

А. В. Мушинин, А. В. Долганов, И.М. Валеев, Н.Г. Смолин

ИММИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО ТРЕНАЖЕРА УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ РЕКТИФИКАЦИИ УЗЛОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЧИСТКИ БУТАДИЕНА-СЫРЦА

Ключевые слова: компьютерный тренажер, математическая модель кипяtilьника, производство бутадиена.

Рассмотрено построение математической модели кипяtilьника ректификационной колонны для применения в компьютерном тренажере.

Keywords: computer simulator, reboiler's mathematical model, production of the butadiene.

The mathematical model of distillation column's reboiler for using in computer simulator is considered.

Введение

Основная роль при комплексной автоматизации производств отводится автоматизированным системам управления технологическими процессами (АСУТП), являющимися базовым уровнем в иерархической структуре АСУ. Несмотря на постоянное развитие технического обеспечения, одним из «слабых» мест в структуре АСУТП был и остается оперативный персонал, являющийся неотъемлемой ее частью. По мнению исследователей, доля ошибок в принятии управляющих решений оперативным персоналом из-за низкой его квалификации может достигать 70 % от общих причин аварийных ситуаций. Особую значимость квалификация операторов приобретает в условиях взрыво- и пожароопасных производств, когда цена ошибки многократно возрастает [1].

Не вызывает сомнения необходимость совершенствования квалификации операторов путем проведения регулярных тренировок по отработке навыков поведения при нештатных ситуациях, а также в штатных ситуациях, требующих глубоких знаний и умений. Общеизвестно, что одним из эффективных подходов к обучению и повышению квалификации операторов является применение компьютерных тренажеров (КТ). Обязательное применение КТ зафиксировано Госгортехнадзором РФ в нормативной документации по безопасной эксплуатации оборудования [2].

Работы над созданием и внедрением КТ для химических производств ведутся с начала 80-х годов XX века как отечественными, так и зарубежными специалистами. Оценивая глубину проблемы, следует отметить, что существует значительное отставание России в этом вопросе, в то время как зарубежные успехи свидетельствуют об экономической эффективности решений в этой области. Объем мирового рынка КТ в 2012 году составил более 400 млн. долл. (лидерами создания КТ являются фирмы Honeywell, Invensys, Yokogawa и др.). Российский рынок оценивается ежегодным объемом продаж на уровне 3-4 млн. долл. Обеспеченность российских предприятий КТ составляет около 25 %. Нарботки в этой области зарубежных производителей

лей носят закрытый характер, представляя собой объект интеллектуальной собственности [3].

Достаточно детальное рассмотрение вопросов методологии построения тренажеров, их архитектуры, истории развития и ряда смежных проблем приводится в работе [1].

Основным звеном КТ является математическая модель процесса, имитирующая во времени протекание физико-химических явлений в объекте с учетом воздействия на него участников тренинга с целью приобретения практических навыков по эффективному управлению процессом в различных режимах. Сложность разработки имитационных моделей для КТ заключается в отсутствии единого подхода к их синтезу, учитывающего ряд специфических особенностей, которые обусловлены:

- масштабностью и много связностью объектов моделирования;
- наличием большого количества управляющих воздействий, включая ручную и автоматическую запорно-регулирующую арматуру, основные и вспомогательные технологические потоки;
- широким диапазоном изменения переменных процесса, характерным для воспроизведения пусковых и остановочных режимов работы объекта, необходимостью моделирования нештатных и аварийных ситуаций;
- необходимостью воспроизведения динамики поведения объекта, и, как следствие, получения устойчивого решения модели в реальном времени;
- невозможностью оценки адекватности модели методами, основанными на использовании экспериментальных данных (ввиду их ограниченности).

Несмотря на многолетние научные изыскания, многие исследователи сходятся во мнении, что решение всего спектра задач в области создания КТ далеко от завершения.

