

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
МНОГОСВЯЗНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
НА ПРИМЕРЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ**

**В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова,
С. Э. Эктов, Р. В. Воронков, М. Л. Гогорян, Д. Г. Дмитриев**

*Кафедра «Информационные процессы и управление»,
terehova.aa@mail.tstu.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: алгоритм управления; диффузионный аппарат; математическая модель; материальный баланс; система управления; тепловой баланс; управление по модели.

Аннотация: Рассмотрены теоретические основы построения математических моделей многосвязных технологических процессов и систем управления ими на примере получения диффузионного сока в наклонном шнековом аппарате. При формировании математической модели использованы физико-химические и термодинамические закономерности, происходящие в процессе экстракции сахара. Математическая модель построена с учетом выявленной структуры объекта и используется в системе управления диффузионным аппаратом. Система осуществляет непрерывный контроль за текущими значениями возмущающих и выходных величин. Затем с помощью модели находятся управляющие воздействия, при которых достигается экстремум критерия оптимальности.

Введение

Методы математического моделирования [1 – 9] позволяют исследовать основные особенности технологического процесса и вскрыть резервы совершенствования. Разработка математической модели – ответственный и трудоемкий этап. Математическая модель пищевого процесса состоит из соотношений, выражающих количественные и качественные характеристики происходящих в технологическом аппарате явлений. К настоящему времени процессы экстракции как объекты автоматического управления крайне недостаточно изучены. Причинами этого являются сложность процессов тепло- и массообмена, происходящих в аппаратах, нестационарность процессов, недостаточность экспериментальных данных по гидродинамике аппаратов.

Для получения математического описания процесса экстракции как объекта управления используем метод составления балансовых уравнений при малых отклонениях от номинального режима.

Формирование математической модели

Диффузионный аппарат является многомерным нелинейным объектом. Проведение экспериментов на реальном аппарате затруднительно. Будем составлять модель на основе физико-химических, термодинамических закономерностей. Для эффективного управления процессом экстракции лучше применить динамическую модель, представляющую собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений. Общая система уравнений для смеси состоит из уравнений материального и теплового балансов.

Примем следующие допущения:

- в качестве модели гидродинамики примем ячеечную модель;
- теплоемкость и теплота парообразования пара постоянны;
- пар распределяется по ячейкам равномерно;
- теплоемкость веществ постоянна;
- плотность смеси свекловичной стружки, мезги и воды, находящейся внутри аппарата изменяется по длине аппарата;
- застойные объемы жидкости в аппарате, а также такие явления, как адсорбция и десорбция вещества на поверхности стружки, диффузия вещества в пленке отсутствуют.

В ячеечной модели поток условно разбивается на ряд последовательно соединенных ячеек. При этом в каждой из этих ячеек имеет место полное перемешивание потока, а перемешивание между ячейками отсутствует. Число таких идеальных ячеек m является параметром, характеризующим модель реального процесса. Когда $m \rightarrow \infty$ имеет место модель идеального вытеснения при $m = 1$ – идеальное смешение. Примем число ячеек $m = 12$.

С учетом принятых допущений уравнение материального баланса для первой ячейки примет вид

$$\frac{dM^1}{d\tau} = G_B + G_{ж.в} + G_{\Pi} + G_{св} + \frac{(G_c + G_{ж})^1}{r_c^1 + r_{ж}^1}, \quad (1)$$

где M^1 – масса смеси в первой ячейке; G_B , $G_{ж.в}$ – расходы свежей и жомопресовой воды соответственно; G_{Π} – расход пара в ячейку; $G_{св}$ – расход свеклы на входе в первую ячейку; G_c , $G_{ж}$ – расходы диффузионного сока и жома соответственно; r_c , $r_{ж}$ – плотности соответственно сока и жома.

