

Автореф.

В 29

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР**

**ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ им. М. В. ЛОМОНОСОВА**

Аспирант И.Б. Вендров

На правах рукописи

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ
СОВМЕСТНО РАБОТАЮЩИХ ВЫПАРНЫХ И
ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ЦЕЛЮ
АВТОМАТИЗАЦИИ**

**(Специальность № 05.198 - Автоматизация
производственных процессов)**

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Одесса, 1972г.

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ им. М. В. ЛОМОНОСОВА

Аспирант И.Б. Вендров

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ
СОВМЕСТНО РАБОТАЮЩИХ ВЫПАРНЫХ И
ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ЦЕЛЮ
АВТОМАТИЗАЦИИ

(Специальность № 05.198 - Автоматизация
производственных процессов)

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Переучет 1987

ОНАХТ 04.07.11
Исследование динамик



v011975

Одесса, 1972г.

№. 6 v011975
Одесский технологический
институт пищевой промыш-
ленности им. М. В. Ломоносова

Работа выполнена на кафедре автоматизации производственных процессов Одесского технологического института пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова.

Научные руководители:

кандидат технических наук, доцент Миронов И.С.,
кандидат технических наук, ст. научн. сотрудник
Таубман Е.И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Чинаев П.И.,
кандидат технических наук, доцент Остапчук Н.В.

Ведущее предприятие - Киевский завод Сахавтомат.

Автореферат разослан "17" января 1972 г.

Защита диссертации состоится "21" февраля 1972 г.
на заседании Совета Одесского технологического института пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзыв на автореферат просим направить в двух экземплярах по адресу: г. Одесса, ГСП-510, ул. Свердлова, 112, Технологический институт пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова.

Ученый секретарь
совета

Л.А. Запорожец

ВВЕДЕНИЕ

Многоступенчатые выпарные установки / МВУ / находят широкое применение в пищевой, химической, энергетической и других отраслях промышленности. От качественной работы выпарной установки зависит ритмичность производства, качество продукции и производительность всего предприятия.

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

Однако, несмотря на широкое распространение этих установок и их важную технологическую роль, динамика МВУ до настоящего времени мало изучена как экспериментально, так и теоретически. Это объясняется сложностью процессов в МВУ, характеризующихся такими особенностями, как многосвязность, нелинейность и распределенность параметров, двухфазное состояние рабочих тел с переменным во времени и пространстве границей раздела между ними, наличием недетектирующих каналов связи, а также наличием большого количества взаимосвязанных выпарных и теплообменных аппаратов.

Проведение экспериментальных исследований с таким сложным комплексом технологического оборудования, как МВУ и взаимосвязанные теплообменные аппараты, ра-

ботающие в производственных условиях не представляется возможным. Для теоретического исследования необходимо иметь соответствующие модели и методы, обеспечивающие получение требуемой информации.

Недостаточность данных по динамике процессов в МВУ затрудняет автоматизацию, расчёт и проектирование этих установок, тормозит развитие выпарной техники

На основе проведенного в реферируемой работе анализа состояния вопроса с учетом практических запросов производства были поставлены следующие основные задачи:

1. Совершенствование математических моделей МВУ и системы совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов с учетом основных особенностей процессов в МВУ;

2. Исследование переходных процессов в МВУ и системе совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов в широком диапазоне изменения режимных параметров установки с учетом нелинейных связей между ними;

3. Выработки рекомендаций, по совершенствованию систем управления МВУ.

Для решения поставленных задач было выполнено следующее:

- 1/ составлены математические модели для выпарного аппарата, МВУ и системы совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов с учетом основных особенностей МВУ.

2/ составлены упрощенные математические модели выпарного аппарата и МВУ;

3/ разработан аналитический метод расчета динамических характеристик выпарного аппарата и МВУ ;

4/ выявлены наиболее существенные и второстепенные нелинейные связи между режимными параметрами установки с целью упрощения нелинейных моделей;

5/ проведен анализ информации о динамических свойствах объекта на основе которого предложены рекомендации по совершенствованию систем управления.

1. М В У - КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ

Исследованию динамики МВУ посвящены ряд теоретических и экспериментальных работ как в нашей стране, так и за рубежом.

Однако, использование результатов этих работ возможно только в частных случаях, когда можно пренебречь влиянием ряда особенностей процессов в МВУ.

Так, например в работах Левачева, Таубмана и других авторов в полной мере не учитываются нелинейные связи между параметрами и другие особенности процессов, так как исследования проводились на основе упрощенных моделей. В качестве основного метода исследования большинство авторов принимают метод математического моде-

лырования с применением аналоговых вычислительных машин / АВМ /.

Анализ методов моделирования показал, что использование АВМ для расчета переходных процессов в МВУ с учетом их основных особенностей не представляется возможным, так как АВМ обладает невысокой точностью расчета нелинейных систем и ограниченной реализуемостью отдельных нелинейных связей. В то же время еще в недостаточной мере развито моделирование переходных процессов в МВУ с применением электронных цифровых вычислительных машин / ЭЦВМ /.

В качестве основного метода расчета переходных процессов в выпарном аппарате, МВУ и системе совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов на основе нелинейной системы уравнений выбран метод математического моделирования с применением ЭЦВМ.

2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕМЕНТАХ ВЫПАРНЫХ УСТАНОВОК

Процессы тепло- и массообмена в технологических аппаратах описываются уравнениями, сохранения массы, энергии, количества движения, сохранения массы сухих веществ, переноса и состояния. Используя эти уравнения, была рассмотрена математическая модель выпарного аппарата, которая учитывает нелинейные связи между параметрами, наличие двухфазного состояния рабочих тел, распределенность параметров и др. Однако ввиду сложности этой модели на ее основе в настоящее время не представляется

возможным получить численную информацию о процессах тепло- и массообмена выпарного аппарата даже с помощью ЭЦВМ. Применяв соответствующие методы упрощения, была получена линейная математическая модель выпарного аппарата с учетом распределенности параметров с однофазным либо двухфазным состоянием рабочих тел, а также нелинейная математическая модель выпарного аппарата с сосредоточенными параметрами.

При составлении нелинейной модели выпарного аппарата были использованы аналитические зависимости, связывающие давление, энтальпию, теплоту парообразования, внутреннюю энергию и плотность пара с температурой пара и жидкости на линии насыщения, а также зависимость плотности раствора от его температуры и концентрации. При этом табличные данные аппроксимировались методом наименьших квадратов полиномами второго и третьего порядка в диапазоне температур 65-140°C с погрешностью, не превышающей 5%.

При выборе соотношений для определения коэффициентов теплоотдачи от греющего пара к поверхности нагрева α_{ii} , был произведен анализ формул Костенко, Нуссельта, Лабунцова, Кутателадзе 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, так как в ней учитывается в явном виде зависимость коэффициента теплоотдачи α_1 , от температурного напора и температуры конденсата.

Представляющий интерес для данного объекта диапазон температур 65-140°C был разбит на интервалы 65-80, 80-100, 100-120, 120-140°C и для каждого из них получены упрощенные формулы для расчета коэффициента теплоотдачи в виде:

Таблица.