В данной работе рассматривается решение ряда проблем, связанных с разработкой имитационной модели технологического процесса ректификации для КТ на примере очистки бутадиена-сырца. Используется методика [4], отличная от метода по-

Особенности математической модели

1. Модель должна быть динамической, т.к. тренажер должен воспроизводить поведение объекта в реальном времени. В модели должно быть предусмотрено масштабирование времени для ускорения или замедления получения численного решения.

3. В модели должны присутствовать все материальные потоки и инструменты для их изменения, доступные оператору на реальном объекте, в т.ч. ручные задвижки, регулирующие клапаны.

5. Алгоритм численного решения модели должен давать устойчивое решение во всем диапазоне изменения входных воздействий.

Использование в тренажерах сложных инженеринговых, т.е. высокоточных физикохимических моделей, применяемых для проектирования аппаратов, вычисления оптимальных режимов и т.п. в настоящий момент затруднительно.

Необходимо также учитывать, что при решении сложной математической модели численными методами в реальном времени (и, тем более, в ускоренном масштабе времени), помимо решения системы дифференциальных уравнений, приходится решать системы нелинейных уравнений и неравенств. При этом требование реального времени может сильно ограничить точность получаемого решения. Использование поисковых численных алгоритмов (например, метода Ньютона) не дает га-

Использование для описания объекта системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных также нежелательно, т.к. существует проблема сходимости и устойчивости вычислительных схем.

Исходя из приведенных соображений, при построении модели объекта следует придерживаться основных физических законов, не забывая при этом о желательности упрощения численного решения задачи [5].

Объект исследования

В данной работе рассматривается узел очистки бутадиен-сырца от метилацетилена в ректификационной колонне. Данный процесс представляет собой классическую схему ректификации, где бутадиен представляет собой низкокипящий компонент, а метилацетилен – высококипящий.

Рассмотрим моделирование процесса нагрева кубовой жидкости колонны в выносном кипятильнике Т-1, представляющем собой вертикальный кожухотрубный одноходовой противоточный теплообменник, принципиальная схема которого изображена на рис. 1.

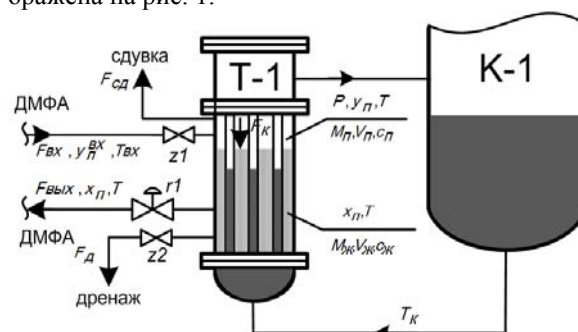


Рис. 1 – Принципиальная схема кипятильника

В трубное пространство кипятильника поступает кубовая жидкость колонны К-1, представляющая, в основном, смесь метилацетилена и бутадиена с преобладающим количеством бутадиена. Подвод тепла в кипятильник осуществляется путем подачи в его межтрубное пространство диметилформамида (ДМФА). ДМФА, отдавая тепло кубовой жидкости через стенки металлических трубок, охлаждается и отводится из кипятильника через регулирующий клапан $r1$.

Особенностью протекания процессов в данном кипятильнике является то, что поступающий теплоноситель – ДМФА может содержать небольшое количество примесей, в основном, диметиламина. Примеси могут накапливаться в верхней части кипятильника, образуя газовую подушку, препятствующую охлаждению ДМФА. Для устранения нега-

тивного влияния данного явления, в верхней части кипятильника предусмотрена линия сдувки примесей в дренажную линию с установленной на ней ручной задвижкой $z1$. Задачей оператора является своевременное определение момента накопления примесей в кипятильнике и периодическая их сдувка. Гидравлическая система кипятильника оборудована также дренажной линией в нижней части кипятильника с ручной задвижкой $z2$ для удаления остатков жидких углеводородов в период плановой или аварийной остановки.

К числу переменных, доступных оператору для наблюдения на объекте, относятся уровень ДМФА L в межтрубном пространстве, а также расход ДМФА $F_{вх}$ на входе в кипятильник.

