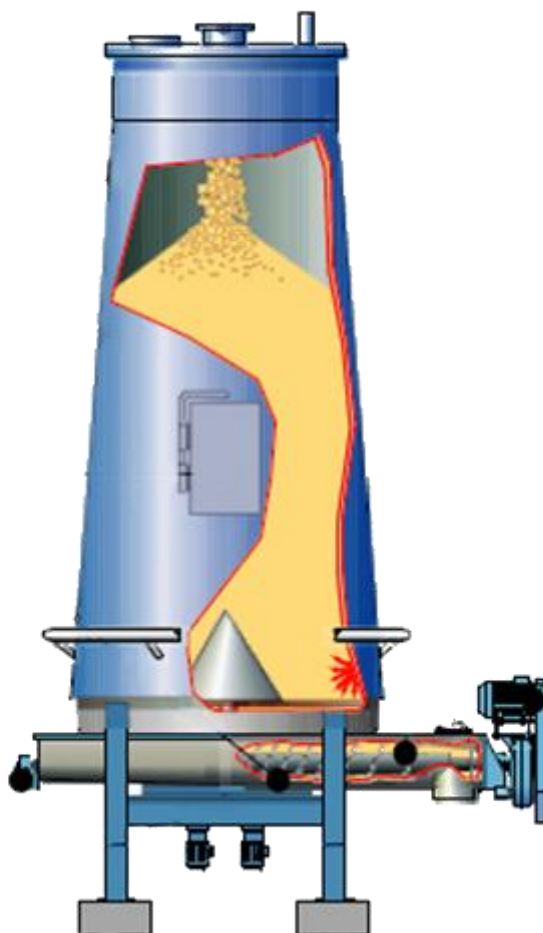


Г.П. Буйлов

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОПИТКИ
И ПРОПАРКИ ЩЕПЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВПВВ
И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
И ОПТИМИЗАЦИИ**



**Санкт-Петербург
2013**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ РАСТИТЕЛЬНЫХ
ПОЛИМЕРОВ»**

Г.П. Буйлов

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОПИТКИ
И ПРОПАРКИ ЩЕПЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ВПВВ
И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ
И ОПТИМИЗАЦИИ**

**Санкт-Петербург
2013**

УДК 676.15.02-52

ББК 35.77я7

Б 905

Буйлов Г.П. Математические модели пропитки и пропарки щепы в производстве ВПВВ и их использование для управления и оптимизации / СПбГТУРП. – СПб., 2013. – 70 с.: ил. 23.

В монографии представлены статические и динамические математические модели пропитки и пропарки щепы в производстве волокнистых полуфабрикатов высокого выхода (ВПВВ) на ОАО «Сясьский ЦБК» (ХРММ), ОАО «Волга» (ХТММ) и ЗАО «Интернейшнл Пейпер» (ХТММ), полученные аналитическим и экспериментальным методами, а также система автоматического управления пропиткой и алгоритмы оптимизации пропитки в производстве ХРММ.

Материалы монографии могут быть использованы бакалаврами и магистрами направления подготовки 151000 «Технологические машины и оборудование», а также бакалаврами направления подготовки 220700 «Автоматизация технологических процессов и производств» и направления подготовки 220400 «Управление в технических системах» при выполнении выпускных квалификационных работ.

Рецензенты:

Зав. кафедрой информационно-измерительных технологий и систем управления СПбГТУРП, профессор, д-р техн. наук Кондрашкова Г.А.;

технический директор ЗАО «Харрис Групп Интернейшнл» Криман Б.И.

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом университета в качестве монографии.

Редактор и корректор Т.А. Смирнова

Техн. редактор Л.Я. Титова

Компьютерная верстка А.А.Галенин

План 2013 г., поз. 56

Подп. к печати 25.12.13 г.

Формат 60х84/16.

Бум. тип. № 1. Печать офсетная.

Печ. л. 4,5. Уч.-изд. л. 4,5.

Тираж 50 экз. Изд. № 56.

Цена «С».

Заказ №

Ризограф Санкт-Петербургского государственного технологического университета растительных полимеров, СПб., 198095, ул. И. Черных, 4.

© Санкт-Петербургский
государственный технологический
университет растительных
полимеров, 2013

© Буйлов Г.П., 2013

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все больше распространяется производство волокнистых полуфабрикатов высокого выхода (ВПВВ) - различных видов механической древесной массы: химико-рафинерной механической массы (ХРММ), термомеханической массы (ТММ), химико-термомеханической массы (ХТММ).

По сравнению с производством целлюлозы производство таких полуфабрикатов имеет бóльший выход, меньшие отходы, меньшее загрязнение окружающей среды.

По своим качественным показателям эти виды древесной массы приближаются к целлюлозе и с успехом могут заменять ее в композиции бумаги и картона, снижая тем самым их себестоимость.

Этапами производства ВПВВ являются промывка щепы, пропитка химикатами, отжим (в зависимости от вида производства), пропарка и двухступенчатый размол щепы на дисковых рафинерах.

Ключевыми узлами подготовки щепы являются пропарка и пропитка химикатами щепы.

Существующая автоматизация на этих узлах не всегда обеспечивает соответствующие показатели по качеству древесной массы, а также по экономии расходов тепла, электрической энергии и химикатов.

Разработка оптимальных систем автоматического управления этими узлами производства ВПВВ, обеспечивающих вышеуказанные требования, возможна на базе статических и динамических моделей технологических процессов.

1. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОПИТКИ ЩЕПЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ХРММ

Технологический процесс и оборудование узла пропитки щепы химикатами

НА ОАО «Сясьский ЦБК» существует производство ХММ (химико-механической массы) или по современной классификации ХРММ (CRMP – «Chemirefiner Mechanical Pulp») из осиновой щепы. ХРММ – это химико-рафинерная механическая масса, получаемая путём обработки щепы химическими реагентами при температуре до 100 °С и последующего ее размолла на рафинерах при атмосферном давлении.

Для пропитки осиновой щепы растворами NaOH и Na₂SO₃ применяется котел типа «Bauer M&D», а размол щепы производится на рафинерах «Enso Bauer - 488».

Смесь растворов NaOH и Na₂SO₃ называется щелочным раствором сульфита натрия.

Промытая и обезвоженная щепа шнековым транспортером подается на ленточные ковшовые элеваторы, с которых щепа поступает на ленточный транспортер, установленный на отметке +24 м. Ленточным транспортером щепа подается в расходный бункер объемом 40 м³, над которым установлен магнитный сепаратор для улавливания металлических включений.

Из бункера щепа роторным разгрузателем подается на загрузочный шнек с вариатором. Загрузочный шнек подает щепу в пропиточный котел (ПК) на пропитку через питательный патрубок. Вариатор позволяет регулировать расход щепы на пропитку. В ПК щепа подвергается в течение 20÷40 минут химической обработке раствором в смеси NaOH и Na₂SO₃. ПК представляет собой сосуд цилиндрической формы диаметром 2,2 м и длиной 21,5 м; он изготовлен из биметалла и установлен в наклонном положении под углом 45 °.

В продольном направлении ПК разделен на два отсека пустотелой перегородкой, вокруг которой движется скребковый транспортер. Скребок транспортер перемещает осиновою щепу от питательного патрубка через пропиточный раствор в прямом и обратном направлении вдоль ПК и выгружает щепу через разгрузочный патрубок на шнековый транспортер. Пропиточный раствор подается в ПК через патрубок, находящийся под питательным патрубком.

В ПК предусмотрена рециркуляция пропиточного раствора, в трубопровод которого подаются свежие растворы NaOH, Na₂SO₃ и вода. На линии рециркуляции установлен паровой теплообменник.

Забор пропиточного раствора на рециркуляцию из ПК производится их двух точек через сито, установленное с нижней стороны перегородки. Для ускорения нагрева пропиточного раствора в период пуска и в зимнее время в ПК пар поступает через инжекторы.

Продолжительность пропитки щепы (время нахождения щепы в пропиточном растворе) определяется скоростью движения скребкового транспортера.

Прошедшая стадию пропитки щелочным раствором сульфита натрия щепка из пропиточного котла через разгрузочный патрубок шнековым транспортером подается в импрессифайнер, где отработанный пропиточный раствор отделяется от щепы.

Параметры пропиточного узла:

Производительность по щепе – 145, 150, 180, 250 т/сут; расход пара в теплообменник – $1,5 \div 2$ т/ч; температура пара – 152°C ; давление пара – 0,4 МПа; расход пара в пропиточный котел - $0 \div 5$ т/ч; расход свежего раствора NaOH в пропиточный котел – $6 \div 18$ л/мин; расход свежего раствора Na_2SO_3 в пропиточный котел - $10 \div 42$ л/мин; концентрация свежего раствора NaOH в пропиточный котел – 200 г/л; концентрация свежего раствора Na_2SO_3 в пропиточный котел – $50 \div 100$ г/л; уровень в пропиточном котле (по гидростатическому давлению) – $11,5 \div 12,4$ м.вод.ст.; расход рециркулянта - $145 \div 250$ л/мин; расход воды - $0 \div 100$ л/мин; температура пропиточного раствора за теплообменником - $100 \div 110^\circ\text{C}$; температура рециркулянта - $70 \div 85^\circ\text{C}$; температура в нижней части пропиточного котла - $65 \div 75^\circ\text{C}$.

Импрегнирование или пропитка древесной щепы химическими реагентами (смесь NaOH и Na_2SO_3) – неотъемлемая часть установки при производстве ХТММ/ХММ из древесины лиственных пород. Процесс пропитки заключается в проникновении NaOH в щепу, набухании древесины и последующей диффузии химикатов через стенки волокон. Применение NaOH обеспечивает сохранение длины волокон и способствует снижению костры в полуфабрикate. Na_2SO_3 уменьшает температуру размягчения лигнина и снижает потемнение древесины от действия NaOH.

Пропитка химикатами способствует более легкому разделению и расслаиванию волокон в процессе дальнейшего размола щепы на рафинерах.

На степень пропитки оказывают влияние свойства щепы (влажность щепы, плотность древесины), размер щепы, состав пропиточного раствора, удельный расход химикатов, температура и продолжительность пропитки.

При увеличении плотности древесины и содержания крупной щепы степень пропитки уменьшается. При увеличении влажности щепы уменьшается объем пропиточного раствора, впитываемого щепой, и

происходит разбавление пропиточного раствора внутри щепы. При повышении влажности щепы необходимо увеличивать удельный расход NaOH по сухому веществу. Увеличение концентрации раствора NaOH увеличивает объем впитываемого раствора. Это связано с более ранним развитием химических процессов, сопровождаемых адсорбцией катионов, набуханием и повышением проницаемости древесины.

С увеличением температуры уменьшается вязкость пропиточного раствора, увеличивается подвижность ионов и скорость диффузии, начинаются процессы сульфонирования и частичного растворения гемицеллюлоз, что приводит к разрыхлению структуры клеточной стенки и соответственно к повышению объема впитываемого щепой раствора[5].

Одним из косвенных показателей степени пропитки щепы является удельный расход электрической энергии (УРЭ) на первой ступени размола. Однако на УРЭ влияют также зазор между дисками рафинера, концентрация в зоне размола и состояние размалывающей гарнитуры.

Исследования, проведенные ЦНИИБом, при отработке технологии производства ХММ позволили определить оптимальную концентрацию NaOH в рециркулянте, уровень в ПК и температуру рециркулянта, обеспечивающие получение древесной массы с разрывной длиной не менее 2200 м.

Оптимальными значениями этих показателей являются следующие:

удельный расход NaOH – 20 кг/т всв; концентрация NaOH в рециркулянте – $1,8 \div 2,0$ г/л; уровень в ПК – $0,93 \div 0,95$ от объема ПК; температура рециркулянта - $78 \div 82$ °С.

Лабораторные исследования, проведенные ЦНИИБом, выявили влияние концентрации NaOH и Na₂SO₃ в рециркулянте на разрывную длину после размола и белизну древесной массы из осиновой щепы. Увеличение концентрации NaOH снижает белизну. Увеличение концентрации Na₂SO₃ повышает белизну, однако процесс снижения белизны за счет увеличения концентрации NaOH является более выраженным, чем процесс увеличения белизны за счет повышения концентрации Na₂SO₃. На механические свойства древесной массы, а именно, разрывную длину после размола оказывает влияние только концентрация NaOH. С увеличением ее разрывная длина возрастает.

Увеличение уровня приводит к переливу раствора в разгрузочный патрубок и излишнему попаданию его в импрессифайнер. Если уровень опустить ниже требуемого, то возникает вероятность того, что он станет ниже верхнего сита, и пропиточный раствор не будет отбираться на рециркуляцию через верхнее сито.

Аналитическая математическая модель пропиточного узла

Математическая модель теплообменника поверхностного типа для подогрева пропиточного раствора

Уравнение теплового баланса трубного пространства теплообменника (рис.1) без учета передачи тепла от пара к трубам и от стенок труб к пропиточному раствору будет следующим:

$$\frac{dQ_{TO}}{dt} = Q_n + Q_v + Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_k - Q_4 - Q', \quad (1)$$

где Q_{TO} – количество тепла, содержащееся в пропиточном растворе, находящемся в трубном пространстве, кДж;

$Q_n, Q_v, Q_1, Q_2, Q_3, Q_k, Q_4, Q'$ – соответственно расходы тепла с паром, водой, растворами каустика, моносulfита, рециркулянтom, с конденсатом, с пропиточным раствором, уходящим в котел, на нагрев труб и стенок теплообменника, кДж/с.

Полагая $Q' = const$, получим уравнение (2) в приращениях:

$$\frac{d\Delta Q_{TO}}{dt} = \Delta Q_n + \Delta Q_v + \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \Delta Q_3 - \Delta Q_k - \Delta Q_4. \quad (2)$$

Определим величины, входящие в уравнение (2):

$$Q_n = G_n \cdot i_n, \quad (3)$$

$$\Delta Q_n = G_n \cdot \Delta i_n + i_n \cdot \Delta G_n, \quad (4)$$

где G_n, i_n – соответственно расход насыщенного пара, кг/с; энтальпия пара, кДж/кг.

Так как

$$i_n = f(P_n),$$

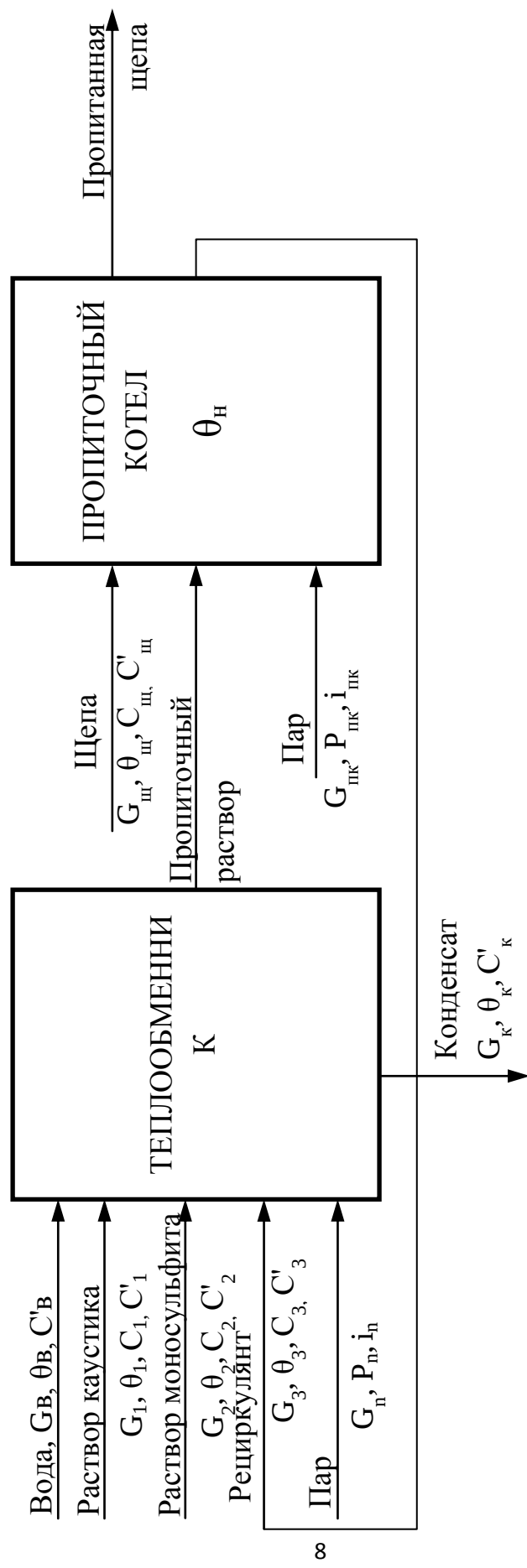


Рис. 1. Расчетная схема пропиточного узла

$$\Delta i_n = \left(\frac{\partial i_n}{\partial P_n} \right)_{\infty} \Delta P_n, \quad (5)$$

следовательно,

$$\Delta Q_n = G_n \left(\frac{\partial i_n}{\partial P_n} \right)_{\infty} \Delta P_n + i_n \Delta G_n, \quad (6)$$

где P_n - давление насыщенного пара, МПа.

Известно, что

$$Q_{\text{то}} = V_{\text{то}} \cdot \rho \cdot \theta \cdot C', \quad (7)$$

где $V_{\text{то}}$ – объем трубного пространства теплообменника, м³;

ρ – плотность пропиточного раствора, находящегося в трубном пространстве, кг/м³;

θ, C' - температура и теплоемкость пропиточного раствора в трубном пространстве, соответственно °С и кДж/кг°С.

В приращениях, полагая, что $\rho = f(\theta)$ и $C' = f(\theta)$, уравнение (7) будет:

$$\Delta Q_{\text{то}} = V_{\text{то}} \left(\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right)_{\infty} \Delta \theta \cdot \theta \cdot C' + V_{\text{то}} \cdot \rho \cdot \Delta \theta \cdot C' + V_{\text{то}} \cdot \rho \cdot \theta \left(\frac{\partial C'}{\partial \theta} \right)_{\infty} \Delta \theta. \quad (8)$$

Известно, что

$$Q_{\text{в}} = G_{\text{в}} \cdot C'_{\text{в}} \cdot \theta_{\text{в}}, \quad (9)$$

где $G_{\text{в}}$ – расход воды в теплообменник, кг/с;

$C'_{\text{в}}$ – теплоемкость воды, кДж/кг°С;

$\theta_{\text{в}}$ – температура воды, °С.

В приращениях уравнение (9) будет:

$$\Delta Q_{\text{в}} = G_{\text{в}} \cdot C'_{\text{в}} \cdot \Delta \theta_{\text{в}} + C'_{\text{в}} \cdot \theta_{\text{в}} \cdot \Delta G_{\text{в}}. \quad (10)$$

Известно, что

$$Q_1 = G_1 \cdot C'_1 \cdot \theta_1, \quad (11)$$

где G_1 – расход каустика, кг/с;

C'_1 – теплоемкость каустика, кДж/кг°С;

θ_1 – температура каустика, °С.

В приращениях уравнение (11) будет:

$$\Delta Q_1 = \Delta G_1 \cdot C'_1 \cdot \theta_1 + C'_1 \cdot \Delta \theta_1 \cdot G_1. \quad (12)$$

Известно, что

$$Q_2 = G_2 \cdot C'_2 \cdot \theta_2, \quad (13)$$

где G_2 – расход моносulfита, кг/с;
 C'_2 – теплоемкость моносulfита, кДж/кг $^{\circ}$ С;
 θ_2 – температура моносulfита, $^{\circ}$ С.

В приращениях уравнение (13) будет:

$$\Delta Q_2 = G_2 \cdot C'_2 \cdot \Delta \theta_2 + C'_2 \cdot \theta_2 \cdot \Delta G_2. \quad (14)$$

Известно, что

$$Q_3 = G_3 \cdot C'_3 \cdot \theta_3, \quad (15)$$

где G_3 – расход рециркулянта, кг/с;
 C'_3 – теплоемкость рециркулянта, кДж/кг $^{\circ}$ С;
 θ_3 – температура рециркулянта, $^{\circ}$ С.

Учитывая, что $C'_3 = f(\theta_3)$, выражение (15) в приращениях будет:

$$\Delta Q_3 = G_3 \cdot C'_3 \cdot \Delta \theta_3 + C'_3 \cdot \theta_3 \cdot \Delta G_3 + G_3 \cdot \theta_3 \cdot \left(\frac{\partial C'_3}{\partial \theta_3} \right)_{\infty} \Delta \theta_3, \quad (16)$$

Известно, что

$$Q_K = G_K \cdot C_K \cdot \theta_K, \quad (17)$$

где G_K – расход конденсата, кг/с;
 C_K – теплоемкость конденсата, кДж/кг $^{\circ}$ С;
 θ_K – температура конденсата, $^{\circ}$ С.

С учетом, что $G_K = G_n$, уравнение (17) в приращениях будет:

$$\Delta Q_K = \Delta G_n \cdot C_K \cdot \theta_K. \quad (18)$$

Известно, что

$$Q_4 = G_4 \cdot C' \cdot \theta, \quad (19)$$

где G_4 , θ , C' – соответственно расход кг/с; температура °С, теплоемкость смеси растворов, поступающих в котел кДж/кг°С.

