

УДК 519.876.2

Л.А. Краснодубец, д-р техн. наук, В.А. Карапетьян, канд. техн. наук,

Ю.Д. Черёмухин, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: tk@sevgtu.sebastopol.ua

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫПАРИВАНИЯ
ДЛЯ ТРЕНАЖЕРОВ АЭС**

Предложена математическая модель процесса выпаривания для однокорпусного выпарного аппарата. Программная имитация в среде Matlab+Simulink подтверждает адекватность и работоспособность модели, возможность ее применения для исследования статических и динамических свойств технологического процесса.

Сложность и разнообразие технологических процессов на АЭС, внедрение современных средств автоматизации и информационных технологий, а отсюда, и необходимость постоянного повышения квалификации персонала, делают актуальными задачи разработки специальных тренажеров. Такие тренажеры должны адекватно моделировать технологические процессы, динамику работы агрегатов и вспомогательного оборудования, алгоритмы их управления, полностью воссоздавать человеко-машинный интерфейс для управленческого персонала, давать возможность инструктору имитировать разнообразные штатные и нештатные ситуации как в работе оборудования и персонала, так и во внешнем окружении. Одной из важных дополнительных функций тренажеров является возможность использования их на этапах наладки оборудования АСУТП для проведения тестирования и коррекции логики и алгоритмов систем управления и автоматики, настройки и наладки регуляторов на реальном оборудовании.

Особую значимость с точки зрения экологии и охраны окружающей среды имеют вспомогательные технологические процессы на АЭС: химические технологические процессы очистки результатов деятельности основного производства, в частности, химические цеха для очистки трапных и боросодержащих вод. В качестве основной технологии очистки применяется технология выпаривания. Данные технологии в последнее время широко используются также и при очистке минерализованных сточных вод, в работе опреснительных установок с целью решения задач водоснабжения ряда районов Украины (Донбасс, Крым, побережье Черного и Азовского морей и др.), для извлечения ценных веществ из морской воды и других соленых источников. Основным элементом оборудования технологии выпаривания является выпарная установка. Центральную часть выпарной установки представляет выпарной аппарат (ВА), где протекает главная фаза технологического процесса концентрирования растворов – процесс выпаривания [1].

Целью работы является получение математической модели динамики процесса выпаривания и верификация модели в пакете Matlab.

В работе для описания динамики процесса выпаривания используется подход, основанный на решении совместной системы дифференциальных уравнений материального, элементного и теплового балансов, из которых, в том числе, следуют уравнения стационарных режимов. Линеаризация данных уравнений позволяет получать математические модели динамики процессов в окрестности стационарных режимов, которые могут использоваться для решения задач синтеза регуляторов и моделирования динамики систем стабилизации.

Рассматривается ВА модели А.22.160.000, предназначенный для упаривания трапных вод спецпрачечной и очистки вторичного пара от загрязнений на АЭС с реакторами типа ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Конструкция данного ВА построена по однокорпусной схеме с выносной греющей камерой [1] и предусматривает естественную циркуляцию (рисунок 1).

Стационарный (номинальный) режим работы данного ВА определяется параметрами, значения которых приведены в таблице 1.

