы локальной теплоотдачи в кипятильных трубах освещены в работах Щеголева Г.М., Тобилевича Н.Ю., Еременко Б.А., Ладиева Р.Я., Федоткина И.М., Дыченко А.С. и др. Для определения локальных коэффициентов при кипении использованы зависимости Федоткина И.М. и Дыченко А.С., выраженные в виде обобщенных уравнений. При этом принята схема распределения кипятильной трубы на четыре участка, границы которых зависят от физических свойств кипящего раствора, условий гидродинамики, теплообмена и пр.

Уравнение для границы и коэффициентов теплоотдачи при кипении для экономайзерного участка

$$l_{ii} = 3,77 \cdot 10^{-5} d K_1^{0,33} K_2^{0,45} P_2^{-0,4}; \quad \alpha_{2i}^I = 0,023 \frac{\lambda}{d} \left( \frac{w_0 d}{\nu} \right)^{0,6} P_2^{0,4} \quad (26)$$

Для участка поверхностного кипения

$$l_{2i} = 4,21 \cdot 10^{-4} d K_1^{1,3} K_2^{0,5} P_2^{-0,35}; \quad \alpha_{2i}^{II} = [5,26 \left( \frac{L_i}{d} K_1^{1,3} K_2^{0,5} \right)^{0,17} P_2^{0,1}] \alpha_{2i}^I \quad (27)$$

Участок развитого кипения

$$l_{3i} = \frac{900 d g_0 w_0' \rho'}{q} \frac{\beta_{kr}}{1 - \beta_{kr}}; \quad \alpha_{2i}^{III} = (4,13 G_2^{0,65} Re^{-0,87} P_2^{0,6}) \alpha_{2i}^I \quad (28)$$

Участок уменьшения интенсивности теплоотдачи к парожидкостной смеси

$$l_{ii} = L_i - l_{3i}; \quad \alpha_{2i}^{IV} = \frac{\lambda}{d} (0,19 P_{2i}^{0,6} K_p^{0,59} K_w^{-0,7} P_2^{-0,1}) \quad (29)$$

Среднее значение коэффициентов теплоотдачи при испарении

$$\alpha_{2i} = \frac{1}{L_i} \left( \int_0^{l_i} \alpha_{2i}^I dl + \int_{l_i}^{l_{ii}} \alpha_{2i}^{II} dl + \int_{l_{ii}}^{l_{3i}} \alpha_{2i}^{III} dl + \int_{l_{3i}}^{L_i} \alpha_{2i}^{IV} dl \right) \quad (30)$$

Теплофизические свойства раствора получены аппроксимацией в зависимости от концентрации и температуры кипения раствора из табличных и графических данных ( $\lambda, \nu, P_2$  и др.).

Уравнение для удельных тепловых потоков к раствору в аппаратах МВУ:

$$q_{2i} = \frac{t_{ci} - \theta_i}{\frac{1}{\alpha_{2i}} + \frac{\delta_c}{2\lambda_n}} \quad (31)$$

Уравнение для температуры пара в греющих камерах теплообменных аппаратов:

$$a_{ij} \frac{dt_{ij}}{dt} = E_j z_j - q_{ij} F_j \quad (32)$$

Уравнение для температуры поверхностей нагрева теплообменных аппаратов:

$$c_{ij} B_j \frac{dt_{ij}}{dt} = F_j (q_{ij} - q_{2j}) \quad (33)$$

Уравнение для жидкостного пространства теплообменных аппаратов:

$$\frac{c_i B_i}{2} \frac{d\theta_i}{dt} = F_j q_{ij} + S_j c_j (\theta_{j-1} - \theta_j) \frac{c_i B_i}{2} \frac{d\theta_{j-1}}{dt} \quad (34)$$

Уравнения состояния для параметров пара в греющих камерах теплообменных аппаратов имеют аналогичный вид (6)-(10).

Уравнение для расхода пара в греющие камеры теплообменников:

$$E_j = c_{ij} (A_{52} + A_{53} \frac{P_i'}{P_j'}) \sqrt{P_i' (P_i' - P_j')} \quad (35)$$

Уравнения для удельных тепловых потоков к поверхностям нагрева теплообменных аппаратов имеют аналогичный вид (24).

Уравнение для удельных тепловых потоков растворов теплообменных аппаратов:

$$q_{ij} = \frac{t_{ci} - \theta_j}{\frac{1}{\alpha_{ij}} + \frac{\delta_c}{2\lambda_n}} \quad (36)$$

Уравнение для коэффициентов теплоотдачи от греющего пара к поверхности нагрева теплообменных аппаратов имеет вид аналогичный (25).

Уравнения для коэффициентов теплоотдачи от поверхности нагрева к жидкостному пространству теплообменных аппаратов:

$$\alpha_{ij}^* = \frac{A_{52}}{2} Re^{0.8} (A_{56} \frac{v_j}{\lambda_j} c_j \gamma_j)^{0.45} \quad \text{при } Re > 10000 \quad (37)$$

$$\alpha_{ij}^* = A_{59} (\lambda_j c_j \gamma_j)^{0.75} (\frac{W_j}{L_j})^{0.75} \quad \text{при } Re \leq 10000 \quad (38)$$

Значения переменных коэффициентов имеют следующий вид:

$$a_{ik} = (V_{ni} - V_{ki}) \left[ \left( \sum_{k=0}^n H_k t_k^k - c_k t_k \right) \sum_{k=1}^n K A_k t_k^{k-1} + \sum_{k=0}^n A_k t_k^k \sum_{k=1}^n K H_k t_k^{k-1} \right] + c_k B_k + c_n B_n + 0.5 c_u B_u \quad (39)$$

$$a_{2i} = (p_i' - p_i'') \eta_i \quad (40)$$

$$a_{3i} = (V_{\alpha} - V_i' - \eta_i h_i) \sum_{k=1}^n \kappa A_k (q_i - q_i')^{k-1} + (V_i' - \eta_i h_i) \sum_{k=1}^n \rho_i^{k-1} \sum_{m=0}^k z_m \theta_i^k \quad (41)$$

$$a_{4i} = (V_i' + \eta_i h_i) \sum_{k=0}^n \theta_i^k \sum_{m=1}^k \kappa z_m \theta_i^{k-1} \quad (42)$$

$$a_{5i} = (c_i \theta_i p_i' - u_i' p_i'') \eta_i \quad (43)$$

$$a_{6i} = (V_{\alpha i} - V_i' - \eta_i h_i) [p_i' \sum_{k=1}^n \kappa H_k (q_i - q_i')^{k-1} + u_i' \sum_{k=1}^n \kappa A_k (q_i - q_i')^{k-1}] - \\ - (V_i' - \eta_i h_i) [A_2 \theta_i p_i' - c_i \theta_i \sum_{k=1}^n \rho_i^{k-1} \sum_{m=0}^k z_m \theta_i^k - p_i' c_i] + c_i \theta_i + a_5 c_{\alpha} G_{\alpha i} \quad (44)$$

$$a_{7i} = -(V_i' + \eta_i h_i) [p_i' \theta_i (A_1 - A_2 \theta_i) + c_i \theta_i \sum_{k=0}^n \theta_i^k \sum_{m=1}^k \kappa z_m \theta_i^{k-1}] \quad (45)$$

$$a_{8i} = p_i' \theta_i \eta_i \quad (46)$$

$$a_{9i} = \theta_i (V_{\alpha} + \eta_i h_i) \sum_{k=1}^n \rho_i^{k-1} \sum_{m=0}^k z_m \theta_i^k$$

$$a_{10i} = (V_{\alpha i} + \eta_i h_i) / \theta_i \sum_{k=0}^n \theta_i^k \sum_{m=1}^k \kappa z_m \theta_i^{k-1} + p_i' \quad (47)$$