Полагая, что $G_4 = G_B + G_1 + G_2 + G_3$ и $C' = f(\theta)$, уравнение (19) в приращениях будет

$$\Delta Q_4 = (\Delta G_B + \Delta G_1 + \Delta G_2 + \Delta G_3) \theta \cdot C' + G_4 \cdot C' \Delta \theta + G_4 \cdot \theta \left(\frac{\partial C'}{\partial \theta} \right)_{\infty} \Delta \theta. \quad (20)$$

Подставим выражения (20), (18), (16), (14), (12), (10), (8) и (6) в уравнение (2). Получим:

$$\begin{aligned} V_{\text{то}} \cdot \rho \cdot \theta \cdot C' \cdot \left[\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right)_{\infty} + \frac{1}{\theta} + \frac{1}{C'} \left(\frac{\partial C'}{\partial \theta} \right)_{\infty} \right] \cdot \frac{d\Delta \theta}{dt} + G_4 \left[C' + \theta \left(\frac{\partial C'}{\partial \theta} \right)_{\infty} \right] \Delta \theta = \\ = G_n \left(\frac{\partial i_n}{\partial P_n} \right)_{\infty} \cdot \Delta P_n + (i_n - C_K \cdot \theta_K) \Delta G_n + G_B \cdot C'_B \cdot \Delta \theta_B - (\theta \cdot C' - \theta_B \cdot C'_B) \Delta G_B + \\ + G_1 \cdot C'_1 \cdot \Delta \theta_1 - (\theta \cdot C' - \theta_1 \cdot C'_1) \Delta G_1 + G_2 \cdot C'_2 \cdot \Delta \theta_2 - (\theta \cdot C' - \theta_2 \cdot C'_2) \Delta G_2 + \\ + G_3 \left[C'_3 + \theta_3 \left(\frac{\partial C'_3}{\partial \theta_3} \right)_{\infty} \right] \Delta \theta_3 - (\theta \cdot C' - \theta_3 \cdot C'_3) \Delta G_3. \end{aligned} \quad (21)$$

Разделив уравнение (21) на величину $G_4 \left[C' + \theta \left(\frac{\partial C'}{\partial \theta} \right)_{\infty} \right]$, получим:

$$T_{\text{то}} \frac{d\Delta \theta}{dt} + \Delta \theta = k_{P_n} \cdot \Delta P_n + k_{G_n} \cdot \Delta G_n + k_{\theta_B} \cdot \Delta \theta_B - k_{G_B} \cdot \Delta G_B + k_{\theta_1} \cdot \Delta \theta_1 - \\ - k_{G_1} \cdot \Delta G_1 + k_{\theta_2} \cdot \Delta \theta_2 - k_{G_2} \cdot \Delta G_2 + k_{\theta_3} \cdot \Delta \theta_3 - k_{G_3} \cdot \Delta G_3, \quad (22)$$

где

$$T_{\text{то}} = \frac{V_{\text{то}} \cdot \rho \cdot C' \cdot \theta \left[\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial \theta} \right)_{\infty} + \frac{1}{\theta} + \frac{1}{C'} \left(\frac{\partial C'}{\partial \theta} \right)_{\infty} \right]}{G_4 [C' + \theta (\partial C' / \partial \theta)_{\infty}]}, \text{C};$$

$$k_{P_n} = \frac{G_n \left(\frac{\partial i_n}{\partial P_n} \right)_{\infty}}{G_4 [C' + \theta (\partial C' / \partial \theta)_{\infty}]}, \text{°C/МПа};$$

$$k_{G_n} = \frac{i_n - C_K \cdot \theta_K}{G_4[C' + \theta(\partial C'/\partial \theta)_\infty]}, \text{ } ^\circ\text{C}/\text{кг}/\text{с};$$

$$k_{\theta_B} = \frac{G_B \cdot C'_B}{G_4[C' + \theta(\partial C'/\partial \theta)_\infty]}, \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C};$$

$$k_{G_B} = \frac{\theta \cdot C' - \theta_B \cdot C'_B}{G_4[C' + \theta(\partial C'/\partial \theta)_\infty]}, \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C};$$

$$k_{\theta_1} = \frac{G_1 \cdot C'_1}{G_4[C' + \theta(\partial C'/\partial \theta)_\infty]}, \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C};$$

$$k_{G_1} = \frac{\theta \cdot C' - \theta_1 \cdot C'_1}{G_4[C' + \theta(\partial C'/\partial \theta)_\infty]}, \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C};$$

$$k_{\theta_2} = \frac{G_2 \cdot C'_2}{G_4[C' + \theta(\partial C'/\partial \theta)_\infty]}, \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C};$$

$$k_{G_2} = \frac{\theta \cdot C' - \theta_2 \cdot C'_2}{G_4[C' + \theta(\partial C'/\partial \theta)_\infty]}, \text{ } ^\circ\text{C}/\text{кг}/\text{с};$$

$$k_{\theta_3} = \frac{G_3[C'_3 + \theta_3(\partial C'_3/\partial \theta_3)_\infty]}{G_4[C' + \theta(\partial C'/\partial \theta)_\infty]}, \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C};$$

$$k_{G_3} = \frac{\theta \cdot C' - \theta_3 \cdot C'_3}{G_4[C' + \theta(\partial C'/\partial \theta)_\infty]} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{кг}/\text{с}.$$

Передаточные функции теплообменника по различным каналам будут следующие (рис.2):

$$W_{T_{O1}}(p) = \frac{k_{P_n}}{T_{TO} \cdot p + 1} = \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta P_n(p)};$$

$$W_{T_{O2}}(p) = \frac{k_{G_n}}{T_{TO} \cdot p + 1} = \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta G_n(p)};$$

$$W_{T_{O3}}(p) = \frac{k_{\theta_B}}{T_{TO} \cdot p + 1} = \frac{\Delta \theta(p)}{\Delta \theta_B(p)};$$

$$W_{\text{TO}_4}(p) = -\frac{k_{G_B}}{T_{\text{TO}} \cdot p + 1} = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta G_B(p)};$$

$$W_{\text{TO}_5}(p) = \frac{k_{\theta_1}}{T_{\text{TO}} \cdot p + 1} = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta\theta_1(p)};$$

$$W_{\text{TO}_6}(p) = -\frac{k_{G_1}}{T_{\text{TO}} \cdot p + 1} = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta G_1(p)};$$

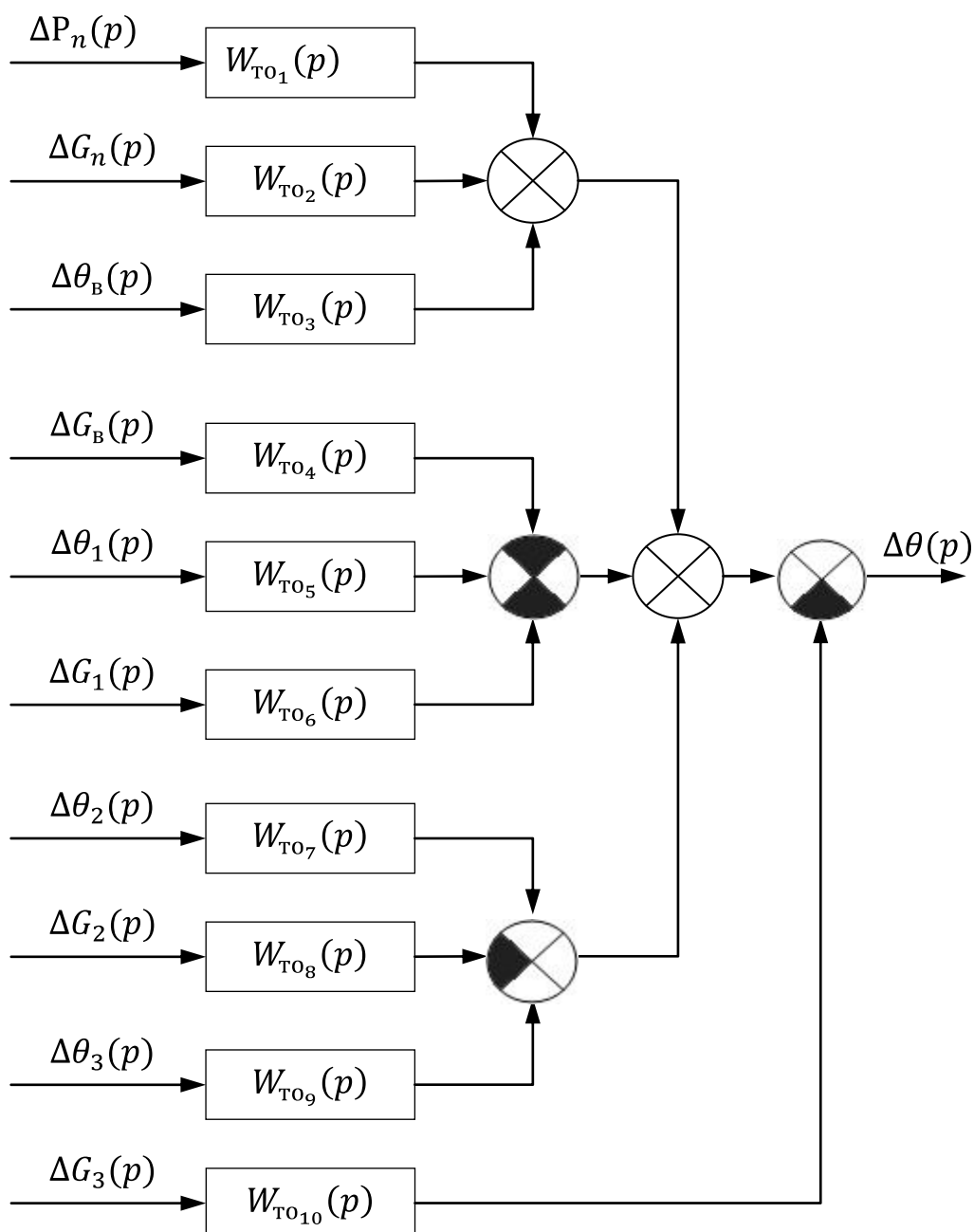


Рис. 2. Алгоритмическая схема теплообменника для подогрева пропиточного раствора

$$W_{\text{To}_7}(p) = \frac{k_{\theta_2}}{T_{\text{To}} \cdot p + 1} = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta\theta_2(p)};$$

$$W_{\text{To}_8}(p) = -\frac{k_{G_2}}{T_{\text{To}} \cdot p + 1} = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta G_2(p)};$$

$$W_{\text{To}_9}(p) = \frac{k_{\theta_3}}{T_{\text{To}} \cdot p + 1} = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta\theta_3(p)};$$

$$W_{\text{To}_{10}}(p) = -\frac{k_{G_3}}{T_{\text{To}} \cdot p + 1} = \frac{\Delta\theta(p)}{\Delta G_3(p)}.$$

Математическая модель пропиточного котла

Уравнение теплового баланса пропиточного котла (рис. 1) будет:

$$\frac{dQ_{\text{пк}}}{dt} = Q_{\text{щ}} + Q_{\text{пк}} + Q_4 - Q_{\text{щп}} - Q_3 - Q'_{\text{пк}}, \quad (23)$$

где $Q_{\text{пк}}$ – количество тепла, содержащееся в веществе в пропиточном котле, кДж;

$Q_{\text{щ}}, Q_{\text{пк}}, Q_4, Q_{\text{щп}}, Q_3, Q'_{\text{пк}}$ – соответственно расходы тепла со щепой, паром в котел, с раствором химикатов, с уходящей пропитанной щепой, с рециркулянтном, на нагрев котла и транспортера внутри котла, кДж/с.

Полагая $Q'_{\text{пк}} = \text{const}$, получим уравнение (23) в приращениях:

$$\frac{d\Delta Q_{\text{пк}}}{dt} = \Delta Q_{\text{щ}} + \Delta Q_{\text{пк}} + \Delta Q_4 - \Delta Q_{\text{щп}} - \Delta Q_3. \quad (24)$$

Определим величины, входящие в уравнение (24). Известно, что

$$\Delta Q_{\text{пк}} = Q_{\text{пк}}^{\text{ж}} + Q_{\text{пк}}^{\text{др}}, \quad (25)$$

где $Q_{\text{пк}}^{\text{ж}}$ – количество тепла, содержащееся в жидкости в пропиточном котле, кДж;

$Q_{\text{пк}}^{\text{др}}$ – количество тепла, содержащееся в древесине в пропиточном котле, кДж;

Известно, что

$$Q_{\text{пк}}^{\text{ж}} = V_{\text{пк}} \cdot \alpha_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{пк}}^{\text{ж}} \cdot C'_3 \cdot \theta_3, \quad (26)$$

где $V_{\text{пк}}$ – рабочий объём пропиточного котла, м³;
 $\alpha_{\text{ж}}$ – доля объёма котла, заполненного жидкостью;

$\rho_{\text{пк}}^{\text{ж}}$ – плотность пропиточного раствора в котле, равная плотности раствора рециркулянта, кг/м³;

C'_3 – теплоемкость пропиточного раствора в котле, равная теплоемкости рециркулянта, кДж/кг °С;

θ_3 – температура пропиточного раствора в котле, равная температуре рециркулянта, °С.

Определим $\alpha_{\text{ж}}$.

$$\alpha_{\text{ж}} = \frac{G_{\text{щ}} \cdot M_{\text{щ}} \cdot 0,01 + G_{\text{пк}} + G_4}{G_{\text{щ}} + G_{\text{пк}} + G_4}, \quad (27)$$

где $M_{\text{щ}}$ – влажность поступающей щепы, %.

Запишем уравнение (26) в приращениях, полагая, $V_{\text{пк}}, \alpha_{\text{ж}}, \rho_{\text{пк}}^{\text{ж}} = \text{const}$.

$$\Delta Q_{\text{пк}}^{\text{ж}} = V_{\text{пк}} \cdot \alpha_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{пк}}^{\text{ж}} \cdot (\partial C'_3 / \partial \theta_3)_{\infty} \cdot \Delta \theta_3 \cdot \theta_3 + V_{\text{пк}} \cdot \alpha_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{пк}}^{\text{ж}} \cdot C'_3 \cdot \Delta \theta_3, \quad (28)$$

$$Q_{\text{пк}}^{\text{др}} = V_{\text{пк}} (1 - \alpha_{\text{ж}}) \cdot \rho_{\text{пк}}^{\text{др}} \cdot C'_3{}^{\text{др}} \cdot \theta_3, \quad (29)$$

где $\rho_{\text{пк}}^{\text{др}}$ – плотность древесинного вещества в котле, кг/м³, равная 1530-1550 кг/м³;

$C'_3{}^{\text{др}}$ – теплоемкость древесинного вещества в котле, равная 1,26-1,42 кДж/кг °С.

Полагая $\rho_{\text{пк}}^{\text{др}}$ и $C'_3{}^{\text{др}} = \text{const}$, запишем уравнение (29) в приращениях:

$$\Delta Q_{\text{пк}}^{\text{др}} = V_{\text{пк}} (1 - \alpha_{\text{ж}}) \cdot \rho_{\text{пк}}^{\text{др}} \cdot C'_3{}^{\text{др}} \cdot \Delta \theta_3. \quad (30)$$

Уравнение (25) в приращениях будет:

$$\Delta Q_{\text{пк}} = \Delta Q_{\text{пк}}^{\text{ж}} + \Delta Q_{\text{пк}}^{\text{др}}. \quad (31)$$

Подставим в уравнение (31) выражения (30) и (28) и после преобразований получим следующее уравнение:

$$\Delta Q_{\text{пк}} = V_{\text{пк}} \left\{ \alpha_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{пк}}^{\text{ж}} \left[\left(\frac{\partial C'_3}{\partial \theta_3} \right)_{\infty} \cdot \theta_3 + C'_3 \right] + (1 - \alpha_{\text{ж}}) \cdot \rho_{\text{пк}}^{\text{др}} \cdot C'_3{}^{\text{др}} \right\} \cdot \Delta \theta_3 \quad (32)$$

Известно, что

$$Q_{\text{щ}} = G_{\text{щ}} \cdot C'_{\text{щ}} \cdot \theta_{\text{щ}}, \quad (33)$$

где $G_{\text{щ}}$ – расход щепы в котел, кг/с;

$C'_{\text{щ}}$ – теплоемкость влажной щепы при влажности $M_{\text{щ}}$, кДж/кг °С.

$\theta_{\text{щ}}$ – температура щепы, °С.

Известно, что

$$C'_{\text{щ}} = C'_{\text{вщ}} \cdot M_{\text{щ}} \cdot 0,01 + C'_{\text{др.щ}} (1 - M_{\text{щ}} \cdot 0,01), \quad (34)$$

где, $C'_{\text{вщ}}$ и $C'_{\text{др.щ}}$ – соответственно теплоемкости воды в щепе и абсолютно сухой древесины в щепе, кДж/кг °С.

Подставив выражение (34) в уравнение (33), получим:

$$Q_{\text{щ}} = G_{\text{щ}} \cdot \theta_{\text{щ}} [C'_{\text{вщ}} \cdot M_{\text{щ}} \cdot 0,01 + C'_{\text{др.щ}} (1 - M_{\text{щ}} \cdot 0,01)]. \quad (35)$$

Уравнение (35), полагая $\theta_{\text{щ}}$, $M_{\text{щ}}$, $C'_{\text{вщ}}$, $C'_{\text{др.щ}}$ постоянными, в приращениях будет

$$\Delta Q_{\text{щ}} = \theta_{\text{щ}} [C'_{\text{вщ}} \cdot M_{\text{щ}} \cdot 0,01 + C'_{\text{др.щ}} (1 - M_{\text{щ}} \cdot 0,01)] \Delta G_{\text{щ}}. \quad (36)$$

Известно, что

$$Q_{\text{пк}} = G_{\text{пк}} \cdot i_{\text{пк}}. \quad (37)$$

Уравнение (37) в приращениях будет

$$\Delta Q_{\text{пк}} = G_{\text{пк}} \cdot (\partial i_{\text{пк}} / \partial P_{\text{пк}})_{\infty} \Delta P_{\text{пк}} + i_{\text{пк}} \cdot \Delta G_{\text{пк}}, \quad (38)$$

где $P_{\text{пк}}$ – давление пара, поступающего в котел, МПа;

$G_{\text{пк}}$ – расход пара, поступающего в котел, кг/с;

$i_{\text{пк}}$ – энтальпия пара, кДж/кг.

Известно, что

$$Q_{\text{щп}} = G_{\text{щп}} \cdot C'_{\text{щп}} \cdot \theta_3, \quad (39)$$

где $G_{щп}$ – расход пропитанной щепы, поступающей на отжим в импрессифайнеры, кг/с;

$C'_{щп}$ – теплоемкость пропитанной щепы, кДж/кг °С;

θ_3 – температура пропитанной щепы, равная температуре раствора рециркулянта, °С.

Известно, что

$$C'_{щп} = C'_{рщ} \cdot M_{щп} \cdot 0,01 + C'_{др.щп} (1 - M_{щп} \cdot 0,01), \quad (40)$$

где $C'_{рщ}$ и $C'_{др.щп}$ – теплоемкости раствора в пропитанной щепе и абсолютно сухой древесины в пропитанной щепе, кДж/кг °С;

$M_{щп}$ – влажность пропитанной химикатами щепы, %.

Полагаем

$$C'_{рщ} = C'_3. \quad (41)$$

Уравнение (39) в приращениях будет

$$\Delta Q_{щп} = G_{щп} \cdot \theta_3 \cdot \Delta C'_{щп} + G_{щп} \cdot C'_{щп} \cdot \Delta \theta_3 + C'_{щп} \cdot \theta_3 \cdot \Delta G_{щп}. \quad (42)$$

Известно, что

$$G_{щп} = G_{щ} + G_{пк} + G_4 - G_3. \quad (43)$$

В приращениях уравнение (43) будет

$$\Delta G_{щп} = \Delta G_{щ} + \Delta G_{пк} + \Delta G_4 - \Delta G_3. \quad (44)$$

В приращениях уравнение (40) будет

$$\Delta C'_{щп} = M_{щп} \cdot 0,01 \cdot (\partial C'_3 / \partial \theta_3)_{\infty} \cdot \Delta \theta_3. \quad (45)$$

Подставив в уравнение (42) уравнения (44) и (45), получим:

$$\Delta Q_{щп} = G_{щп} \cdot M_{щп} \cdot 0,01 \cdot (\partial C'_3 / \partial \theta_3)_{\infty} \cdot \Delta \theta_3 \cdot \theta_3 + G_{щп} \cdot C'_{щп} \cdot \Delta \theta_3 + C'_{щп} \cdot \theta_3 \cdot (\Delta G_{щ} + \Delta G_{пк} + \Delta G_4 - \Delta G_3). \quad (46)$$

Подставим выражения (16), (46), (20), (38), (36) и (32) в уравнение (24). После преобразования получим:

$$\begin{aligned}
& V_{\text{ПК}} \left\{ \alpha_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ПК}}^{\text{ж}} \left[\left(\frac{\partial C'_3}{\partial \theta_3} \right)_{\infty} \cdot \theta_3 + C'_3 \right] + (1 - \alpha_{\text{ж}}) \cdot \rho_{\text{ПК}}^{\text{др}} \cdot C'_3{}^{\text{др}} \right\} \cdot \frac{d\Delta\theta_3}{dt} = Q_{\text{щ}} \cdot C'_{\text{щ}} \cdot \\
& \Delta G_{\text{щ}} + G_{\text{ПК}} \left(\frac{\partial i_{\text{ПК}}}{\partial P_{\text{ПК}}} \right)_{\infty} \Delta P_{\text{ПК}} + i_{\text{ПК}} \cdot \Delta G_{\text{ПК}} + \theta \cdot C' \cdot \Delta G_4 + \left[G_4 \cdot C' + G_4 \cdot \theta \left(\frac{\partial C'}{\partial \theta} \right)_{\infty} \right] \cdot \\
& \Delta\theta - G_{\text{щп}} \cdot \left[M_{\text{щп}} \cdot 0,01 \left(\frac{\partial C'_3}{\partial \theta_3} \right)_{\infty} \cdot \theta_3 + C'_{\text{щп}} \right] \Delta\theta_3 - C'_{\text{щп}} \theta_3 \Delta G_{\text{щ}} - C'_{\text{щп}} \theta_3 \cdot \Delta G_{\text{ПК}} - \\
& C'_{\text{щп}} \theta_3 \cdot \Delta G_4 + C'_{\text{щп}} \theta_3 \cdot \Delta G_3 - G_3 \left[C'_3 + \theta_3 \left(\frac{\partial C'_3}{\partial \theta_3} \right)_{\infty} \right] \cdot \Delta\theta_3 - C'_3 \cdot \theta_3 \cdot \Delta G_3 \quad (47)
\end{aligned}$$

После группировки слагаемых получим:

$$\begin{aligned}
& V_{\text{ПК}} \left\{ \alpha_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ПК}}^{\text{ж}} \left[\left(\frac{\partial C'_3}{\partial \theta_3} \right)_{\infty} \cdot \theta_3 + C'_3 \right] + (1 - \alpha_{\text{ж}}) \cdot \rho_{\text{ПК}}^{\text{др}} \cdot C'_3{}^{\text{др}} \right\} \cdot \frac{d\Delta\theta_3}{dt} + \\
& \left\{ G_{\text{щп}} \cdot \left[M_{\text{щп}} \cdot 0,01 \left(\frac{\partial C'_3}{\partial \theta_3} \right)_{\infty} \cdot \theta_3 + C'_{\text{щп}} \right] + G_3 \left[C'_3 + \theta_3 \left(\frac{\partial C'_3}{\partial \theta_3} \right)_{\infty} \right] \right\} \cdot \Delta\theta_3 = \\
& G_{\text{ПК}} \left(\frac{\partial i_{\text{ПК}}}{\partial P_{\text{ПК}}} \right)_{\infty} \Delta P_{\text{ПК}} + i_{\text{ПК}} \cdot \Delta G_{\text{ПК}} + (\theta \cdot C' - C'_{\text{щп}} \theta_3) \cdot \Delta G_4 + \left[G_4 \cdot C' + G_4 \cdot \theta \cdot \right. \\
& \left. \left(\frac{\partial C'}{\partial \theta} \right)_{\infty} \right] \cdot \Delta\theta - (C'_3 - C'_{\text{щп}}) \theta_3 \cdot \Delta G_3 - (C'_{\text{щп}} \theta_3 - C'_{\text{щ}} \theta_{\text{щ}}) \Delta G_{\text{щ}}. \quad (48)
\end{aligned}$$

Разделив все члены уравнения (48) на коэффициент при $\Delta\theta_3$ в левой части уравнения, получим:

$$\begin{aligned}
& T_{\text{ПК}} \frac{d\Delta\theta_3}{dt} + \Delta\theta_3 = -K_{\text{щ}} \cdot \Delta G_{\text{щ}} + K_{P_{\text{ПК}}} \cdot \Delta P_{\text{ПК}} + K_{G_{\text{ПК}}} \cdot \Delta G_{\text{ПК}} + K_{G_4} \\
& \cdot \Delta G_4 + K_{\theta} \cdot \Delta\theta - K_{G_3} \cdot \Delta G_3, \quad (49)
\end{aligned}$$

где

$$T_{\text{ПК}} = \frac{V_{\text{ПК}} \left\{ \alpha_{\text{ж}} \cdot \rho_{\text{ПК}}^{\text{ж}} \left[\left(\frac{\partial C'_3}{\partial \theta_3} \right)_{\infty} \cdot \theta_3 + C'_3 \right] + (1 - \alpha_{\text{ж}}) \cdot \rho_{\text{ПК}}^{\text{др}} \cdot C'_3{}^{\text{др}} \right\}}{G_{\text{щп}} \cdot \left[M_{\text{щп}} \cdot 0,01 \left(\frac{\partial C'_3}{\partial \theta_3} \right)_{\infty} \cdot \theta_3 + C'_{\text{щп}} \right]}, \text{C};$$

$$K_{\text{щ}} = \frac{C'_{\text{щп}} \theta_3 - \theta_{\text{щ}} \cdot C'_{\text{щ}}}{G_{\text{щп}} \cdot \left[M_{\text{щп}} \cdot 0,01 \left(\frac{\partial C'_3}{\partial \theta_3} \right)_{\infty} \cdot \theta_3 + C'_{\text{щп}} \right]}, \text{°C/кг/с};$$

$$K_{P_{\text{ПК}}} = \frac{G_{\text{ПК}} (\partial i_{\text{ПК}} / \partial P_{\text{ПК}})_{\infty}}{G_{\text{щп}} \cdot \left[M_{\text{щп}} \cdot 0,01 \left(\frac{\partial C'_3}{\partial \theta_3} \right)_{\infty} \cdot \theta_3 + C'_{\text{щп}} \right]}, \text{°C/МПа};$$

$$K_{G_{\text{пк}}} = \frac{i_{\text{пк}}}{G_{\text{щп}} \cdot [M_{\text{щп}} \cdot 0,01(\partial C'_3 / \partial \theta_3)_{\infty} \cdot \theta_3 + C'_{\text{щп}}]}, \text{ } ^\circ\text{C}/\text{кг}/\text{с};$$

$$K_{\theta} = \frac{G_4 \cdot C' + G_4 \cdot \theta \cdot \left(\frac{\partial C'}{\partial \theta} \right)_{\infty}}{G_{\text{щп}} \cdot [M_{\text{щп}} \cdot 0,01(\partial C'_3 / \partial \theta_3)_{\infty} \cdot \theta_3 + C'_{\text{щп}}]}, \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C};$$

$$K_{G_3} = \frac{(C'_3 - C'_{\text{щп}})\theta_3}{G_{\text{щп}} \cdot [M_{\text{щп}} \cdot 0,01(\partial C'_3 / \partial \theta_3)_{\infty} \cdot \theta_3 + C'_{\text{щп}}]}, \text{ } ^\circ\text{C}/\text{кг}/\text{с};$$

$$K_{G_4} = \frac{\theta \cdot C' - C'_{\text{щп}}\theta_3}{G_{\text{щп}} \cdot [M_{\text{щп}} \cdot 0,01(\partial C'_3 / \partial \theta_3)_{\infty} \cdot \theta_3 + C'_{\text{щп}}]}, \text{ } ^\circ\text{C}/\text{кг}/\text{с}.$$