Математическая модель кипятильника

Приведем систему допущений, принимаемую в модели:

1. Теплоноситель представляет собой бинарную смесь ДМФА и диметиламина с известным содержанием каждого компонента на входе;

2. Пар и жидкость находятся в равновесии друг с другом при температуре кипения.

3. Температура во всех точках межтрубного пространства кипятильника одинакова.

4. Плотности и теплоемкости жидких и газообразных сред не зависят от температуры.

С учетом принятых допущений перейдем к составлению математического описания кипятильника.

Запишем уравнения входных и выходных материальных потоков кипятильника (см. рис. 1):

$$F_{вх} = K_{вх} \sqrt{\frac{(P_{вх} + P)}{2}} \cdot (P_{вх} - P); \quad (1)$$

$$F_{вых} = K_{вых} \cdot [r1] \cdot \sqrt{P + \frac{M_{ж} \cdot g}{S}} - P_{вых}; \quad (2)$$

$$F_{сд} = K_{сд} \cdot [z1] \cdot \sqrt{\frac{(P_{сд} + P)}{2}} \cdot (P - P_{сд}); \quad (3)$$

$$F_{д} = K_{д} \cdot [z2] \cdot \sqrt{P + \frac{M_{ж} \cdot g}{S}} - P_{д}, \quad (4)$$

где $F_{вх}$, $F_{вых}$, $F_{сд}$, $F_{д}$ – массовые расходы входного, выходного потока теплоносителя, сдувок и дренажа соответственно, кг/с; $P_{вх}$, $P_{вых}$, $P_{сд}$, $P_{д}$ – известные давления в смежных узлах, Па; $K_{вх}$, $K_{вых}$, $K_{сд}$, $K_{д}$ – коэффициенты проходного сечения соответствующих трубопроводов; $[r1]$, $[z1]$, $[z2]$ – положения регулирующего клапана и ручных задвижек, установленных на соответствующих потоках и изменяющихся в диапазоне $[0 \div 1]$; P – давление паровой фазы в межтрубном пространстве, Па; $M_{ж}$ – масса ДМФА в межтрубном пространстве кипятильника, кг; S – площадь поперечного сечения межтрубного пространства, м²; g – ускорение свободного падения, м/с².

В выражениях (2), (4) присутствует слагаемое $\frac{M_{ж} \cdot g}{S}$, представляющее собой величину гидростатического давления ДМФА высотой L в межтрубном пространстве кипятильника. Уровень ДМФА L является контролируемой переменной объекта и может быть вычислен по выражению:

$$L = \frac{M_{ж}}{S \cdot \rho_{ж}},$$

где $\rho_{ж}$ – плотность ДМФА, кг/м³.

Давление паровой фазы P будем находить из уравнения состояния идеальных газов:

$$P = \frac{M_{п} \cdot R \cdot T}{V_{п}}, \quad (5)$$

где $M_{п}$ – масса пара в межтрубном пространстве, кг; R – реальная газовая постоянная для ДМФА, Дж/(моль·К); T – температура в межтрубном пространстве кипятильника, К; $V_{п}$ – объем паровой фазы, м³.

Объем паровой фазы в межтрубном пространстве $V_{п}$ связан с массой жидкой фазы $M_{ж}$ соотношением:

$$V_{п} = V_0 - \frac{M_{ж}}{\rho_{п}}, \quad (6)$$

где V_0 – общий объем межтрубного пространства кипятильника, м³.

Общий материальный баланс по паровой и жидкой фазам запишется в виде:

$$\frac{dM_{п}}{dt} = F_{вх} - F_{к} - F_{сд}; \quad (7)$$

$$\frac{dM_{ж}}{dt} = F_{к} - F_{вых} - F_{д}, \quad (8)$$

где $F_{к}$ – поток сконденсировавшегося ДМФА, кг/с.

Для нахождения температуры T в межтрубном пространстве кипятильника необходимо записать уравнение парожидкостного равновесия. Согласно принятому допущению о равновесии парожидкостной смеси для любого компонента i связь между содержанием его в паре y_i и содержанием в жидкости x_i подчиняется закону Рауля [6]:

$$y_i = x_i \frac{P_i}{P}, \quad (9)$$

где $P_i = f_i(T)$ – функциональная зависимость упругости паров от температуры кипения для чистого i -того компонента.