Ф-ла Костенко	ф-ла Нуссельта с поправкой Кутателадзе	ф-ла Нуссельта с поправкой Кутателадзе	Формула Кутателадзе
$\alpha_1 = \frac{A_{ср1}}{[(t_n - t_{см})L]^{1/4}}$	$\alpha_1 = \frac{A_{ср2}}{[(t_n - t_{см})L]^{1/4}}$	$\alpha_1 = \frac{A_{ср3}}{[(t_n - t_{см})L]^{0,22}}$	$\alpha_1 = A_{ср4} (t_n - t_{см})L$

Эти формулы могут быть использованы для приближенного расчета коэффициента теплоотдачи α_1 , с максимальной погрешностью не более 6,7%.

В качестве расчетной зависимости для коэффициента теплоотдачи от поверхности нагрева к кипящей жидкости использовалась преобразованная формула Кичигина Н.А. и Тобилевича Н.Д.

3. НЕЛИНЕЙНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОВМЕСТНО РАБОТАЮЩИХ ВЫПАРНЫХ И ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

При составлении математического описания для системы совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов использовалась нелинейная математическая модель

выпарного аппарата / теплообменника / с сосредоточенными параметрами с учетом соответствующих связей, в зависимости от типа схем МВУ и взаимосвязанных с ней тепловых потребителей.

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

уравнения для температуры пара в греющей камере МВУ

$$a_{1i} \frac{dt_{pi}}{d\tau} = D_{i-1} z_{pi} - q_{1i} F_{1i} \quad / 1 /$$

Уравнения для температур поверхностей нагрева кипяточных труб МВУ:

$$c_m G_{cmi} \frac{dt_{cmi}}{d\tau} = F_{cpi} (q_{1i} - q_{2i}) \quad / 2 /$$

Уравнения для уровней жидкости в аппаратах МВУ

$$a_{2i}^* \frac{dh_i}{d\tau} + a_{3i}^* \frac{d\theta_i}{d\tau} + a_{4i}^* \frac{db_i}{d\tau} = S_{i-1} + D_{i-1}^n - D_i - S_i - D_i^n - \sum_{j=1}^n E_j \quad / 3 /$$

Уравнения для температуры парожидкостного пространства аппаратов МВУ

$$a_{5i}^* \frac{dh_i}{d\tau} + a_{6i}^* \frac{d\theta_i}{d\tau} + a_{7i}^* \frac{db_i}{d\tau} = q_{2i} F_{cpi} + S_{i-1} c_{x i-1} \theta_{i-1} + D_{i-1}^n l'_{i-1} - S_i c_{xi} \theta_i - (D_i + D_i^n + \sum_{j=1}^n E_j) l'_i \quad / 4 /$$

Уравнения для концентрации жидкости в аппаратах МВУ

$$a_{8i}^* \frac{dh_i}{d\tau} + a_{9i}^* \frac{d\theta_i}{d\tau} + a_{10i}^* \frac{db_i}{d\tau} = S_{i-1} b_{i-1} - S_i b_i \quad / 5 /$$

Уравнения состояния для параметров в греющих камерах МВУ

$$p = A_{29} t_{pi}^2 - A_{30} t_{pi} + A_{31} \quad / 6 /$$

$$P_{ni} = A_{32} t_{ni}^2 - A_{17} t_{ni} + A_{33} \quad / 7 /$$

$$L_{ni} = -A_{37} t_{ni}^2 + A_{38} t_{ni} + A_{51} \quad / 8 /$$

$$Z_{ni} = -A_{34} t_{ni}^2 - A_{35} t_{ni} + A_{36} \quad / 9 /$$

$$U_{ni} = L_{ni} - A_{28} \quad / 10 /$$

Уравнения состояния для параметров парожидкостного пространства аппаратов МВУ

$$P_i' = A_{29} (\theta_i - \Delta_i)^2 - A_{30} (\theta_i - \Delta_i) + A_{31} \quad / 11 /$$

$$P_i' = A_{32} (\theta_i - \Delta_i)^2 - A_{17} (\theta_i - \Delta_i) + A_{33} \quad / 12 /$$

$$L_i' = -A_{37} (\theta_i - \Delta_i)^2 + A_{38} (\theta_i - \Delta_i) + A_{51} \quad / 13 /$$

$$U_i' = L_i' - A_{28} \quad / 14 /$$

$$\rho_{ж} = (A_{39} v_i^2 - A_{18} v_i - A_{40}) v_i^2 + (A_{13} v_i^2 - A_{14} v_i + A_{15}) v_i + A_{41} v_i^2 + A_{21} v_i + A_{42} \quad / 15 /$$

$$C_{xi} = A_1 - (A_{27} - A_{22} \theta_i) v_i \quad / 16 /$$

Уравнения для расхода пара в греющие камеры аппаратов МВУ

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

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

либо

$$D_i = \frac{A_{1i+1}^*}{z_{ni+1}} \frac{dt_{ni}}{d\tau} + \frac{q_{1i+1} F_{cp i+1}}{z_{ni+1}} \quad / 19 /$$

Уравнения для расхода жидкости в аппараты МВУ

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

$$S_L = C_{1i} \sqrt{\rho_{xi} [P_i' + \rho_{xi} (h_i + \beta_i) - P_{i+1}' - \rho_{xi+1} (h_{i+1} + \beta_{i+1})]}; \quad 121/$$

уравнения для расходов пара на подпитку аппаратов МВУ

$$D_{i-1}'' = C_{3i-1} (A_{52} + A_{53} \frac{\rho_i'}{\rho_{i-1}'}) \sqrt{\rho_{i-1}' (P_{i-1}' - P_i')}; \quad 122/$$

$$D_i'' = C_{3i} (A_{52} + A_{53} \frac{\rho_{i+1}'}{\rho_i'}) \sqrt{\rho_i' (P_i' - P_{i+1}')}; \quad 123/$$

Уравнения для удельных тепловых потоков к поверхности нагрева аппаратов МВУ

$$q_{1i} = \frac{t_n - t_{cm}}{\frac{1}{\alpha_{1i}} + \frac{\delta_{cm}}{2R_m}}; \quad 124/$$

Уравнения для коэффициентов теплоотдачи при конденсации

$$\alpha_{1i} = \frac{A_{43} (A_{44} + A_{45} t_{pi} - A_{46} t_{pi}^2)^{3/4}}{[(t_{pi} - t_{cm}) L_i]^{1/4}}; \quad 125/$$

Уравнения для коэффициентов теплоотдачи при испарении

$$\alpha_{2i} = (A_{47} \theta_i - A_{48} \theta_i v_i - A_{49} v_i + A_{50})^{5/2} (t_{cm} - \theta)^{3/2}; \quad 126/$$

Уравнения для удельных тепловых потоков в жидкости в аппаратах МВУ

$$q_{2i} = \frac{t_{cmi} - \theta_i}{\frac{1}{\alpha_{2i}} + \frac{\delta_{cm}}{2R_m}}; \quad 127/$$

Уравнения для температуры пара в греющих камерах теплообменных аппаратов

$$a_{ij} \frac{dt_{nj}}{d\tau} = E_{ij} z_{ij} - q_{ij} F_{cpj}; \quad 128/$$

Уравнения для температуры поверхностей нагрева теплообменных аппаратов

$$c_{mj} G_{cmj} \frac{dt_{cmj}}{d\tau} = F_{cpj} (q_{ij} - q_{4j}); \quad 129/$$