Передаточные функции пропиточного котла по различным каналами будут следующими (рис.3):

$$W_{\text{пк}_1}(p) = -\frac{K_{\text{щ}}}{T_{\text{пк}} \cdot p + 1} = \frac{\Delta\theta_3(p)}{\Delta G_{\text{щ}}(p)};$$

$$W_{\text{пк}_2}(p) = \frac{K_{P_{\text{пк}}}}{T_{\text{пк}} \cdot p + 1} = \frac{\Delta\theta_3(p)}{\Delta P_{\text{пк}}(p)};$$

$$W_{\text{пк}_3}(p) = \frac{K_{G_{\text{пк}}}}{T_{\text{пк}} \cdot p + 1} = \frac{\Delta\theta_3(p)}{\Delta G_{\text{пк}}(p)};$$

$$W_{\text{пк}_4}(p) = \frac{K_{G_4}}{T_{\text{пк}} \cdot p + 1} = \frac{\Delta\theta_3(p)}{\Delta G_4(p)};$$

$$W_{\text{пк}_5}(p) = \frac{K_{\theta}}{T_{\text{пк}} \cdot p + 1} = \frac{\Delta\theta_3(p)}{\Delta\theta(p)};$$

$$W_{\text{пк}_6}(p) = -\frac{K_{G_3}}{T_{\text{пк}} \cdot p + 1} = \frac{\Delta\theta_3(p)}{\Delta G_3(p)}.$$

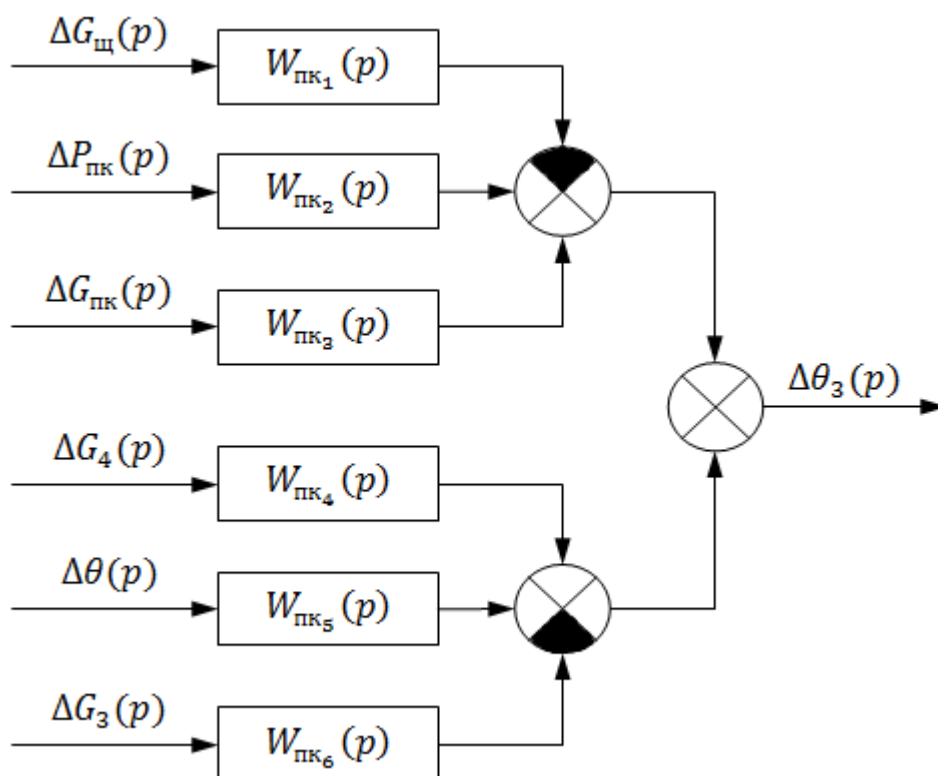


Рис.3. Алгоритмическая схема пропиточного котла

Численные значения передаточных функций пропиточного узла по различным каналам

Для определения численных выражений передаточных функций были приняты следующие исходные данные:

$$\begin{aligned}
 G_n &= 1,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \\
 i_n &= 2732 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \\
 P_n &= 0,35 \text{ МПа}; \\
 Q_n &= 150 \text{ }^\circ\text{C}; \\
 G_B &= 0,417 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \\
 \theta_B &= 5 \text{ }^\circ\text{C}; \\
 C'_B &= 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^\circ\text{C}}; \\
 G_1 &= 0,178 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \\
 C'_1 &= 3,41 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^\circ\text{C}}; \\
 \theta_1 &= 20 \text{ }^\circ\text{C}; \\
 G_2 &= 0,218 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \\
 C'_2 &= 2,82 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^\circ\text{C}};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\theta_2 &= 20 \text{ }^{\circ}\text{C}; \\
G_{\text{щ}} &= 8,67 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \\
M_{\text{щ}} &= 50 \%; \\
G_{\text{щп}} &= 11,28 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \\
M_{\text{щп}} &= 70 \%; \\
\theta_{\text{щ}} &= 20 \text{ }^{\circ}\text{C}; \\
C_3^{\text{др}} &= 1,26 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^{\circ}\text{C}}; \\
\rho_{\text{пк}}^{\text{др}} &= 1530 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \\
\alpha_{\text{ж}} &= 0,7; \\
\rho_{\text{пк}}^{\text{ж}} &= 1129 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \\
C'_{\text{вщ}} &= 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^{\circ}\text{C}}; \\
C'_{\text{дрщ}} &= 1,26 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^{\circ}\text{C}}; \\
C'_{\text{рщ}} &= 4,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^{\circ}\text{C}}; \\
\theta_3 &= 79 \text{ }^{\circ}\text{C}; \\
\theta &= 110 \text{ }^{\circ}\text{C}; \\
C'_3 &= 4,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^{\circ}\text{C}}; \\
C' &= 4,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^{\circ}\text{C}}; \\
G_3 &= 3,39 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \\
G_4 &= 4,2 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \\
G_{\text{пк}} &= 1,8 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \\
P_{\text{пк}} &= 0,35 \text{ МПа}; \\
i_{\text{пк}} &= 2732 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \\
\rho &= 1129 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}; \\
V_{\text{то}} &= 0,29 \text{ м}^3; \\
G_{\text{к}} &= 1,5 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \\
C_{\text{к}} &= 4,22 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}^{\circ}\text{C}}; \\
\theta_{\text{к}} &= 100 \text{ }^{\circ}\text{C}; \\
V_{\text{пк}} &= 75 \text{ м}^3.
\end{aligned}$$

После вычисления получим следующие передаточные функции:

- передаточная функция ТО по каналу давление пара – температура пропиточного раствора

$$W_{\text{то1}}(p) = \frac{8,9 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}}{75p + 1}, \text{ МПа};$$

- передаточная функция ТО по каналу расход пара – температура пропиточного раствора

$$W_{\text{ТО}_2}(p) = \frac{105,7}{75p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{кг/с}};$$

- передаточная функция ТО по каналу температура воды – температура пропиточного раствора

$$W_{\text{ТО}_3}(p) = \frac{0,008}{75p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{^{\circ}\text{C}};$$

- передаточная функция ТО по каналу расход воды – температура пропиточного раствора

$$W_{\text{ТО}_4}(p) = -\frac{19,68}{75p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{кг/с}};$$

- передаточная функция ТО по каналу температура раствора едкого натра – температура пропиточного раствора

$$W_{\text{ТО}_5}(p) = \frac{0,027}{75p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{^{\circ}\text{C}};$$

- передаточная функция ТО по каналу расход раствора едкого натра – температура пропиточного раствора

$$W_{\text{ТО}_6}(p) = -\frac{17,5}{75p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{кг/с}};$$

- передаточная функция ТО по каналу температура раствора моносulfита – температура пропиточного раствора

$$W_{\text{ТО}_7}(p) = \frac{0,028}{75p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{^{\circ}\text{C}};$$

- передаточная функция ТО по каналу расход раствора моносulfита – температура пропиточного раствора

$$W_{\text{ТО}_8}(p) = -\frac{18,06}{75p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{кг/с}};$$

- передаточная функция ТО по каналу температура рециркулянта – температура пропиточного раствора

$$W_{\text{ТО}_9}(p) = \frac{1,08}{75p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{^{\circ}\text{C}};$$

- передаточная функция ТО по каналу расход рециркулянта – температура пропиточного раствора

$$W_{\text{ТО}_{10}}(p) = -\frac{6,9}{75p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{кг/с}};$$

- передаточная функция ПК по каналу расход щепы – температура рециркулянта

$$W_{\text{ПК}_1}(p) = -\frac{3,28}{7570p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{кг/с}};$$

- передаточная функция ПК по каналу давление пара в ПК – температура рециркулянта

$$W_{\text{ПК}_2}(p) = \frac{3,8 \cdot 10^{-6}}{7570p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{МПа}};$$

- передаточная функция ПК по каналу расход пара в ПК – температура рециркулянта

$$W_{\text{ПК}_3}(p) = \frac{44,4}{7570p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{кг/с}};$$

- передаточная функция ПК по каналу расход пропиточного раствора в ПК – температура рециркулянта

$$W_{\text{ПК}_4}(p) = \frac{3,15}{7570p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{кг/с}};$$

- передаточная функция ПК по каналу температура пропиточного раствора в ПК – температура рециркулянта

$$W_{\text{ПК}_5}(p) = \frac{0,35}{7570p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{^{\circ}\text{C}};$$

- передаточная функция ПК по каналу расход рециркулянта из ПК – температура рециркулянта

$$W_{\text{ПК}_6}(p) = -\frac{0,833}{7570p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\frac{\text{кг}}{\text{с}}}.$$

Экспериментальные динамические модели пропиточного котла

На пропиточном котле были проведены активные экспериментальные исследования с целью определения динамических характеристик по следующим каналам [3]:

- температура пропиточного раствора за теплообменником $\theta_{\text{то}}$ – температура в нижней части котла $\theta_{\text{к}}$;
- температура пропиточного раствора за теплообменником $\theta_{\text{то}}$ – температура пропиточного раствора в линии рециркуляции $\theta_{\text{л.р.}}$;
- расход пара в нижнюю часть пропиточного котла $G_{\text{н}}$ – температура в нижней части котла $\theta_{\text{н}}$;
- расход пара в нижнюю часть пропиточного котла $G_{\text{н}}$ – температура пропиточного раствора в линии рециркуляции $\theta_{\text{л.р.}}$.

Полученные экспериментальные временные разгонные характеристики (рис.4) были аппроксимированы методами: суммы площадей, дополнительных членов и решением дифференциального уравнения 1-го порядка с запаздыванием.

При аппроксимации предполагалось, что передаточная функция имеет вид

$$W(p) = \frac{k}{1 + T_o p} \cdot e^{-p\tau}, \quad (50)$$

где k – коэффициент передачи звена;

T_o – постоянная времени, мин;

τ – время запаздывания, мин.

В методе решения дифференциального уравнения, для которого дана передаточная функция (50), с начальными условиями при единичном скачкообразном входном воздействии для определения параметров звена имеем функции:

$$T_o = -\frac{t_a - \tau}{\ln(1 - h_a)}, \quad (51)$$

$$\tau = \frac{t_b \cdot \ln(1-h_a) - t_a \cdot \ln(1-h_b)}{\ln(1-h_a) - \ln(1-h_b)}, \quad (52)$$

где t_a и t_b – время точки перегиба и точки уплотнения функции;
 h_a, h_b – нормированные амплитуды разгонной характеристики в данных точках.

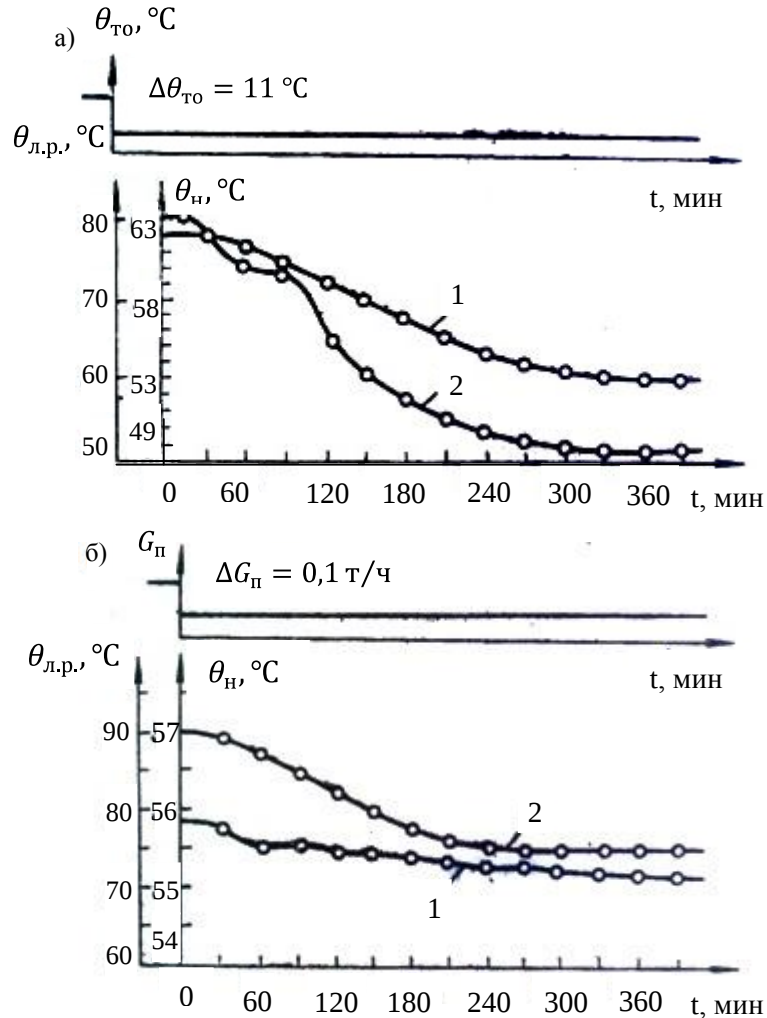


Рис. 4. Экспериментальные временные разгонные характеристики: а – при возмущении по температуре за теплообменником; б – при возмущении по расходу пара в нижнюю часть пропиточного котла; 1 – $\theta_{л.р.}$; 2 – θ_n

При методе суммы площадей была использована формула вида:

$$S_k = S_1^k \int_0^\infty (1-h) \int_0^\infty \left[\frac{(-\theta)^{k-1}}{(k-1)!} + \frac{(-\theta)^{k-2}}{(k-2)!} + \sum_{i=1}^{k-3} \frac{S_{k-1-i} (-\theta)^i}{S_1^{k-1-i} \cdot i!} \right] d\theta, \quad (53)$$

где S_k – искомая постоянная времени;

k – порядок звена;

θ – новый масштаб времени, равный t/S_1 ;

Для ПЭВМ была составлена программа и произведен расчет параметров аппроксимирующей функции по трем методам. В качестве критерия адекватности аппроксимирующей функции рассчитывалась суммарная ошибка адекватности. Параметры выбирались по минимальной суммарной ошибке метода. Были получены следующие передаточные функции:

$$W_1(p) = \frac{1,05 \cdot e^{-15p}}{50p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{^{\circ}\text{C}};$$

$$W_2(p) = \frac{1,3 \cdot e^{-30p}}{126p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{^{\circ}\text{C}};$$

$$W_3(p) = \frac{12 \cdot e^{-5p}}{69p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{т/ч}};$$

$$W_4(p) = \frac{48 \cdot e^{-20p}}{67p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{т/ч}}.$$

Статические модели пропитки на основе экспериментальных статистических исследований

Основным показателем, характеризующим степень пропитки щепы, является концентрация едкого натра в линии рециркуляции пропиточного аппарата, которая зависит от многих факторов, в частности породы древесины, плотности, влажности и геометрических размеров щепы, соотношения крупной и мелкой фракций щепы, удельного расхода едкого натра, поступающего на пропитку, температуры пропиточного раствора.

Регрессионный анализ результатов пассивного эксперимента на пропиточном аппарате позволил выявить зависимость концентрации едкого натра в линии рециркуляции от температуры в линии рециркуляции, температуры в нижней части аппарата и удельного расхода едкого натра.

Экспериментальные исследования проводились в октябре 1987 г. и январе 1988 г. при следующих параметрах режима пропитки [2]:

- производительность 190 т всв/сут;
- расход водного раствора едкого натра 8,6 л/мин (октябрь), 8,5-10,2 л/мин (январь);
- концентрация водного раствора едкого натра 226-236 г/л (октябрь), 200-230 г/л (январь);
- температура в линии рециркуляции 76-81 °С (октябрь), 78-85 °С (январь);

- удельный расход едкого натра 14,7-15,4 кг/т (октябрь), 14,17-17,93 кг/т (январь);

- температура в нижней части аппарата 60-67 °С (октябрь), 62-68 °С (январь);

- концентрация едкого натра в линии рециркуляции 1,08-1,48 г/л (октябрь), 0,8-1,11 г/л (январь).

Параметры при пассивном эксперименте измерялись лабораторным способом с интервалом 5 мин.

Расчеты по определению коэффициентов множественной и парной корреляции проводились на ЭВМ.

Исследовалась множественная корреляция концентрации едкого натра в линии рециркуляции от температуры в линии рециркуляции и удельного расхода едкого натра.

Уравнения множественной линейной регрессии, связывающей эти величины, имеют следующий вид для октября 1987 г. и января 1988 г. соответственно:

$$C_p = 4,41 - 0,0415\theta_3 + 0,0133q_{NaOH},$$

$$C_p = 3,29 - 0,0335\theta_3 + 0,0255q_{NaOH},$$

где C_p – концентрация едкого натра в линии рециркуляции, г/л;

θ_3 – температура в линии рециркуляции, °С;

q_{NaOH} – удельный расход сухого едкого натра, кг/т.

Среднеквадратическая погрешность для уравнений множественной регрессии составила 5 %.

Исследовались парные корреляции концентрации едкого натра в линии рециркуляции от температуры в линии рециркуляции, температуры в нижней части аппарата и удельного расхода едкого натра.

Уравнения парной корреляции, связывающей концентрацию едкого натра в линии рециркуляции с температурой в линии рециркуляции, имеют следующий вид для первого и второго экспериментов соответственно:

$$C_p = 4,65 - 0,0417\theta_p,$$

$$C_p = 4,59 - 0,0447\theta_p,$$

Среднеквадратическая погрешность для этих зависимостей составила 5-6%.

Уравнение парной корреляции, связывающей концентрацию едкого натра в линии рециркуляции с температурой в нижней части аппарата, имеют следующий вид для октября и января соответственно:

$$C_p = 3,89 - 0,0396\theta_{нк},$$

$$C_p = 3,85 - 0,0447\theta_{нк},$$

где $\theta_{\text{нк}}$ – температура в нижней части пропиточного аппарата, °С.

Среднеквадратическая погрешность составила 6-9 %.

Уравнения парной корреляции, связывающей концентрацию едкого натра в линии рециркуляции с удельным расходом едкого натра, поступающим на пропитку щепы, имеют следующий вид, соответственно для осеннего и зимнего экспериментов:

$$C_p = 0,284 + 0,0682q_{\text{NaOH}},$$

$$C_p = -0,138 + 0,070q_{\text{NaOH}}.$$

Среднеквадратическая погрешность составила 8-10%.

Полученные уравнения множественной и парной линейной регрессии соответствуют сущности физических процессов, протекающих в пропиточном узле: концентрация остаточной щелочности в рециркулянте возрастает с увеличением удельного расхода едкого натра и уменьшается при увеличении как температуры рециркулянта, так и температуры в нижней части пропиточного котла.

Оценить степень приближения значений концентрации остаточной щелочности в рециркулянте, полученных по уравнениям линейной регрессии к соответствующим наблюдаемым в эксперименте значениям величины, можно по результатам обработки экспериментальных статистических данных. Для каждого уравнения регрессии вычислялись значения математического ожидания концентрации остаточной щелочности в рециркулянте, разность между наблюдаемым значением и математическим ожиданием и отношения их в процентах. Расхождение между величинами составляет для большинства наблюдений 3-8 %. Вычислялись также значения среднеквадратического отклонения наблюдаемых значений исследуемой функции от ее математического ожидания. Например, для случая множественной корреляции среднеквадратичное значение отклонений расчетных значений от опытных составляет 0,069 г/л. Учитывая чрезвычайно узкий диапазон изменения измеренных величин, можно отметить, что полученные уравнения линейной регрессии достаточно хорошо описывают модель пропиточного котла в пределах изменений рассматриваемых величин.

Методом наименьших квадратов (МНК) для пассивного эксперимента по программе Л.Н. Селяниновой были обработаны два массива данных (2008 г.) доли крупной щепы в потоке ($\alpha_{\text{кр}}$) и концентрации остаточной щелочности в рециркулируемом пропиточном растворе (C_p) и получены нижеследующие уравнения линейной регрессии:

$$C_p = 0,701 + 0,161\alpha_{\text{кр}};$$

$$C_p = 0,605 + 0,255\alpha_{\text{кр}}.$$

Уравнения подтверждают положение о том, что увеличение доли крупной щепы снижает степень ее пропитки, что характеризуется

увеличением концентрации остаточной щелочности в рециркулируемом пропиточном растворе.

На рис. 5 представлены результаты наблюдений и обработки двух массивов данных.

Также обработаны 3 массива данных УРЭ (Е) на I ступени размола и концентрации остаточной щелочности рециркулируемого пропиточного раствора, полученных при исследованиях в 1987 (1 массив) и 2008 (2 массива) годах. В результате получены нижеследующие уравнения параболы регрессии.

$$E = 324,2 C_p^2 - 657,4 C_p + 746,8;$$

$$E = 421,5 C_p^2 - 1226 C_p + 1222;$$

$$E = 592 C_p^2 - 1447 C_p + 1204.$$

На рис. 6 представлены результаты наблюдений и обработки трех массивов данных.