Начальное условие для уравнения (1)

$$M^1(0) = M_0^1. \quad (2)$$

Для второй и последующих ячеек данное уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{dM^i}{d\tau} = (G_c + G_{ж})^{i-1} + G_{\Pi} - \frac{(G_c + G_{ж})^i}{r_c^i + r_{ж}^i}, \quad i = \overline{2, m}. \quad (3)$$

Начальные условия

$$M^i(0) = M_0^i, \quad i = \overline{2, m}. \quad (4)$$

Уравнение теплового баланса для первой ячейки

$$c_p \frac{d(M^1 t_d^1)}{d\tau} = G_B c_B t_B^{BX} + G_{ж.в} c_{ж.в} t_{ж.в}^{BX} + G_{св} c_{св} t_{св}^{BX} + G_{\Pi} h_{\Pi} - \frac{(G_c + G_{ж})^1 c_p t_d^1}{r_c^1 + r_{ж}^1} - KF(t_d^1 - t_{oc}), \quad (5)$$

где $c_p, c_B, c_{ж.в}, c_{св}$ – удельные теплоемкости веществ, воды, жомопрессовой воды, свеклы соответственно; h_{Π} – энтальпия пара на входе в аппарат; t_d^1 – температура смеси на выходе из первой ячейки; $t_B^{BX}, t_{ж.в}^{BX}$ – температуры свежей и жомопрессовой воды на входе в аппарат соответственно; $t_{св}^{BX}$ – температура поступающей свеклы; K – коэффициент теплопередачи; F – площадь поверхности теплопередачи.

Начальное условие для уравнения (5)

$$M^1(0) t_d^1(0) = M_0^1 t_{д0}^1, \quad (6)$$

Для второй и последующих ячеек уравнений теплового баланса будет выглядеть следующим образом:

$$c_p \frac{d(M^i t_d^i)}{d\tau} = \frac{(G_c + G_{ж})^{i-1} c_p t_d^{i-1}}{r_c^i + r_{ж}^i} + G_{\Pi} h_{\Pi} - \frac{(G_c + G_{ж})^{i-1} c_p t_d^i}{r_c^i + r_{ж}^i} - KF(t_d^i - t_{oc}), \quad (7)$$

$i = \overline{2, m}.$

Начальные условия для уравнения (7)

$$M^i(0) t_d^i(0) = M_0^i t_{д0}^i, \quad i = \overline{2, m}. \quad (8)$$

Расход свеклы определяется зависимостью

$$G_{св} = f_1(n_{ш}), \quad (9)$$

где $n_{ш}$ – частота вращения шнека.

Расход пара в ячейку определяется из уравнения

$$G_{\Pi} = \frac{\mu K_v \sqrt{P_{\Pi} - P_a}}{12}, \quad (10)$$

где μ – степень открытия клапана на линии подачи пара; K_v – пропускная способность клапана; P_{Π}, P_a – давления в линии подачи пара и аппарате соответственно.

Энтальпия пара поступающего в аппарат определяется соотношением

$$h_{\Pi} = f_2(P_{\Pi}). \quad (11)$$

По закону диффузии Фика, диффузионный поток J (количество растворенного вещества, продиффундировавшего сквозь некоторый слой растворителя), пропорционален градиенту концентрации C_c (разности концентраций на границах этого слоя),

$$J = -D \frac{dC_c}{dx}. \quad (12)$$

Величина коэффициента диффузии D зависит от рода диффундирующего вещества и температуры, при которой происходит диффузия. В первом прибли-

жении он показывает, сколько данного вещества продиффундирует в единицу времени через единицу площади

$$D^i = \frac{K_c F_c t_d}{\eta^i}, \quad i = 1, m, \quad (13)$$

здесь K_c – количество сырья; F_c – площадь свекловичной стружки; η – вязкость смеси при данной температуре,

$$\eta^i = f(r^i), \quad (14)$$

где r – плотность смеси при данной температуре.

Полученная динамическая модель процесса экстракции в диффузионном аппарате в дальнейшем применяется:

- для выбора динамических каналов управления;
- получения переходных характеристик;
- в алгоритме управления диффузионным аппаратом.