Уравнения для жидкостного пространства теплообменных аппаратов

$$\frac{c_{xj} G_{xj}}{2} \frac{d\theta_j}{d\tau} = F_{cpj} q_{2j} + c_{xj} S_j (\theta_{j-1} - \theta_j) - \frac{c_{xj} G_{xj}}{2} \frac{d\theta_{j-1}}{d\tau} \quad /30/$$

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

Уравнения для расхода пара в греющие камеры теплообменников

$$E_{ij} = C_{4j} \left(A_{52} + A_{53} \frac{P_j}{P_i} \right) \sqrt{P_i (P_i - P_{ij})} \quad /31/$$

Уравнения для удельных тепловых потоков к поверхностям нагрева теплообменных аппаратов имеют вид аналогичный / 24 /

Уравнения для удельных тепловых потоков жидкости теплообменных аппаратов

$$q_{2j} = \frac{t_{cmj} - \theta_j}{\frac{1}{\alpha_{2j}^*} + \frac{\delta_{cmj}}{2R_M}} \quad /32/$$

Уравнения для коэффициентов теплоотдачи от греющего пара к поверхностям нагрева теплообменных аппаратов имеют вид аналогичный /25/

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

$$\alpha_{2j}^* = \frac{A_{58} R_{xj}}{Re^{0,8}} \left(A_{56} \frac{\nu_{xj}}{R_{xj}} c_{xj} \nu_{xj}^{0,45} \right) \quad \text{при } Re > 10000 \quad /33/$$

либо

$$\alpha_{2j}^* = A_{59} (R_{xj}^2 c_{xj} \nu_{xj})^{1/3} \left(\frac{W_{xj}}{L_j} \right)^{1/3} \quad /34/$$

при $Re \leq 10000$

Значения переменных коэффициентов имеют следующий вид:

$$a_{1i}^* = -A_3(V_{3i} - V_{ki})t_{pi}^3 - A_4(V_{3i} - V_{ki})t_{pi}^2 + [A_5(V_{3i} - V_{ki}) + A_6 G_{ki}]t_{pi} + C_M G_{mi} + A_7 C_u G_{ui} - A_8(V_{3i} - V_{ki}) + A_9 G_{ki}; \quad /35/$$

$$a_{2i}^* = \eta_i (\rho_{xi} - \rho_i'); \quad /36/$$

$$a_{3i}^* = (V_{xoi} + \eta_i h_i) [(A_{10} b_i^2 - A_{11} b_i - A_{12}) \theta_i + (A_{13} b_i^2 - A_{14} b_i + A_{15}) - A_{16}(\theta_i - \Delta_i) + A_{17}] + V_{oi} [A_{16}(\theta_i - \Delta_i) - A_{17}]; \quad /37/$$

$$a_{4i}^* = (V_{xoi} + \eta_i h_i) [(A_{10} b_i - A_{18}) \theta_i^2 + (A_{19} b_i - A_{14}) \theta_i + A_{20} b_i + A_{21}]; \quad /38/$$

$$a_{5i}^* = \eta_i [\rho_{xi} c_{xi} \theta_i - \rho_i' (L_i' - A_{28})]; \quad /39/$$

$$a_{6i}^* = \left\{ (V_{xoi} + \eta_i h_i) [C_{xi} (A_{10} b_i^2 - A_{11} b_i - A_{12})] \right\} \theta_i^2 + \left\{ (V_{xoi} + \eta_i h_i) [C_{xi} (A_{13} b_i^2 - A_{14} b_i + A_{15}) + (A_{22} \rho_{xi} b_i - A_{16} L_i' + A_{23} \rho_i' + A_{24})] + V_{oi} (A_{16} L_i' - A_{23} \rho_i' - A_{24}) \right\} \theta_i + (V_{xoi} + \eta_i h_i) [C_{xi} \rho_{xi} + (A_{16} \Delta_i + A_{17}) L_i' - \rho_i' (A_{23} \Delta_i + A_{38}) - (A_{24} \Delta_i + A_{26})] - V_{oi} [(A_{16} \Delta_i + A_{17}) L_i' - (A_{23} \Delta_i + A_{38}) \rho_i' - (A_{24} \Delta_i + A_{26})] + C_M \sum G_{mi} + A_7 C_u \sum G_{ui} \quad /40/$$

$$a_{7i}^* = (V_{xoi} + \eta_i h_i) \{ C_{xi} (A_{10} v_i - A_{18}) \theta_i^3 + [C_{xi} (A_{19} v_i - A_{14}) + A_{22} \rho_{xi}] \theta_i^2 + [C_{xi} (A_{20} v_i + A_{21}) - A_{27} \rho_{xi}] \theta_i \} \quad /41/$$

$$a_{8i}^* = \eta_i \rho_{xi} v_i; \quad /42/$$

$$a_{9i}^* = v_i (V_{xoi} + \eta_i h_i) [(A_{10} v_i^2 - A_{11} v_i - A_{12}) \theta_i + (A_{13} v_i^2 - A_{14} v_i + A_{15})]; \quad /43/$$

$$a_{10i}^* = v_i (V_{xoi} + \eta_i h_i) [(A_{10} v_i - A_{18}) \theta_i^2 + (A_{19} v_i - A_{14}) \theta_i + A_{20} v_i + A_{21}] + \rho_{xi}; \quad /44/$$

Значение переменного коэффициента a_{ij}^* находится из /35/ аналогично a_{1j}^* . Величины t_n, t_{cm}, θ температуры соответственно пара, поверхности нагрева и жидкости, h - уровень жидкости, δ - концентрация жидкости, S - расход жидкости, D, D'', E - расход пара соответственно на обогрев выпарных аппаратов, на подпитку и к тепловым потребителям, F - поверхность нагрева, δ - толщина стенки трубы, V_0, V_3, V_k, V_{xo} - объемы соответственно парожидкостного пространства, пара в греющей камере, пленки конденсата и жидкости, ограниченной плоскостью, от которой отсчитывается уровень, p_n, p' - давление пара в греющей камере и вторичного пара, ρ_n, ρ' - плотность пара в греющей камере и вторичного пара, i_n, i' - энтальпия пара в греющей камере и вторичного пара, z_n - теплота конденсации в греющей камере, U_n, U' - внутренняя энергия пара в греющей камере и вторичного пара, ρ_x - плотность жидкости,

Δ - суммарная температурная депрессия,

L - длина поверхности нагрева труб,

$\bar{\theta}$ - среднеарифметическое значение температур на выходе и входе аппарата,

R_m, R_x - коэффициенты теплопроводности металла и жидкости,

d - диаметр канала труб,

ν - коэффициент кинематической вязкости,

ω_x - скорость жидкости,

Re - число Рейнольдса,

C_m, C_x, C_u - теплоемкость соответственно металла, жидкости и изоляции,

$G_{x, k, m, u, c, m}$ - масса соответственно жидкости, конденсата, металла корпуса, соприкасающегося с парожидкостным пространством, изоляции металла, соприкасающегося с парожидкостным пространством, металла труб, металла корпуса греющей камеры,

F - площадь поперечного сечения парожидкостного пространства,

A, B, P - 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 отличается на постоянные величины от температуры пара в греющей камере:

$$\theta_{mi} = t_{pi} - \psi_1, \quad t_{ki} = t_{pi} - \psi_2$$

2. Температура изоляции корпуса равна средне-арифметическому значению температуры металла корпуса и окружающего воздуха

$$\theta_{и} = 0,5(\theta_{м} + \theta_{в})$$

3. Не учитывается скорость изменения объема пленки конденсата;

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

5. Не учитывается масса неконденсируемых газов конденсата, накапливающегося в нижней части греющей камеры;

6. Не учитываются потери тепла в окружающую среду;

7. Температура металла отличается на постоянную величину от температуры жидкости, т.е.

$$\theta_{м}^* = \theta_{ж} - \psi_3$$

8. Не учитывается сила инерции, действующая на массу жидкости;

9. Не учитывается унос жидкости вторичным паром;

10. Трубы аппарата имеют одинаковые геометрические размеры и выполнены из материала с одинаковыми теплофизическими константами;

11. Тепловой поток вдоль оси трубы отсутствует;

лельно к аппаратам МВУ по расходам пара, эти теплообменники целесообразно 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 /28/ - /35/.