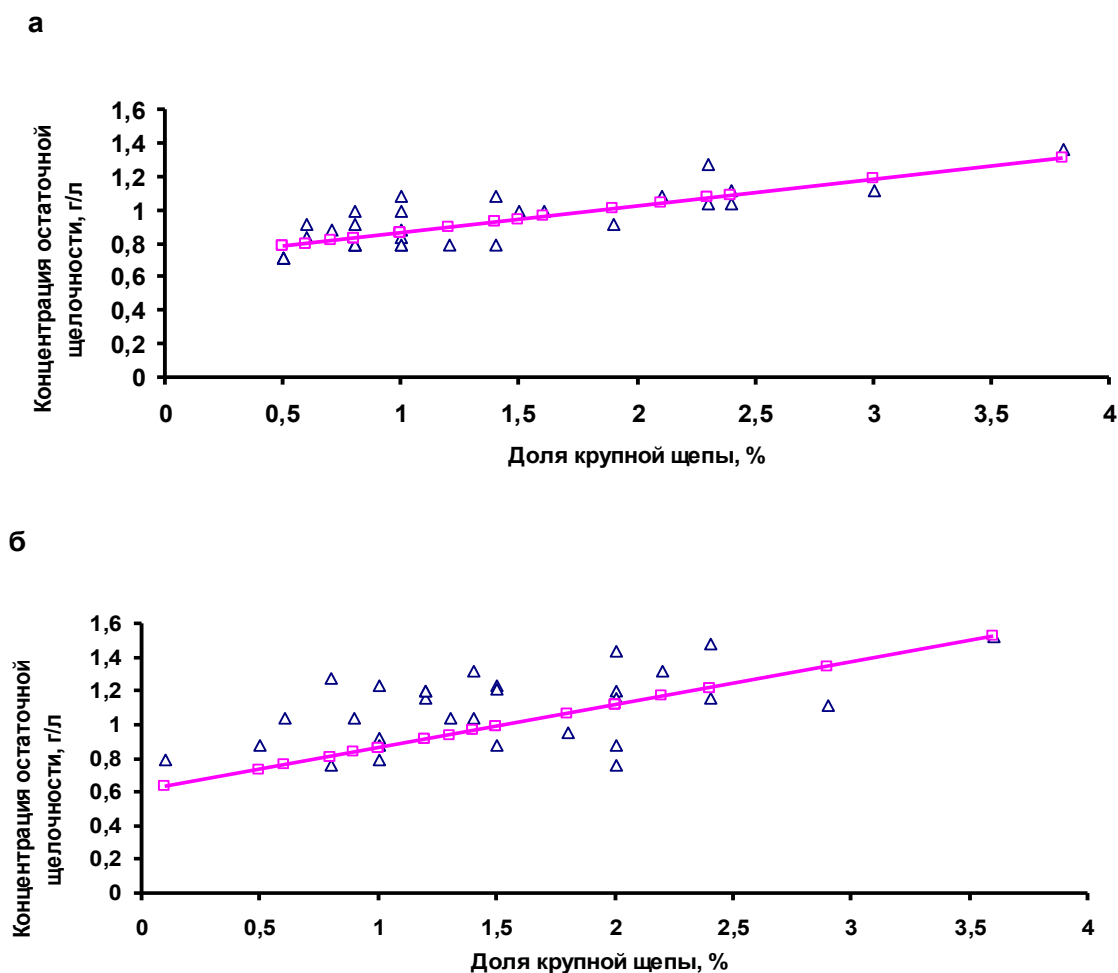
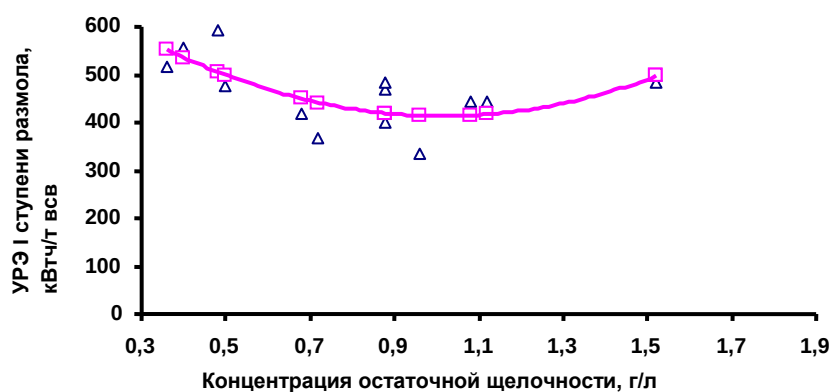
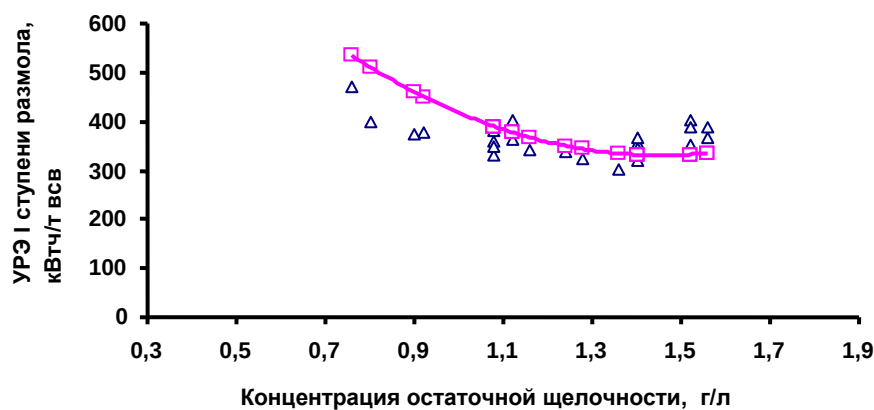


Рис. 5. Влияние размеров щепы на концентрацию остаточной щелочности по данным статистических наблюдений: а, б – соответственно по первому и второму массивам данных; Δ - экспериментальные данные, □ – расчетные данные по уравнениям регрессии

а



б



в

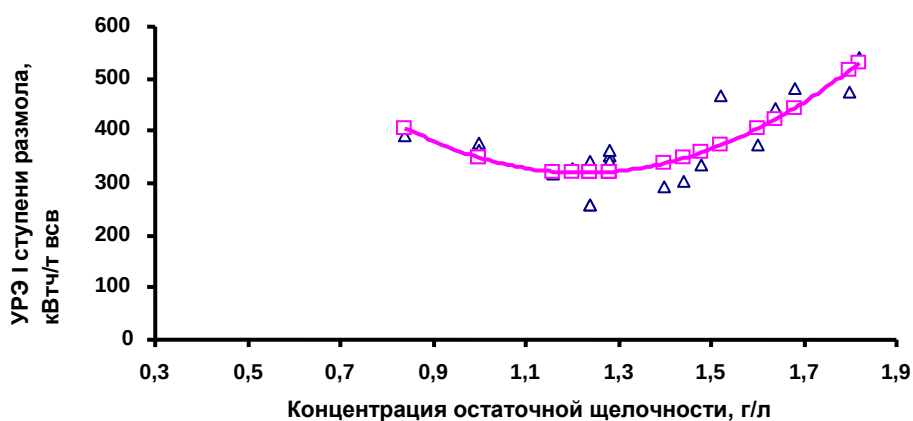


Рис. 6. Зависимость УРЭ на первой ступени размола от концентрации остаточной щелочности по данным статистических наблюдений: а, б, в – соответственно по первому массиву данных 1987 г., второму и третьему массивам данных 2008 г.; Δ - экспериментальные данные, □ – расчетные данные по уравнениям регрессии

Аналогичным образом были обработаны три массива (1987, 2008, 2009 гг.) концентрации остаточной щелочности в линии рециркуляции пропиточного раствора и температуры в нижней части пропиточного котла $\theta_{\text{нк}}$ и получены нижеследующие уравнения нелинейной регрессии от одной переменной [8,9]:

$$C_p = -98,14 + 2,84\theta_{\text{нк}} - 0,02024 \theta_{\text{нк}}^2;$$

$$C_p = -110,8 + 3,177\theta_{\text{нк}} - 0,02247 \theta_{\text{нк}}^2;$$

$$C_p = -149,5 + 4,232\theta_{\text{нк}} - 0,02969 \theta_{\text{нк}}^2.$$

Значимость коэффициентов регрессии определялась с помощью нормированной случайной величины, подчиняющейся t-распределению Стьюдента. Проверка адекватности эмпирической модели производилась с помощью критерия Фишера (F).

Влияние некоторых факторов на эффективность пропитки осинового щепы в лабораторных условиях

Эффективность пропитки щепы, определяемая по впитываемости химикатов, зависит от целого ряда факторов. Исследовано в лабораторных условиях влияние температуры и концентрации химикатов раствора для пропитки на впитываемость химикатов осинового щепой производственной рубки и щепой, предварительно размолотой на прессфайнере.

При установленном оптимальном соотношении расходов химикатов пределы варьирования изменяли следующим образом:

продолжительность процесса – 40-80 мин,
расход моносulfита натрия – 2,0-10 г/л,
расход пара – 2,0-6,0 г/л,
температура от 50-90 °С.

Осиновую щепу, предварительно раздавленную на прессфайнере, пропитывали растворами Na_2SO_3 и $NaOH$ в соотношении 1:1 и при постоянном гидромодуле 1:5,25. В конце пропитки определяли впитываемость химикатов по концентрации и объёму остаточного раствора.

По результатам эксперимента выведено следующее уравнение в кодированном виде:

$$\hat{y} = 70,93 + 11,78 \hat{t} + 4,526 \hat{t} - 1,226 \hat{C}_{NaOH} - 2,55 \hat{C}_{Na_2SO_3},$$

где $\hat{y}$ – впитываемость химикатов щепой;

$\hat{t}$ – температура пропитки;
 $\hat{\tau}$ – длительность пропитки;
 $\hat{C}_{NaOH}$ – концентрация едкого натра;
 $\hat{C}_{Na_2SO_3}$ – концентрация моносulfита натрия.

Из зависимости видно, что в вышеуказанных пределах параметров пропитки наибольшее влияние на эффективность пропитки грубоволокнистой массы (щепа, раздавленная на прессфайнере) оказывают температура и продолжительность пропитки. Увеличение же концентрации химикатов в растворе в указанных пределах не дает положительного эффекта.

С целью определения влияния параметров пропитки на впитываемость химикатов осиновой технологической щепой взяты пределы варьирования, приемлемые для использования на установке по производству химической древесной массы на Сясьском ЦБК:

продолжительность пропитки – 10-30 мин,
 концентрация моносulfита натрия – 3,0-15,0 г/л,
 концентрация едкого натра – 1,2-5,0 г/л,
 температура от 50-90 °С.

После обработки полученных данных получено следующее выражение в кодированном виде:

$$\hat{y} = 10,6 - 2,06 \hat{t} - 3,06 \hat{\tau} - 0,89 \hat{C}_{NaOH} - 0,39 \hat{C}_{Na_2SO_3}.$$

Как и для щепы, пропущенной через прессфайнер, концентрация химикатов почти не влияет на эффективность пропитки. Наибольшее значение для пропитки производственной щепы имеет продолжительность процесса пропитки.

Таким образом, для щепы, пропущенной через прессфайнер, влияние исследованных факторов значительно сильнее, так как впитываемость химикатов осиновой щепой зависит в основном от размеров и формы щепы.

Для получения осиновой химической древесной массы с высокими показателями качества необходимо подавать раствор химикатов для пропитки непосредственно в шнек прессфайнера и перед пропиточной камерой [1].

2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОПИТКИ ЩЕПЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ХРММ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ

В древесно-массном цехе (ДМЦ) ОАО «Сясьский ЦБК» существует система автоматизации пропиточного котла, разработанная фирмой «Enso Gutzeit» (Финляндия). В системе автоматизации предусмотрена автоматическая промывка сит пропиточного котла для забора рециркулянта, предупреждающая их забивание. Забор пропиточного раствора на рециркуляцию производится из двух точек через сита, установленные внутри котла. В результате работы часто происходит забивание сит, что приводит к нарушению технологического процесса. В этом случае необходима промывка сит рециркулянтом.

Промывка рециркуляционных сит осуществляется путем открывания и закрывания клапанов *A, B, C, D* в определенной последовательности (рис. 7). Алгоритм управления промывкой циркуляционных сит представлен на рис.8 [7].

Существующая схема автоматизации пропиточного котла представлена на рис.9.

Здесь измеряется и регулируется уровень в пропиточном котле изменением расхода воды, поступающей в трубопровод пропиточного раствора и изменением расхода рециркуляционного пропиточного раствора, поступающего в бак моносulfита (поз.1). Измеряется и регулируется температура пропиточного раствора за теплообменником изменением расхода пара (поз.2). Измеряются и регулируются расходы растворов едкого натра (поз.3) и моносulfита (поз.4), поступающих на пропитку. Измеряется и регулируется расход рециркуляционного пропиточного раствора (рециркулянта) (поз.5). Измеряются температура пропиточного раствора в нижней части котла (поз.6), температура рециркулянта (поз.7) и скорость загрузочного шнека (поз.9), автоматически управляется промывка сит (поз.8).

Эта система автоматизации не обеспечивает стабилизацию остаточной щелочности в рециркулянте после пропиточного котла, являющейся косвенным показателем степени пропитки щепы раствором едкого натра. Стабилизируя остаточную щелочность в рециркулянте, можно обеспечить требуемые свойства пропитанной щепы и заданные качественные показатели древесной массы после размола. Эта система автоматизации не обеспечивает высокую точность стабилизации теплового режима пропитки, так как расход пара изменяется только в зависимости от отклонения температуры пропиточного раствора за теплообменником от заданной.

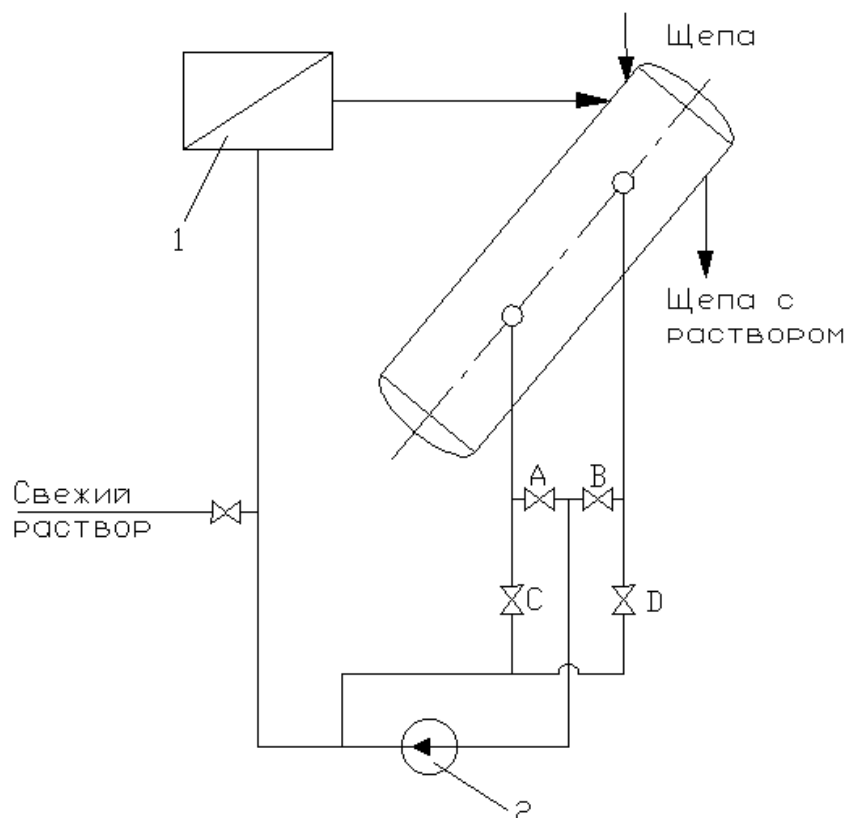


Рис.7. Схема трубопроводов и клапанов на линии рециркуляции пропиточного раствора в котле: 1- подогреватель, 2- циркуляционный насос

*Комментарии к схеме алгоритма управления промывкой
циркуляционных сит в пропиточном котле*

- 1 – проверка состояния клапана A (клапан открыт);
- 2 – проверка состояния клапана B (клапан закрыт);
- 3, 15 – операция – “открыть клапан A”;
- 4 – проверка состояния клапана C (клапан закрыт); 5, 18 – операция “закрыть клапан B”;
- 6, 16 – операция “закрыть клапан C”;
- 7 – проверка состояния клапана D (клапан закрыт);
- 8, 21 – операция “закрыть клапан D”;
- 9 – сравнение измеренного значения G_3 с минимально допускаемым значением G_3^{don} расхода рецикуланта ($G_3 < G_3^{don}$);
- 10 – операция “открыть клапан B”;
- 11 – операция “открыть клапан C”;
- 12 – операция “закрыть клапан A”;
- 13 – операция “промывка левого сита”;
- 14, 20 – сравнение времени промывки сита t_c с временем, равным 30 с ($t_c > 30$ с);

17 – операция “открыть клапан D”;
19 – операция “промывка правого сита”.

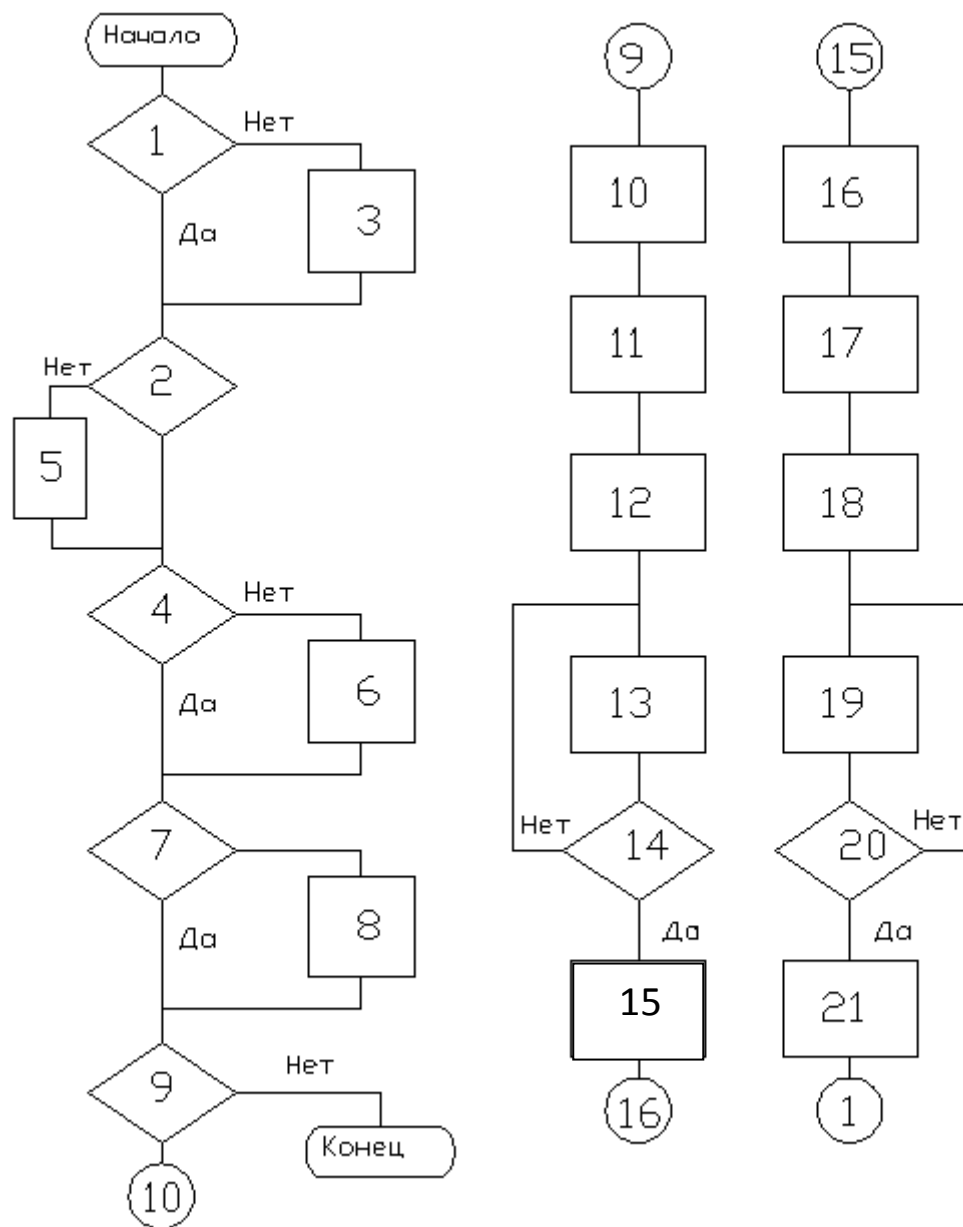


Рис.8. Схема алгоритма управления промывкой циркуляционных сит в пропиточном котле

Существующая система автоматизации также не обеспечивает регулирование температуры рециркулянта и температуры пропиточного раствора в нижней части котла, что необходимо для стабилизации концентрации остаточной щелочности в рециркулянте.

Разработан способ автоматического управления обработкой древесной щепы в пропиточном аппарате в производстве ХРММ с целью повышения эффективности пропитки за счет стабилизации теплового режима пропитки щепы и остаточной щелочности в рециркулянте [4].

В этом способе дополнительно к существующему, представленному на рис.9, измеряют нагрузку загрузочного шнека аппарата, по которому определяют расход воздушно-сухой щепы, расход и давление пара на входе в пропиточный аппарат, концентрацию растворов едкого натра и моносulfита на входе в аппарат и концентрацию остаточной щелочности в рециркулянте, вычисляют удельный расход моносulfита по его расходу, концентрации и расходу воздушно-сухой щепы и по величине рассогласования между вычисленными и заданными значениями изменяют расход раствора моносulfита в аппарат, вычисляют удельный расход едкого натра по его расходу, концентрации и расходу воздушно-сухой щепы, определяют величину и знак рассогласования между максимально допустимым и вычисленным удельным расходом, вычисляют удельный расход тепла по расходу воздушно-сухой щепы, расходу пара и его давлению, определяют величину и знак рассогласования между заданным и измеренным значениями концентрации остаточной щелочности в рециркулянте, вычисляют скорость изменения уровня в аппарате, знак этой скорости и значение ее модуля, которое сравнивают с заданным значением модуля, определяют знак рассогласования и при отрицательном знаке рассогласования и положительном знаке скорости изменения уровня в аппарате осуществляют сброс рециркулянта в бак моносulfита, а регулирование расхода рециркулянта осуществляют по величине рассогласования между измеренным расходом и заданным, в качестве которого используют величину, пропорциональную рассчитанному значению расхода воздушно-сухой щепы, при этом изменение расхода раствора едкого натра осуществляют по величине рассогласования текущего значения удельного расхода едкого натра и заданного значения, скорректированного по величине рассогласования концентрации остаточной щелочности, отрицательному знаку этого рассогласования и любому знаку рассогласования величин удельного расхода едкого натра; изменение расхода пара в подогреватель осуществляют в зависимости от величины рассогласования текущего значения удельного расхода тепла и заданного, пропорционально температуре пропиточного раствора за подогревателем, величины рассогласования температуры рециркулянта, скорректированной по величине рассогласования концентрации остаточной щелочности, отрицательному знаку этого рассогласования и любому знаку рассогласования между заданным и текущим значениями удельного расхода едкого натра, а по величине рассогласования между текущим и заданным значениями концентрации остаточной щелочности в рециркулянте при положительном знаке рассогласования этой концентрации и отрицательном

знаке рассогласования удельного расхода едкого натра изменяют расход пара в подогреватель и корректируют заданное значение температуры пропиточного раствора в нижней части аппарата, которое сравнивают с текущим значением этой температуры, и по величине рассогласования изменяют расход пара в пропиточный аппарат.

Наличие многоконтурного управления тепловым режимом пропиточного узла обеспечивает повышение точности стабилизации теплового режима пропитки в различных зонах и дает снижение расхода пара.

Наличие корректирующих воздействий на изменение заданных значений удельного расхода пара, температуры рециркулянта и температуры в нижней части котла по отклонению концентрации остаточной щелочности в рециркулянте, учет величины и знака скорости изменения уровня для его регулирования обеспечивают стабилизацию остаточной щелочности при изменении физико-химических свойств поступающей щепы, что, в свою очередь, обеспечивает требования регламента по пропитке и в дальнейшем при размоле щепы – заданные показатели древесной массы при уменьшении расхода электроэнергии.

Возможность переключения корректирующих воздействий в зависимости от удельного расхода едкого натра повышает обезвоживающую способность древесной массы, что в свою очередь позволяет обеспечить требуемую влажность картона на КДМ и снизить расход едкого натра.

На рис. 10 изображена функциональная схема усовершенствованной системы автоматизации пропитки в производстве ХРММ с учетом некоторых положений указанного способа. В этой системе регулируется уровень в пропиточном котле 1 также, как и в предыдущей системе, регулируется температура раствора в нижней части котла изменением расхода пара в котел 4. Температура рециркуляционного пропиточного раствора регулируется по каскадному варианту, включающему стабилизирующий контур 2 по температуре пропиточного раствора перед котлом и задающий контур 3 по температуре пропиточного раствора за котлом. Предусмотрены АСР удельных расходов химикатов 5,6 и АСР соотношения расходов щепы и рециркуляционного пропиточного раствора 7. Для управления концентрацией остаточной щелочностью в пропиточном растворе существует АСР 8, которая вводит поправки на задания АСР удельного расхода раствора гидроксида натрия (едкого натра) и АСР температуры рециркуляционного пропиточного раствора [7].