Последнюю зависимость можно представить уравнением Антуана [6]:

$$P_i = \exp\left(A_i - \frac{B_i}{T + C_i}\right), \quad (10)$$

где A_i , B_i , C_i – известные коэффициенты Антуана для i -того компонента, являющиеся справочными данными.

Для упрощения модели и получения решения в устойчивом виде линеаризуем уравнение (10), приведя его для ДМФА и диметиламина к виду:

$$P_{\text{ДМФА}} = A_{\text{ДМФА}}^* \cdot T + B_{\text{ДМФА}}^*; \quad (11)$$

$$P_{\text{Д}} = A_{\text{Д}}^* \cdot T + B_{\text{Д}}^*, \quad (12)$$

где $P_{\text{ДМФА}}$, $P_{\text{Д}}$ – упругости паров ДМФА и диметиламина, Па; $A_{\text{ДМФА}}^*$, $B_{\text{ДМФА}}^*$, $A_{\text{Д}}^*$, $B_{\text{Д}}^*$ – постоянные коэффициенты, вычисленные при линеаризации уравнения Антуана.

Воспользуемся стехиометрическими соотношениями по жидкой и газовой фазе:

$$\sum_{i=1}^N x_i = 1; \quad \sum_{i=1}^N y_i = 1, \quad (13)$$

Запишем уравнение парожидкостного равновесия для смеси ДМФА и диметиламина с учетом уравнений (11) и (12):

$$\frac{P \cdot y_n}{A_{\text{ДМФА}}^* \cdot T + B_{\text{ДМФА}}^*} + \frac{P \cdot (1 - y_n)}{A_{\text{Д}}^* \cdot T + B_{\text{Д}}^*} = 1, \quad (13)$$

где y_n – содержание ДМФА в паровой фазе, мол. дол; $(1 - y_n)$ – содержание диметиламина в паровой фазе.

Уравнение (14) представляет собой нелинейное уравнение относительно неизвестной переменной T и требует для решения применения поискового численного метода, что нежелательно с учетом высказанных ранее суждений. Данное уравнение преобразуется в квадратное уравнение вида:

$$a \cdot T^2 + b \cdot T + c = 0, \quad (15)$$

где коэффициенты a , b , c могут быть найдены из соотношений:

$$a = A_{\text{ДМФА}}^* \cdot A_{\text{Д}}^*;$$

$$b = B_{\text{ДМФА}}^* \cdot A_{\text{Д}}^* + B_{\text{Д}}^* \cdot A_{\text{ДМФА}}^* + P \cdot y_n (A_{\text{ДМФА}}^* - A_{\text{Д}}^*) - P \cdot A_{\text{ДМФА}}^*;$$

$$c = B_{\text{ДМФА}}^* \cdot B_{\text{Д}}^* + P \cdot y_n (B_{\text{ДМФА}}^* - B_{\text{Д}}^*) - P \cdot B_{\text{ДМФА}}^*.$$

Уравнение (15) решается аналитически с выбором корня, лежащего в области допустимых значений T .

Для нахождения неизвестной величины y_n , входящей в уравнение (15), составим уравнение материального баланса по ДМФА:

$$\frac{d(M_n \cdot y_n)}{dt} = F_{\text{вх}} \cdot y_n^{\text{вх}} - F_{\text{к}} \cdot x_n - F_{\text{сд}} \cdot y_n, \quad (16)$$

где $y_n^{\text{вх}}$ – известное содержание ДМФА во входном потоке теплоносителя, мол.дол.; x_n – содержание ДМФА в жидкой фазе, мол.дол.