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ МВУ НА ЕЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для оценки возможностей упрощения нелинейной математической модели МВУ /1/ - /27/, /31/, /35/ - /44/, было рассмотрено влияние отдельных нелинейных связей между параметрами установки на количественные результаты, получаемые при моделировании динамики 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:

- а/ возмущений одного и того же знака;
- б/ возмущений одинаковых по амплитуде но противоположных по знаку;
- в/ одних и тех же возмущений, но различной амплитуды.

В качестве примера моделировалась динамика пятиступенчатой выпарной установки. Моделирование выпарной

установки производилось на ЭЦВМ "Раздан-2" на основе алгоритма разработанного И.И. Костанти и при его участии.

Изучение нелинейностей динамической модели выпарного аппарата производилось на основе характеристик, полученных при ступенчатых воздействиях расходом греющего пара $\Delta D_0 = \pm 30\%$. В этом случае принимались постоянными D_{i-1}^n, D_i^n, E_i . При исследовании нелинейностей МВУ рассматривался режим работы, при котором осуществлялась стабилизация уровней жидкости в аппаратах МВУ за счёт изменения расхода жидкости на их входе.

Кроме этого стабилизировалась температура жидкости в концентраторе за счёт регулирования разряжения в конденсаторе. При этом регулирующие воздействия расходами жидкости являлись 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 $\Delta C_0 = \pm 30\%$ и $\Delta C_0 = +50\%$ при постоянных

$$E_1, E_2, E_3, D_0^n, D_1^n, D_2^n, D_3^n, \theta_0, \Delta i, h_i, b_0, \theta_5, S_5$$

б/ отбором пара из первого аппарата $\Delta E_1 = \pm 50\%$ при постоянных

$$E_2, E_3, D_0^n, D_1^n, D_2^n, D_3^n, h_i, b_0, \theta_0, \theta_5, S_5, \Delta i$$

в/ отбором пара из второго аппарата $\Delta E = -82\%$ при

$$\text{постоянных } E_1, E_3, D_0^n, D_1^n, D_2^n, D_3^n, \Delta i, h_i, b_0, \theta_0, \theta_5, S_5$$

г/ концентрацией раствора на входе первого аппарата $\Delta b_0 = \pm 30\%$ при постоянных

$$E_1, E_2, E_3, D_0^n, D_1^n, D_2^n, D_3^n, h_i, \theta_0, \theta_5, S_5, \Delta i$$

д/ расходом жидкости на входе первого аппарата $\Delta S_0 = +35\%$ при постоянных $E_1, E_2, E_3, D_0, D_1, D_2, D_3, h_i, \theta_0, \theta_5, S_5, \Delta_i$

е/ расходом греющего пара в первый аппарат $\Delta D_0 = +30\%$ и отбором пара из четвертого аппарата $\Delta E_0 = +42\%$ при постоянных $E_1, E_2, E_3, \Delta_i, D_1, D_2, D_3, h_i, \theta_0, \theta_5, S_5$

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

1. Коэффициенты $a_{1i}^*, a_{2i}^*, \dots, a_{10i}^*$ - постоянные,
2. Коэффициенты теплоотдачи α_{1i}, α_{2i} - постоянные,
3. Коэффициенты $\alpha_{1i}, a_{1i}^*, a_{2i}^*, \dots, a_{10i}^*$ - постоянные,
4. Коэффициенты теплоотдачи α_{1i} - постоянные,
5. Коэффициенты теплоотдачи α_{2i} - постоянные,
6. Расход греющего пара в первый аппарат ΔD_0 и коэффициенты теплоотдачи α_{1i} и α_{2i} - постоянные.

На рис. 1 представлены динамические характеристики МВУ, полученные при ступенчатом воздействии ходом регулирующего органа греющего пара первого аппарата $\Delta C_0 = +30\%$. Моделирование переходных процессов производилось на основе нелинейной и упрощенных моделей.

Кривые 1 получены на основе нелинейной модели; кривые 2 при постоянных $a_{1i}^*, a_{2i}^*, \dots, a_{10i}^*$; кривые 3 при постоянных α_{1i} и α_{2i} ; кривые 4 при постоянных α_{1i} ; кривые 5 при постоянных $\alpha_{1i}, \alpha_{2i}, a_{1i}^*, a_{2i}^*, \dots, a_{10i}^*$

Оценка значимости отдельных нелинейных связей между параметрами установки производилась путем сопоставления динамических характеристик, полученных на основе нелиней-