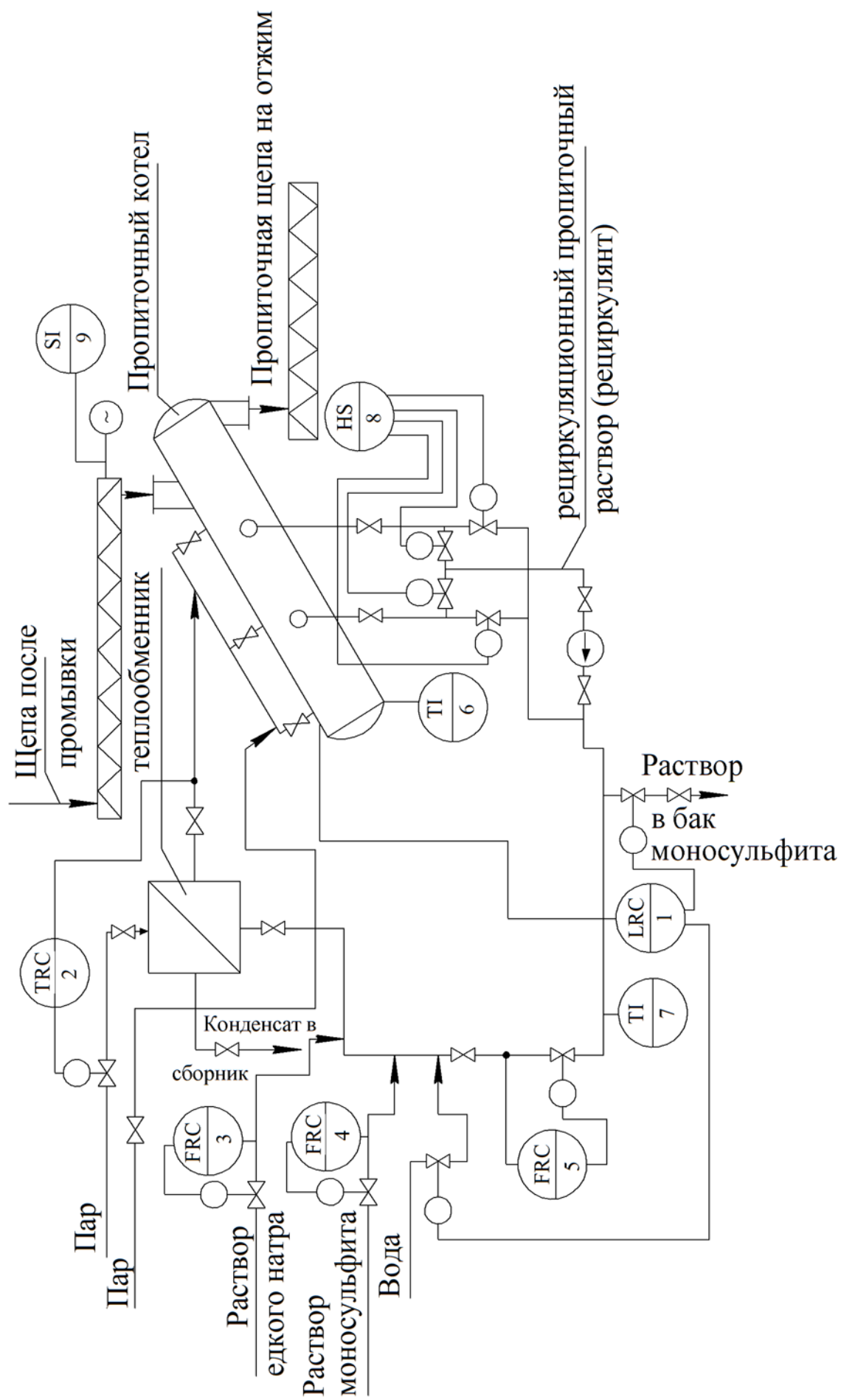


Рис.9. Функциональная схема автоматизации пропиточного котла

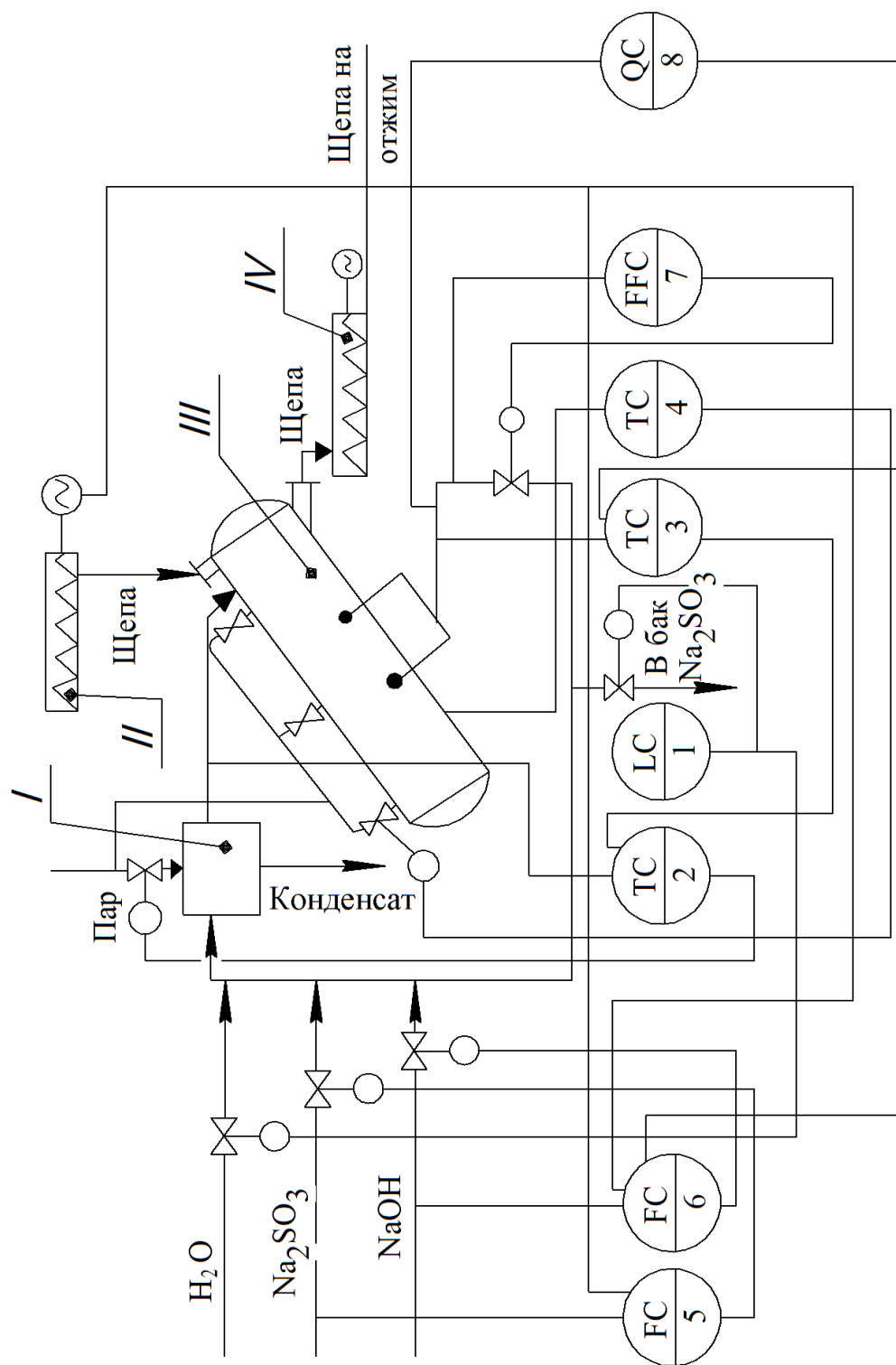


Рис.10. Функциональная схема усовершенствованной системы автоматизации пропитки щепы в производстве ХРММ: I – теплообменник, II – загрузочный шнек, III – котел, IV – разгрузочный шнек

3. АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОПИТКИ ОСИНОВОЙ ЩЕПЫ В ПРОПИТОЧНОМ КОТЛЕ «BAUER M&D» НА ОАО «СЯСЬСКИЙ ЦБК»

Повышение эффективности пропитки и, следовательно, снижение удельного расхода электроэнергии можно обеспечить следующим образом.

По уравнению $E = f(C_p)$ определяется оптимальное значение концентрации остаточной щелочности $C_p^{\text{опт}}$, обеспечивающее минимальный удельный расход энергии на первой ступени размола щепы.

Если рассогласование между измеренной и оптимальной концентрациями остаточной щелочности положительное, то для уменьшения следует определить оптимальную температуру в нижней части пропиточного котла $\theta_{\text{нк}}^{\text{опт}}$ по уравнению нелинейной регрессии $C_p = f(\theta_{\text{нк}})$ и в случае ее значения менее допустимого рекомендовать оператору увеличить температуру до оптимальной.

При отрицательном указанном рассогласовании с этой же целью следует определить оптимальный удельный расход едкого натра $q_{\text{NaOH}}^{\text{опт}}$ по уравнению линейной регрессии $C_p = f(q_{\text{NaOH}})$ и в случае его значения менее допустимого рекомендовать оператору увеличить его до оптимального.

Коэффициенты всех уравнений регрессии необходимо постоянно пересчитывать методом МНК для пассивного эксперимента по накопленному массиву данных.

Блок-схема периодического алгоритма повышения эффективности пропитки (рис.11) и комментарии к нему приведены ниже [9].

Комментарии к блок-схеме периодического алгоритма повышения эффективности пропитки

1. Начало.

2. Ввод 25 значений следующих параметров:

C_{pi} , г/л – концентрация остаточной щелочности пропиточного раствора;

A'_{1i} , A''_{1i} и A'_{2i} , A''_{2i} , МВт · ч – часовые расходы электрической энергии левого и соответственно правого приводных электродвигателей рафинера I ступени размола до и после измерения концентрации остаточной щелочности;

$\theta_{\text{нк}i}$, °С – температура раствора в нижней части пропиточного котла;

$n_{\text{шн}i}$, об/мин – частота вращения шнека, подающего щепу в пропиточный котел;

$V_{\text{NaOH}i}$, л/мин – расход раствора едкого натра, поступающего на пропитку;

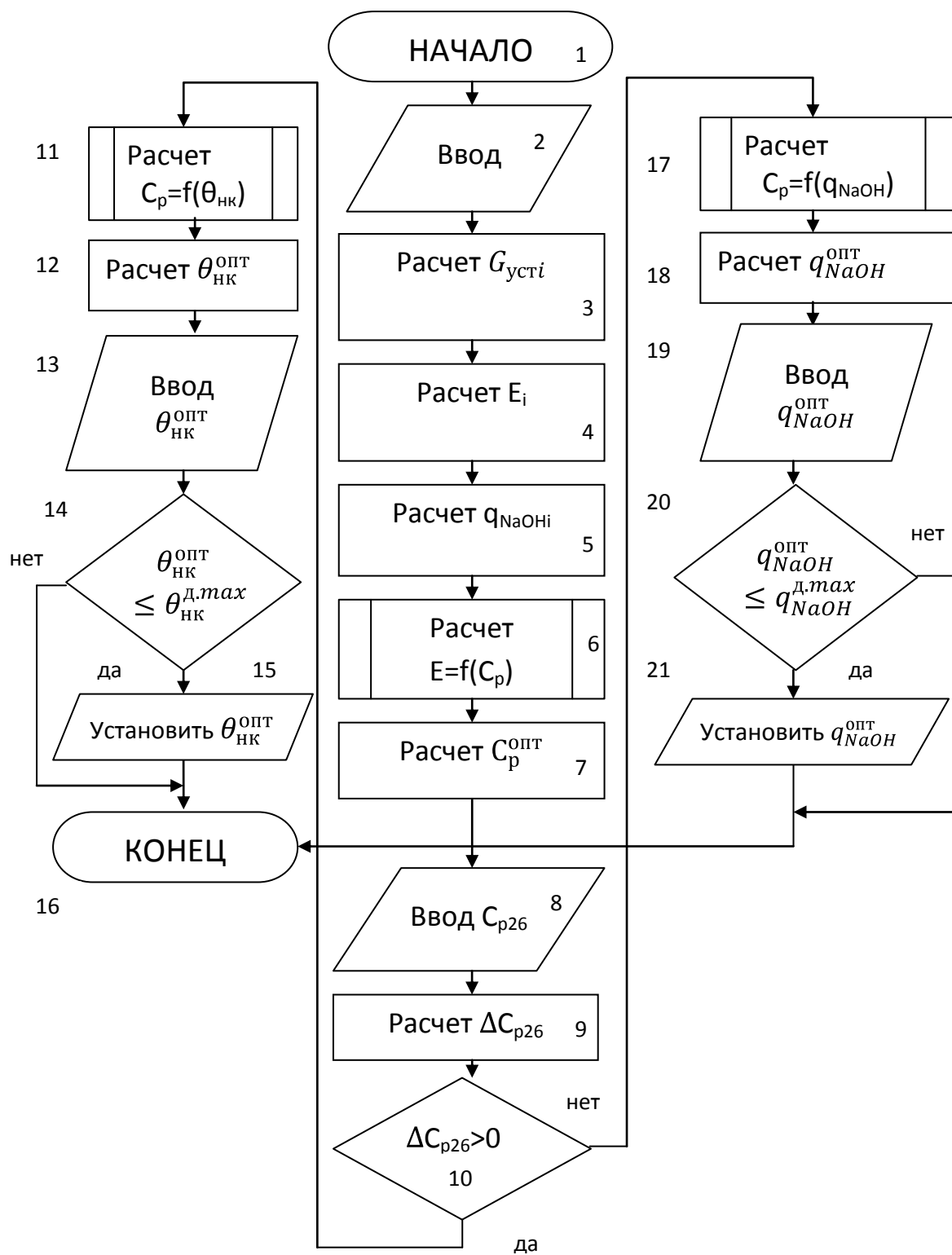


Рис.11. Блок- схема алгоритма повышения эффективности пропитки

C_{NaOH_i} , г/л – концентрация раствора едкого натра, поступающего на пропитку.

Дискретность измерения параметров соответствует периоду отбора проб рециркулируемого пропиточного раствора для лабораторного измерения концентрации остаточной щелочности.

3. Расчет часовой производительности установки

$$G_{усті} = k \cdot n_{шні}, \text{ т ВСВ}, \quad (54)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

4. Расчет удельного расхода электроэнергии на рафинере первой ступени размола

$$E_i = \frac{(A'_{1i} + A''_{1i} + A'_{2i} + A''_{2i}) \cdot 500}{G_{усті}}, \frac{\text{кВт} \cdot \text{ч}}{\text{т ВСВ}}. \quad (55)$$

5. Расчет удельного расхода едкого натра, поступающего в пропиточный котел

$$q_{NaOH_i} = \frac{V_{NaOH_i} \cdot C_{NaOH_i}}{G_{усті}} \cdot 0,06, \frac{\text{кг}}{\text{т ВСВ}}. \quad (56)$$

6. Расчет зависимости $E = f(C_p)$ по 25 значениям E_i и C_{pi} (с использованием подпрограммы МНК с проверкой по Стьюденту и Фишеру) вида

$$E = a \cdot C_p^2 + b \cdot C_p + c. \quad (57)$$

7. Расчет оптимальной концентрации остаточной щелочности $C_p^{\text{опт}}$ из выражения $\frac{\partial E}{\partial C_p} = 0$:

$$2a \cdot C_p^{\text{опт}} + b = 0; C_p^{\text{опт}} = -\frac{b}{2a}. \quad (58)$$

8. Ввод следующего значения концентрации остаточной щелочности C_{p26} после C_{p25} .

$$9. \text{ Расчет } \Delta C_{p26} = C_{p26} - C_p^{\text{опт}}.$$

10. Проверка неравенства $\Delta C_{p26} > 0$.

11. Расчет зависимости $C_p = f(\theta_{нк})$ по 25 значениям $\theta_{нкi}$ и C_{pi} (с использованием подпрограммы МНК с проверкой по Стьюденту и Фишеру) вида

$$C_p = -d \cdot \theta_{нк}^2 + e \cdot \theta_{нк} - f. \quad (59)$$

12. Расчет оптимального значения температуры в нижней части пропиточного котла из выражений

$$d \cdot \theta_{нк}^2 - e \cdot \theta_{нк} + f + C_p^{опт} = 0; \quad (60)$$

$$\theta_{нк}^{опт} = \frac{e \pm \sqrt{e^2 - 4 \cdot d(f + C_p^{опт})}}{2d}. \quad (61)$$

13. Ввод максимального допускаемого значения температуры в нижней части пропиточного котла $\theta_{нк}^{д.мах}$.

14. Проверка соотношения $\theta_{нк}^{опт} \leq \theta_{нк}^{д.мах}$.

15. Выдача рекомендации оператору по установке $\theta_{нк}^{опт}$.

16. Конец.

17. Расчет зависимости $C_p = f(q_{NaOH})$ по 25 значениям $q_{NaOH i}$ и C_{pi} (с использованием подпрограммы REGR с проверкой по Стьюденту и Фишеру) вида

$$C_p = g + k^* \cdot q_{NaOH}. \quad (62)$$

16. Конец.

18. Расчет оптимального значения удельного расхода едкого натра из выражения

$$q_{NaOH}^{опт} = \frac{C_p^{опт} - g}{k^*}. \quad (63)$$

19. Ввод максимального допускаемого значения удельного расхода едкого натра $q_{NaOH}^{д.мах}$.

20. Проверка соотношения $q_{NaOH}^{opt} \leq q_{NaOH}^{d.max}$.

21. Выдача рекомендации оператору по установке q_{NaOH}^{opt} .

Представленный выше алгоритм повышения эффективности пропитки имеет существенный недостаток – он периодического действия. Периодичность ввода данных определяется ведущим параметром – концентрацией остаточной щелочности C_{pi} .

Непрерывный алгоритм (рис. 12) лишен этого недостатка [11].

Комментарии к блок-схеме непрерывного алгоритма

1. Начало.
2. Ввод i ; i – номер взятия пробы C_{pi} (1,2,...).
3. Ввод D ; D – количество строк одной базы данных (20, 30), D выбирает пользователь.
4. Расчет $K = (i - D) / D$; K – номер базы данных (0,1,2, ...).
5. Проверка неравенства $K \geq 0$.
6. Проверка значения K (целое или дробное).
7. Ввод значения пробы концентрации остаточной щелочности C_{pi} , г/л;
8. Ввод значения частоты вращения шнека, подающего щепу в пропиточный котел, $n_{шн i}$, об/мин.
9. Расчет часовой производительности установки $G_{уст i}$, т всв/ч.
10. Ввод значений часовых расходов электрической энергии левого и правого приводных электродвигателей рафинера I ступени размола до и после взятия пробы концентрации остаточной щелочности $A'_{1 i}, A''_{1 i}, A'_{2 i}, A'_{2 i}$ МВт·ч.
11. Расчет удельного расхода электроэнергии на рафинере I ступени размола E_i , кВт·ч/т всв.
12. Ввод значений температуры раствора в нижней части пропиточного котла $\theta_{нк i}$, °С.
13. Ввод значений объемного расхода раствора едкого натра на пропитку $V_{NaOH i}$, л/мин.
14. Ввод значений концентрации раствора едкого натра, поступающего на пропитку, $C_{NaOH i}$, г/л.
15. Расчет значений удельного расхода едкого натра, поступающего в пропиточный котел, $q_{NaOH i}$, кг/т всв.
16. Проверка равенства $i = (K + 1) \cdot D$.
17. Ввод очередной базы данных значений концентрации остаточной щелочности в рециркулируемом пропиточном растворе $C_{PKD}, \dots C_{P(K+1)D}$.
18. Ввод очередной базы данных значений удельного расхода энергии на I ступени размола щепы $E_{KD}, \dots E_{(K+1) \cdot D}$.
19. Расчёт зависимости $E_{KD} = f(C_{PK})$ по 20 (30) значениям E и C_P .

20. Расчет оптимальной концентрации остаточной щелочности $C_{P_{K \text{ опт}}}$.
21. Расчет номера взятия проб после очередной базы данных $j = (K + 1) \cdot D + j$; j – то же, что и i , но после анализа соответствующей K –й базы данных.
22. Ввод следующих значений концентрации остаточной щелочности $C_{p j}$.
23. Расчет отклонения концентрации остаточной щелочности $\Delta C_{p j} = C_{p j} - C_{P_{K \text{ опт}}}$.
24. Проверка неравенства $\Delta C_{p j} > 0$.
25. Ввод базы данных значений температуры в нижней части пропиточного котла $\theta_{KD}^{\text{НК}}, \dots, \theta_{(K+1)D}^{\text{НК}}$.
26. Ввод базы данных значений удельного расхода едкого натра на пропитку $q_{KD}^{\text{NaOH}}, \dots, q_{(K+1)D}^{\text{NaOH}}$.
27. Расчет зависимости $C_{P_K} = f(\theta_K^{\text{НК}})$.
28. Расчет зависимости $C_{P_K} = f(q_K^{\text{NaOH}})$.
29. Расчет оптимального значения температуры в нижней части пропиточного котла $\theta_{K \text{ опт}}^{\text{НК}}$.
30. Расчет оптимального значения удельного расхода едкого натра $q_{K \text{ опт}}^{\text{NaOH}}$.
31. Ввод максимального допускаемого значения температуры в нижней части пропиточного котла $\theta_{\text{доп}}^{\text{НК}}$.
32. Ввод максимального допускаемого значения удельного расхода едкого натра $q_{\text{доп}}^{\text{NaOH}}$.
33. Проверка неравенства $\theta_{K \text{ опт}}^{\text{НК}} \leq \theta_{\text{доп}}^{\text{НК}}$.
34. Проверка неравенства $q_{K \text{ опт}}^{\text{NaOH}} \leq q_{\text{доп}}^{\text{NaOH}}$.
35. Выдача рекомендации оператору по установке $\theta_{\text{опт}}^{\text{НК}}$.
36. Выдача рекомендации оператору по установке $q_{\text{опт}}^{\text{NaOH}}$.
37. Проверка неравенства $j \leq (K + 2) \cdot D$.
38. Конец.

Данный алгоритм позволяет одновременно с ходом технологического процесса корректировать параметры пропитки осиновой щепы с целью минимизации энергетических затрат при ее размоле.