Разработка структуры системы управления

Существуют различные варианты управления по модели [10 – 21]. Обычно имеется модель объекта, на которой можно в ускоренном масштабе времени выявить влияние различных возмущающих воздействий на объект и заблаговременно скорректировать задания или настроечные параметры управляющих устройств таким образом, чтобы эти возмущения не сказались на стабилизируемых параметрах. Такие системы относятся к супервизорному управлению или управлению с прогнозированием.

В предлагаемом способе управления по модели используется блок, формирующий управляющие воздействия с применением модели, связывающей входные и выходные переменные. Управление по модели реализовано следующим образом. Выполняется непрерывный контроль за текущими значениями возмущающих и выходных величин. Затем с помощью динамической модели по критерию оптимальности при выполнении ограничений находятся управляющие воздействия, при которых обеспечиваются требуемые температуры в секциях аппарата.

На рисунке 1 показан алгоритм решения задачи управления. Алгоритм учитывает как контролируемые (измеряемые) возмущения ($n_{ш}$, $G_{ж.в}$, $G_{в}$, $t_{ж.в}^{BX}$, $t_{в}^{BX}$, $t_{св}^{BX}$, t_{oc} , F_c), так и не измеряемое возмущение (качество сырья K_c).

Алгоритм состоит в следующем. В блоке 1 осуществляется ввод измеренных управляющих и возмущающих параметров: степень открытия клапана на линии подачи пара μ , частота вращения шнека $n_{ш}$, расходы жомпрессовой $G_{ж.в}$ и свежей $G_{в}$ воды, температуры жомпрессовой $t_{ж.в}^{BX}$ и свежей $t_{в}^{BX}$ воды на входе в аппарат, температура поступающей свеклы $t_{св}^{BX}$, температура окружающей среды t_{oc} , площадь свекловичной стружки F_c , определяемая скоростью вращения свеклорезок. В этот же блок поступают данные по качеству K_c .

При переходе к другому сырью меняется его качество и температура окружающей среды, также может меняться и размер стружки. Эти изменения осуществляются в блоках 2 и 3.

В блоке 2 возмущения первой группы компенсируются путем стабилизации параметров с помощью одноконтурных систем регулирования. Стабилизация состоит в поддержании параметров на заданных значениях.