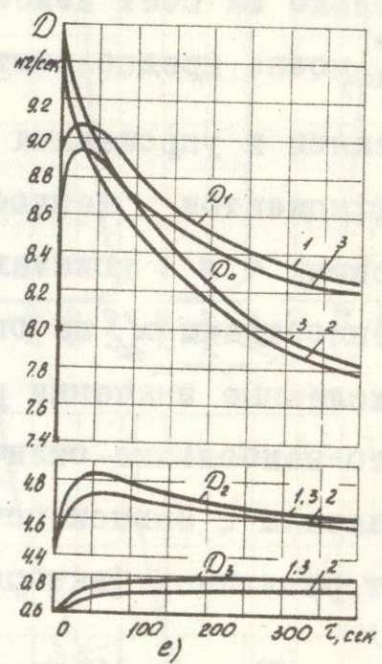
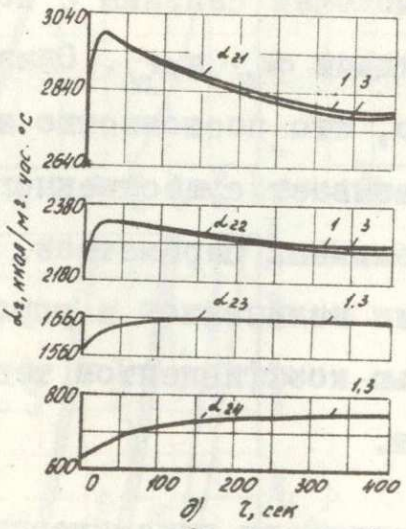
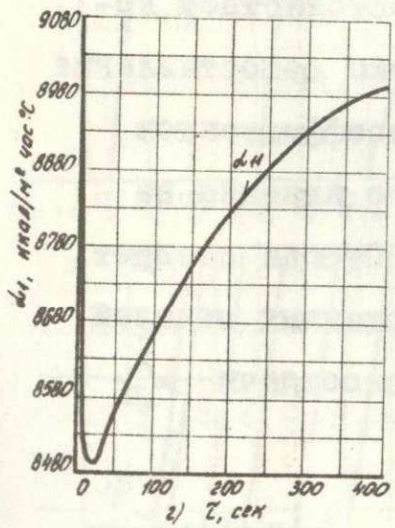
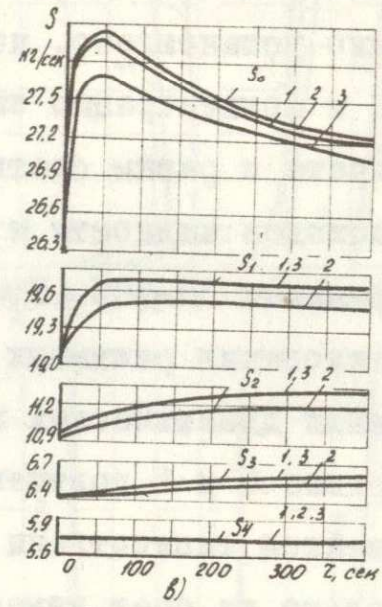
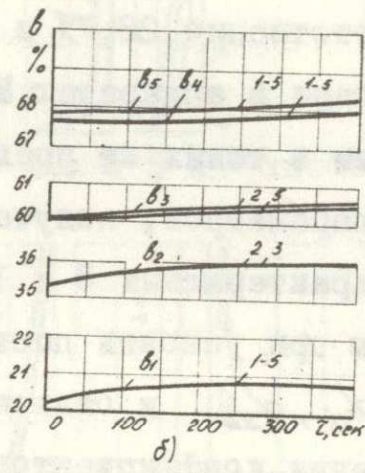
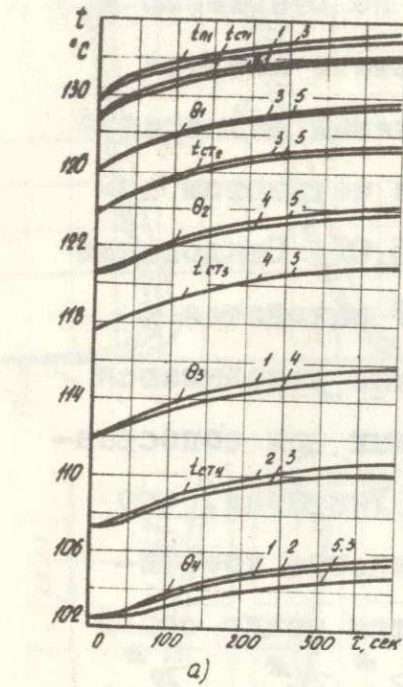


Рис. 1

Динамические характеристики МВУ ($\Delta C_0 = \pm 30\%$)

ной и упрощенных моделей, и значений режимных параметров для момента времени $\tau = 400$ сек. При этом наибольшие отклонения режимных параметров получены при сопоставлении динамических характеристик 3, по отношению к динамическим характеристикам 1. В результате анализа было установлено, что наибольшие отклонения температуры и концентрации жидкости наблюдаются в четвертом аппарате и равны соответственно 28,7% и 25,0%. Отклонения расходов жидкости 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 1. Учитывая, что кривые 3 и 5 получены при условии постоянства коэффициентов теплоотдачи α_{1i} , α_{2i} и отличаются между собой только за счет изменения коэффициентов α_{1i}^* , α_{2i}^* , ..., α_{9i}^* , α_{10i}^* , можно предположить, что наибольшие отклонения нелинейной и упрощенных моделей связаны с постоянством коэффициентов теплоотдачи α_{1i} и α_{2i} . Однако сопоставление кривых 4 и 1 показало, что постоянство коэффициентов теплоотдачи α_{1i} не оказывает существенного влияния на численные значения режимных параметров. Отсюда следует, что наибольшие отличия нелинейной и упрощенных моделей связаны с зависимостью коэффициентов теплоотдачи α_{2i} от различных факторов.

На рис. 2 представлены динамические характеристики МВУ, полученные при воздействии ступенчатого возмущения ходом регулирующего органа греющего пара первого аппарата $\Delta C_0 = -30\%$. При этом кривые 1 получены на основе