Значение переменного коэффициента  $a_{10}$  находится из (39) аналогично  $a_{11}$ . Величины  $t_m$ ,  $t_{\alpha}$ ,  $q$  — температуры соответственно пара, поверхности нагрева и раствора,  $h_i$  — уровень раствора,  $\theta_i$  — концентрация раствора,  $S_i$  — расход раствора,  $D_i$ ,  $D_i'$ ,  $E_i$ ,  $D_i''$  — расход пара соответственно на обогрев выпарных аппаратов, на подпитку, к тепловым потребителям и отжка неконденсирующихся газов,  $F$  — поверхность нагрева,  $\delta_c$  — толщина стенки кипяточной трубки,

$V_i$ ,  $V_i'$ ,  $V_{\alpha i}$ ,  $V_{\alpha}$  — объемы соответственно парожидкостного пространства, пара в греющей камере, пленки конденсата и жидкости, ограниченной плоскостью, от которой отсчитывается уровень;

$p_i$ ,  $p_i'$  — давление пара в греющей камере и вторичного пара;

$\rho_i$ ,  $\rho_i'$ ,  $\rho_i''$  — плотность пара в греющей камере, кипящего раствора и вторичного пара;

$i_i$ ,  $i_i'$  — энтальпия пара в греющей камере и вторичного пара;

$z_i$  — теплота конденсации в греющей камере;

$u_i$ ,  $u_i'$  — внутренняя энергия пара в греющей камере вторичного пара;

$$\Delta = \Delta' + \Delta'' + \Delta''' + \Delta''''$$

(48)

$\Delta_i$  - суммарная депрессия,  $\Delta_i'$  - физико-химическая депрессия;  $\Delta_i''$  - гидростатическая депрессия,  $\Delta_i'''$  - гидродинамическая депрессия,  $\Delta_i''''$  - потери температурного напора в трубопроводе;

- высота и диаметр кипяtilьных труб,

$L, d$  - среднеарифметическое значение температур на выходе и входе теплообменного аппарата,

$\lambda_m, \lambda$  - коэффициенты теплопроводности металла и раствора,

$\nu$  - коэффициент кинематической вязкости,

$\omega_0$  - скорость циркуляции жидкости,

$Re$  - число Рейнольдса,  $Pr$  - критерий Прандтля для раствора,

$Gr$  - критерий Грасгофа,  $Pr_u$  - критерий Пекле при кипении,

$K_1, K_2$  - комплексы Стермана, Стюшина,

$c_m, c, c_u$  - теплоемкость соответственно металла, раствора и изоляции,

$\theta, \theta_m, \theta_u, \theta_c, \theta'$  - масса соответственно раствора, конденсата, металла корпуса, соприкасающегося с парожидкостным пространством, изоляции металла, соприкасающегося с парожидкостным пространством, металла труб, металла корпуса греющей камеры;

$S_c$  - площадь поперечного сечения парожидкостного пространства,

$A, B, C, H, Z$  - постоянные коэффициенты.

Индексы:

$i-1$  - вход в аппарат,

$i$  - выход из аппарата (номер аппарата),

$j-1$  - вход в теплообменник,

$j$  - выход из теплообменника (номер теплообменника).

Уравнения динамики получены при следующих допущениях:

1. Температура металла и пленки конденсата, отличающиеся на постоянные величины от температуры пара в греющей камере:

$$\theta_{mi} = t_{mi} - \theta_1, \quad t_{ki} = t_{mi} - \theta_2$$

2. Не учитывается скорость изменения объема пленки конденсата.

3. Не учитывается массовая сила и сила инерции, действующие на пленку конденсата.

4. Температура изоляции корпуса равна среднеарифметическому значению температуры металла корпуса и окружающего воздуха:

$$\theta_u = 0.5(\theta_m + \theta_g)$$

5. Не учитываются потери тепла в окружающую среду.
6. Температура металла отличается на постоянную величину от температуры жидкости, т.е.

$$\theta_n = \theta_l - \gamma$$

7. Не учитывается сила инерции, действующая на массу жидкости.

8. Не учитывался унос раствора вторичным паром.

9. Кипятильные трубы имеют одинаковые геометрические размеры и выполнены из металла с одинаковыми теплофизическими свойствами.

10. Тепловой поток вдоль оси кипятильной трубы отсутствует.

11. Все трубы аппарата воспринимают одинаковое количество тепла.

Таким образом, получена нелинейная математическая модель (1)-(48), которая при  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, \dots, m$ , описывает динамику процессов тепло- и массообмена в системе совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов, а при  $i = 1$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ , динамику выпарного аппарата и связанных с ним теплообменников.

Для протиточной выпарной установки, работающей совместно с тепловыми потребителями, математическая модель не изменяется. Изменяются лишь индексы у параметров, определяющих расход раствора, т.е. индексом  $i = 1, 2, \dots, n$  заменяются соответственно индексам  $i = n, n-1, \dots, 1$ .

Если принять, что сумма  $\sum_{i=1}^n E_i = 0$ , то получим нелинейную математическую модель протиточной либо противоточной МВУ без внешних потребителей.

При сопоставлении математической модели для группы теплообменников, последовательно включенных по расходам раствора и параллельно связанных с аппаратами МВУ по расходам пара, можно приближенно представить их одним эквивалентным теплообменником. При этом для описания процесса теплообмена можно использовать математическую модель парожидкостного теплообменника.

В тех случаях, когда группа теплообменников не связана между собой по расходам жидкости и включена параллельно к аппаратам МВУ по расходам пара, эти теплообменники це-

лесообразно объединить в один эквивалентный теплообменник. При этом каждый из теплообменников представляется в виде отдельной секции эквивалентного теплообменника. Для описания процесса теплообмена в эквивалентном теплообменнике можно использовать систему уравнений (32)-(38).

#### АЛГОРИТМЫ ДЛЯ ПРОЕКТНЫХ И ПОВЕРОЧНЫХ РАСЧЕТОВ МВУ

При проектировании новых и анализе режимов работы действующих МВУ возникают следующие задачи:

1. Определение параметров МВУ при проектных и проверочных расчетах.
2. Расчет зависимостей критериев эффективности от независимых переменных и чувствительности этих зависимостей к различным параметрам.
3. Определение оптимальных параметров.
4. Определение динамических характеристик МВУ.