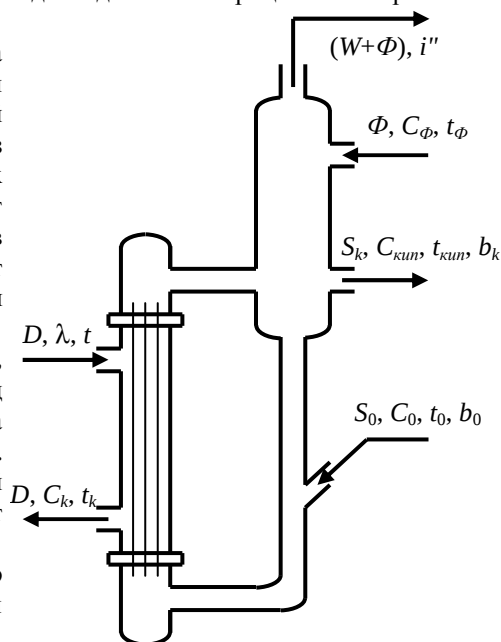


Рисунок 1 – Схема однокорпусного ВА

Таблица 1 – Основные параметры для расчета стационарного режима

Наименование параметров	Значения параметров
Расход раствора, поступающего на выпарку, S_0	6000 кг/ч
Давление (избыточное): греющего пара вторичного пара	0,25 МПа (2,5 кгс/см ²) 0,02 МПа (0,2 кгс/см ²)
Начальная температура раствора на входе в аппарат, t_0	303 К (30 °С)
Температура кипения раствора, $t_{кип}$	379 К (106 °С)
Температура греющего пара, t	411 К (138 °С)
Температура флегмы, t_ϕ	373 К (100 °С)
Удельная теплопроводность раствора, начальная, $C_n (C_0)$	4100 Дж/кг·°С
Удельная теплопроводность раствора, конечная, C_k	3770 Дж/кг·°С
Удельная теплопроводность флегмы C_ϕ	4190 Дж/кг·°С
Удельное количество теплоты, r	513,5 ккал/кг
Расход греющего пара, D	7694 кг/ч
Теплосодержание (энтальпия) греющего пара, λ	2737000 Дж/кг
Теплосодержание (энтальпия) вторичного пара, i''	2684000 Дж/кг
Начальная концентрация раствора, b_0	0,5 ... 10 г/л
Конечная концентрация раствора, b_k	180 ... 200 г/л

Приведем вывод дифференциальных уравнений модели выпаривания на основе материальных и энергетических балансовых соотношений [1].

1. **Вывод уравнения материального баланса.** Рассмотрим стационарное уравнение материального баланса

$$S_0 = S_k + W,$$

где S_0 – расход раствора, поступающего на выпарку, кг/ч; S_k – расход упаренного раствора, кг/ч; W – расход выпаренной воды (выход вторичного пара), кг/ч.

Учитывая равенство количества вещества в растворе до выпаривания и в конце этого технологического процесса $S_0 b_0 = S_k b_k$, где b_0 , b_k – начальная и конечные концентрации раствора ($b_0 = 10$ г/л, $b_k = 180$ г/л), можно рассчитать величину расхода выпаренной воды $W = S_0(1 - b_0/b_k) = 5670$ кг/ч и, с учетом данных таблицы 1, определить расход упаренного раствора $S_k = S_0 - W = 330$ кг/ч. Общий расход упаренной воды включает еще расход флегмы Φ (подогретой воды, орошающей элементы сепаратора – тарелки). Расход флегмы на орошение тарелок принят на основании опытных данных, полученных разработчиком, и составляет 15 % от общего расхода выпаренной воды $\Phi = 0,15(W - \Phi)$, $\Phi = 0,176W = 948$ кг/ч, таким образом, общий расход выпаренной воды (с учетом флегмы) $W_{общ} = W + \Phi = 6668$ кг/ч.

Для перехода к динамическому уравнению материального баланса введем переменную v , зависящую от времени и характеризующую материальные потери (кг) в ВА. В таком случае динамическое уравнение состояния материального баланса можно записать в виде дифференциального уравнения

$$v'(t) = S_0 - S_k - W.$$

При $v'(t) = 0$ из последнего соотношения следует уравнение стационарного режима.

2. **Вывод уравнения элементного баланса.** Уравнение динамического элементного баланса построим на основе стационарного уравнения материального баланса, вводя переменную b , зависящую от времени и характеризующую текущую концентрацию раствора. В таком случае уравнение динамического элементного баланса можно записать в виде дифференциального уравнения

$$vb'(t) = S_0(b_0 - b) - Wb.$$

При $b'(t) = 0$ получаем уравнение стационарного режима для концентраций.