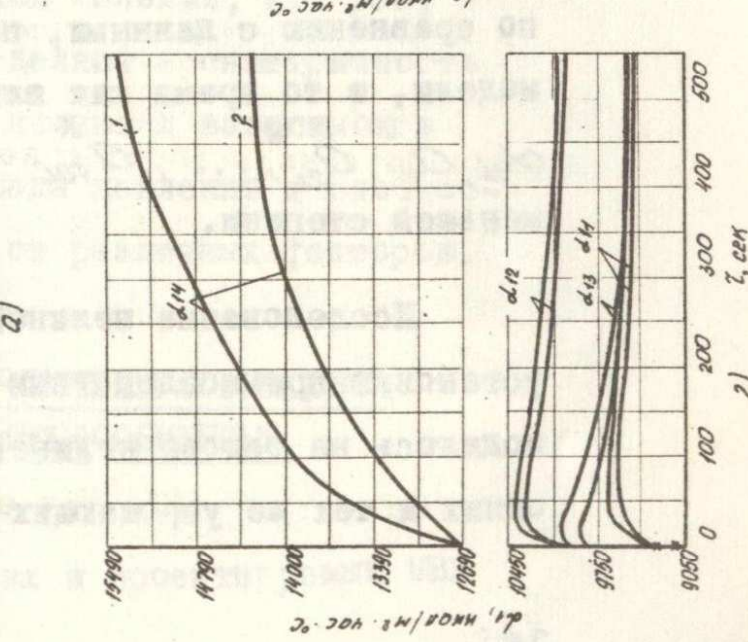
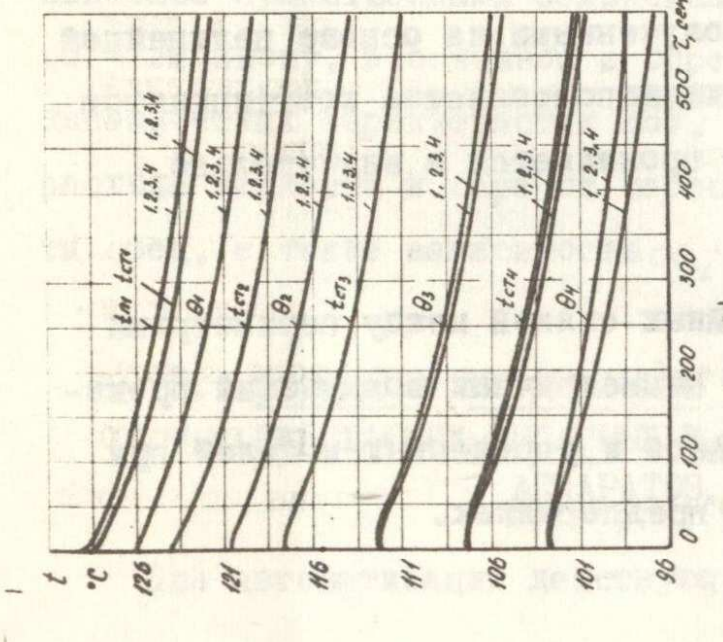
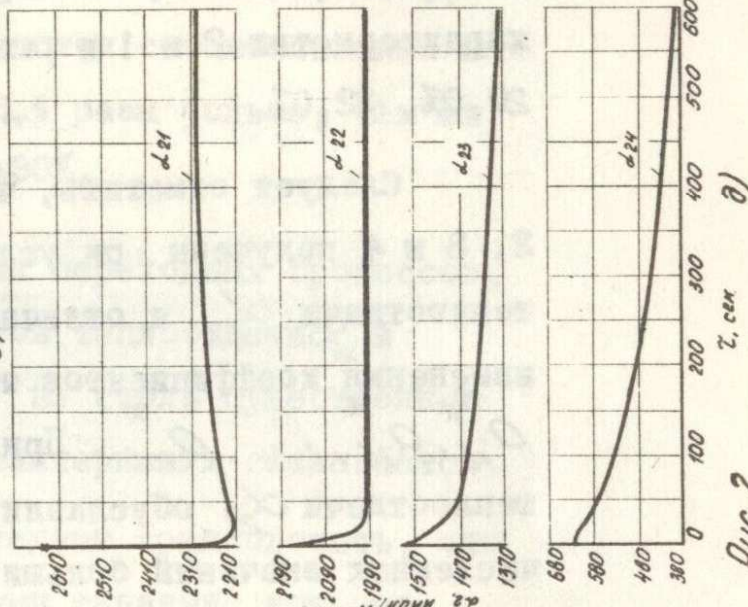
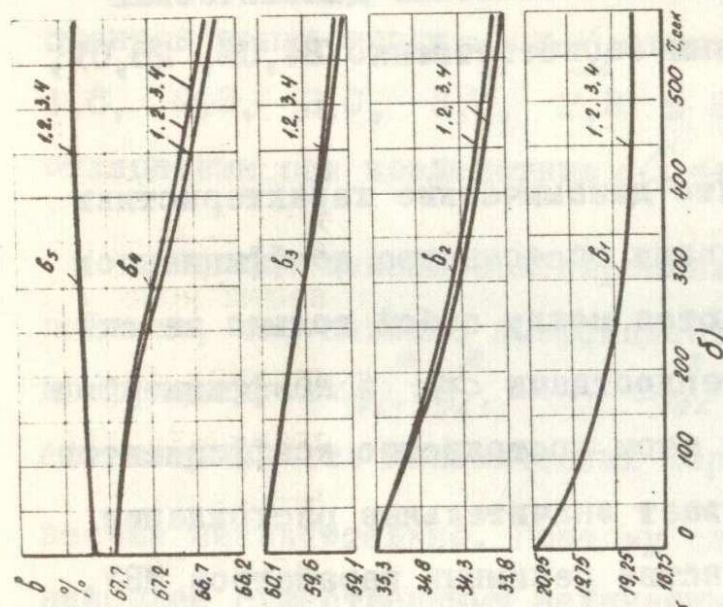
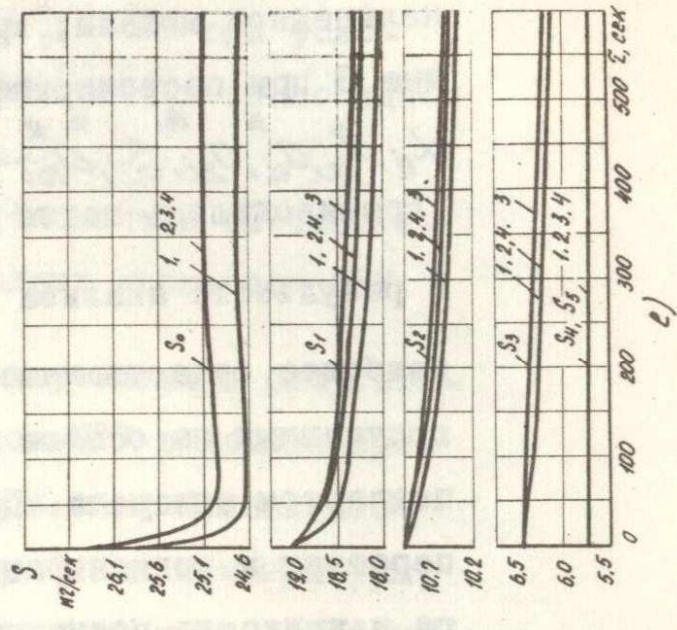
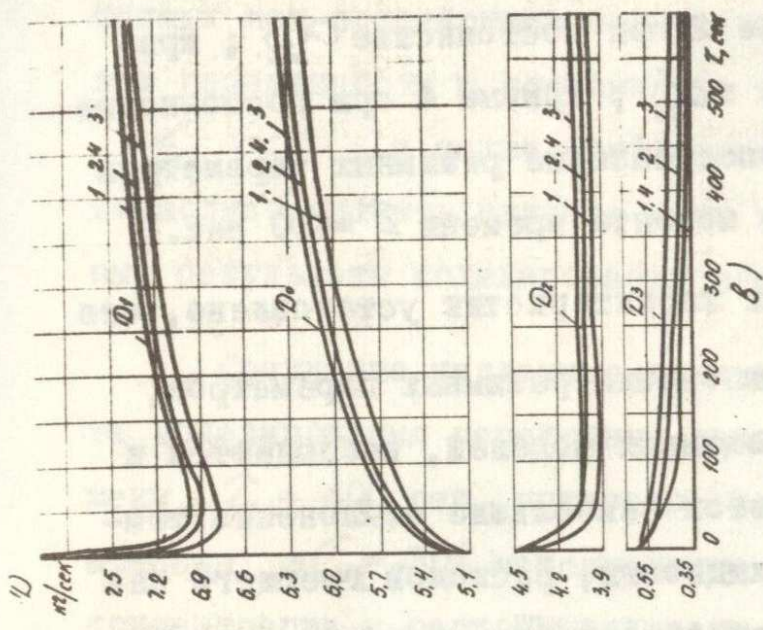


Fig. 2

2)

нелинейной модели; кривые 2 при постоянстве α_{2i} ; кривые 3 при постоянстве α_{1i} и α_{2i} ; кривые 4 при постоянстве $\alpha_{1i}, \alpha_{2i}, a_{1i}^*, a_{2i}^*, \dots, a_{10i}^*$. Сопоставление режимных параметров производилось также для момента времени $\tau = 400$ сек.

В результате анализа этих характеристик установлено, что наиболее существенные отклонения режимных параметров, полученных на основе упрощенных моделей, наблюдаются в четвертом аппарате. При этом наибольшие отклонения температуры и концентрации жидкости, расходов греющего пара и жидкости получены при сопоставлении динамические характеристики 2 и 1 и равны соответственно 34,0%, 28,0%, 29,0%, 32,0%.

Следует отметить, что динамические характеристики 2, 3 и 4 получены при условии постоянства коэффициентов теплоотдачи α_{2i} и отличаются между собой только за счёт изменения коэффициентов теплоотдачи α_{1i} и коэффициентов $a_{1i}^*, a_{2i}^*, \dots, a_{10i}^*$. При этом постоянство коэффициентов теплоотдачи α_{2i} обуславливает значительные расхождения численных значений большинства режимных параметров МВУ, по сравнению с данными, полученными на основе нелинейной модели, в то время как влияние постоянства коэффициентов $\alpha_{1i}, a_{1i}^*, a_{2i}^*, \dots, a_{10i}^*$ проявляется в значительно меньшей степени.