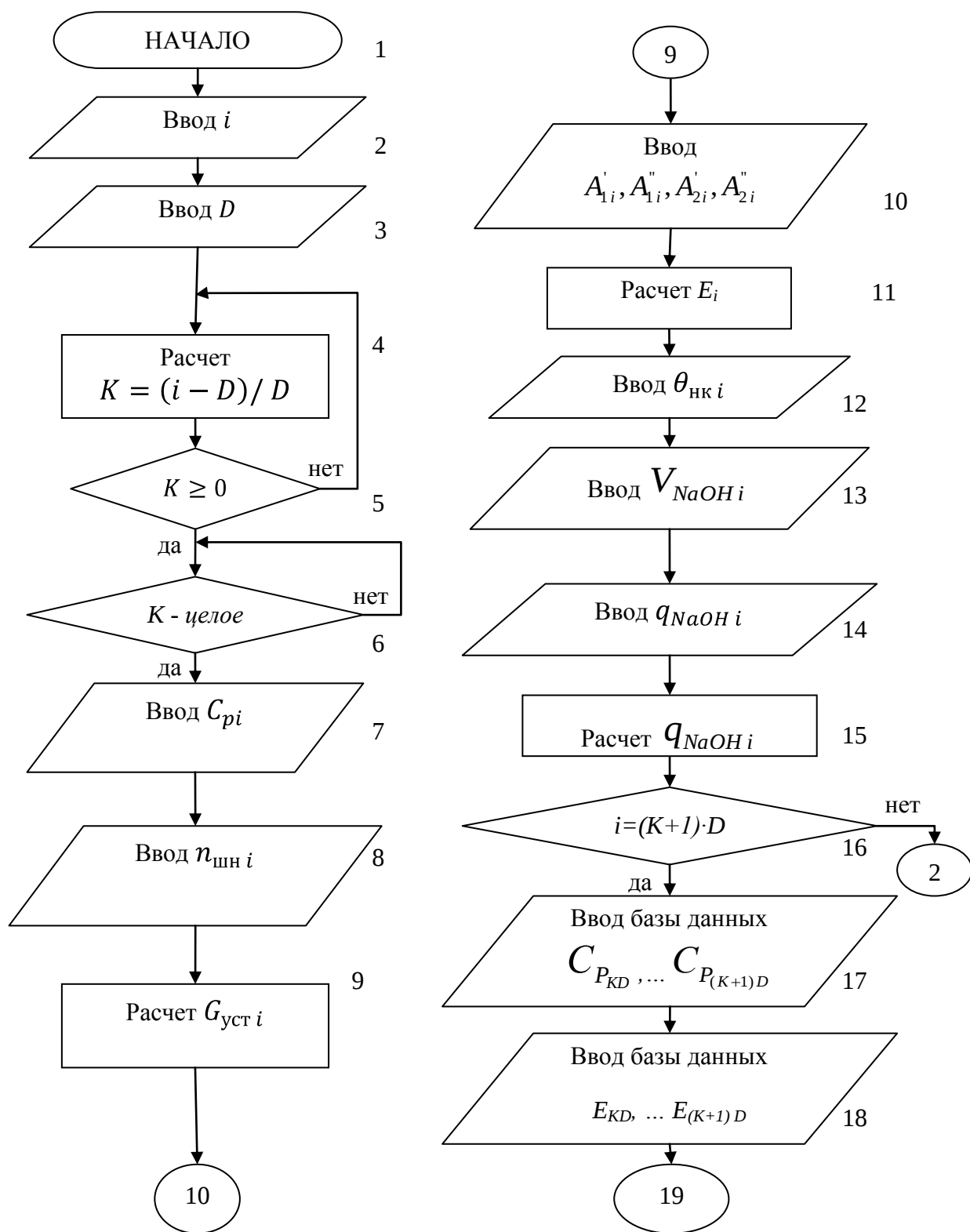
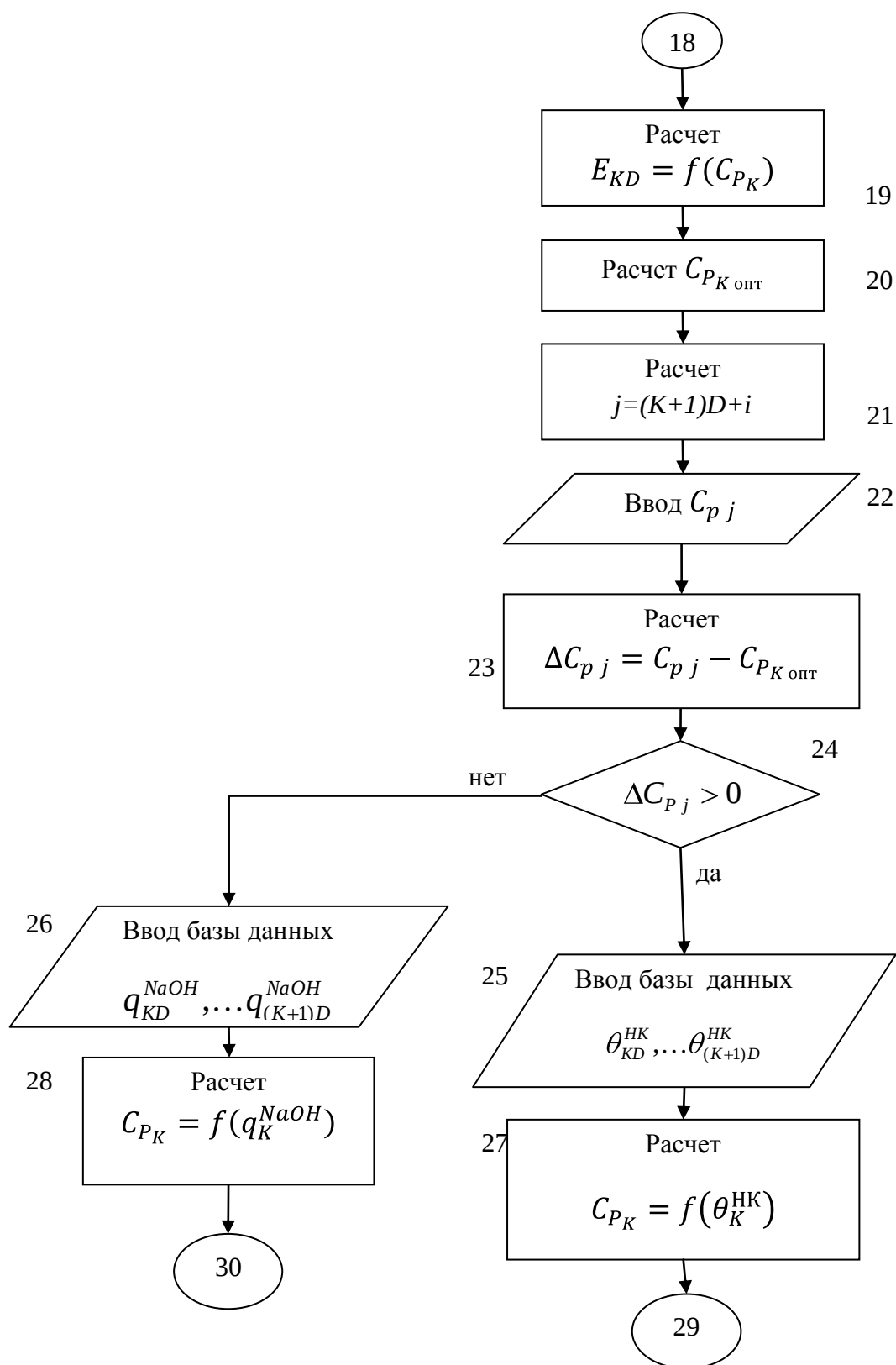
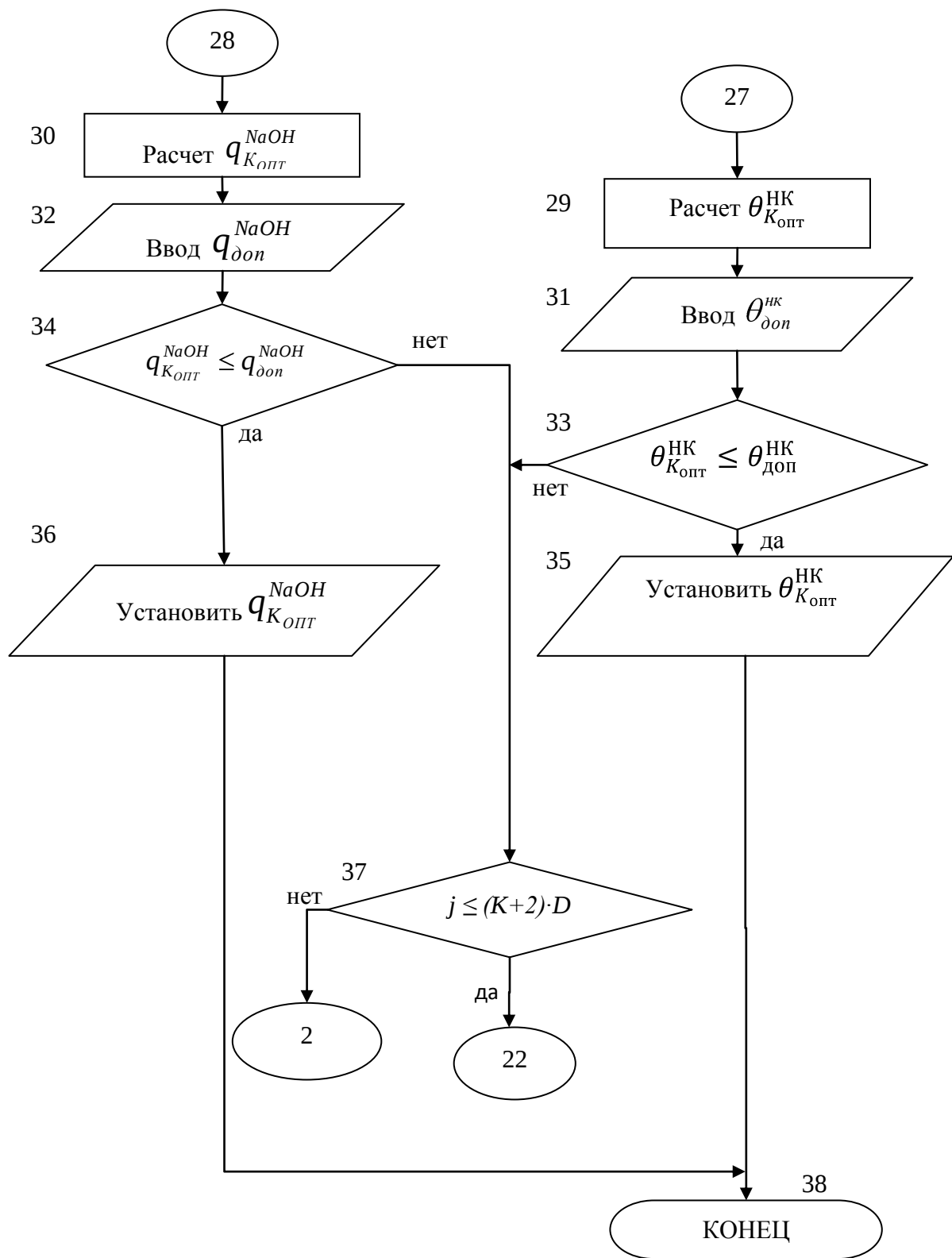


Рис. 12. Блок-схема непрерывного алгоритма повышения эффективности пропитки осиновой щепы в производстве ХРММ на ОАО «Сясьский ЦБК»



Продолжение рис. 12



Окончание рис. 12

4. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОПАРКИ И ПРОПИТКИ ЩЕПЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ХТММ

Технология и автоматизация пропарки и пропитки щепы в производстве ХТММ фирмы «Sunds Defibrator» на ОАО «Волга»

На установках по производству ХТММ фирмы «Sunds Defibrator» (Швеция) ведущую роль для последующего размола играют узлы пропитки и термогидролитической обработки щепы (рис. 13).

Пропитанная и обезвоженная щепа с двухвинтового обезвоживающего шнека 1 подается во вторую камеру предварительной пропарки щепы 2, объемом 28 м^3 , где подогревается паром при атмосферном давлении до температуры $90 \div 100^\circ\text{C}$ в течение 5-10 минут.

Щепа из камеры пропарки промытой щепы с помощью разгрузочного шнека (3) поступает в шнековый пробковый питатель «S-42» 4, являющийся частью пропиточного устройства (импрегнатора) Прех 5. В шнековом пробковом питателе щепа сжимается, при этом из нее удаляется влага, воздух и значительная часть экстрактивных веществ. Щепа здесь обезвоживается до сухости 60 %. Далее щепа поступает в нижнюю часть импрегнатора, где она расширяется и впитывает химические реагенты подобно губке. Пропитка осуществляется при атмосферном давлении пропиточным раствором с температурой 30°C , включающим сульфит натрия, гидроксид натрия и комплексообразователь. Затем щепа двумя вертикальными шнековыми транспортерами перемещается по всей высоте импрегнатора и горизонтальным шнековым транспортером 6 подается в хранилище 7 – устройство термогидролитической обработки объемом 36 м^3 . В этом устройстве продолжается пропитка щепы химическими реагентами при нагреве паром. Щепа в этом устройстве находится в течение 10-15 минут при температуре $80 \div 90^\circ\text{C}$. Время выдержки щепы зависит от уровня, который регулируется изменением скоростей вращения шнековых разгружающих транспортеров перед импрегнатором и после устройства термогидролитической обработки и шнекового пробкового питателя. Цель гидролитической обработки щепы – обеспечение временных и температурных условий для продолжения впитывания химикатов щепой.

Подогрев щепы до требуемой температуры в начальный момент пуска установки осуществляется за счет подачи свежего пара давлением 0,3 МПа. Из бункера химически обработанная щепа системой шнеков 8 подается на узел размола с частичной регуляцией обратно в устройство термогидролитической обработки.

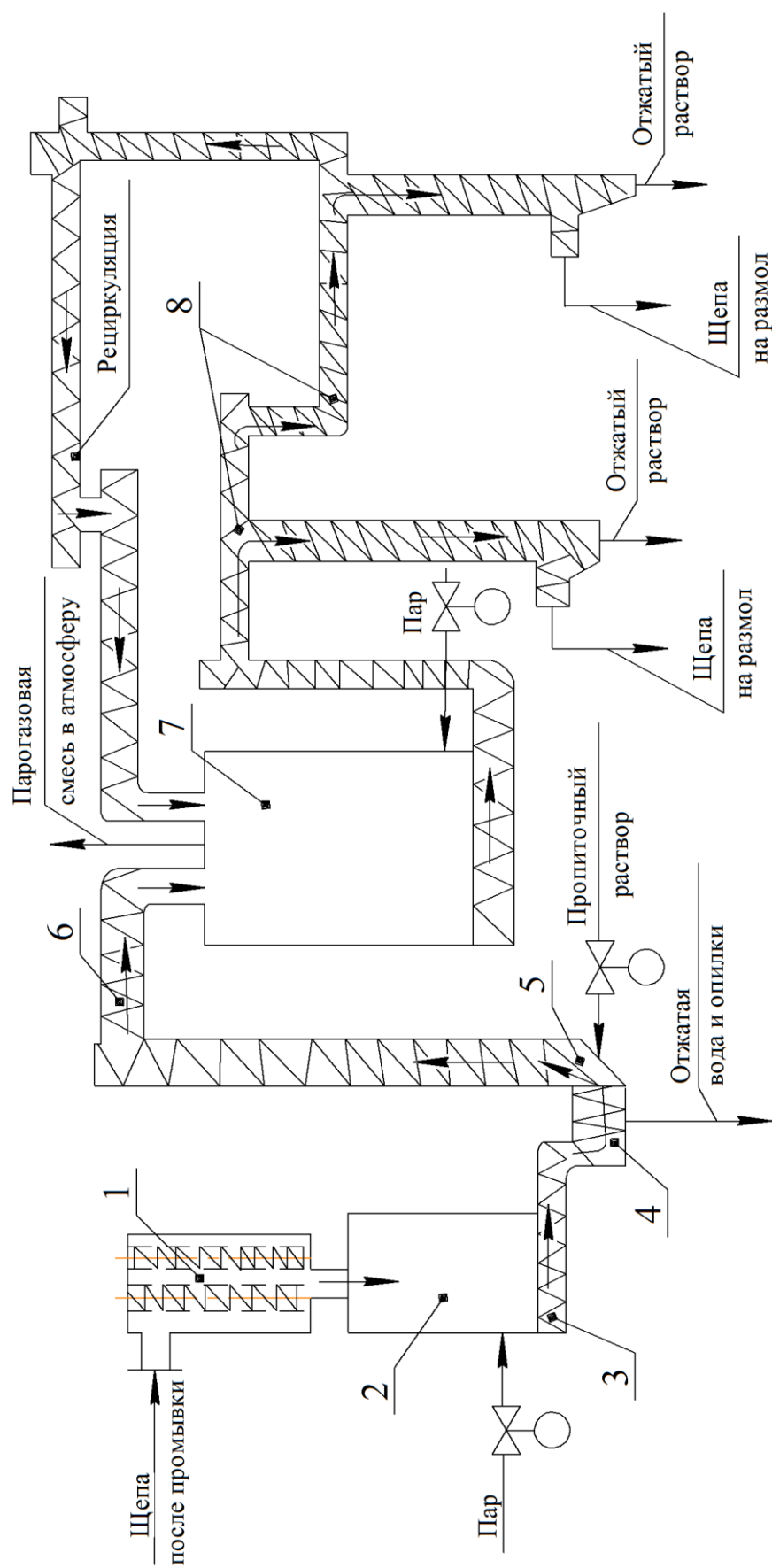


Рис. 13. Технологическая схема пропарки и пропитки щепы в производстве ХТММ на ОАО «Волга»

Фирма “Sunds-Defibrator” предлагает следующую систему автоматического управления пропиткой щепы (рис. 14). Эта система управления предусматривает АСР удельных расходов растворов химикатов (поз.1,2,3) поступающих в пропиточную камеру, изменением их расходов, АСР уровня пропиточного раствора в расходном баке (поз.4) изменением расхода воды, АСР уровня

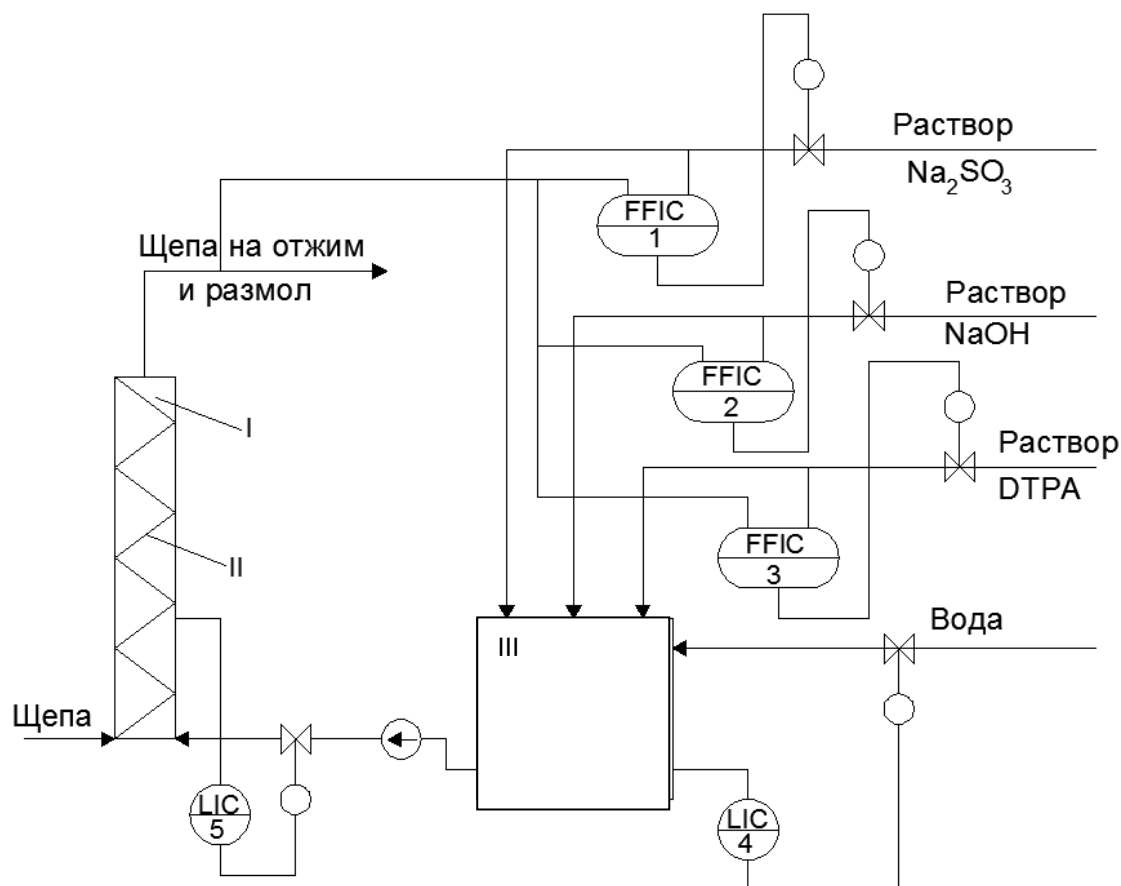


Рис. 14. Схема системы автоматического управления пропиткой щепы в производстве XTMM фирмы “Sunds-Defibrator”:

I – пропиточная камера; *II* – шнек; *III* – расходный бак пропиточного раствора

в пропиточной камере (поз.5) изменением расхода поступающего пропиточного раствора из расходного бака. Система управления частично выполняет задачу управления степенью пропитки щепы, так как здесь в зависимости от влажности или плотности исходной щепы автоматически изменяется концентрация химикатов в пропиточном растворе. При уменьшении влажности или плотности щепы уровень в пропиточной камере снижается вследствие увеличивающейся адсорбирующей способности древесной щепы. Это вызывает увеличение расхода пропиточного раствора, но меньшей концентрации, вследствие наличия АСР уровня в пропиточной

камере и расходном баке пропиточного раствора. Однако эффективность этой системы автоматического управления может быть обеспечена лишь при небольшом объеме пропиточной камеры, где изменения уровня существенны при изменении физических свойств древесной щепы.

Экспериментальная динамическая модель устройства термогидролитической обработки щепы

Системой автоматизации предварительной обработки щепы, предложенной фирмой «Sunds Defibrator» для производства ХТММ на ОАО «Волга» (бывший Балахнинский ЦБК) предусмотрена автоматическая система управления температурой в устройстве термогидролитической обработки при измерении температуры в нижней его части. Эта система на производстве в автоматическом режиме не работает, а работает только в режиме дистанционного управления.

Для выяснения причин неработоспособности этой автоматической системы управления были проведены активные экспериментальные исследования на устройстве термогидролитической обработки щепы с помощью системы «Damatic XD», установленной в цехе ХТММ на комбинате.

Было получено несколько временных разгонных характеристик по каналу: степень открытия клапана на паропроводе в устройство – температура внутри устройства. Методом площадей (Симою) были обработаны эти характеристики и определена по средним результатам передаточная функция по этому каналу, имеющая следующий вид:

$$W_1(p) = \frac{0,32 \cdot e^{-32p} \text{ }^{\circ}\text{C}}{112p + 1}, \frac{\%}{\%}.$$

Одновременно было получено несколько временных разгонных характеристик по каналу: степень открытия клапана на паропроводе в устройство – температура в вентиляционной трубе на выходе из устройства.

Аналогичным образом была определена передаточная функция по этому каналу. Она имеет следующее выражение:

$$W_2(p) = \frac{0,35 \cdot e^{-17p} \text{ }^{\circ}\text{C}}{83p + 1}, \frac{\%}{\%}.$$

Оценивая численно эти передаточные функции, можно сделать вывод, что показатели инерционности первого канала значительно превышают

аналогичные показатели второго канала (постоянная времени больше в 1,35, а запаздывание в 1,9 раза).

Суммарная эквивалентная инерционность первого канала составляет 6 минут, что составляет 0,4-0,6 от времени нахождения щепы в термогидролитическом устройстве. Этим и объясняется неработоспособность системы автоматического управления температурой в устройстве.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что более целесообразным является автоматическое управление температурой в термогидролитическом устройстве при измерении ее в вентиляционной трубе на выходе из устройства [6].

Технология, оборудование и автоматизация пропарки и пропитки щепы в производстве ХТММ фирмы «Metso» на ЗАО «International Paper»

Промытая и обезвоженная щепа после обезвоживающего шнека через желоб поступает в бункер пропарки щепы (1), в котором происходит удаление воздуха из щепы и нагрев до температуры, оптимальной для осуществления её пропитки химикатами (рис. 15).

Уровень щепы в бункере (рис.16) управляется регулирующим контуром и поддерживается в пределах 75-85 %. Пропарка щепы осуществляется в бункере пропарки щепы вторичным паром давлением 0,15 МПа. Осуществляется регулирование расхода пара. В случае недостатка пара предусмотрена подпитка от магистрали вторичного пара давлением 0,2 МПа, в период пуска – от основной магистрали пара низкого давления 0,5 МПа. Нижний кольцевой трубопровод обеспечивает пропарку щепы от периферии к центру, а центральная труба от центра к периферии. Такая схема позволяет равномерно пропаривать щепу в донной части бункера.

Температура щепы в нижней части бункера поддерживается регулятором на уровне 90 °С. Пропаренная щепа выгружается из бункера разгрузочным устройством 2 и разгрузочным шнеком 3. Скорость вращения шнека соответствует производительности производственного потока. Время пропарки щепы составляет 20-30 минут.

Обработка щепы паром обеспечивает вытеснение воздуха из капиллярной системы древесной щепы, набухание древесины приводит к переходу части лигнина и гемицеллюлоз в легкорастворимую форму, таким образом, происходит подготовка древесины к воздействию химических реагентов.

Подготовленная таким образом щепа влажностью 65 % из бункера пропарки с помощью разгрузочного устройства разгрузочным шнеком подается в желоб подачи уплотняющего шнека 5 пропиточной колонны 6.

Паровоздушная смесь из бункера щепы выводится в атмосферу.

Уплотняющий шнек предназначен для уплотнения щепы в пробку на

входе в пропиточную колонну. Для формирования плотной пробки щепы в расщепляющей трубе и предотвращения потери жидкости в пропиточной колонне уплотняющий шнек оснащен пневматическим устройством для создания противодавления.

Сжатие щепы в уплотняющем шнеке необходимо для удаления избыточной поверхностной влаги и воздуха до подачи древесины непосредственно на размол или на пропитку. В случае пропитки после сжатия улучшается процесс абсорбции, обеспечивая ее равномерность и таким образом сокращается расход тепловой энергии при термогидролитической обработке щепы.

Пневматическое устройство для создания противодавления состоит из пневматического цилиндра с поршнем, на конце которого закреплен конус. При действии пневматического устройства происходит отжим и удаление из щепы через перфорацию уплотняющей горловины воды, в которой содержатся растворенные вещества, опилки. Давление сжатого воздуха на пневматический цилиндр составляет 0,18-0,25 МПа.

Для смыва опилок в дренажный кожух уплотняющего шнека насосом из бака оборотной воды подается светлый фильтрат.

Если плотная масса не сформирована, то устройство для создания противодавления автоматически давит конусом вперед и занимает то место в уплотняющей горловине шнека, которое не позволяет уходить воде и химикатам из колонны через шнек питателя.

Уплотняющий шнек подает щепу влажностью 50 % в нижнюю часть пропиточной колонны, где она пропитывается смесью растворов химикатов (сульфит натрия – Na_2SO_3 , едкий натр (каустическая сода) – $NaOH$, хелатный реагент «Диссольвин Д-40-К») и горячей воды.