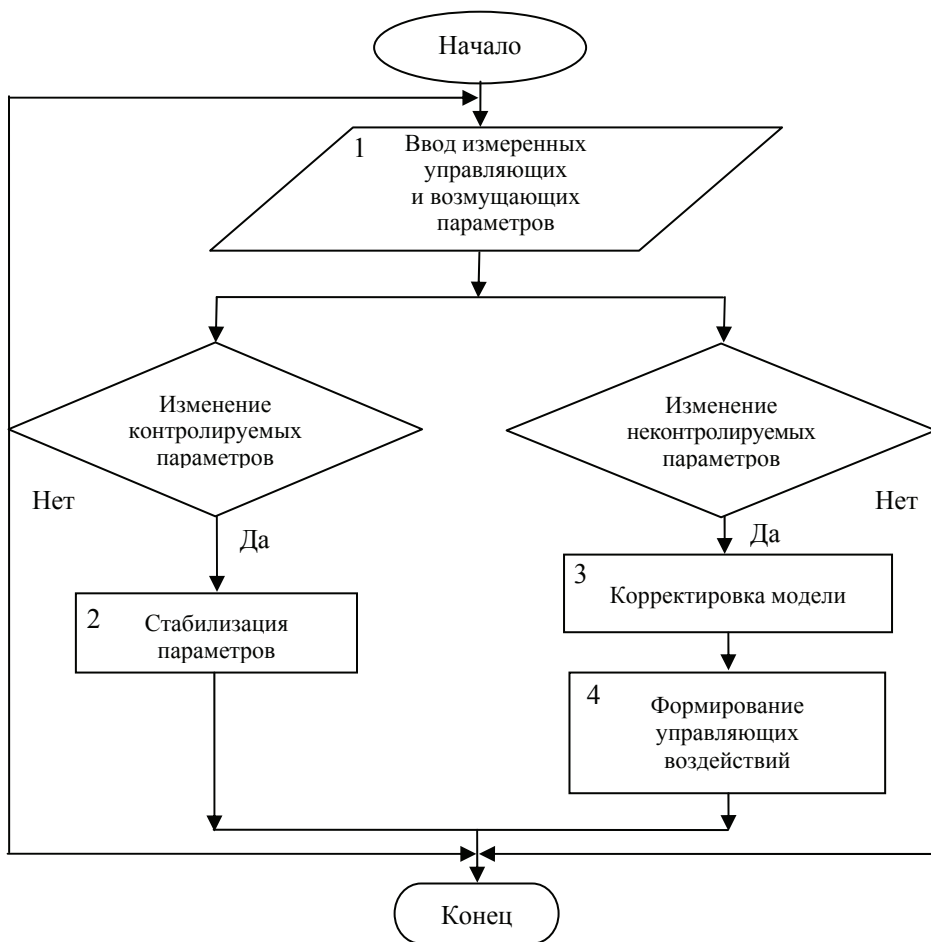


Рис. 1. Блок-схема алгоритма решения задачи управления

Для компенсации возмущений второй группы осуществляется корректировка модели (1) – (13) в блоке 3, параметры которой также корректируются при временном прекращении работы установки, при плановом ремонте, замене оборудования.

В блоке 4 определяются значения коэффициента диффузии D и формируются управляющие воздействия. В результате работы данного блока получаем задания на регуляторы температур по секциям диффузионного аппарата. Полученные значения выдаются на исполнительные механизмы. При поступлении новых данных (изменения возмущающих воздействий) осуществляется переход к блоку 1.

Предложенный алгоритм может применяться для различного числа корректируемых параметров. Например, при модернизации технологического оборудования или изменения технологического регламента число параметров можно изменить.

На рисунке 2 приведена структурная схема управления по модели.

В блоке «Одноконтурные системы регулирования» выполняется регулирование расхода жомпрессовой и свежей воды в диффузионный аппарат. Расход измеряется расходомером-счетчиком. Унифицированный выходной сигнал постоянного тока с датчика поступает на аналоговый вход микроконтроллера. Контроллер формирует управляющий сигнал, поступающий на блок управления



Рис. 2. Структурная схема управления диффузионным аппаратом по модели

электродвигателем исполнительного механизма, который регулирует работу клапана на линии подачи жомопрессовой и свежей воды.

Регулирование скорости вращения свеклорезок осуществляется следующим образом. Измерение скорости вращения проводится бесконтактным датчиком скорости, который текущее значение скорости вращения преобразует в унифицированный сигнал. Этот сигнал направляется на микроконтроллер, а управляющий сигнал с контроллера поступает на вход задания частоты частотного преобразователя, управляющего электродвигателем свеклорезки.

Рассмотрим регулирование расхода свекловичной стружки в диффузионный аппарат. Контроль веса свекловичной стружки осуществляется электротензометрическим весоизмерительным устройством. Измерение скорости вращения шнека проводится бесконтактным датчиком совместно с электронным тахометром, сигнал с которого направляется на микроконтроллер. Контроллер вырабатывает управляющее воздействие, которое управляет электродвигателями транспортеров.

В блоке «Анализ качества сырья» определяются загрязненность свеклы примесями и сахаристость корнеплодов. Анализ качества свеклы в условиях сахарного производства выполняется многократно: во время роста свеклы, при приемке свеклы и укладке в кагаты или сплавные площадки, во время хранения свеклы, при поступлении в переработку. При механизированной уборке в поступающей с полей свекле кроме земли содержится много травы, ботвы и свекловичного боя.