Исследование нелинейных связей между параметрами установки при воздействии симметричных возмущений производилось на основе нелинейной и упрощенных моделей при одних и тех же упрощающих предпосылках.

Сопоставление динамических характеристик, полученных при воздействии возмущений $\Delta C_0 = +30\%$ при условии переменности и постоянства коэффициентов теплоотдачи α_{1i}, α_{2i} , а также коэффициентов $a_{1i}^*, a_{2i}^*, \dots, a_{10i}^*$ позволило оценить влияние этих коэффициентов на численные результаты моделирования переходных процессов МВУ.

Сравнение численных данных, полученных в результате моделирования переходных процессов МВУ в момент времени $\hat{t} = 400$ сек. показало, что при воздействии возмущения $\Delta C_0 = -30\%$ максимальные отклонения температуры, концентрации и расходов жидкости, расходов пара, коэффициентов теплоотдачи α_{1i} и α_{2i} отличаются соответственно в 1,6, 2,3, 3,0, 3,7, 2,3 и 2,4 раза больше, чем их отклонения при воздействии $\Delta C_0 = +30\%$.

Анализ данных моделирования переходных процессов, показал, что влияние коэффициентов теплоотдачи α_{1i} и коэффициентов $a_{1i}^*, a_{2i}^*, \dots, a_{10i}^*$ на столь существенную асимметричность динамических характеристик сказывается весьма незначительно. Поэтому следует предположить, что наиболее существенными нелинейными связями, которые, по - видимому, в основном и определяют асимметричность динамических характеристик МВУ, являются зависимости расхода жидкости и пара от перепада давлений и плотности сред, а также зависимость α_{2i} от различных факторов.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ СИСТЕМЫ СОВМЕСТНО РАБОТАЮЩИХ ВЫПАРНЫХ И ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ

Для автоматизации действующих и проектируемых МВУ

необходима информация об их динамических свойствах. Такая информация может быть получена путем моделирования переходных процессов на ЭВМ либо аналитическим путем. Аналитический расчёт переходных процессов выпарной установки целесообразно применять для оценки погрешности моделирования на АВМ, оценки влияния конструктивных и режимных параметров на динамические характеристики выпарного аппарата, а также при отсутствии средств вычислительной техники. Решение в аналитической форме системы уравнений /1/ - /5/ представляется возможным только в случае их значительного упрощения. Для упрощения модели принимаются следующие допущения:

- 1/ коэффициенты теплоотдачи α_{1i} и α_{2i} постоянные величины;
- 2/ коэффициенты при скоростях изменения режимных параметров - постоянные величины;
- 3/ расходы жидкости и пара не зависят от режимных параметров аппарата;
- 4/ теплота парообразования, теплоемкость жидкости и энтальпия пара - постоянные;
- 5/ уровни в аппаратах - постоянные;
- 6/ изменения концентрации жидкости не оказывает влияния на процесс теплообмена в аппаратах МВУ.

С учетом этих допущений математическая модель выпарного аппарата значительно упрощается и представляется возможным выполнить расчёт переходных процессов аналитическим путем. Используя операторный метод решения с применением теоремы разложения, было получено решение уравнений /1/-/2/ и /4/ в виде:

$$\theta(z) = [B_0 + B_1 e^{-p_1 z} + B_2 e^{-p_2 z} + B_3 e^{-p_3 z}] A^* \quad /45/$$

где: $\theta(z)$ - значение температуры соответствующее но

в греющей камере (t_{II}), поверхности нагрева (t_{cm}) и жидкости (θ).

$$B_0 = \frac{X(0)}{Y(0)}; B_1 = \frac{X(P_1)}{P_1 Y'(P_1)}; B_2 = \frac{X(P_2)}{P_2 Y'(P_2)}; B_3 = \frac{X(P_3)}{P_3 Y'(P_3)};$$

$$Y(P) = T_{1i} \cdot T_{2i} \cdot T_{3i} \cdot P^3 + (T_{1i} \cdot T_{2i} + T_{1i} \cdot T_{3i} + T_{2i} \cdot T_{3i}) P^2 + (T_{1i} + T_{2i} + T_{3i} - d_{3i}^* C_{4i}^* T_{1i} - C_{3i}^* T_{3i}) P - d_{3i}^* C_{4i}^* - C_{3i}^* + 1$$

$X(P)$ - полином, характеризующий влияние динамических свойств, смежных рассматриваемому, каналов;

P_1, P_2, P_3 - корни характеристического уравнения;

$Y(P)$ - производная от характеристического уравнения;

T_{1i}, T_{2i}, T_{3i} - постоянные времени, характеризующие инерционность соответственно пара греющей камеры, металла поверхности нагрева и массы сред паро-жидкостного пространства;

$d_{3i}^*, C_{3i}^*, C_{4i}^*$ - коэффициенты, зависящие от конструктивных, режимных и теплофизических параметров установки;

A^* - внешние воздействия.

Если принять одноемкостную сосредоточенную модель выпарного аппарата /тепловые емкости греющей камеры и металла поверхности нагрева не учитываются или добавляются с соответствующими "весовыми" коэффициентами к емкости жидкости/, то представляется возможным аналитически рассчитать динамические характеристики МВУ с числом ступеней $n \leq 4$ по формуле, имеющей вид аналогичный /45/. С помощью формулы /45/ были рассчитаны динамические характеристики выпарного аппарата при воздействии возмущения $\Delta D_0 = +50\%$. Результаты расчета совпали с численными данными, полученными при моделировании динамики одноступенчатого выпарного аппарата на ЭЦВМ.

Анализ динамических характеристик МВУ полученных на основе нелинейной модели /1/ - /27/, /31/, /35/-/44/ в главе 1У, показал, что по температурным каналам объект обладает самовыравниванием. Длительность переходных процессов достигает 400-800 сек. Наибольшее время переходного запаздывания равно 20 сек /за время запаздывания принят период времени, в течение которого соответствующие температуры изменились на величину $0,02^{\circ}\text{C}$ от начальных значений/.

Следует указать, на существенное влияние внутренних обратных связей на величину и характер отдельных режимных характеристик МВУ. Из графиков /рис.1/ видно, что скачкообразное увеличение расхода пара в греющую камеру первого аппарата начинает со временем уменьшаться, стремясь к установившемуся значению. Время переходного запаздывания по каналам концентрации жидкости равно 80 сек /за время запаздывания принят период времени, в течение которого концентрация жидкости изменилась на величину $0,005$ от установившегося значения/. При этом в течение промежутка времени $\tau = 1140$ сек /максимальное время моделирования переходных процессов по концентрации в МВУ/ концентрация жидкости не достигла своих установившихся значений. Это объясняется относительно большой инерционностью каналов по концентрации.

По каналам температуры при воздействии расходом жидкости на входе первого аппарата $\Delta S_0 = +35\%$ длительность переходных процессов составила 400-500 сек. Следует отме-

туть, что при этом воздействии изменения температуры и концентрации жидкости происходит практически без запаздывания. Это объясняется почти одновременным изменением расходов жидкости во всех аппаратах МВУ.