Структурные схемы алгоритмов для решения этих задач разработаны на основе системы нелинейных уравнений, описывающих стационарные и переходные режимы МВУ.

Система алгоритмов расчета МВУ состоит из следующих основных алгоритмов:

1. Алгоритмов уточненного расчета параметров в МВУ (АУР).
2. Алгоритм расчета зависимостей выходных параметров МВУ от входных или алгоритм расчета статических характеристик (АРСХ).
3. Алгоритм расчета зависимостей технико-экономических критериев эффективности (оптимальности) от независимых параметров (АРХО).
4. Алгоритм оптимизации параметров (АО).
5. Алгоритм расчета динамических характеристик (АРДХ).

Алгоритм АУР состоит из двух основных частей: задания исходной информации (ИИ) и операционной (ОБ), с помощью которой решается система нелинейных уравнений, заданных в явной или неявной форме. Решение производится с помощью численных методов. Если приближенное решение  $\bar{y}_0$  известно достаточно точно, то АУР его уточняет. Если  $\bar{y}_0$  неизвестен, то необходим вспомогательный алгоритм оценки  $\bar{y}_0$ . Этот алгоритм также состоит из двух частей: задания исход-

ной информации и операционной, рассчитывающей на основе приближенных соотношений из теории выпарных установок, заданных в явном виде.

Алгоритм АРСХ формируется из АУР путем добавления блока вариации вектора независимых параметров  $\bar{X}$ . Этот блок служит для вариации вектора  $\bar{X}$  с учетом заданных ограничений на  $\bar{X}$  и  $\bar{Y}$ . С помощью алгоритма АРСХ исследовались статистические характеристики МВУ, выполненных по различным схемам, а также оценивался дрейф этих характеристик при изменении различных конструктивных и режимных параметров.

Алгоритм АРХО формируется из АРСХ добавлением блока расчета целевой функции, алгоритм АО получается из АРХО включением в цепь обратной связи оптимизатора.

Алгоритм АРДХ разработан на основе использования численных методов интегрирования систем дифференциальных уравнений. В качестве начального состояния при расчете динамических характеристик МВУ принимается состояние, определяемое вектором  $\bar{Y}$ , рассчитанное по алгоритму АУР.

При разработке алгоритма решения нелинейной системы статики МВУ определены следующие численные методы: простых итераций, Зейделя, Ньютона и градиентный метод.

Поскольку аналитические выражения для частных производных нелинейных функций многих переменных имеют, как правило, громоздкие математические выражения или неявный вид, то значения производных определялись численным методом. Приращение аргументов определялось машинным экспериментом. Методы Ньютона и градиентный требуют намного большего машинного времени решения системы, поэтому нами было отдано предпочтение методу Зейделя, т.к. он не требует вычисления частных производных, позволяет сократить количество задаваемых величин при решении системы, поскольку величины, получаемые в предыдущих уравнениях, являются исходными для последующих.

При разработке алгоритмов возможны два варианта: совместное решение замкнутой системы, описывающей МВУ, и решение системы уравнений одного аппарата с последующим использованием этого алгоритма для всех аппаратов МВУ. Нами использован второй вариант, т.к. он обеспечивает существенное уменьшение объема памяти ЭВМ, занимаемого под программу.

На основании разработанных алгоритмов были составлены рабочие программы для ЭВМ "Минск 32" на языке "Фортран" и "АКИ-Т".

с. 60 12557

### Анализ статических характеристик МВУ.

В качестве примера моделировалась пятикорпусная выпарная установка работающая в свеклосахарном производстве, при различных внешних и внутренних возмущениях.

Наносились следующие возмущения:

а) пароттобором из первого аппарата  $E_1$ , в пределах  $\pm 100\%$  от номинального значения при постоянных

б) пароттобором из второго аппарата  $E_2$ , при постоянных

в) пароттобором из третьего аппарата  $E_3$ , при постоянных

г) пароттобором из четвертого аппарата  $E_4$ , при постоянных

д) расходом раствора, поступающим на выпарку  $S_0$ , при постоянных

е) концентрацией  $\beta_0$  раствора, поступающего на выпарку при постоянных

ж) температурой  $\theta_0$  раствора, поступающего на выпарку при постоянных

з) температурой паров  $t_{пк}$ , поступающих на конденсатор при постоянных

Исследовалось влияние нелинейностей при коэффициенте теплопередачи (K) постоянном и переменном, а также определялись экстремальность параметром при вышеуказанных возмущениях.

Из полученных статических характеристик для МВУ видно, что наибольшие значения расхождения параметров приходятся на последние аппараты МВУ. Наибольшее расхождение между моделью с  $K=var$  и  $K=const$  имеет место при нанесении таких возмущений, как пароттобор на корпусам (особенно II, III, IV), расход раствора  $S_0$  и его концентрация. Меньшая величина расхождения имеет место при возмущении по  $t_{пк}$ . В основном эти расхождения относятся к V аппарату МВУ. Наблюдается практическое совпадение моделей при возмущении

по температуре входящего раствора  $\theta_0$  и температуре греющего пара  $t_{пг}$ . При возмущении по  $E_1 = \pm 100\%$  номинальной величины составляют в среднем 2-5% по таким каналам, как производительность ( $W$ ), концентрация ( $\theta$ ) и коэффициент теплопередачи. При возмущении  $\pm 100\%$   $E_2$  расхождения составляют 10-50% по  $E_3$  - 5-20%;  $E_4$  - 1-10%, доходя на последних корпусах по  $K$  до 20% и выше. При возмущении по  $S_0$  расхождения составляют 10-20%. Изменения  $\theta_0$  в пределах 10-24% СВ дают погрешность около 10% при определении  $W, \theta$  и около 20-50% при определении  $K$ . При изменении  $\theta_0$  в пределах 116-132°C погрешности не превышают 1-2%. Изменение  $t_{пг}$  (62-84°C) дает расхождение 1-5% на первых четырех аппаратах. На пятом - до 10% по  $\theta$  и около 40-60% по  $K$ . Изменение  $t_{пг}$  температуры греющего пара приводит в основном, к расхождению определения  $K$  1-5%.

Наблюдается экстремальная зависимость коэффициента теплопередачи от изменения пароотбора  $E_2$  более 150-200% от номинального идет заметное снижение коэффициента теплопередачи второго аппарата. Наблюдается также экстремальное изменение коэффициентов теплопередачи второго и третьего аппаратов при изменении  $E_3 = 120-150\%$  от номинального. Экстремальные изменения внутренних параметров от возмущения по другим внешним параметрам не наблюдаются.