Если технологический режим нарушен или в переработку поступает свекла низкого качества в связи с плохими условиями выращивания и хранения, с повышенным содержанием обломков, инфицированная грибами и бактериями, жизнедеятельность микроорганизмов в смеси интенсифицируется, и неучтенные потери сахарозы увеличиваются. Повышение неучтенных потерь отрицательно сказывается на эффективности работы не только диффузионной установки, но и всей технологической линии.

В блоке «Управление по модели» по измеренным значениям: расходу и температурам жомопрессовой и свежей воды, температурам поступающей свеклы и окружающей среды, и рассчитанным: площади свекловичной стружки, расходу пара, коэффициенту диффузии, качеству свеклы проводится корректировка модели. Затем рассчитываются управляющие воздействия, и происходит управление температурой с поправкой на качество сырья. Контроллер формирует управляющий сигнал, который поступает на блок управления электродвигателем исполнительного механизма клапана на линии подачи греющего пара.

Заключение

Разработанные динамические модели процесса экстракции в наклонном диффузионном аппарате позволяют рассчитать коэффициент диффузии и определить управляющие воздействия. Алгоритм управления, построенный с использованием разработанной модели, дает возможность управлять концентрацией сахара в получаемом диффузионном соке при разных значениях возмущающих воздействий, в частности при изменении качества и температуры поступающего на переработку сырья. С помощью предложенной структурной схемы управления решается задача формирования автоматизированной системы управления.

Список литературы

1. Битюков, В. К. Обобщенная математическая модель сетевой системы управления с конкурирующим методом доступа / В. К. Битюков, А. Е. Емельянов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2012. – Т. 18, № 2. – С. 319 – 326.
2. Метод моделирования многосвязной цифровой системы управления процессом синтеза аммиака / В. С. Кудряшов, С. Г. Тихомиров, С. В. Рязанцев, А. В. Иванов, И. А. Козенко // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2017. – Т. 23, № 4. – С. 572 – 580. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.572-580
3. Математические модели многосвязных объектов управления / М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. В. Башкатова, А. А. Мамонтов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 1. – С. 53 – 62. doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062
4. Коновалов, В. И. Основные пути энергосбережения и оптимизации в тепло- и массообменных процессах и оборудовании / В. И. Коновалов, Н. Ц. Гатапова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – Т. 14, № 4. – С. 796 – 811.
5. Остапчук, Н. В. Основы математического моделирования процессов пищевых производств: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Высш. шк., 2001. – 367 с.
6. Бракоренко, А. С. Моделирование технологических процессов в ходе разработки и отладки АСУ ТП / А. С. Бракоренко // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2014. – № 3. – С. 21 – 27.
7. Демиденко, Н. Д. Моделирование и оптимизация технологических систем с распределенными параметрами / Н. Д. Демиденко, Л. В. Кулагина // Вестник СибГАУ. – 2014. – №3(55). – С. 55 – 62.
8. Диго, Г. Б. Построение модели предельного режима функционирования массообменного технологического процесса / Г. Б. Диго, Н. Б. Диго, А. Ю. Торгашов // Моделирование систем. – 2012. – № 1 (31). – С. 80 – 86.
9. Райбман, Н. С. Построение моделей процессов производства / Н. С. Райбман, В. М. Чадеев. – М. : Энергия, 1975. – 375 с.
10. Управление объектами с взаимосвязанными величинами / М. Н. М. Саиф, В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. В. Башкатова, А. А. Мамонтов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 2. – С. 206 – 218. doi:10.17277/vestnik.2019.02.pp.206-218
11. Дяконца, С. А. Применение компенсирующего регулирования для многосвязного управления многопараметрической системой / С. А. Дяконца, И. Р. Сугачевский // Системы. Методы. Технологии. – 2014. – № 1 (21). – С. 86 – 90.
12. Прангишвили, И. В. Основные системные законы управления сложными системами различной природы в кризисной ситуации / И. В. Прангишвили // Приборы и системы управления. – 1977. – №2. – С. 32 – 38.
13. Кудряшов, В. С. Способ автоматизированного синтеза структуры передаточных функций автономных компенсаторов многосвязной цифровой системы

управления / В. С. Кудряшов // Вестн. Воронеж. гос. технол. акад. Сер. Информ. технологии, моделирование и управление. – 2011. – № 2. – С. 16 – 20.