Пропиточная колонна IPA-880 предназначена для пропитки щепы химическими реагентами для получения размягчения, сульфирования лигнина при действии сульфита натрия, набухания волокон при воздействии едкого натра. Пропитка способствует легкому разделению и расслаиванию волокон в процессе размола щепы на рафинерах. Равномерная обработка раствором химикатов обеспечивает минимальное содержание костры в массе.

Пропиточная колонна состоит из двух вертикальных шнеков с лопастями, приводящимися в синхронное движение от двух электродвигателей. Шнеки двухстороннего вращения пропиточной колонны поднимают щепу вверх, сквозь воду или раствор химикатов. Вращение шнеков контролируется датчиками скорости.

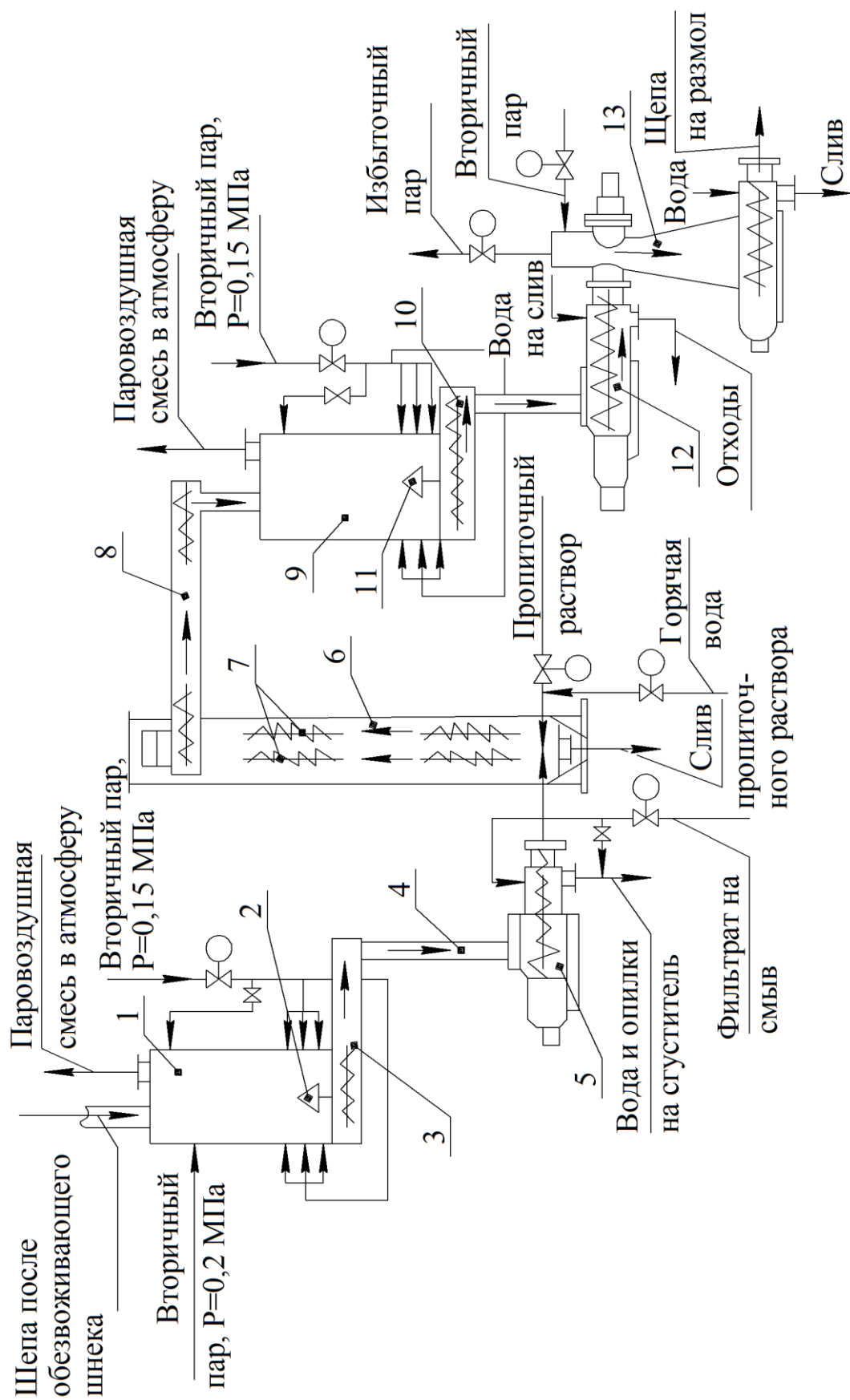


Рис. 15. Технологическая схема пропарки и пропитки щепы в производстве ХТММ на ЗАО «International Paper»



Рис. 16. Бункер пропарки щепы

Растворы химикатов поступают со склада химикатов в систему статических смесителей.

Раствор сульфита натрия с концентрацией 10 % и раствор едкого натра с концентрацией 20 % подаются на статический смеситель. В смесителе происходит смешение химикатов с последующей подачей их к второму статическому смесителю, в который насосом подается 40-процентный раствор хелатного реагента "Диссольвин Д-40-К". Готовый пропиточный раствор от второго смесителя подается в пропиточную колонну.

Пропиточный раствор имеет температуру 30 – 35 °С. Пропитка осуществляется при атмосферном давлении в течение 1-2 минут.

Скорость вращения вертикальных шнеков колонны составляет 25 об/мин. Производится измерение нагрузки вертикальных шнеков пропиточной колонны. Пропитанная щепа через разгрузочный короб падает на разгрузочный шнек 8. Разгрузочный шнек направляет щепу в бункер окончательной пропарки щепы 9. Пропиточный раствор стекает в нижнюю часть колонны. Время выдерживания щепы в растворе химикатов и,

соответственно, степень пропитки обеспечивается контуром регулирования уровня, который автоматически поддерживается добавлением воды для компенсации унесенной в щепе жидкости. Заданное значение уровня соответствует 30 %. При верхнем уровне 80 % срабатывает аварийная сигнализация.

Заданное значение расхода воды составляет 350 л/мин.

Бункер окончательной пропарки щепы предназначен для выдержки пропитанной химикатами щепы при температуре 90 °С. Щепы на входе в разгрузочный шнек 10 имеет влажность 50 %. При достижении предельного значения уровня 85 % подача щепы в бункер прекращается.

В бункере окончательной пропарки щепы выдерживается в течение 20-30 минут при температуре 50 ÷ 70 °С. В бункер подогрева щепы предусмотрена подача вторичного пара от размолы щепы давлением 0,15 МПа при помощи регулятора расхода пара, в период пуска – от основной магистрали пара низкого давления 0,5 МПа. Время выдержки щепы, то есть степень ее прогрева, регулируется путем изменения уровня щепы в бункере. Установлены регуляторы давления для обеспечения давления в паропроводе к бункеру пропарки щепы.

Нижний кольцевой трубопровод обеспечивает пропарку щепы от периферии к центру, а центральная труба от центра к периферии. Такая схема позволяет равномерно подогревать щепу по мере ее продвижения.

Температура щепы в нижней части бункера поддерживается регулятором на уровне 75 – 85°С. Соотношение расходов пара в центральную трубу и в нижний кольцевой трубопровод устанавливается ручными клапанами.

Паровоздушная смесь из бункера окончательной пропарки щепы, выводится в атмосферу. Уровень щепы в бункере управляется САУ (поз.4) (рис. 17).

На САУ скоростью разгружающего шнека бункера предварительной пропарки перед промывкой поступает коррекция задания с выходов САУ скоростью разгружающего шнека (поз.3) и САУ уровня рассматриваемого бункера пропарки.

Управление расходом пара осуществляется соответствующей САУ (поз.1).

Температура щепы в нижней части бункера управляется САУ (поз.2) на уровне 90 °С. Пропаренная щепа выгружается из бункера разгрузочным устройством и разгрузочным шнеком. Скорость вращения шнека соответствует производительности производственного потока. На САУ расходом пара поступает задание с выхода САУ температурой.

Паровоздушная смесь (выпар) из бункера пропарки через вентиляционную трубу выводится в атмосферу. Температура паровоздушной смеси (выпара) контролируется АСК (поз.5).

Из бункера окончательной пропарки щепы, который снабжен двухлопастным разгрузочным устройством с коническим обтекателем 11 для

предотвращения зависания щепы и обеспечения равномерности подачи, щепа поступает на уплотняющий шнек 12 подогревателя щепы 13. В секции прессования уплотняющего шнека происходит выжимание жидкости из щепы; эта волокнодержащая вода отводится к сепаратору отходов. В конической части уплотняющего шнека щепа спрессовывается в пробку плотной массы на выпуске.

Подогреватель щепы, в котором щепа при необходимости нагревается вторичным паром от рафинера первой ступени, является одновременно буфером для равномерной стабильной подачи щепы в рафинер.

Щепа влажностью 50 % подается в верхнюю часть подогревателя. Перемещение щепы осуществляется при атмосферном давлении.

Избыточный пар отводится из верхней части подогревателя щепы через клапан регулятора давления в систему теплорекуперации к скрубберу или к бункерам предварительной пропарки щепы.

Из подогревателя щепа поступает на двухступенчатый размол.

Схема автоматизации пропиточной колонны (ПК) (рис.18) включает следующие САУ и АСК:

САУ уровнем в ПК (поз.7), САУ расходом химикатов (поз.10), САУ скоростью уплотняющего шнека (поз.2), АСК скорости вертикальных шнеков (поз.3,4), АСК активной мощности приводов вертикальных шнеков (поз.5,6), АСК расхода воды и температуры смеси, поступающих в ПК (поз.8,9), АСК активной мощности привода уплотняющего шнека (поз.1).

Уровень в ПК характеризует впитываемость щепы. При ухудшении впитываемости уровень увеличивается, что вызывает уменьшение расхода воды в ПК. В результате увеличивается концентрация поступающих химикатов, что способствует лучшему проникновению химикатов в щепу, т.е. повышению степени пропитки.

На САУ расходом химикатов и САУ скоростью уплотняющего шнека поступают корректирующие сигналы задания с выхода САУ скоростью разгружающего шнека бункера пропарки щепы [10].

Недостатки существующей САУ уровнем в пропиточной колонне ИРА-880

Если щепа мелкая или с малой плотностью, то уровень в ПК уменьшается, так как щепа хорошо впитывает пропиточный раствор. В результате САУ уровнем увеличивает расход воды в ПК. В этом случае увеличивается температура пропитки, увеличивается впитываемость и в большей степени увеличивается расход воды для обеспечения заданного уровня. Но уменьшается концентрация химикатов в растворе и соответственно снижается впитываемость и увеличивается удельный расход энергии при размоле щепы. В этом случае для снижения удельного расхода энергии необходимо уменьшить задание САУ уровнем.

В случае поступления крупной щепы или щепы с большой плотностью уменьшается впитываемость щепы и увеличивается уровень.

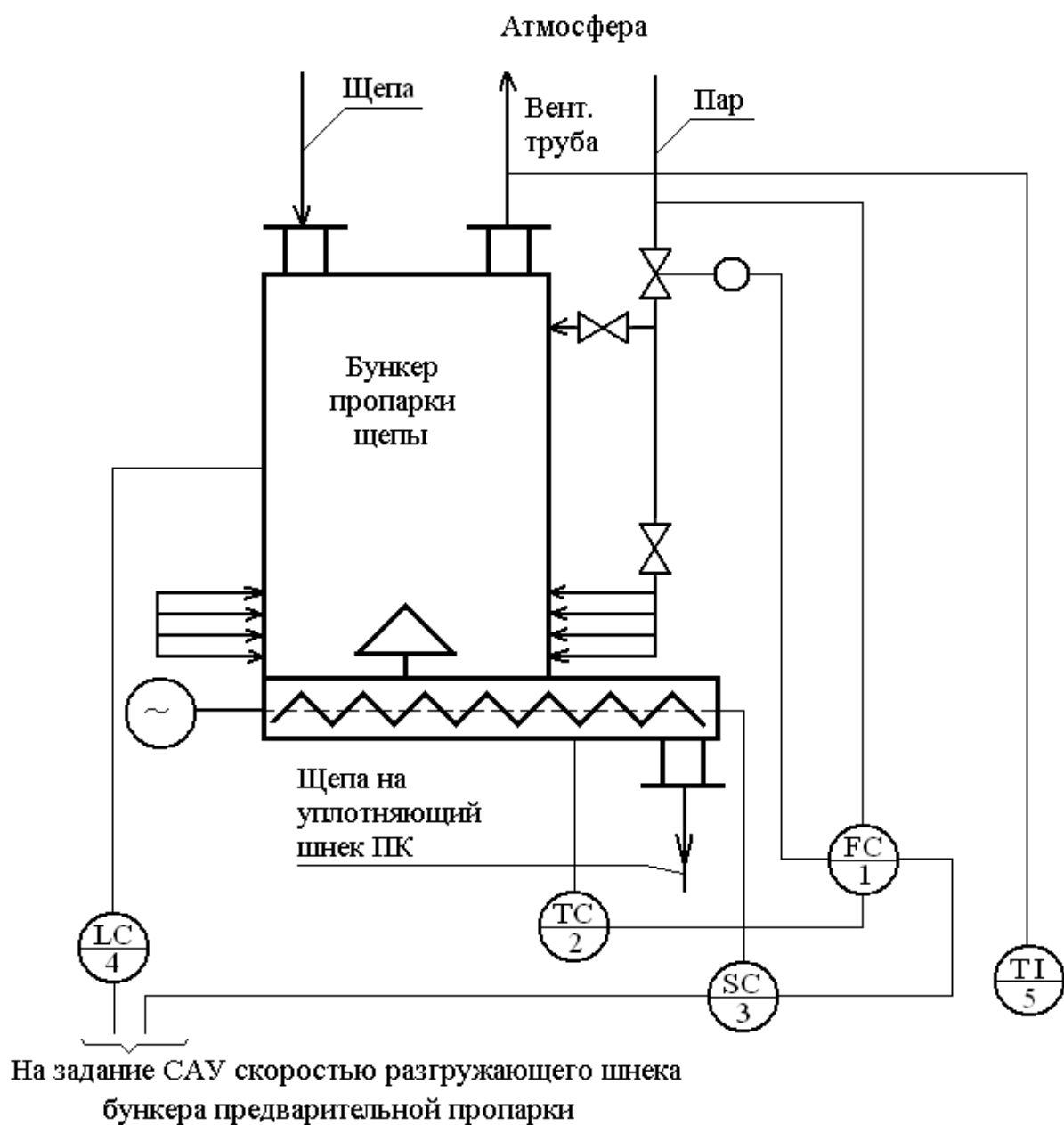


Рис.17. Функциональная схема автоматизации бункера пропарки щепы

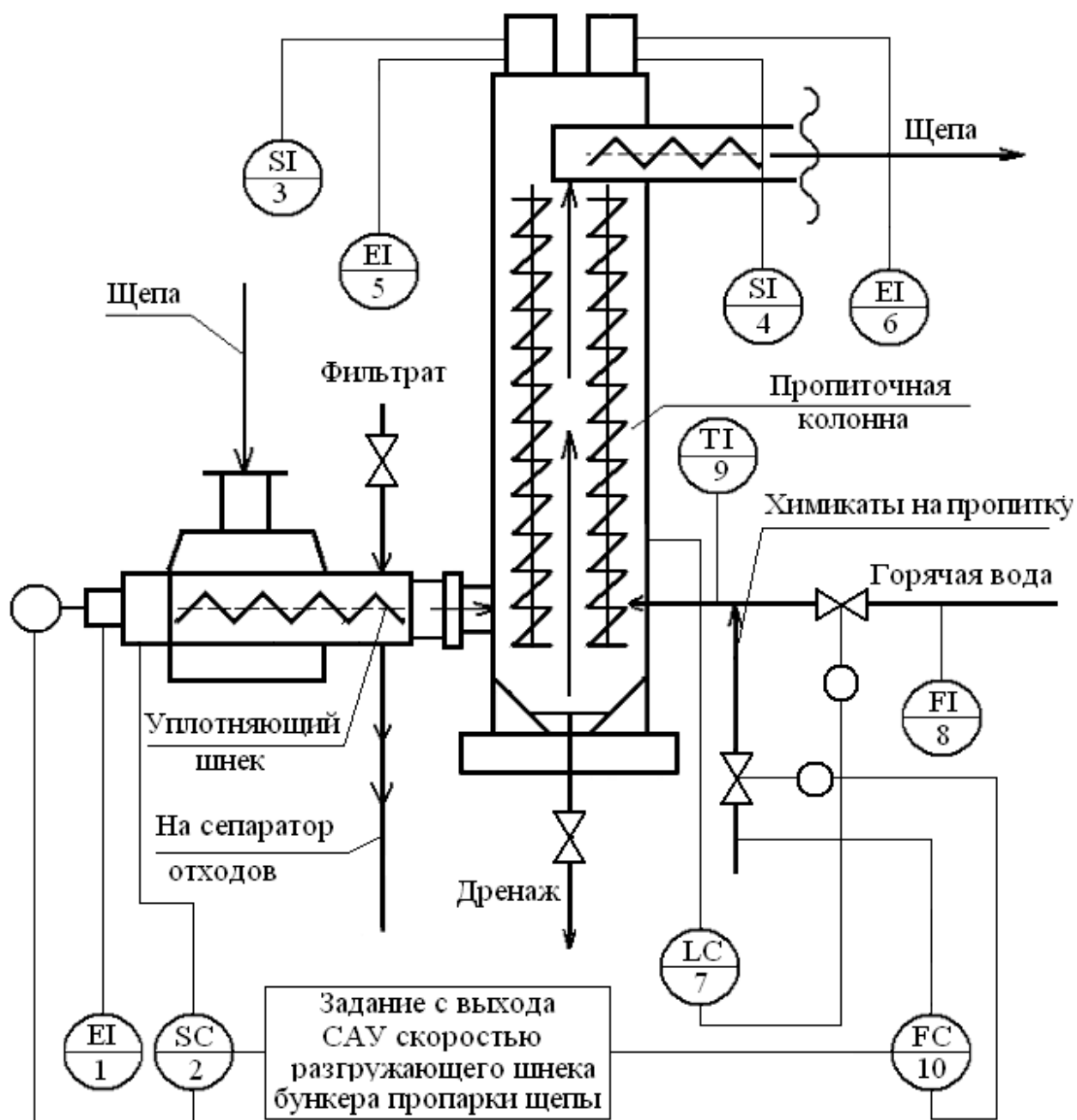


Рис.18.Функциональная схема автоматизации пропиточной колонны с уплотняющим шнеком

САУ уменьшает расход воды в ПК для восстановления уровня.

В результате уменьшается температура пропитки и еще больше уменьшается впитываемость химикатов щепой.

С другой стороны, в этом случае увеличивается концентрация химикатов в пропиточном растворе, но уменьшается время нахождения щепы в растворе. Поэтому уменьшение температуры пропиточного раствора и времени нахождения щепы в растворе может увеличить удельный расход энергии.

Для снижения удельного расхода энергии в этом случае следует увеличить задание САУ уровнем.

Аналитическая математическая модель пропитки щепы в пропиточной колонне IPA-880

Расчетная схема пропиточной колонны представлена на рис. 19.

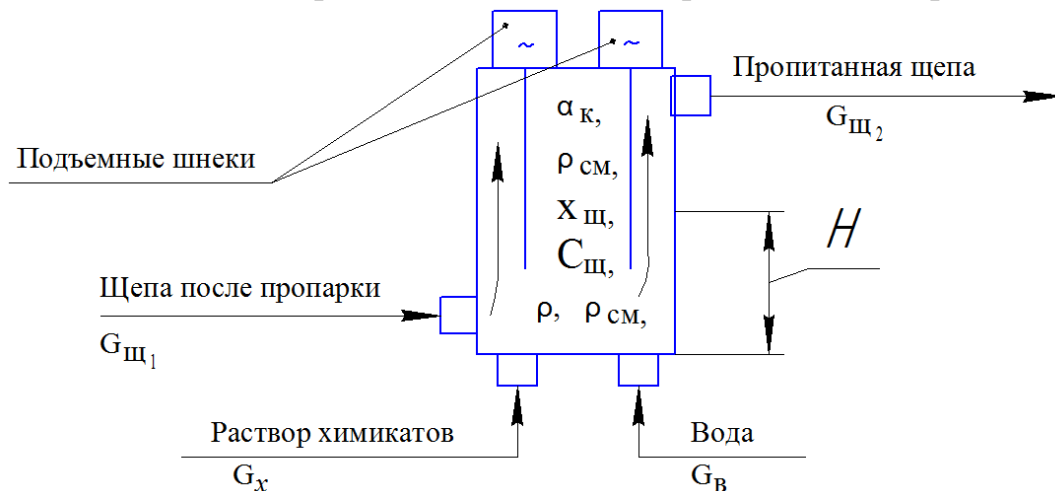


Рис.19. Расчетная схема пропиточной колонны

Уравнение материального баланса пропиточной колонны в приращениях будет:

$$\frac{d\Delta G_k^*}{dt} = \Delta G_{щ1} + \Delta G_x + \Delta G_v - \Delta G_{щ2}, \quad (64)$$

где G_k^* – массовое количество щепы и пропиточного раствора в колонне, кг;

$G_{щ1}$ – расход поступающей щепы, кг/с;

$G_x, G_v, G_{щ2}$ – расходы химиката, воды и уходящей щепы, кг/с.

$$G_{щ2} = G_{щ1} + G_{рвщ}, \quad (65)$$

где $G_{щ1}$ – расход щепы, кг/с;

$G_{рвщ}$ – расход пропиточного раствора, оставшегося в щепе после ее пропитки, кг/с.

$$G_k^* = F_k \cdot H \cdot \alpha_k \cdot \rho_{см}, \quad (66)$$

где F_k – площадь живого сечения колонны (цилиндра), м²;

H – уровень в колонне, м;

α_k – коэффициент, учитывающий объем материала конструкции шнеков, находящихся в растворе в колонне;

$\rho_{см}$ – плотность смеси в колонне (раствор + щепа), кг/м³.

Известно, что

$$\rho_{\text{см}} = \rho(1 - C_{\text{щ}}) + \rho_{\text{щ}} \cdot C_{\text{щ}}, \quad (67)$$

где ρ и $\rho_{\text{щ}}$ – соответственно плотности пропиточного раствора и щепы в колонне, кг/м³;

$C_{\text{щ}}$ – концентрация щепы в колонне.

Подставив выражение (67) в выражением (66), получим:

$$G_k^* = F_k \cdot H \cdot \alpha_k \cdot [\rho(1 - C_{\text{щ}}) + \rho_{\text{щ}} \cdot C_{\text{щ}}] \quad (68)$$

или

$$G_k^* = F_k \cdot H \cdot \alpha_k \cdot [\rho + C_{\text{щ}} \cdot (\rho_{\text{щ}} - \rho)]. \quad (69)$$

Полагая ρ , α_k , $C_{\text{щ}}$ и $F_k - \text{const}$, получаем

$$\Delta G_k^* = F_{k\infty} \cdot \alpha_{k\infty} [\rho_{\infty} + C_{\text{щ}\infty} \cdot (\rho_{\text{щ}\infty} - \rho_{\infty})] \cdot \Delta H. \quad (70)$$

Выражение (65) в приращениях будет:

$$\Delta G_{\text{щ}_2} = \Delta G_{\text{щ}_1} + \Delta G_{\text{рвщ}}. \quad (71)$$

Известно, что

$$G_{\text{рвщ}} = f(H, x_{\text{щ}}), \quad (72)$$

где $x_{\text{щ}}$ – величина, характеризующая свойства щепы (размеры, плотность и др.) и влияющая на впитываемость щепой химического пропиточного раствора.

Уровень также влияет на впитываемость, так как он характеризует длительность нахождения щепы в растворе внутри колонны.

Выражение (72) в приращениях будет:

$$\Delta G_{\text{рвщ}} = \left(\frac{\partial G_{\text{рвщ}}}{\partial H} \right)_{\infty} \cdot \Delta H + \left(\frac{\partial G_{\text{рвщ}}}{\partial x_{\text{щ}}} \right)_{\infty} \cdot \Delta x_{\text{щ}}. \quad (73)$$

После подстановки выражений (66) и (73) в уравнение (64) и после преобразований получим:

$$F_{k\infty} \cdot \alpha_{k\infty} [\rho_{\infty} + C_{\text{щ}\infty} \cdot (\rho_{\text{щ}\infty} - \rho_{\infty})] \cdot \frac{d\Delta H}{dt} + \left(\frac{\partial G_{\text{рвщ}}}{\partial H} \right)_{\infty} \cdot \Delta H = \Delta G_x + \Delta G_B - \left(\frac{\partial G_{\text{рвщ}}}{\partial x_{\text{щ}}} \right)_{\infty} \cdot \Delta x_{\text{щ}}. \quad (74)$$

Известно, что

$$\Delta G_x = \left(\frac{\partial G_x}{\partial m_x} \right)_{\infty} \cdot \Delta m_x, \quad (75)$$

и

$$\Delta G_B = \left(\frac{\partial G_B}{\partial m_B} \right)_{\infty} \cdot \Delta m_B, \quad (76)$$

где m_x и m_B – соответственно степени открытия регулирующих клапанов на трубопроводах химиката и воды, поступающих в колонну, %.