3. **Вывод уравнения теплового баланса.** В соответствии с рисунком 1 баланс установившихся тепловых потоков можно записать в виде следующего стационарного уравнения

$$D \cdot \lambda + S_0 C_0 t_0 + \Phi \cdot C_\phi t_\phi = (W + \Phi) i'' + D \cdot C_k t_k + S_k C_{кип} t_{кип}.$$

Преобразовав его к виду

$$D(\lambda - C_k t_k) = (W i'' - W C_{кип} t_{кип}) + S_0(C_{кип} t_{кип} - C_0 t_0) + \Phi i'' + \Phi C_\phi t_\phi,$$

можно выразить расход греющего пара D и для принятой начальной концентрации $b_0 = 10$ г/л расход греющего пара составит $D = 7694$ кг/ч.

Общее уравнение стационарного теплового баланса имеет вид

$$S_0(h_0 - h_k) - W(i'' - h_k) + Q - L = 0,$$

где h_0 , h_k , i'' – соответственно энтальпии входного и выходного (упаренного) растворов и вторичного пара, Дж/кг; Q – расход тепла в корпусе ВА, Дж/ч; L – тепловые потери в корпусе ВА, Дж/ч.

По данным таблицы 1 найдем необходимые значения величин энтальпий входного (h_0) и упаренного (h_k) растворов:

$$h_0 = C_0 t_0 = 4100 \cdot 303 = 1242300 \text{ Дж/кг}; \quad h_k = C_k t_k = 3770 \cdot 379 = 1428830 \text{ Дж/кг}.$$

Расход тепла определяется как $Q = D \cdot r = 16514602000 \text{ Дж/ч}$.

Для получения уравнения динамического теплового баланса введем переменную h , зависящую от времени и определяющую текущую энтальпию раствора и запишем дифференциальное уравнение

$$vh'(t) = S_0(h_0 - h) - W(i'' - h) + Q - L.$$

При $h'(t) = 0$ это дифференциальное уравнение вырождается в стационарное уравнение общего теплового баланса.

Таким образом, динамическая модель технологического процесса выпаривания для однокорпусного ВА модели А.22.160.000 представляется следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} v'(t) &= S_0 - S_k - W, \\ v \cdot b'(t) &= S_0(b_0 - b) - W \cdot b, \\ v \cdot h'(t) &= S_0(h_0 - h) - W(i'' - h) + Q - L. \end{aligned} \quad (1)$$

Полученная система дифференциальных уравнений позволяет проводить моделирование динамики процессов выпаривания в однокорпусном ВА. Схема моделирования, соответствующая системе (1), построенная средствами пакета визуального моделирования Simulink [2], изображена на рисунке 2. Для корректной работы схемы предварительно должен быть исполнен **m**-файл, устанавливающий необходимые для блоков схемы параметры и коэффициенты.