14. Рылов, М. А. Обзор систем усовершенствованного управления технологическими процессами / М. А. Рылов // Исследовано в России (электронный научный журнал). – 2013. – №8. – С. 120 – 126.

15. Галяув, Е. Р. Робастное оптимальное управление линейными объектами с эталонной моделью / Е. Р. Галяув, И. Б. Фуртат // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 2. – С. 22 – 25.

16. Степанец, А. В. Регулирующий адаптивный комплекс на основе каскадной системы с моделью объекта управления / А. В. Степанец // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/10(56). – С. 14 – 18.

17. Печенкин, Д. В. Автоматизированная система управления технологическим процессом получения элементарной серы на основе оценки рисков / Д. В. Печенкин, Б. С. Дмитриевский, И. А. Щербатов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – № 8(3). URL : https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/PechenkinSoavtors_3_20_1.pdf doi: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.008 (дата обращения : 07.09.2023).

18. Управление расписанием многосвязной производственной системы / В. Г. Матвейкин, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова, М. В. Лемкина, С. Н. А. Аль Кнфер, М. А. Д. Аль Амиди // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 1. – С. 50 – 61. doi: 10.17277/vestnik.2021.01.pp.050-061

19. Двухмодельный комплекс для исследования процесса адсорбции водорода / Б. С. Дмитриевский, М. Х. Х. Альруйшид, А. А. Терехова, А. А. Ишин, С. А. Скворцов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2021. – Т. 27, № 4. – С. 528 – 535. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp. 528-535

20. Математическое моделирование и оптимальное управление процессом адсорбционного получения водорода / М. Х. Х. Альруйшид, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова, А. А. Ишин, С. А. Скворцов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 35 – 45. doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.035-045

21. Математическое моделирование процесса получения водорода из продуктов парового риформинга природного газа / М. Х. Х. Альруйшид, С. А. Скворцов, А. А. Ишин, Б. С. Дмитриевский, А. А. Терехова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022/ – № 10(1). URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48311319_39896218.pdf. doi: 10.26102/2310-6018/2022.36.1.024 (дата обращения : 07.09.2023).

Development of a Control System for Multi-Connected Technological Processes Using the Example of Food Industry

V. G. Matveykin, B. S. Dmitrievsky, A. A. Terekhova,
S. E. Ektov, R. V. Voronkov, M. L. Gogoryan, D. G. Dmitriev

*Department of Information Processes and Control,
terekhova.aa@mail.tstu.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: control algorithm; diffusion apparatus; mathematical model; material balance; control system; heat balance; model management.

Abstract: The theoretical foundations for constructing mathematical models of multi-connected technological processes and their control systems are considered using the example of obtaining diffusion juice in an inclined screw apparatus. When forming a mathematical model, physicochemical and thermodynamic patterns that occur during

the process of sugar extraction were used. A mathematical model is built taking into account the identified structure of the object and is used in the control system of the diffusion apparatus. The system continuously monitors the current values of disturbance and output quantities. Then, using the model, control actions are found at which the extremum of the optimality criterion is achieved.

References

1. Bityukov V.K., Yemelyanov A.E. [Generalized mathematical model of a network control system with a competitive access method], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 2, pp. 319-326. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Kudryashov V.S., Tikhomirov S.G., Ryazantsev S.V., Ivanov A.V., Kozenko I.A. [Method of modeling a multi-connected digital control system for the synthesis of ammiak], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2017, vol. 23, no. 4, pp. 572-580. doi: 10.17277/vestnik.2017.04.pp.572-580 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Saif M.N.M., Matveikin V.G., Dmitrievsky B.S., Bashkatova A.V., Mamontov A.A. [Mathematical models of multi-connected control objects], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 53-62/ doi: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.053-062 (In Russ., abstract in Eng.)
4. Konovalov V.I., Gatapova N.Ts. [The main ways of energy saving and optimization in heat and mass transfer processes and equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2008, vol. 14, no. 4, pp. 796-811. (In Russ., abstract in Eng.)
5. Ostapchuk N.V. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya protsessov pishchevykh proizvodstv: ucheb. posobiye* [Fundamentals of mathematical modeling of food production processes: Textbook], Kiev: Vysshay shkola, 2001, 367 p. (In Russ.)
6. Brakorenko A.S. [Modeling of technological processes during the development and debugging of automated process control systems], *Elektrotekhnicheskiye komplekisy i sistemy upravleniya*. [Electrical complexes and control systems], 2014, no. 3, pp. 21-27. (In Russ., abstract in Eng.)
7. Demidenko N.D., Kulagina L.V. [Modeling and optimization of technological systems with distributed parameters], *Vestnik SibGAU* [Bulletin of SibGAU], 2014, no. 3(55), pp. 55-62. (In Russ., abstract in Eng.)
8. Digo G.B., Digo N.B., Torgashov A.Yu. [Constructing a model of the limiting mode of functioning of a mass-exchange technological process], *Modelirovaniye sistem* [Modeling of systems], 2012, no. 1 (31), pp. 80-86. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Raibman N.S., Chadeev V.M. *Postroyeniye modeley protsessov proizvodstva* [Building models of production processes], Moscow: Energiya, 1975, 375 p. (In Russ.)
10. Saif M.N.M., Matveikin V.G., Dmitrievsky B.S., Bashkatova A.V., Mamontov A.A. [Management of objects with interrelated quantities], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 2, pp. 206-218. doi:10.17277/vestnik.2019.02.pp.206-218 (In Russ., abstract in Eng.)
11. Dyakonitsa S.A., Sugachevsky I.R. [Application of compensating regulation for multi-connected control of a multiparametric system], *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. [Systems. Methods. Technologies], 2014, no. 1(21), pp. 86-90. (In Russ., abstract in Eng.)
12. Prangishvili I.V. [Basic system laws of control of complex systems of various nature in a crisis situation], *Pribory i sistemy upravleniya* [Instruments and control systems], 1977, no. 2, pp. 32-38. (In Russ., abstract in Eng.)
13. Kudryashov V.S. [A method of automated synthesis of the structure of transfer functions of autonomous compensators of a multi-connected digital control system], *Vestnik Voronezhskoy gosudarstvennoy tekhnologicheskoy akademii. Seriya: Informatsionnyye tekhnologii, modelirovaniye i upravleniye*. [Bulletin of the Voronezh State Technological Academy. Series: Information technologies, modeling and management], 2011, no. 2, pp. 16-20. (In Russ., abstract in Eng.)

14. Rylov M.A. [Review of advanced process control systems], *Issledovano v Rossii (elektronnyy nauchnyy zhurnal)* [Researched in Russia (electronic scientific journal)], 2013, no. 8, pp. 120-126. (In Russ., abstract in Eng.)

15. Galyaev E.R., Furtat I.B. [Robust optimal control of linear objects with a reference model], *Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika*. [Instruments and systems. Management, control, diagnostics], 2010, no. 2, pp. 22-25. (In Russ., abstract in Eng.)

16. Stepanets A.V. [Regulating adaptive complex based on a cascade system with a model of a control object], *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*. [East European Journal of Advanced Technologies], 2012, no. 2/10(56), pp. 14-18. (In Russ., abstract in Eng.)