Подставляем выражения (75) и (76) в выражение (74) и делим все слагаемые на $\left(\frac{\partial G_{pвщ}}{\partial H} \right)_{\infty}$.

Окончательно, после преобразований получаем:

$$T_k \frac{d\Delta H}{dt} + \Delta H = k_x \cdot \Delta m_x + k_B \cdot \Delta m_B - k_{x_{щ}} \cdot \Delta x_{щ}, \quad (77)$$

где

$$T_k = \frac{F_{k\infty} \cdot \alpha_{k\infty} [\rho_{\infty} + C_{щ\infty} \cdot (\rho_{щ\infty} - \rho_{\infty})]}{\left(\frac{\partial G_{pвщ}}{\partial H} \right)_{\infty}}, \text{ с};$$

$$k_x = \left(\frac{\partial G_x}{\partial m_x} \right)_{\infty} / \left(\frac{\partial G_{pвщ}}{\partial H} \right)_{\infty}, \frac{\text{м}}{\%};$$

$$k_B = \left(\frac{\partial G_B}{\partial m_B} \right)_{\infty} / \left(\frac{\partial G_{pвщ}}{\partial H} \right)_{\infty}, \frac{\text{м}}{\%};$$

$$k_{x_{щ}} = \left(\frac{\partial G_{pвщ}}{\partial x_{щ}} \right)_{\infty} / \left(\frac{\partial G_{pвщ}}{\partial H} \right)_{\infty}, \frac{\text{м}}{\text{ед. } x_{щ}}.$$

Алгоритмическая схема пропиточной колонны представлена на рис. 20 , где $W_1(P)$, $W_2(P)$, $W_3(P)$ – передаточные функции пропиточной колонны по соответствующим каналам.

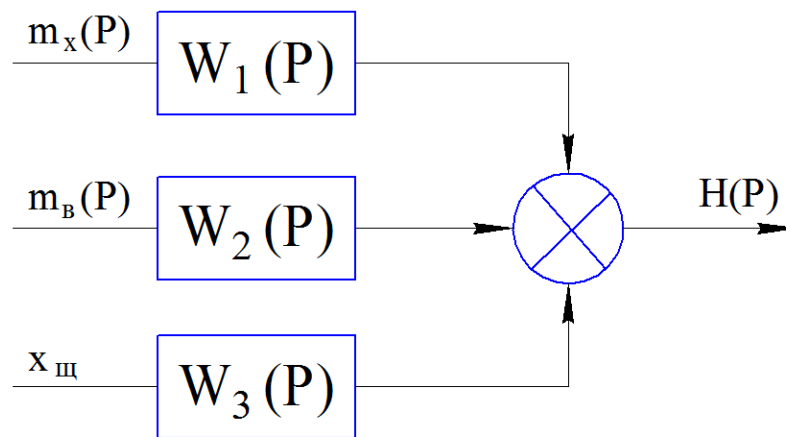


Рис.20. Алгоритмическая схема пропиточной колонны.

Экспериментальная динамическая модель пропарки щепы в производстве ХТММ

Как было указано выше, промытая и обезвоженная щепа поступает в пропарочный бункер. В нижнюю часть бункера подается свежий пар.

Пропарка щепы – один из важнейших этапов подготовки щепы для последующего размола. Плохо пропаренная щепа имеет более твердую структуру и это способствует дополнительному энергопотреблению при ее размоле.

На рис. 21 представлена алгоритмическая схема пропарочного бункера,

где $\theta_{щ}(p)$ – температура поступающей щепы, °С;

$P_n(p)$ – давление пара, кПа;

$G_n(p)$ – расход пара, т/ч;

$G_{щ}(p)$ – расход щепы, т/ч;

$G_{вып}(p)$ – расход пара через выпар, т/ч,

$W_{об_1}(p), W_{об_2}(p), W_{об_3}(p), W_{об_4}(p), W_{об_5}(p)$ – передаточные функции пропарочного бункера по соответствующим каналам.

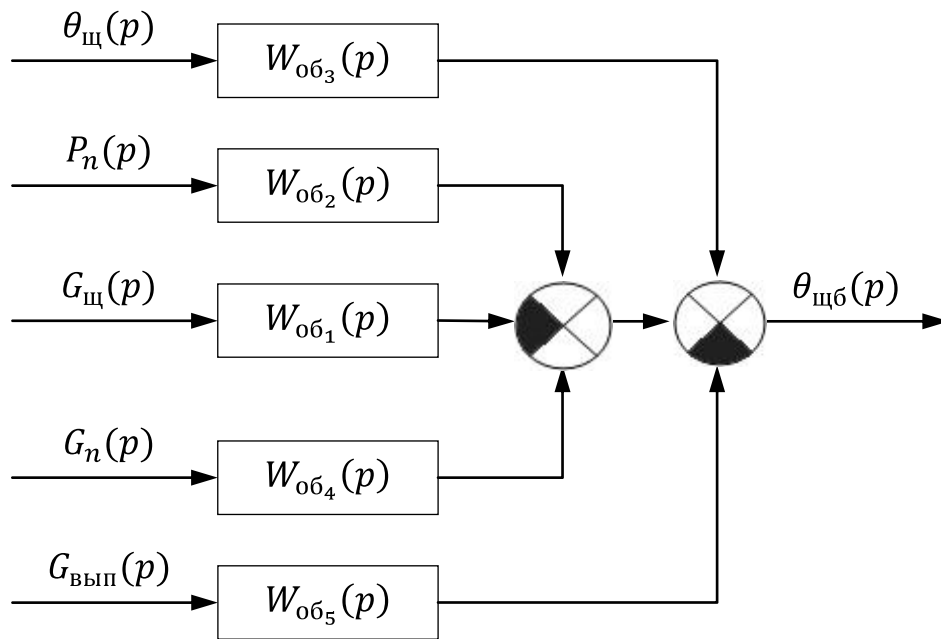


Рис. 21. Алгоритмическая схема пропарочного бункера

Для получения передаточной функции пропарочного бункера по каналу: положение клапана на подаче пара в бункер $m_n(p)$ – температура щепы в нижней части бункера $\theta_{шб}(p)$ была получена временная импульсная характеристика по температуре при подаче импульса по положению клапана (рис. 22), причем $G_n = f(m_n)$.

Положение клапана на начало эксперимента – 57 %.

Положение клапана в импульсе – 11 %.

Положение клапана на конец эксперимента – 57 %.

Температура щепы на начало эксперимента – 88,6 °С.

Минимальная температура щепы в ходе эксперимента – 82,3 °С.

Температура щепы на конец эксперимента – 88,6 °С.

После обработки результатов активного эксперимента получена следующая передаточная функция пропарочного бункера

$$W_{об}(p) = \frac{0,132 \cdot e^{-182p}}{259 \cdot p + 1}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\%}.$$

Аналитическая математическая модель пропарки щепы в производстве ХТММ

Уравнение теплового баланса пропарочного бункера (рис. 23) перед пропиточной колонной в отклонениях от состояния равновесия будет следующим:

$$\frac{d\Delta Q^*}{dt} = \Delta Q_{ш}^{BX} + \Delta Q_n - \Delta Q_{пвс} - \Delta Q_{ш}^{BYX}, \quad (78)$$

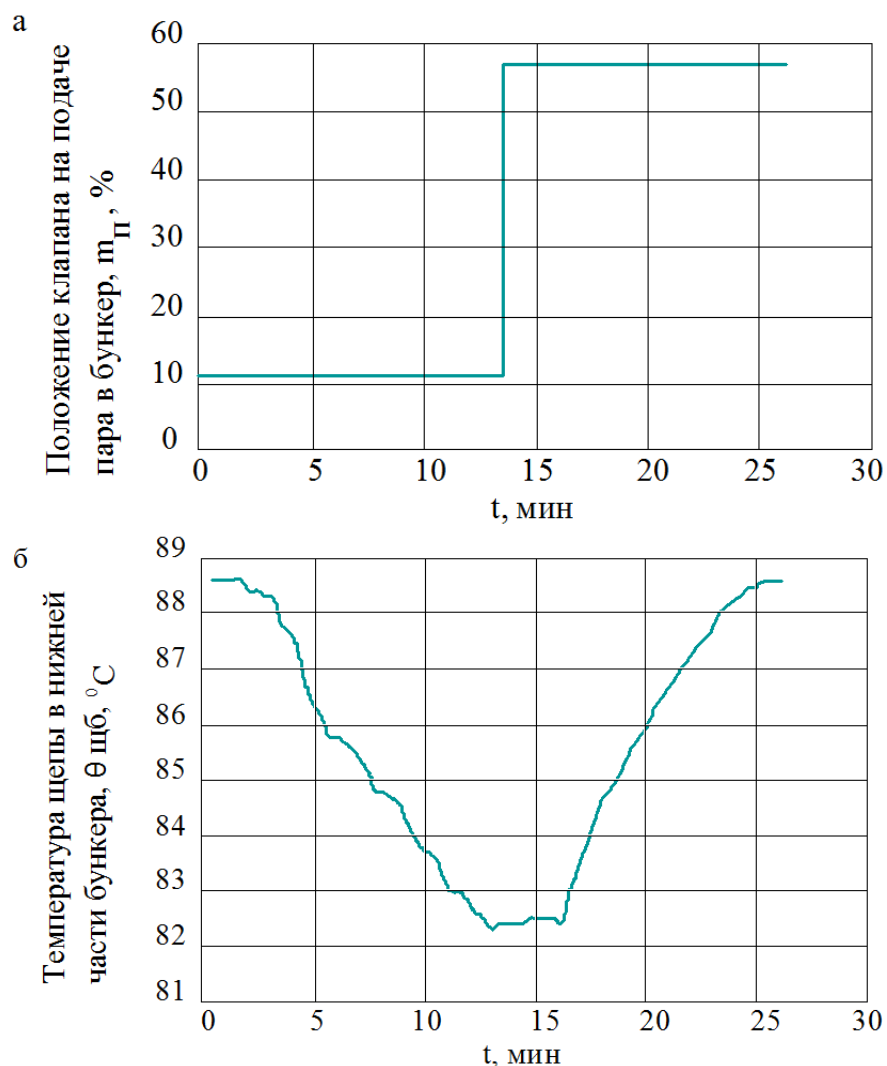


Рис. 22. Графические зависимости при активном эксперименте в пропарочном бункере: а – изменение положения клапана на подаче пара, б – изменение температуры щепы в нижней части бункера

где Q^* – количество тепла в щепе внутри бункера, кДж;

$Q_{щ}^{ВХ}, Q_n, Q_{пвс}, Q_{щ}^{ВЫХ}$ – расходы тепла соответственно с поступающей щепой, с вторичным паром, с уходящей из бункера паровоздушной смесью и с уходящей щепой, кДж/с.

$$Q^* = V_p \cdot \rho_{щ}^{ВЫХ} \cdot C_{щ}^{ВЫХ} \cdot \theta_{щ}^{ВЫХ}, \quad (79)$$

где V_p – объем бункера, заполненной щепой, м³;

$\rho_{щ}^{ВЫХ}$ – плотность пропаренной щепы, кг/м³;

$C_{щ}^{ВЫХ}$ – теплоемкость пропаренной щепы, кДж/ кг°С

$\theta_{щ}^{ВЫХ}$ – температура щепы в нижней части бункера, °С.

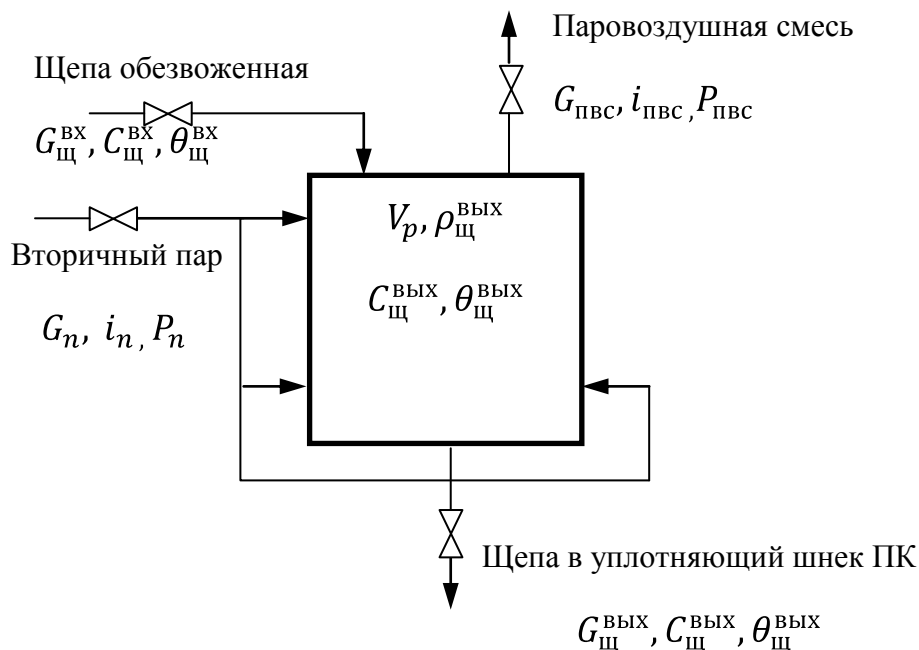


Рис. 23. Расчетная схема пропарочного бункера

$$\rho_{щ}^{ВЫХ} = \rho_{др} \cdot \beta_{щ} + \rho_v \cdot (1 - \beta_{щ}), \quad (80)$$

где $\beta_{щ}$ – сухость щепы в бункере;

$\rho_{др}, \rho_v$ – плотности древесинного вещества (ели или осины) без воздуха и воды соответственно, кг/м³;

$$C_{щ}^{ВЫХ} = C_{др} \cdot \beta_{щ} + C_v (1 - \beta_{щ}), \quad (81)$$

где $C_{др}, C_v$ – теплоемкости древесинного вещества (ели или осины) без воздуха и воды соответственно, кДж/ кг°С.

Полагая $V_p, \rho_{щ}^{ВЫХ}$ и $C_{щ}^{ВЫХ}$ постоянными, получим:

$$\Delta Q^* = V_p \cdot \rho_{щ}^{ВЫХ} \cdot C_{щ}^{ВЫХ} \cdot \Delta \theta_{щ}^{ВЫХ}, \quad (82)$$

$$Q_n = G_n \cdot i_n, \quad (83)$$

где G_n – расход пара, кг/с;

i_n – энтальпия пара, кДж/кг.

Известно, что

$$i_n = f(P_n), \quad (84)$$

где P_n – давление вторичного пара, МПа.

$$\Delta Q_n = i_{n \infty} \cdot \Delta G_n + G_{n \infty} \cdot \left(\frac{\partial i_n}{\partial P_n} \right) \Delta P_n. \quad (85)$$

$$Q_{\text{ПВС}} = G_{\text{ПВС}} \cdot i_{\text{ПВС}}, \quad (86)$$

где $G_{\text{ПВС}}$ – расход паровоздушной смеси в вентиляцию, кг/с;
 $i_{\text{ПВС}}$ – энтальпия паровоздушной смеси, кДж/кг.

Полагая $i_{\text{ПВС}} = \text{const}$, получим

$$\Delta Q_{\text{ПВС}} = i_{\text{ПВС} \infty} \cdot \Delta G_{\text{ПВС}}. \quad (87)$$

$$Q_{\text{Щ}}^{\text{ВХ}} = G_{\text{Щ}}^{\text{ВХ}} \cdot C_{\text{Щ}}^{\text{ВХ}} \cdot \theta_{\text{Щ}}^{\text{ВХ}}, \quad (88)$$

где $G_{\text{Щ}}^{\text{ВХ}}$ – расход воздушно-сухой щепы после обезвоживающего шнека, кг/с;

$C_{\text{Щ}}^{\text{ВХ}}$ – теплоемкость воздушно-сухой щепы, поступающей в бункер, кДж/кг $^{\circ}\text{C}$;

$\theta_{\text{Щ}}^{\text{ВХ}}$ – температура воздушно-сухой щепы, поступающей в бункер, $^{\circ}\text{C}$.

Полагая $C_{\text{Щ}}^{\text{ВХ}} = \text{const}$,

$$\Delta Q_{\text{Щ}}^{\text{ВХ}} = G_{\text{Щ} \infty}^{\text{ВХ}} \cdot C_{\text{Щ} \infty}^{\text{ВХ}} \cdot \Delta \theta_{\text{Щ} \infty}^{\text{ВХ}} + C_{\text{Щ} \infty}^{\text{ВХ}} \cdot \theta_{\text{Щ} \infty}^{\text{ВХ}} \cdot \Delta G_{\text{Щ} \infty}^{\text{ВХ}}. \quad (89)$$

Известно, что

$$Q_{\text{Щ}}^{\text{ВЫХ}} = G_{\text{Щ}}^{\text{ВЫХ}} \cdot C_{\text{Щ}}^{\text{ВЫХ}} \cdot \theta_{\text{Щ}}^{\text{ВЫХ}}, \quad (90)$$

где $G_{\text{Щ}}^{\text{ВЫХ}}$ – расход пропаренной и увлажненной конденсатом щепы из бункера в уплотняющий шнек пропиточной колонны, кг/с.

$$\Delta Q_{\text{Щ}}^{\text{ВЫХ}} = G_{\text{Щ} \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot C_{\text{Щ} \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot \Delta \theta_{\text{Щ} \infty}^{\text{ВЫХ}} + C_{\text{Щ} \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot \theta_{\text{Щ} \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot \Delta G_{\text{Щ} \infty}^{\text{ВЫХ}}. \quad (91)$$

Уравнение материального баланса пропарочного бункера будет следующим

$$G_{\text{Щ}}^{\text{ВЫХ}} = G_{\text{Щ}}^{\text{ВХ}} + G_n - G_{\text{ПВС}}. \quad (92)$$

Следовательно,

$$\Delta G_{\text{Щ}}^{\text{ВЫХ}} = \Delta G_{\text{Щ}}^{\text{ВХ}} + \Delta G_n - \Delta G_{\text{ПВС}}. \quad (93)$$

Подставив выражение (93) в выражение (91), получим:

$$\Delta Q_{\text{щ}}^{\text{ВЫХ}} = G_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot C_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot \Delta \theta_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}} + C_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot \theta_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}} (\Delta G_{\text{щ}}^{\text{ВХ}} + \Delta G_n - \Delta G_{\text{ПВС}}). \quad (94)$$

Подставляем выражения (82), (85), (87), (89) и (94) в уравнение (78) и после преобразований получаем уравнение математической модели в следующем виде:

$$T_{\theta} \frac{d\Delta \theta_{\text{щ}}^{\text{ВЫХ}}}{dt} + \Delta \theta_{\text{щ}}^{\text{ВЫХ}} = k_{\theta_{\text{щ}}^{\text{ВХ}}} \cdot \Delta \theta_{\text{щ}}^{\text{ВХ}} - k_{G_{\text{щ}}^{\text{ВХ}}} \cdot \Delta G_{\text{щ}}^{\text{ВХ}} + k_{G_n} \cdot \Delta G_n - k_{G_{\text{ПВС}}} \cdot \Delta G_{\text{ПВС}} + k_{P_n} \cdot \Delta P_n, \quad (95)$$

$$\text{где } T_{\theta} = \frac{V_p \cdot \rho_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}}}{G_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}}}, \text{ с;}$$

$$k_{\theta_{\text{щ}}^{\text{ВХ}}} = \frac{G_{\text{щ } \infty}^{\text{ВХ}} \cdot C_{\text{щ } \infty}^{\text{ВХ}}}{G_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot C_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}}};$$

$$k_{G_{\text{щ}}^{\text{ВХ}}} = \frac{C_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot \theta_{\text{щ}}^{\text{ВЫХ}} - C_{\text{щ } \infty}^{\text{ВХ}} \cdot \theta_{\text{щ } \infty}^{\text{ВХ}}}{G_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot C_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}}}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{кг/с}};$$

$$k_{G_n} = \frac{i_{n \infty} - C_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot \theta_{\text{щ}}^{\text{ВХ}}}{G_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot C_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}}}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{кг/с}};$$

$$k_{G_{\text{ПВС}}} = \frac{i_{\text{ПВС } \infty} - C_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot \theta_{\text{щ}}^{\text{ВХ}}}{G_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot C_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}}}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{кг/с}};$$

$$k_{P_n} = \frac{G_{n \infty} \left(\frac{\partial i_n}{\partial P_n} \right)_{\infty}}{G_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}} \cdot C_{\text{щ } \infty}^{\text{ВЫХ}}}, \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{МПа}}.$$

Библиографический список

1. Воронова В.В., Смирнов М.Н., Солдатов Н.А. Влияние некоторых факторов на эффективность пропитки осиновой щепы // Целлюлоза, бумага и картон: научно-техн. реф. сб./ ВНИПИЭИлеспром – М., 1982. – С. 9.
2. Буйлов Г.П., Волков А.М., Стефановский С.В. и др. Экспериментальные статические характеристики процесса пропитки осиновой щепы на Сясьском ЦБК в производстве облицовочного картона марок А и Б // Химия и технология бумаги: межвуз. сб. науч. тр. / ЛТА. – Л., 1988. – С. 131–133.
3. Буйлов Г.П., Кудряшова Н.Ю., Стефановский С.В. и др. Экспериментальное определение математической модели пропиточного котла для осиновой щепы Сясьского ЦБК по различным каналам управления в производстве картона марок А и Б // Химия и технология целлюлозы и полуцеллюлозы: межвуз. сб. науч. тр. / ЛТА. – Л., 1989. – С. 57–59.
4. Буйлов Г.П., Стефановский С.В., Криман Б.И. и др. Способ автоматического управления обработкой древесной щепы в пропиточном аппарате. А.с. СССР №1501008, G05D27/00, D21C7/06. Оpubл. 15.08.89, БИ. №30.

5. Пузырев С.С. Древесное сырье – определяющий фактор качества механической массы: реферативная информация /ЦИНТИхимнефтемаш – М., 1990.
6. Буйлов Г.П., Буйлова Л.И. Экспериментальные исследования узла термогидролитической обработки щепы после импрегнатора в производстве ХТММ. // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: межвуз. сб. науч. тр. / ЛТИ ЦБП. – Л., 1991. – С. 117–118.
7. Буйлов Г.П., Доронин В.А., Серебряков Н.П. Автоматика и автоматизация производственных процессов целлюлозно-бумажных производств: учеб. пособие для вузов. – М.: Экология, 1995. – 320 с.
8. Чуева Ю.В., Буйлов Г.П. Применение регрессионной математической модели для оценки пропитки осиновой щепы в производстве ХММ на ОАО «Сясьский ЦБК» // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: межвуз. сб. науч. тр. / СПб ГТУРП. – СПб., 2008. – С. 119–123.
9. Буйлов Г.П., Орлова Ю.В. Повышение эффективности пропитки химикатами осиновой щепы в производстве ХРММ на ОАО «Сясьский ЦБК» // Целлюлоза. Бумага. Картон, 2011. №9. С. 56–58.
10. Суриков В.Н., Буйлов Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств: учеб.–метод. пособие. – СПб.: СПб ГТУРП, 2011. Ч. 1.–77 с.
11. Буйлов Г.П., Галенин А.А. Непрерывный алгоритм повышения эффективности пропитки химикатами осиновой щепы в производстве ХРММ на ОАО «Сясьский ЦБК». // Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства: межвуз. сб. науч. тр. / СПб ГТУРП. – СПб., 2013. – С. 13–18.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Математические модели пропитки щепы в производстве ХРММ.....	4
2. Использование математических моделей пропитки щепы в производстве ХРММ для целей управления.....	33
3. Алгоритмы оптимизации пропитки осиновой щепы в пропиточном котле «Bauer M&D» на ОАО «Сясьский ЦБК».....	40
4. Математические модели пропарки и пропитки щепы в производстве ХТММ.....	49
Библиографический список.....	69