Анализ динамических свойств МВУ показал, что при управлении целесообразно использовать в качестве воздействий расходы жидкости на входе и выходе аппаратов МВУ. Была опробирована возможность получения необходимой информации о динамических свойствах объекта, о величине и характере изменения параметров и управляющих воздействий путем моделирования переходных процессов частично управляемой МВУ. Такая информация весьма важна для синтеза системы управления, так как она позволяет еще на стадии проектирования оценить регулирующие возможности каналов управления, величину и характер изменения режимных параметров установки, степень влияния регулирующих воздействий на работу смежных с МВУ технологических аппаратов и др.

Исследовалась пятиступенчатая выпарная установка свеклосахарного производства, работающая совместно с семнадцатью тепловыми потребителями МВУ. Для упрощения расчетной схемы отдельные группы парожидкостных теплообменников, включенных параллельно по расходам жидкости и пара, были объединены в эквивалентные теплообменники. Моделирование переходных процессов частично управляемой МВУ, работающей совместно с тепловыми потребителями, производилось на основе системы уравнений /1/ - /44/ при

$i = 1, 2, 3, 4, 5$ и соответственно

$j = 1, 2, 5, 2, 0$.

Регулирование концентрации и температуры жидкости в концентраторе осуществлялось за счёт изменения соответственно расхода жидкости на его выходе и стабилизации разряжения в конденсаторе. Кроме этого стабилизировались уровни в аппаратах МВУ за счёт изменения расходов жидкости на их входе.

Моделирование переходных процессов производилось при ступенчатых воздействиях: ходом регулирующего органа пара на входе в греющую камеру первого аппарата $\Delta C_0 = +30\%$, отбором пара из второго аппарата $\Delta E_2 = \pm 82\%$.

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 жидкости находится в пределах 10,8 - 14,4 т/час.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Рассмотрены нелинейная и линейная математические модели выпарного аппарата, учитывающие распределенность параметров. Получены математическая модель МВУ и системы совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов с сосредоточенными параметрами, учитывающих нелинейность связей между параметрами. Рассмотрены упрощенные математические модели МВУ с сосредоточенными параметрами.

2. Получены нелинейные модели динамики парожидкостного теплообменника и групп теплообменников с сосредоточенными параметрами, включенных параллельно, последовательно и смешанно по расходам жидкости и пара.

3. Выполнено моделирование переходных процессов в МВУ и в системе совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов на основе нелинейной и упрощенных математических моделей с помощью ЭВМ, показавшие, что результаты по некоторым параметрам расходятся на 25% и более.

4. Получены на основе нелинейной и упрощенных моделей динамические характеристики МВУ; проведен анализ их работы в переходном режиме; определены динамические свойства МВУ по различным каналам и при различных воздействиях; выявлены главные и второстепенные нелинейные связи между режимными параметрами установки. В результате анализа динамических свойств МВУ установлено, что длитель-

ность переходных процессов по температурным каналам находится в пределах 400–800 сек. Наибольшие переходные запаздывания по каналам температуры и концентрации жидкости наблюдаются в последних по отношению к аппаратам, к которым приложено воздействие, корпусах. Наименьшая длительность переходных процессов и отсутствие запаздывания получено при воздействии возмущения расходом жидкости на входе первого аппарата МВУ. Оценка значимости отдельных нелинейных связей между параметрами установки показало, что наиболее существенные нелинейные связи проявляются в зависимостях, связывающих: расходы пара с перепадом давления и плотностью пара; коэффициенты теплоотдачи α_{2i} с температурой и концентрацией жидкости, а также с температурным напором.

5. Установлено, что МВУ является объектом с переменными динамическими свойствами.

6. Получены на основе нелинейной модели динамические характеристики режимных параметров совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов, работающих в режиме стабилизации уровней жидкости в аппаратах МВУ, концентрации и температуры жидкости в концентраторе. В результате анализа этих характеристик установлено, что регулирование концентрации и уровней жидкости посредством изменения расходов жидкости на входе и выходе из аппаратов МВУ, хотя и показало удовлетворительные результаты, имеет существенные недостатки:

а/ в случае уменьшения расходов жидкости происходит уменьшение производительности установки по раствору, что является экономически нецелесообразным;

б/ нестабильность расходов жидкости вызывает неритмичность процессов всего производства.

7. Получены упрощенные формулы для аналитического расчёта динамических характеристик выпарной установки по температурным каналам.

В результате анализа динамических свойств МВУ и системы совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов возможно предложить некоторые рекомендации по совершенствованию управления МВУ.

1. При выборе системы управления необходимо учитывать изменения динамических свойств МВУ в переходных режимах;

2. При регулировании ряда режимных параметров МВУ 1 уровней и концентрации жидкости, производительности по пару либо температуры /давления/ пара 1 целесообразно применить комбинированную систему управления. При этом использование дополнительного канала по расходу пара на подпитку позволяет осуществить частично инвариантное управление, способствующее улучшению качества регулирования.

3. Учитывая невозможность одновременного регулирования этих параметров вследствие их взаимосвязанности, необходимо рассредоточить каналы управления таким образом,

чтобы регулирование производительности по пару температуры /давления/ пара осуществлялось в аппаратах с развитым пароотбором, используя при этом дополнительный канал по расходу пара на подпитку; регулирование уровней предпочтительней осуществлять расходами жидкости на входах аппаратов, так как в этом случае имеются более существенные регулирующие возможности /больше коэффициент усиления/; регулирование концентрации жидкости возможно осуществлять на последнем аппарате МВУ.

4. Представляется возможным использовать для управления процессами в многоступенчатой выпарной установке АВМ. При этом в качестве математической модели объекта может быть использована упрощенная нелинейная модель совместно работающих выпарных и теплообменных аппаратов.

ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:

1. Вендров И.В., Миронов И.С. и др. Система автоматического управления энергетической установки на низкокипящем веществе и исследование способов оптимального управления с учетом изменения свойств объекта. Тезисы докладов 1У Всесоюзного совещания по автоматическому управлению /технической кибернетике/, Тбилиси, 1968.

2. Вендров И.В., Костанжи И.И., Таубман Е.И.. Исследование нелинейной модели выпарной установки. Труды семинара "Кибернетика и автоматическое управление", вып. 1, Киев, 1969.

3. Вендров И.Б., Костанжи И.И., Таубман Е.И. Моделирование переходных процессов в выпарной установке на электронных цифровых вычислительных машинах. Кн. Таубмана Е.И.. Расчёт и моделирование выпарных установок. М., "Химия", 1970.

ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ СДЕЛАНЫ ДОКЛАДЫ
НА НАУЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЯХ :

1. На научно-технических конференциях Одесского технологического института пищевой промышленности им. М.В. Ломоносова, 1966, 1967, 1969.
2. На городском семинаре по кибернетике и автоматическому управлению, Одесса, 1968.
3. На республиканских семинарах по динамике тепловых процессов, Киев, 1969, 1970, 1971 г.г.
4. На республиканском семинаре по алгоритмизации расчётов процессов и аппаратов химических производств. Киев, 1969 г.
5. На Всесоюзном совещании по выпарной технике, Харьков, 1969 г.