17. Pechenkin D.V., Dmitrievsky B.S., Shcherbatov I.A. [Automated control system for the technological process of obtaining elemental sulfur based on risk assessment], [Modeling, optimization and information technology], 2020, no. 8(3). available at: https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/PechenkinSoavtors_3_20_1.pdf. doi: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.008 (accessed 07 September 2023) (In Russ., abstract in Eng.)

18. Matveikin V.G., Dmitrievsky B.S., Terekhova A.A., Lemkina M.V., Al Knfer S.N.A., Al Amidi M.A.D. [Schedule management of a multi-connected production system], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 1, pp. 50-61. doi: 10.17277/vestnik.2021.01.pp.050-061 (In Russ., abstract in Eng.)

19. Dmitrievsky B.S., Alruyshid M.H.H., Terekhova A.A., Ishin A.A., Skvortsov S.A. [A two-model complex for the study of the water adsorption process], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 4, pp. 528-535. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.528-535 (In Russ., abstract in Eng.)

20. Alruyshid M.H.H., Dmitrievsky B.S., Terekhova A.A., Ishin A.A., Skvortsov S.A. [Mathematical modeling and optimal control of the process of adsorption production of hydrogen], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 35-45. doi: 10.17277/vestnik.2022.01.pp.035-045 (In Russ., abstract in Eng.)

21. Alruyshid M.H.H., Skvortsov S.A., Ishin A.A., Dmitrievsky B.S., Terekhova A.A. [Mathematical modeling of the process of obtaining hydrogen from natural gas steam reforming products], [Modeling, optimization and information technologies], 2022, no. 10(1), available at: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_48311319_39896218.pdf. doi: 10.26102/2310-6018/2022.36.1.024 (accessed 07 September 2023) (In Russ., abstract in Eng.)

Entwicklung des Steuersystems der vielfach vernetzten technologischen Prozesse am Beispiel der Lebensmittelproduktion

Zusammenfassung: Es sind die theoretischen Grundlagen zur Erstellung mathematischer Modelle vielfach vernetzter technologischer Prozesse und deren Steuerungssysteme am Beispiel der Gewinnung von Diffusionsaft in einem Schrägschneckenapparat betrachtet. Bei der Bildung des mathematischen Modells sind physikalisch-chemische und thermodynamische Muster verwendet, die während des Zuckerextraktionsprozesses auftreten. Unter Berücksichtigung der identifizierten Struktur des Objekts ist ein mathematisches Modell erstellt und im Steuerungssystem des Diffusionsapparats verwendet. Das System überwacht kontinuierlich die aktuellen Stör- und Leistungsgrößenwerte. Mithilfe des Modells werden dann Steueraktionen ermittelt, bei denen das Extremum des Optimalitätskriteriums erreicht wird.

Élaboration d'un système de commande des processus technologiques multi-interconnectés à l'exemple de la production alimentaire

Résumé: Sont examinées les bases théoriques de la construction des modèles mathématiques des processus technologiques multi-couplés et de systèmes de contrôle à l'exemple de la production de jus de diffusion dans une application à vis incline. Lors de la formation d'un modèle mathématique, sont utilisés les modèles physico-chimiques et thermodynamiques qui se produisent dans le processus d'extraction du sucre. Le modèle mathématique est basé sur la structure de l'objet identifié et est utilisé dans le système de contrôle de l'application de diffusion. Le système surveille en permanence les grandeurs actuelles des valeurs perturbatrices et des valeurs de sortie. Ensuite, avec le modèle, sont trouvés les effets de contrôle dans lesquels l'extremum du critère d'optimalité est atteint.

Авторы: *Матвейкин Валерий Григорьевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; *Дмитриевский Борис Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Информационные процессы и управление»; *Терехова Анастасия Андреевна* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Эктов Семён Эдуардович* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Воронков Роман Вячеславович* – аспирант кафедры «Информационные процессы и управление»; *Гогорян Михаил Леонович* – магистрант; *Дмитриев Дмитрий Геннадьевич* – магистрант, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.