Установление адекватности больших систем, к которым можно отнести МВУ, на промышленном оборудовании, как известно, является достаточно сложным ввиду многообразия связей различных параметров. Проверка адекватности на отдельных элементах не дает положительного результата, т.к. нарушается взаимосвязь между элементами. Отсутствуют какие-либо конкретные рекомендации по проверке адекватности модели и МВУ в целом.

Нами предпринята попытка установления адекватности математической модели оборудованию поэлементно, но без нарушения взаимосвязи между ними. Для этого проведено сравнение параметров отдельных элементов систем (МВУ и её математической модели) при существующих взаимосвязях между элементами в каждой системе. Качественное соответствие модели объекту оценено с помощью постановки эксперимента.

Для установления адекватности предложенной модели МВУ

были использованы опытные данные, полученные совместно с Беликом В.Г. на экспериментальной 3-корпусной выпарной установке с паротборами, изготовленной и смонтированной на сахарном заводе в промышленной длине кипяточных труб, а также данные, полученные Н.Ю.Тобилевичем, В.А.Еременко, И.М.Федоткиным, А.С.Диченко и др.

Методика проведения исследований заключалась в том, что проводилось изменение тех же параметров, что и при получении статических характеристик и в том же диапазоне.

При проверке эквивалентности описания парожидкостного пространства проведено сравнение следующих параметров модели с опытными данными: скорости циркуляции раствора и среднего значения  $\alpha_{21}$  от изменения видимого уровня раствора; локальных значений  $\alpha_{21}$  по длине кипяточной трубы при различных уровнях; расхода раствора; его концентрации, температуры и др.

Эквивалентность модели греющей камеры определялась дополнительно по параметрам, которые не входят в модель парожидкостного пространства.

Эквивалентность для выпарного аппарата определялась по параметрам: расход пара в отбор - производительность, коэффициент теплопередачи, полезная разность температур; уровень жидкости в трубах - производительность, полезная разность температур; температура греющего пара - производительность, коэффициент теплопередачи и др.

Эквивалентность модели МВУ проверена при работе двух смежных аппаратов и тех же параметрах, что в выпарном аппарате.

Установленные численные значения относительной погрешности модели равны соответственно для парожидкостного пространства (кипяточной трубы) - 11,2%, выпарного аппарата - 13,9%, пятикорпусной МВУ - 16-18%.

Таким образом, разработанная математическая модель МВУ с внешними потребителями адекватна объекту в области возможных эксплуатационных изменений основных рабочих параметров, а по отдельным параметрам (уровень, паротбор) и за пределами их эксплуатационных значений.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ МВУ

Важное значение имеет исследование нелинейностей математической модели с целью упрощения при расчете динамических характеристик МВУ. Эти данные необходимы для выявления области значения режимных параметров, в пределах которой упрощенные модели достаточно полно отражают реальные процессы в МВУ.

Для исследования и расчета переходных режимов МВУ необходимо интегрировать системы, состоящие из большого количества нелинейных дифференциальных уравнений.

Для численного интегрирования системы нелинейных дифференциальных уравнений применен метод конечных разностей Рунге-Кутта, т.к. он обладает меньшей погрешностью в сравнении с методами Эйлера, Адамса и др.

Разработана методика моделирования динамических характеристик на ЭВМ. Получен алгоритм и рабочая программа для ЭВМ, которая позволяет производить расчет переходных процессов МВУ на основе как нелинейной, так и упрощенных моделей.

Дано соотношение для оценки возможности использования ЭВМ с количеством ячеек оперативной памяти для моделирования заданной выпарной установки.

В качестве примера моделировалась четырехкорпусная выпарная установка с концентратором и девятью теплообменными аппаратами, работающими на вторичных парах. Установка предназначена для выпаривания сахарного раствора.

Для оценки возможностей упрощения нелинейной математической модели МВУ (I)-(3I), 35, (39)-(44) было рассмотрено влияние отдельных нелинейных связей между параметрами установки на количественные результаты, получаемые при определении динамических характеристик МВУ. Нелинейности исследовались путем сопоставления отклонений динамических характеристик и значений режимных параметров для различных моментов времени, полученных на основе нелинейной и упрощенных математических моделей при воздействии:

- 1) возмущений одного и того же знака;
- 2) возмущений одинаковых по амплитуде, но противоположных по знаку;
- 3) одних и тех же возмущений, но различной амплитуды.

Изучение нелинейностей динамических характеристик модели выгарного аппарата производилось на основе характеристик, полученных при ступенчатых воздействиях расходом греющего пара  $\Delta D_0 = \pm 30\%$  от номинальной величины. В этом случае принимались постоянными  $D_{i-1}^n, D_i^n, E_j$ . При исследовании нелинейностей всей системы рассматривался режим работы, при котором осуществлялась стабилизация уровня раствора в аппаратах МВУ за счет изменения расходов раствора на их входе.

Кроме этого стабилизировалась температура раствора в концентраторе за счет регулирования разряжения в конденсаторе. При этом регулирующие воздействия расходами раствора явились одновременно возмущающими воздействиями по всем остальным каналам МВУ.

Наряду с воздействиями расходами раствора на входе каждого аппарата МВУ наносились ступенчатые возмущения:

а) ходом регулирующего органа греющего пара первого аппарата  $\Delta C_2 = \pm 30\%$  и  $\Delta C_2 = +50\%$  от номинального при постоянных:

$$E_1, -E_4, D_0^n - D_3^n, \theta_0, \theta_1, \Delta_i, h_i, \theta_k, S_k$$

б) отбором пара из первого аппарата  $\Delta E_1 = \pm 50\%$  от номинального значения при постоянных:

$$E_2, -E_4, D_0^n - D_3^n, \theta_0, \theta_1, \Delta_i, h_i, \theta_k, S_k$$

в) отбором пара из второго аппарата  $\Delta E_2 = \pm 82\%$  от при постоянных:

$$E_1, E_3, E_4, D_0^n - D_3^n, \theta_0, \theta_1, \Delta_i, h_i, \theta_k, S_k$$

г) концентрацией растворов на входе первого аппарата  $\Delta \theta_0 = \pm 30\%$  от  $\theta_0$  при постоянных:

$$E_1, -E_4, D_0^n - D_3^n, \theta_0, \Delta_i, h_i, \theta_k, S_k$$

д) расходом раствора на входе первого аппарата  $\Delta S_0 = +35\%$  от  $S_0$  при постоянных:

$$E_1, -E_4, D_0^n - D_3^n, \theta_0, \theta_1, \Delta_i, h_i, \theta_k, S_k$$

е) расходом греющего пара в первый аппарат  $\Delta D_0 = +30\%$  и отбором пара из четвертого аппарата  $\Delta E_4 = +42\%$  при постоянных:

$$E_1, -E_3, D_0^n - D_3^n, \theta_0, \theta_1, \Delta_i, h_i, \theta_k, S_k$$

Нелинейности исследовались путем последовательного включения в нелинейную математическую модель МВУ одной или нескольких упрощающих предпосылок:

I. Коэффициенты  $a_{11}, a_{21}, \dots, a_{101}$  - постоянные.

2. Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_{11}$ ,  $\alpha_{21}$  - постоянные.
3. Коэффициенты  $\alpha_{11}, a_{11}, a_{21}, \dots, a_{101}$  - постоянные.
4. Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_{11}$  - постоянные
5. Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_{21}$  - постоянные.
6. Расход греющего пара в первый аппарат  $D_0$  и коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_{11}$  и  $\alpha_{21}$  - постоянные.