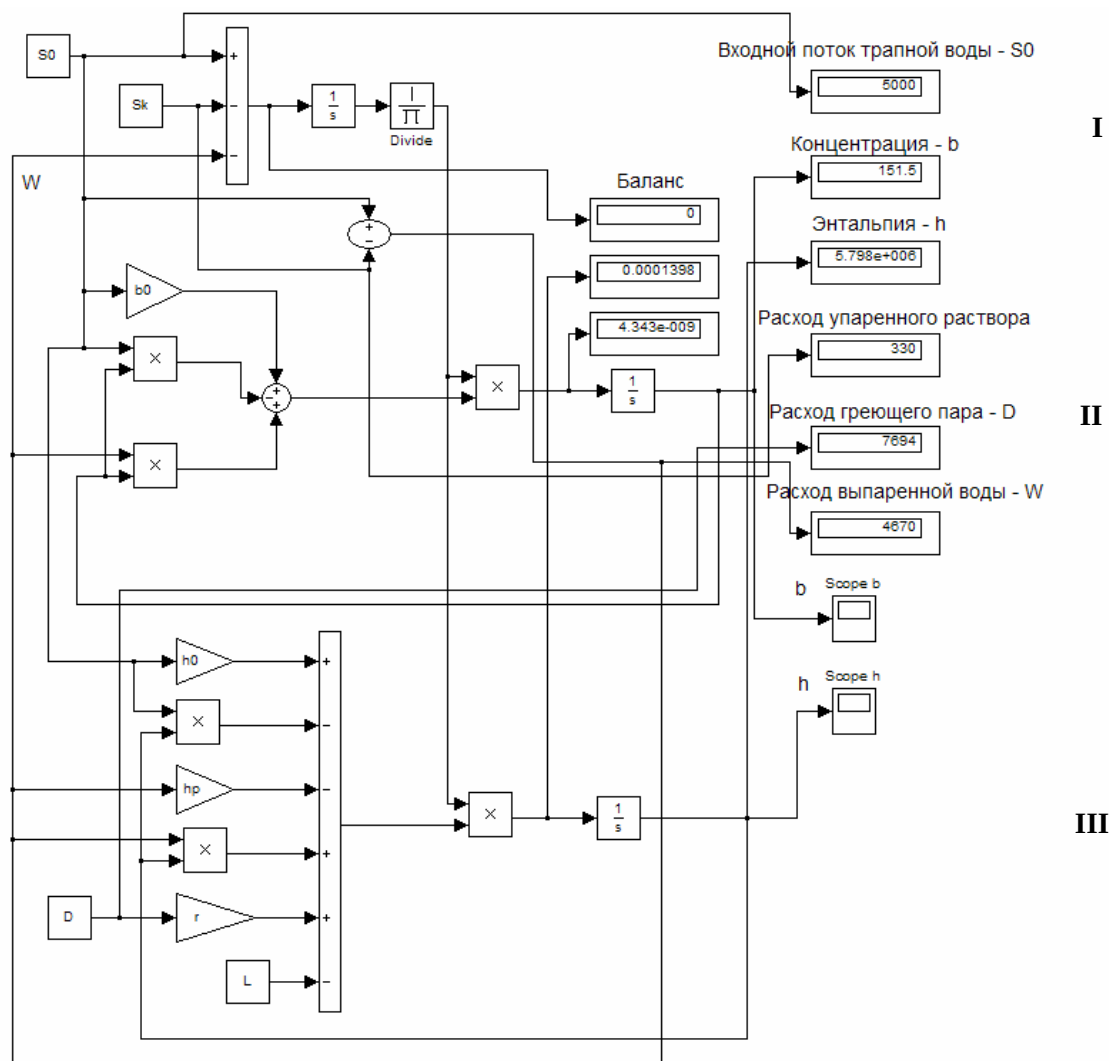


Рисунок 2 – Simulink–схема нелинейной модели однокорпусного ВА

Горизонтальные блоки (I, II и III) Simulink–схемы представляют соответственно первое, второе и третье дифференциальные уравнения системы (1). Все обозначения, приведенные в схеме моделирования (рисунок 2) максимально соответствуют обозначениям в системе уравнений (1). В блоках Display выводятся установившиеся значения, полученные в результате моделирования процессов в ВА в течение 3-х минут, а в блоках Scope – графики переходных процессов для значений концентрации раствора (b) и его энтальпии (h).

Приведенная схема моделирования применялась для имитации процессов выпаривания для различных исходных данных, в частности, варьировались значения потока и температуры входной жидкости, температуры и расхода греющего пара и др.

На рисунке 3 изображены графики, показывающие изменения концентрации и энтальпии при увеличении потока греющего пара. Концентрация и теплосодержание выходного (упаренного) раствора изменяются от начальных значений до расчетных (соответственно, $b_k \approx 181$ г/л и $h_k \approx 1,43 \cdot 10^6$ Дж/кг).

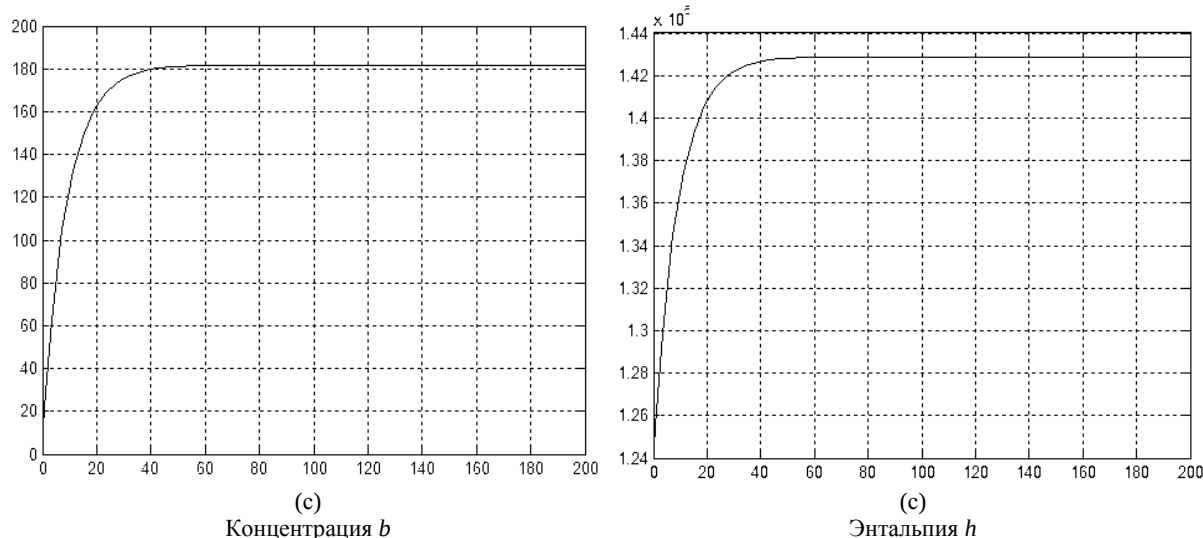


Рисунок 3 – Изменения концентрации раствора и величины энтальпии

Проведенные эксперименты с данной Simulink–схемой показали, что она достаточно адекватно отражает тепловые и массовые процессы в ВА при небольших (в пределах до 10 %) изменениях входных параметров. Экспериментальные исследования с помощью данной схемы моделирования показали, что в качестве управления для достижения заданной концентрации упаренного раствора следует использовать величину потока входного раствора или его концентрацию. При моделировании значение номинальное значение входного потока S_0 принималось равным 6000 кг/ч, а значения концентраций принимались 5 г/л и 10 г/л. Изменение расхода греющего пара, отличающегося от номинального, используется для корректировки теплового баланса. Данная модель может быть применена для расчета других стационарных режимов при изменении исходных данных, характеризующих конкретный однокорпусный ВА.

Выполненные исследования показали, что предложенные структурные модели однокорпусного ВА могут быть использованы для разработки тренажеров для обучения операторов, обслуживающих выпарные установки, обеспечивающие различные режимы технологического процесса, связанные с изменениями параметров входных потоков жидкости и греющего пара. В дальнейшем предполагается использовать полученную математическую модель и схему моделирования для выполнения линеаризации в окрестности номинального режима работы моделируемого выпарного аппарата с целью синтеза стабилизирующих регуляторов.

Библиографический список

1. Гальперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии / Н.И. Гальперин. — М.: Химия, 1981. — 812 с.
2. Лазарев Ю.Ф. Моделирование процессов и систем в Matlab / Ю.Ф. Лазарев. — СПб.: Питер-ВНУ, 2005. — 512 с.

Поступила в редакцию 20.11.2008 г.