Продифференцировав левую часть уравнения (16) по частям и подставив в него вместо $\frac{dM_n}{dt}$ правую часть уравнения (7), получим следующее дифференциальное уравнение для определения y_n :

$$M_n \frac{dy_n}{dt} = F_{\text{вх}} \cdot (y_n^{\text{вх}} - y_n) - F_{\text{к}} \cdot (y_n - x_n), \quad (17)$$

Концентрация ДМФА в жидкой фазе x_n находится из уравнения парожидкостного равновесия (9):

$$x_n = y_n \frac{P}{A_{\text{ДМФА}}^* \cdot T + B_{\text{ДМФА}}^*}, \quad (18)$$

Расход конденсата $F_{\text{к}}$ может быть рассчитан из уравнения теплового баланса межтрубного пространства кипятильника. При этом необходимо учитывать принятое допущение о равенстве температур по всему объему межтрубного пространства:

$$\begin{aligned} \frac{d[(c_{\text{ж}} \cdot M_{\text{ж}} + c_{\text{п}} \cdot M_{\text{п}}) \cdot T]}{dt} = & c_{\text{п}} \cdot F_{\text{вх}} \cdot T_{\text{вх}} - \\ & - c_{\text{ж}} \cdot F_{\text{вых}} \cdot T - \varphi + F_{\text{к}} \cdot \lambda - c_{\text{п}} \cdot F_{\text{сд}} \cdot T - \\ & - c_{\text{ж}} \cdot F_{\text{д}} \cdot T - \varphi_1, \end{aligned} \quad (19)$$

где $c_{\text{ж}}$, $c_{\text{п}}$ – теплоёмкости жидкой и паровой фаз соответственно, Дж/(кг К); $T_{\text{вх}}$ – известная температура входного потока теплоносителя, К; λ – скрытая теплота конденсации парового потока, Дж/кг; φ – тепловой поток, отводимый из межтрубного пространства кипятильника для парообразования бутадиена, находящегося в трубном пространстве, Дж/с; φ_1 – поток тепловых потерь, Дж/с.

Величина теплового потока φ рассчитывается по формуле:

$$\varphi = k_t \cdot S_t \cdot (T - T_{\text{к}}) \cdot \left(1 - \frac{M_{\text{ж}}}{L_0 \cdot S_t \cdot \rho_{\text{ж}}}\right)$$

где k_t – коэффициент теплопередачи через стенки труб; S_t – площадь теплопередачи, м²; $T_{\text{к}}$ – известная температура потока в трубном пространстве, вычисляемая из теплового баланса колонны К-1, К; L_0 – высота труб в кипятильнике, м.

Для вычисления потока конденсата $F_{\text{к}}$ преобразуем дифференциальное уравнение (19) в алгебраическое, используя почленное дифференцирование левой части, с учетом уравнений (5), (7), (8), (11) и (12). В результате преобразований получим:

$$F_{\text{к}} = \frac{E}{S}, \quad (20)$$

где

$$\begin{aligned} E = & \left(\frac{D}{G} + \frac{P \cdot (F_{\text{вых}} + F_{\text{д}})}{G \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot V_n} - \frac{P \cdot (F_{\text{вх}} + F_{\text{сд}})}{G \cdot M_n} \right) \cdot \\ & \cdot (c_{\text{ж}} \cdot M_{\text{ж}} + c_{\text{п}} \cdot M_{\text{п}}) + c_{\text{п}} \cdot F_{\text{вх}} \cdot (T - T_{\text{вх}}) + \varphi + \varphi_1, \\ S = & \frac{(c_{\text{ж}} M_{\text{ж}} + c_{\text{п}} M_{\text{п}}) \cdot P}{G \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot V_n} - \frac{(c_{\text{ж}} M_{\text{ж}} + c_{\text{п}} M_{\text{п}}) \cdot P}{G \cdot M_n} - \\ & - \frac{(c_{\text{ж}} M_{\text{ж}} + c_{\text{п}} M_{\text{п}}) \cdot P_{\text{ДМФА}} \cdot (y_n - x_n) \cdot (y_n P - x_n P_{\text{Д}})}{G \cdot y_n \cdot M_n \cdot (y_n \cdot P_{\text{Д}} - y_n \cdot P_{\text{ДМФА}} + P_{\text{ДМФА}})} + \\ & + \lambda + T \cdot (c_{\text{п}} - c_{\text{ж}}). \end{aligned}$$