Оценка значимости отдельных нелинейных связей между параметрами установки производилась путем сопоставления динамических характеристик, полученных на основе нелинейной и упрощенных моделей, и значений режимных параметров для момента времени  $\tau = 400$  сек. после нанесения возмущения. При этом наибольшее отклонение режимных параметров получено при сопоставлении динамических характеристик 3, по отношению к динамическим характеристикам I. В результате анализа было установлено, что наибольшие отклонения температуры и концентрации раствора наблюдаются в четвертом аппарате и равны соответственно 28% и 25%. Отклонения расходов раствора и пара в аппаратах МВУ находятся в пределах 30-40%. Почти в таких же пределах укладываются отклонения режимных параметров, полученных при сопоставлении динамических характеристик 5 и I. Учитывая, что полученные зависимости 3 и 5 получены при условии постоянства коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{11}, \alpha_{21}$  и отличаются между собой только за счет изменения коэффициентов  $a_{11}, a_{21}, \dots, a_{101}$ , можно предположить, что наибольшие отклонения нелинейной и упрощенных моделей связаны с постоянством коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{11}$  и  $\alpha_{21}$ . Однако сопоставление результатов 4 и I показало, что постоянство коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{11}$  не оказывает существенного влияния на численные значения режимных параметров. Отсюда следует, что наибольшие отличия нелинейной и упрощенных моделей связаны с зависимостью коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{21}$  от различных факторов.

Динамические характеристики режимных параметров при возмущении по  $\Delta C_2 = -30\%$  при следующих упрощающих предположениях: I получены на основе нелинейной модели; 2 при постоянстве  $\alpha_{21}$ ; 3 при постоянстве  $\alpha_{11}$  и  $\alpha_{21}$ ; 4 при постоянстве  $\alpha_{11}, \alpha_{21}; a_{11}, \dots, a_{101}$ . Сопоставление режимных параметров проведено также для момента времени  $\tau = 400$  сек.

В результате анализа численных данных установлено,

что наиболее существенные отклонения режимных параметров получены на основе упрощенных моделей в четвертом аппарате. При этом наибольшие отклонения температуры и концентрации раствора, расходов греющего пара и раствора получены при сопоставлении динамических характеристик 2 и I и равны соответственно 34%, 28%, 29%, 32%.

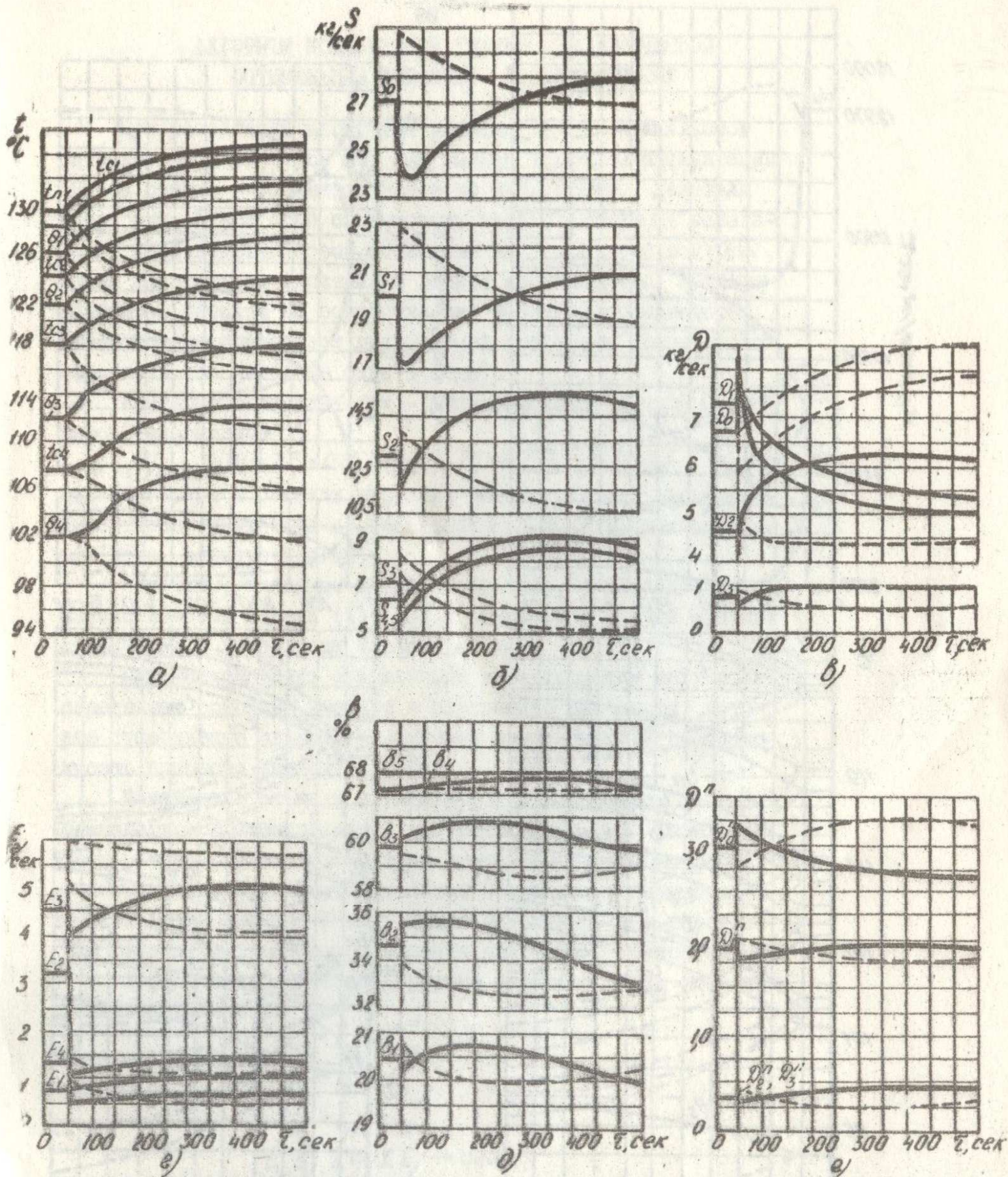
Сопоставление динамических характеристик, полученных при воздействии возмущений  $\Delta C_2 = \pm 30\%$  при условии переменности и постоянства коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{11}, \alpha_{21}$ , а также коэффициентов  $\alpha_{11}, \alpha_{21}, \dots, \alpha_{101}$ , позволило оценить влияние этих коэффициентов на численные результаты моделирования переходных процессов в МВУ.

Сравнение численных данных, полученных в результате моделирования переходных процессов МВУ в момент времени  $\tau = 400$  сек., показало, что при воздействии возмущения  $\Delta C_2 = -30\%$  максимальные отклонения температуры, концентрации и расходов раствора, пара, коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_{11}$  и  $\alpha_{21}$  отличаются соответственно в 1,6; 2,3; 3,0; 3,7; 2,3 и 2,4 раза больше, чем их отклонения при воздействии  $\Delta C_2 = +30\%$ .

На рис. 1 и 2 представлены динамические характеристики МВУ и системы теплообменников при возмущении отбором пара из второго аппарата МВУ  $\Delta E_2 = \pm 82\%$ .

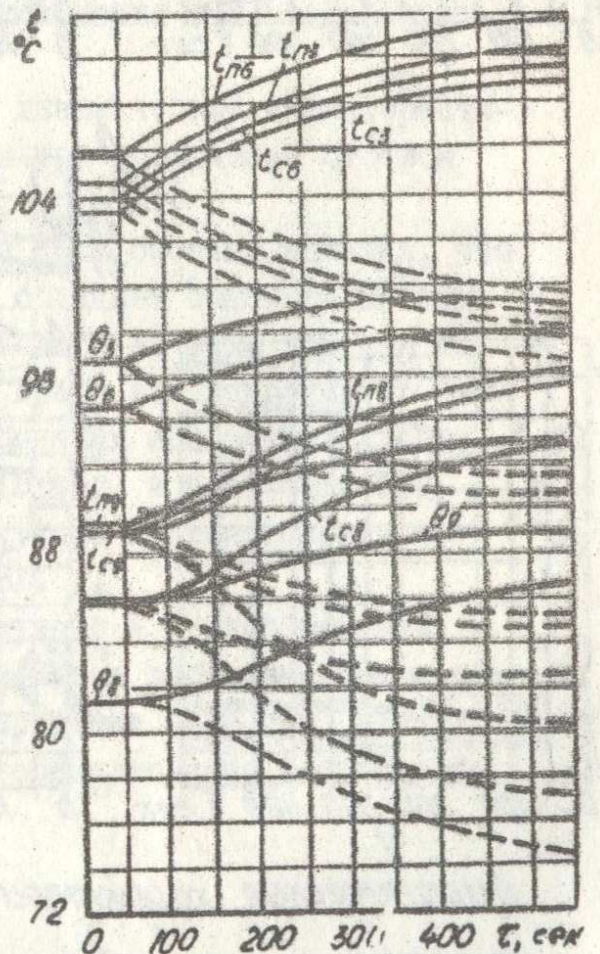
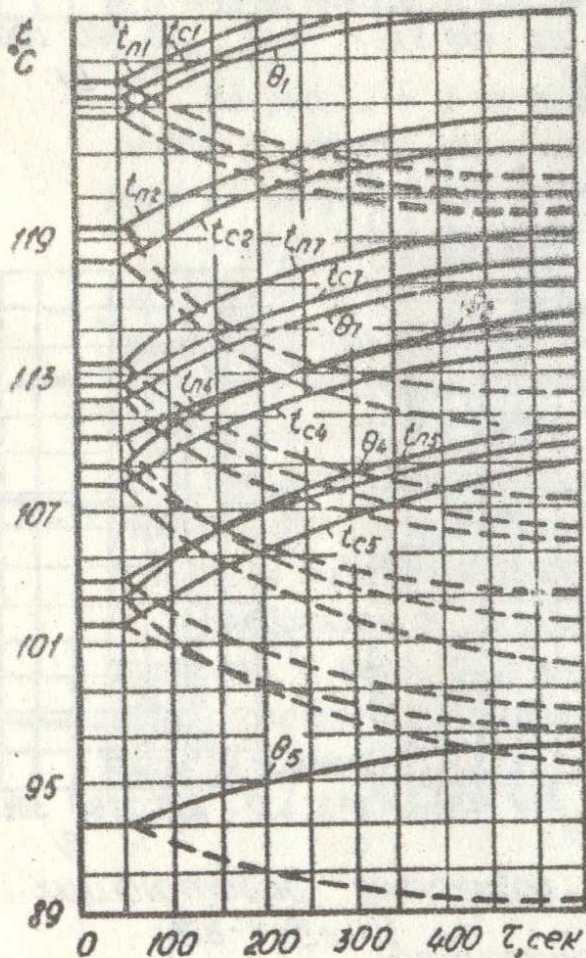
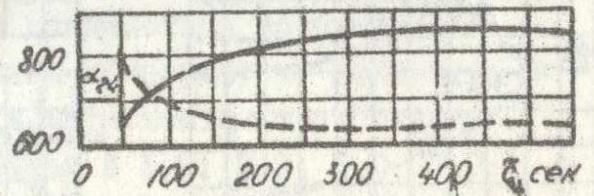
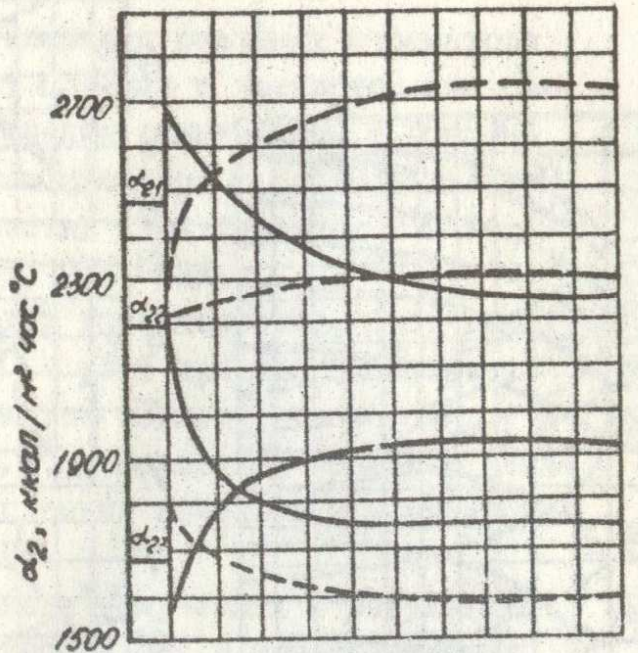
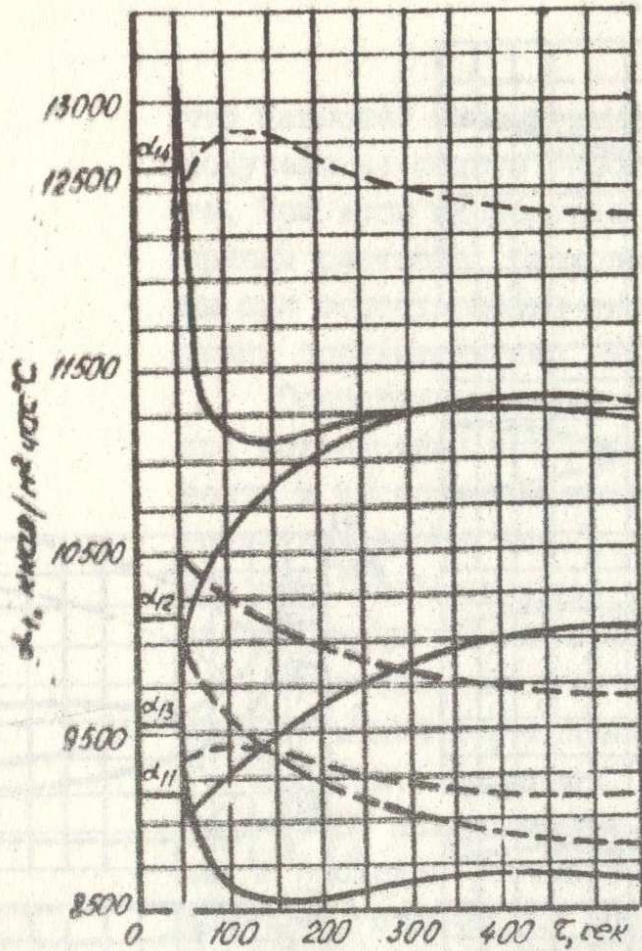
Анализ динамических свойств этой системы показал, что по температурным каналам объект обладает самовыравниванием. Длительность переходных процессов по этим каналам находится в пределах 500-600 сек. Время запаздывания по температурным каналам МВУ и теплообменных аппаратов находится в пределах соответственно 0-15 сек. и 4-40 сек. При этом наименьшее запаздывание получено в теплообменнике, связанном со вторым аппаратом МВУ.

Наибольшее запаздывание получено в теплообменниках, связанных с четвертым аппаратом. Время запаздывания по каналам концентрации находится в пределах 5-25 сек. Максимальные изменения расходов раствора находятся в пределах 10,8 - 14,4 т/час.



Динамические характеристики совместно работающих  
 выпарных и теплообменных аппаратов  $\begin{pmatrix} -\Delta E_2 = -82\% \\ -\Delta E_2 = +82\% \end{pmatrix}$

Рис. 1



Динамические характеристики совместно работающих:  
 выпарных и теплообменных аппаратов ( $-\Delta E_2 = -82\%$ )  
 Рис. 2 ( $-\Delta E_2 = +82\%$ )

## АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ МВУ

При разработке алгоритма решения задачи комплексной оптимизации параметров МВУ был выбран критерий оптимизации МВУ на основе экономической оценки результатов действия установки. В критерий оптимизации входят следующие показатели: производительность установки по выпаренной воде  $\Sigma W$ , объем капитальных вложений в данное производство, эксплуатационные затраты на осуществление процесса производства; качественные показатели выпускаемой продукции (при сроке строительства не более одного года).

Критерий оптимальности - минимум себестоимости  $C$  процесса выпаривания

$$C = (1/2 \Sigma W) (\rho c_p \Sigma F_i + \alpha c_p \Sigma F_i + c_q D_0 + c_b D_k + c_e \Sigma N_i) \quad (49)$$

где слагаемые в скобках выражают соответственно стоимость амортизационных отчислений, эксплуатационных расходов пара, воды, электроэнергии.

Величины, входящие в уравнение (49), определяются из математической модели (I)-(48) и выражаются в виде функций от внешних и внутренних параметров МВУ.

При исследовании статических характеристик МВУ были определены основные внешние и внутренние параметры, которые существенно влияют на критерий оптимальности (себестоимость процесса выпаривания  $C$ ).

В качестве внешних оптимизируемых параметров выбраны температура греющего пара и поступающего в МВУ раствора; температура пара, уходящего на конденсатор; концентрация выходного раствора поддерживается постоянной; суммарный парототбор постоянен. К внутренним оптимизируемым параметрам относятся температуры кипения раствора в аппаратах МВУ.

Ограничения на оптимизируемые параметры были выбраны в виде неравенств:

$$\begin{aligned} t_{mj}^b &> t_m > t_m^H \\ \theta_0^b &> \theta_0 > \theta_0^H \\ t_{mk}^b &> t_{mk} > t_{mk}^H \\ \theta_0, \theta_k, \Sigma W, \Sigma E_j &\rightarrow \text{const} \\ \theta_{i-1} &> \theta_i > \theta_{i+1}, \quad h_i^b > h_i > h_i^H \end{aligned} \quad (50)$$

Совокупность уравнений (I)-(48) и (49) совместно с

системой неравенств (50) есть полная нелинейная математическая модель критерия оптим. защиты для МВУ. С помощью этой модели можно определить экстремум критерия оптимизации, как функции многих взаимосвязанных и независимых переменных сложной многопараметрической технологической системы - МВУ, при этом показатели экономичности МВУ - расход тепла, воды, электроэнергии и т.д. оказываются зависимыми только от оптимизируемых параметров.

Поскольку подобные задачи являются предметом рассмотрения специального раздела вычислительной математики - нелинейного программирования, решение таких задач может быть получено только с помощью численных методов с применением ЭВМ. При рассмотрении таких численных методов, как сканирование, поочередного изменения параметров (Гаусса-Зейделя), градиента, наискорейшего спуска и комбинирований случайного поиска с наискорейшим спуском, нами выбран последний.

Достоинством этого метода является его относительная простота реализации на ЭВМ. Сравнение этого метода с методом градиента показывает, что при одинаковых размерах шагов оба метода имеют примерно одинаковую эффективность при размерности задачи, равной трем. При введении переменного шага и увеличении размерности задачи более эффективным оказывается метод случайного поиска. В методе случайного поиска при наличии ограничений нет необходимости применять специальную стратегию поиска, достаточно считать, что если очередной случайный шаг привел к нарушению ограничения, то это следует отнести к категории неудачных и далее руководствоваться обычной стратегией случайного поиска.

При разработке алгоритма оптимизации параметров МВУ задача была сформулирована следующим образом. МВУ, как объект оптимизации, представляет систему с  $n$  входными параметрами и  $(m + 1)$  выходными. Все входные параметры предполагаются управляемыми и определяются  $n, m$ -мерными векторами, координаты которых находятся в определенных пределах, что связано с ограничениями, накладываемыми на свободу выбора входных параметров. МВУ также имеет  $(m + 1)$  выходной параметр - основной (критерий оптимизации), который функционально связан с входными параметрами.

Задача оптимизации заключается в минимизации критерия

оптимизации путем соответствующего выбора вектора входных параметров.

Алгоритм разработан для случая, когда в области, ограниченной исходными параметрами, имеется один минимум, что было подтверждено при исследовании статических характеристик.

На основе разработанного алгоритма и рабочей программы для ЭВМ "Минск-32" было определено оптимальное количество ступеней выпаривания в области определения входных параметров при минимальной стоимости выпаривания, а также влияние показателей, входящих в экономический критерий оптимизации при различных стоимостях греющего пара, поверхности нагрева, воды и т.д.

Задача проведения процесса выпаривания при минимальных затратах может быть решена с применением систем автоматического оптимального управления на основе полученных математических моделей и результатов моделирования. При этом показатель эффективности непосредственно измеряется на объекте или определяется с помощью вычислительного устройства или ЭВМ.

Так как в настоящее время в сахарной промышленности не накоплен опыт применения ЭВМ, то можно вести разработку локальных систем оптимизации с использованием моделей статистики и динамики процесса и результатов моделирования. В качестве примеров локальной оптимизации могут быть разработаны функциональные схемы оптимального регулирования: уровней, времени работы МВУ до остановки и др. Ряд из них является развитием работ в этом направлении институтов: МЭИ, ВНИИСП, КТИП, "Пищепромавтоматика", УкрНИИХИММАШ, ОПИ (г.Одесса), завода "Сахавтомат" и др.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Разработана методика составления математических моделей системы совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов в отличие от традиционных учитывает переменные теплофизические свойства рабочих сред, изменение коэффициентов теплопередачи по аппаратам. Указанные особенности предлагаемой методики позволяют существенно уточнить расчетные характеристики МВУ.

2. Полученные нелинейные математические модели позволя-

ют решить следующие задачи:

а) оценки пределов применимости линейных моделей при исследовании на ЭВМ динамики и статики и оптимизации тепловых процессов в МВУ;

б) оценки степени влияния нелинейностей математической модели на изменение количественных значений режимных и конструктивных параметров МВУ;

в) анализа и синтеза совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов и системы их автоматического регулирования в широком диапазоне изменения режимных и конструктивных параметров;

г) проведение комплексной технико-экономической оптимизации основных параметров МВУ.

3. Разработана методика получения статических и динамических характеристик, а также оптимальных параметров на ЭВМ с помощью численных методов нелинейного программирования.

4. На основании разработанных алгоритмов получены рабочие программы для ЭВМ "Раздан-2", "Минск-22" и "Минск-32", которые позволяют проводить моделирование переходных и статических процессов в МВУ, а также их оптимизация на основе нелинейной и упрощенных математических.

5. Для определения эквивалентности математической модели и оборудования МВУ получены опытные данные на экспериментальной установке с промышленной длиной кипяточных труб. Сопоставление опытных данных и данных математической модели показало, что значения относительной погрешности модели равны для кипяточной трубы - 11,2%; выпарного аппарата - 13,9%; МВУ пятикорпусной - 16-18%.

6. Анализ динамических характеристик системы совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов показал, что:

а) объект обладает значительным самовыравниванием по температурам и концентрациям;

б) длительность переходных процессов по температурным каналам МВУ и теплообменных аппаратов находится в пределах 400-500 сек;

в) переходное запаздывание по каналам температуры МВУ и теплообменных аппаратов находится в пределах соответственно 0-70 и 10-150 сек. При этом наибольшее запаздывание получено при воздействии возмущения  $\Delta C_2 = +30\%$  по каналам:

сечение регулирующего органа пара на входе в греющую камеру первого аппарата - температуры соответствующего пара, поверхности нагрева и раствора в конечном аппарате и связанных с ним теплообменников.

7. Подключение к МВУ внешних тепловых потребителей и расхода пара на подпитку существенно изменяет её динамические свойства. При этом включение внешних тепловых потребителей увеличивает длительность переходных процессов.

8. Сформулирован критерий оптимизации режимов работы МВУ и на её основе математических моделей определены эффективные управляющие воздействия на выпарную станцию. С помощью ЭВМ на основе этих моделей даны примеры определения оптимальных параметров.

9. Основные результаты настоящей работы применены опытным производством "Сахпроманергоналадка" (заводом "Сахавтомат") при исследовании характеристик МВУ и разработке проекта установки оптимизации выпарной станции. Годовой экономический эффект от внедрения установки на сахзаводе им. Артема составляет около 20 тыс. руб. при сроке окупаемости дополнительных затрат 0,21 года и характеристике эффективности в первый год внедрения, равной 7,8.

Результаты выполненного исследования использованы также при выполнении рабочих чертежей термообессоливающей установки производительностью 23,0 м<sup>3</sup>/час для сточных вод травильных отделений Никопольского котлотрубного завода. Годовой экономический эффект составит 50 тыс. руб.

Полученные в работе результаты не являются окончательными и нуждаются в дополнительных уточнениях по мере накопления опыта при проектировании и эксплуатации МВУ.

Дальнейшие исследования в этой области предполагается проводить путем расширения математических исследований на ЭВМ и физических моделях в следующих направлениях.

1. При математическом моделировании учитывать распределенность параметров МВУ, а также нелинейные связи между ними.

2. Оптимизацию тепловых режимов МВУ проводить во взаимосвязи с различного рода внешними потребителями при проектировании систем регулирования для новых МВУ или совершенствования режимов работы, существующих в различных отраслях

промышленности.

Основное содержание диссертации опубликовано в статьях:

1. Белик В.Г., Костанжи И.И. Изучение процесса теплообмена с помощью ЭЦВМ на нелинейных математических моделях с распределенными параметрами, "Энергетика и электрификация" вып.1, изд. "Техника", Киев, 1974.

2. Вендров И.Ф., Костанжи И.И. и др. Исследование нелинейной модели выпарной установки. Сб. "Кибернетика и автоматическое управление". Вып.1, Киев, 1969.

3. Вендров И.Ф., Костанжи И.И. и др. Расчет переходных процессов в выпарных установках. Сб. "Динамика тепловых процессов", "Наукова думка", 1972.

4. Костанжи И.И., Белик В.Г. Математические модели процесса теплообмена. "Энергетика и электрификация", вып.1, изд. "Техника", Киев, 1973.

5. Таубман Б.И., Легкий А.А., Костанжи И.И. Оптимальное проектирование и анализ схем многокорпусных выпарных установок на ЭЦВМ. Тезисы докладов Всесоюзной межвузовской конференции по термическим методам обработки при консервировании пищевых продуктов. Одесса, 1969.

6. Федоткин И.М., Таубман Б.И., Белик В.Г., Костанжи И.И. Оптимальное управление работой выпарной станции с пароотбором. "Энергетика и электрификация", вып.3. Изд. "Техника", Киев, 1972.

7. Федоткин И.М., Белик В.Г., Костанжи И.И. Определение удельного веса кипящих растворов по величине гидродинамической депрессии. Реф.ин. "Пищевая промышленность", изд. "Вища школа", Киев, 1973.

8. Федоткин И.М., Белик В.Г., Костанжи И.И. Моделирование процессов выпаривания на ЭЦВМ с учетом нелинейности и распределенности параметров. Тезисы доклада ЗПИ, 1974.

9. Вендров И.Ф., Костанжи И.И. Нелинейная математическая модель системы, спільно працюючих випарних і теплообмінних апаратів. - "Автоматика", 1974, № 6, с.53-59.