Здесь

$$\begin{aligned} G = & \frac{M_n R}{V_n} - \frac{x_n A_{\text{ДМФА}}^* \cdot (P_{\text{Д}})^2 - P_{\text{ДМФА}} P \cdot (y_n - 1) \cdot A_{\text{Д}}^*}{P_{\text{Д}} \cdot (y_n \cdot P_{\text{Д}} - y_n \cdot P_{\text{ДМФА}} + P_{\text{ДМФА}})}, \\ D = & \frac{P_{\text{ДМФА}} F_{\text{вх}} \cdot (y_n^{\text{вх}} - y_n) \cdot (y_n P - x_n P_{\text{Д}})}{y_n \cdot M_n \cdot (y_n \cdot P_{\text{Д}} - y_n \cdot P_{\text{ДМФА}} + P_{\text{ДМФА}})}. \end{aligned}$$

Уравнение (20) является алгебраическим, разрешенным относительно искомой переменной $F_{\text{к}}$ в явном виде.

Таким образом, математическое описание кипяtilьника Т-1 состоит из 9 нелинейных алгебраических уравнений (1-6, 15, 18, 20), выраженных в явном виде относительно искомых переменных и 3 дифференциальных уравнений (7, 8, 17).

Полученная математическая модель может быть решена без использования поисковых методов, система дифференциальных уравнений решается любым одношаговым численным методом, например, методом Рунге-Кутты 4-го порядка [7].

Процедура проверки адекватности тренажерной модели проводилась в соответствии с методикой, изложенной в работе [8].

Заключение

В работе рассмотрена задача построения математической модели одного из технологических объектов процесса получения бутадиена – кипяtilьника кубовой жидкости колонны. Задача решена с точки зрения применения данной модели в динамическом тренажере для обучения оперативного персонала. Особенностью модели является специфика получения ее численного решения без использования поисковых численных методов, что является актуальным при использовании ее в тренажерных системах реального времени.

Полученные результаты были реализованы в компьютерном тренажерном комплексе по обучению операторов цеха углеводородного сырья [9-10] и описаны в работе [3].

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (соглашение №14.В37.21.0591).

Литература

1. В. М. Дозорцев, *Компьютерные тренажеры для обучения операторов технологических процессов*. Синтег, Москва, 2009, 372 с.
2. ПБ 09-540-03. *Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств*. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 05.05.03 № 29, зарегистрированным Минюстом России 15.05.03 г., рег. № 4537.
3. А.В. Мушнин, Д. В. Елизаров, В. В. Елизаров, *Вестник Казан. технол. ун-та*, 15. 8. 348–351 (2012).
4. А.В. Долганов, В. В. Елизаров, В. И. Елизаров, *Вестник Казан. технол. ун-та*, 14. 19. 180–188 (2011).
5. А. Г. Колмогоров, Н.С. Благодарный, *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 26. 2. 51–56 (2010).
6. А.Г. Касаткин, *Основные процессы и аппараты химической технологии*. Химия, Москва, 1973, 754 с.
7. Т.Н. Гартман, Д.В. Клушин, *Основы компьютерного моделирования химико-технологических процессов*. Академкнига, Москва, 2008, 416 с.
8. Н.С. Благодарный, М.В. Кривов, А. Г. Колмогоров, В. Ю. Кобозев, *Автоматизация в промышленности*, 7. 59-65 (2010).
9. Авт. свид. РФ 2012615831 (2012)
10. Авт. свид. РФ 2012615832 (2012)

© **А. В. Мушнин** – инженер кафедры автоматизации технологических процессов и производств НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ», [Aleksy_muschinin@mail.ru](mailto:Aleksey_muschinin@mail.ru); **А. В. Долганов** – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ»; **И.М. Валеев** – начальник информационно-вычислительного центра НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ»; **Н.Г. Смолин** – заведующий отделом технического обеспечения ИВЦ НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ».