

7. *Beerkens R. G.* Modeling of the melting process in industrial glass furnaces / R. G. Beerkens // *Mathematical Simulation in Glass Technology* / eds. D. Krause and H. Loch. – Berlin : Springer, 2002. – P. 17-72.
8. *Choudhary M. K.* Heat transfer in glass-forming melts / M. K. Choudhary, R. M. Potter // *Properties of Glass Forming Melts* / eds. L. D. Pye, A. Montenero and I. Joseph. – Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2005. – P. 249-293.
9. *Kuhn W. S.* Mathematical modeling of batch melting in glass tanks / W. S. Kuhn // *Mathematical Simulation in Glass Technology* / eds. D. Krause and H. Loch. – Berlin : Springer, 2002. – P. 73-125.
10. *Choudhary M. K.* Three-dimensional mathematical model for flow and heat transfer in electric glass furnaces / M. K. Choudhary // *Heat Transfer Eng.* – 1985. – 6. – P. 55-65.
11. *Prokhorenko O.* Radiative thermal conductivity of melts / O. Prokhorenko // *High Temperature Glass Melt Property Database for Process Modeling* / eds. T. P. Seward, T. Vascott. – Westerville, OH, USA : American Ceramic Society, 2005. – P. 95-117.
12. An investigation of batch charging for a crown fired oxyfuel furnace / B. Purnode, B. Golchert, D. Bessette et al. // *Proc. of the 8th ESG Conference, Sunderland, UK, 2006.*
13. *Abbassi A.* Numerical simulation and experimental analysis of an industrial glass melting furnace / A. Abbassi, Kh. Khoshmanesh // *Appl. Thermal Eng.* – 2008. – 28 [5–6]. – P. 450-459.
14. Validation of Advanced Models for Glass Melting Furnaces / J. Wang, B. S. Brewster, M. Q. Mcquay, B. W. Webb // *A Collection of Papers Presented at the 60th Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings.* – 1999. – 21 [1].
15. *Bird R. B.* Transport Phenomena / R. B. Bird, W. E. Stewart, E. N. Lightfoot. – N.-Y. : Wiley, 2007.

УДК 676.056.521.1

ЖУЧЕНКО А. И., д.т.н., проф.; ЧЕРЁПКИН Е. С., асс.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

## РАСЧЁТ ПРОГРЕВА БУМАЖНОГО ПОЛОТНА

*Рассмотрен вопрос создания оптимального температурного графика прогрева бумажного полотна. Особое внимание уделено показателям качества бумажного полотна и влиянию на них интенсивности нагрева. Разработан алгоритм расчёта оптимального температурного графика, который обеспечивает максимально быстрый прогрев полотна при соблюдении ограничений на качественные показатели.*

**Ключевые слова:** производство бумаги, температурный график прогрева, параметры качества, оптимальное управление.

© Жученко А. И., Черёпкин Е. С., 2014.

**Постановка проблемы.** Влажное бумажное полотно после прессования поступает в сушильную часть бумагоделательной машины (БДМ), основное назначение которой заключается в испарении влаги из материала до конечной относительной влажности 5...8 % [1].

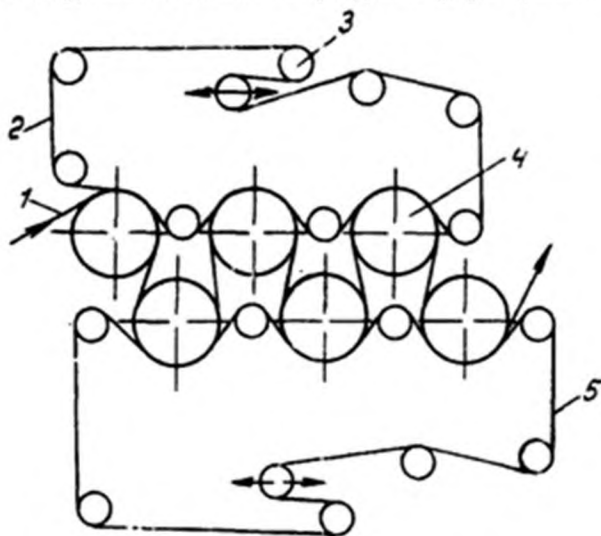
Сушка является энергоёмким процессом. Сушильная часть БДМ потребляет примерно 30...43 % всей энергии, расходуемой для испарения примерно 1,5 % всей влаги (1,5...2,5 кг воды с 1 кг бумаги), подлежащей удалению из бумажного полотна на всей (БДМ) [2].

Сушильная часть бумагоделательной машины состоит из 10...80 цилиндров диаметром 1500...1800 мм. Они располагаются в шахматном порядке в два яруса (рис. 1) [2]. Бумажное полотно, охватывая каждый из них по дуге 225...235°, попеременно соприкасаясь то одной, то другой стороной с нагретой поверхностью, нагревается, и из него удаляется влага. Между сушильными цилиндрами полотно проходит по участку свободного хода, где удаление влаги осуществляется за счёт её нагрева на сушильном цилиндре. Такой способ сушки называется контактно-конвективным и широко применяется в современных БДМ.

Сушильные цилиндры нагревают перегретым паром, который подают при давлении 0,5...1,0 МПа и температуре 120...165 °С. Из-за потерь при теплообмене между паром и стенкой цилиндра температура его поверхности на 15...20 °С ниже, чем у пара внутри него, бумажного полотна – на 15...30 °С ниже, чем у сушильного цилиндра.

Процесс сушки состоит из нескольких стадий: прогрева материала (повышение температуры бумаги до «рабочего» значения), участка постоянной скорости сушки (удаление основной массы воды из бумажного полотна)

и участка падающей скорости сушки (досушивание бумаги) [2]. Для каждой стадии определяющей является динамика изменения температуры и влажности бумаги, что обусловлено их тесной связью с параметрами качества, другими словами, температурный график сушки.



1 – полотно бумаги; 2 – верхняя сушильная сетка;  
3 – направляющие валики; 4 – сушильный цилиндр;  
5 – нижняя сушильная сетка

**Рис. 1 – Двухрядная схема расположения цилиндров с двумя сушильными сетками (традиционная схема)**

волокон. В связи с этим, возникает необходимость быстрого доведения температуры бумаги до заданного значения (окончания прогрева). Уменьшение времени прогрева бумажного полотна положительно сказывается на последующих этапах сушки, поскольку будет обеспечено плавное удаление основной части влаги, что положительно скажется на однородности и качестве продукта [5, 6, 7]. Но поскольку бумага относится к капиллярно-пористым коллоидным телам, то при резком повышении температуры происходят необратимые процессы разрушения внутренней структуры, что ухудшает качественные показатели, приводит к загрязнению поверхности сушильных цилиндров и снижает КПД сушки.

**Целью** статьи является разработка алгоритма расчёта оптимального температурного графика прогрева, который обеспечит быстрое нагревание бумаги до заданного значения при соблюдении ограничений на качественные показатели конечного продукта.

**Характеристика прогрева бумажного полотна.** Бумага поступает на сушильную часть БДМ с влажностью 55...60 % и температурой 15...25 °С. Температура греющей поверхности может достигать 95...150, температура пара внутри цилиндров – 160...165 °С при избыточном давлении пара 0,5...1,0 МПа. Совокупность температур сушильных цилиндров (и пара внутри них), формирует режим сушки. Он может изменяться в зависимости от особенностей полотна, за счёт чего производительность сушки может быть повышена в 1,3...1,4 раза. В зависимости от вида бумаги и особенностей машины, в конце прогрева температура материала должна составлять от 80 до 120 °С [1].

Изменение температуры при прогреве (рис. 2) происходит в несколько этапов: повышение температуры на сушильном цилиндре (кривая 1–2) и спад при прохождении по участку свободного хода (кривая 2–3).

**Ограничения на изменение температуры бумаги.** Качество готовой бумаги определяется требованиями стандарта [2]. Несоблюдение хотя бы одного из показателей качества относит бумагу к более низкому классу и снижает её стоимость. Поэтому в качестве ограничения следует выбирать наиболее чувствительные к изменениям температуры показатели. Они будут формировать допустимые границы изменения температуры бумаги на каждом цилиндре.

Изначально важно установить границы параметров качества, которые соответствуют конкретному виду бумаги, и определить соответствующие им значения и допустимые изменения температуры (рис. 3, 4):

$$T_{гр}(P_2) \leq T_{p,1} \leq T_{гр}(P_1), \quad (1)$$

**Анализ предыдущих исследований.** Исследованию температурного графика сушки посвящено большое количество работ [3–7]. Но лишь в некоторых из них [4, 6, 7] стадии прогрева бумажного полотна уделено отдельное внимание. Анализ данных работ позволяет сделать следующие выводы:

1. Прогрев занимает 5...15 % общего времени пребывания бумаги в сушильной части.

2. Плавное повышение температуры бумаги способствует формированию качественного полотна.

3. Прогрев полотна заканчивается при достижении бумагой температуры мокрого термометра.

4. Основной причиной недостаточной изученности процесса является его малая, по сравнению с двумя другими стадиями, продолжительность.

5. В работах даны лишь общие указания по расчёту температурного графика. Вместе с тем, для повышения эффективности сушки целесообразно создать систему автоматического управления данным процессом, включающую алгоритм расчёта оптимального температурного графика.

Во время прогрева бумажного полотна удаление влаги практически не происходит [3, 4, 7]. Это обусловлено достаточно низкой температурой полотна, при которой довольно прочны связи влаги с

где  $T_{гр}(P_1)$  и  $T_{гр}(P_2)$  – граничные значения температуры, которые соответствуют допустимому значению показателя качества, указанному в стандарте, °С. При этом всегда выполняется условие  $T_{гр}(P_2) \leq T_{гр}(P_1)$ .

Ограничение (1) – это ограничение на конечную температуру прогрева.

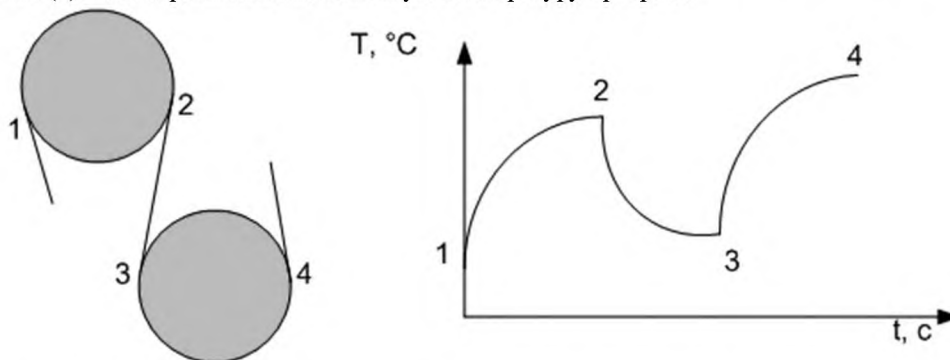


Рис. 2 – Изменение температуры бумажного полотна при прохождении по сушильному цилиндру и участку свободного хода

Условие допустимого изменения температуры бумаги на конкретном цилиндре:

$$\Delta T_n = f(\Delta T_{доп, n}, T_{но}), \quad (2)$$

где  $\Delta T_n$  – изменение температуры бумаги на цилиндре  $n$ ;  $\Delta T_{доп, n}$  – допустимое изменение температуры согласно параметрам качества, °С;  $T_{но}$  – температура бумаги на входе на цилиндр  $n$ , °С.

В каждом цикле прогрева существуют две критические точки, которые соответствуют температуре на сходе с сушильного цилиндра (точка 2 на рис. 2, первая критическая точка) и в конце участка свободного хода (точка 3 на рис. 2, вторая критическая точка). Следовательно, для построения температурного графика необходимо рассчитывать два набора значений температуры.

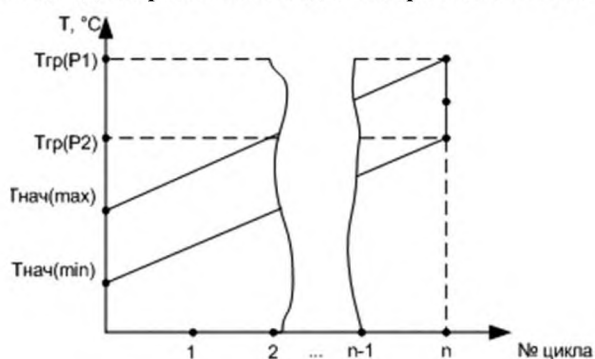


Рис. 3 – Область допустимых значений температуры полотна по мере прохождения по участку прогрева

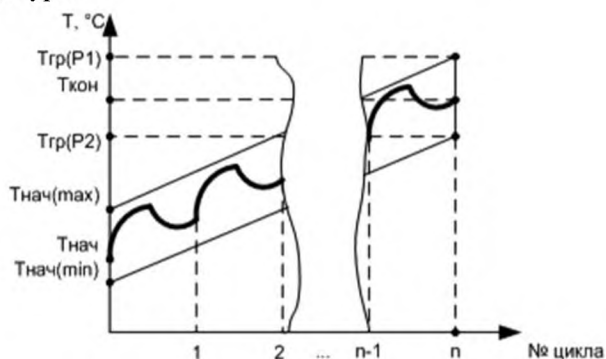


Рис. 4 – Температурный график прогрева бумажного полотна с ограничениями на температуру бумаги

Количество циклов  $n$  и, следовательно, сушильных цилиндров, определяется видом бумаги и особенностями БДМ (выбирается количество, которое обеспечивает достижение бумагой температуры мокрого термометра). Их количество на этапе прогрева (левые части линий до установления постоянного значения температуры на рис. 4) может изменяться от 3 до 15 штук [2].

**Алгоритм расчёта температурного графика прогрева.** Общий алгоритм расчёта целесообразно представить в виде пошагового алгоритма в реальном времени [6, 7]. Это даёт возможность его реализации при помощи специального математического и программного обеспечения (СМПО) для моделирования сушки и создания системы автоматического управления сушильной частью БДМ.

Алгоритм состоит из двух частей: расчёт температуры бумажного полотна на сушильном цилиндре и на участке свободного хода (рис. 5). Для каждого из них существует своё задание по конечной температуре ( $T_s$  и  $T_{з.сх}$ ). Расчёт начинаем с момента поступления бумаги на первый сушильный цилиндр.

**Шаг 1.** Ввод начальных параметров процесса, температуры и влажности бумаги при входе на сушильный цилиндр, параметров сушильного цилиндра и окружающей среды на участке свободного хода.

**Шаг 2.** Выбор величины нагрева бумаги на сушильном цилиндре (зависит от начальной температуры  $T_{n0}$  и допустимой величины изменения температуры  $\Delta T_{\text{доп}}$  ограничения по качеству (2)).

**Шаг 3.** Если температура на сходе с текущего сушильного цилиндра превышает температуру задания  $(T_{n0} + \Delta T_{\text{доп}}) \geq T_3$  следует уменьшить  $\Delta T_{\text{доп}}$ , иначе это приведёт к перегреву полотна и снижению качественных показателей, и перейти к шагу 4. Если  $(T_{n0} + \Delta T_{\text{доп}}) < T_3$  переходим к расчёту температуры на выходе сушильного цилиндра, шаг 5.

**Шаг 4.** Рассчитываем допустимое изменение температуры бумажного полотна на текущем сушильном цилиндре (без перегрева)  $\Delta T_n = T_3 - T_{n0}$  и переходим к расчёту температуры в конце сушильного цилиндра, шаг 5.

**Шаг 5.** По температуре в начале сушильного цилиндра  $T_{n0}$  и величине нагрева  $\Delta T_n$  рассчитываем температур в конце текущего цилиндра  $T_n = T_{n0} + \Delta T_n$ . После схода с сушильного цилиндра, бумага проходит по участку свободного хода. Температура полотна на выходе  $T_{n,\text{сх}} = 21,844 \ln p_{\text{п}} - 2,564$ , где  $p_{\text{п}}$  – парциальное давление на поверхности материала, Па. Данная величина зависит от температуры бумаги в начале участка свободного хода и на сходе с сушильного цилиндра. В зависимости от величины температуры расчёт  $p_{\text{п}}$  ведёт по разным формулам.

**Шаг 6.** Если  $T_n < 60$  °С, то для расчёта  $p_{\text{п}}$  переходим на шаг 7, иначе – шаг 8.

**Шаг 7.** Рассчитываем  $p_{\text{п}} = \frac{P_{\text{ов}} + (P_{\text{п0}} - P_{\text{ов}})}{\exp \frac{\beta_p r \tau_{\text{сх}}}{P_{\text{сп}}(c_c + c_w u)}}$ , где  $p_{\text{п}}$ ,  $P_{\text{ов}}$  – парциальные давления на поверхности мате-

риала и в окружающей среде, Па;  $\beta_p$  – коэффициент массообмена, отнесённый к разности парциальных давлений,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{Па})$ ;  $c_c$  и  $c_w$  – удельные массовые теплоёмкости сухого материала и воды,  $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;  $\tau$  – время прохождения бумаги по участку свободного хода, с;  $P_{\text{сп}}$  – масса квадратного метра сухого полотна,  $\text{г}/\text{м}^2$ ;  $u_0$  – влагосодержание бумажного полотна,  $\text{кг}/\text{кг}$ . После этого переходим к шагу 11.

**Шаг 8.** Если  $60$  °С  $\leq T_n < 80$  °С, переходим к шагу 9. Если  $T_n > 80$  °С, переходим к шагу 10.

**Шаг 9.** Определяем  $p_{\text{п}}$  из формулы  $\frac{(\sqrt{p_{\text{п}}} - \sqrt{P_{\text{ов}}})(\sqrt{P_{\text{п0}}} + \sqrt{P_{\text{ов}}})}{(\sqrt{p_{\text{п}}} + \sqrt{P_{\text{ов}}})(\sqrt{P_{\text{п0}}} - \sqrt{P_{\text{ов}}})} = 4a \exp \frac{\beta_p r \tau_{\text{сх}}}{P_{\text{сп}}(c_c + c_w u)}$ , после чего пере-

ходим к шагу 11.

**Шаг 10.** Определяем  $p_{\text{п}}$  методом итераций:

$$\frac{1}{6P_{\text{ов}}^{0,67}} \left( \begin{aligned} & \ln \frac{(P_{\text{ов}}^{0,33} - p_{\text{п}}^{0,33})^2}{P_{\text{ов}}^{0,67} + P_{\text{ов}}^{0,33} p_{\text{п}}^{0,33} + P_{\text{п}}^{0,67}} + \frac{1}{P_{\text{ов}}^{0,67} \sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2P_{\text{п}}^{0,33} + P_{\text{ов}}^{0,33}}{P_{\text{ов}}^{0,33} \sqrt{3}} - \\ & - \ln \frac{(P_{\text{ов}}^{0,33} - P_{\text{п0}}^{0,33})^2}{P_{\text{ов}}^{0,67} + P_{\text{ов}}^{0,33} P_{\text{п0}}^{0,33} + P_{\text{п0}}^{0,67}} + \frac{1}{P_{\text{ов}}^{0,67} \sqrt{3}} \operatorname{arctg} \frac{2P_{\text{п0}}^{0,33} + P_{\text{ов}}^{0,33}}{P_{\text{ов}}^{0,33} \sqrt{3}} \end{aligned} \right) = \frac{\beta_p r \tau_{\text{сх}}}{P_{\text{сп}}(c_c + c_w u)}.$$

Переходим к шагу 11.

**Шаг 11.** По полученному значению  $p_{\text{п}}$  (в зависимости от начальной температуры) рассчитываем температуру в конце участка свободного хода  $T_{n,\text{сх}} = 21,844 \ln p_{\text{п}} - 2,564$ .

**Шаг 12.** Если  $T_{n,\text{сх}} = T_{3,\text{сх}} \pm e$ , где  $e$  – максимально допустимое отклонение температуры в конце участка свободного хода, то процесс прогрева закончен и система выдаёт температурный график сушки (оптимальные значения температуры бумаги на каждом сушильном цилиндре и участке свободного хода). Иначе процесс нагревания необходимо продолжить на следующем сушильном цилиндре и перейти к шагу 13.

**Шаг 13.** Значению температуры на входе на следующий сушильный цилиндр присваивают температуру в конце участка свободного хода и расчёт повторяют.

**Выводы и направления дальнейшего исследования.** С целью обеспечения наилучшего качества сушки бумажного полотна разработан алгоритм расчёта оптимального температурного графика прогрева, позволяющий определить температуры полотна на каждом сушильном цилиндре и участке свободного хода.

Алгоритм является частью разрабатываемой системы автоматического управления сушильной частью бумагоделательной машины. Предметом дальнейших исследований является практическая реализация и тестирование последней.

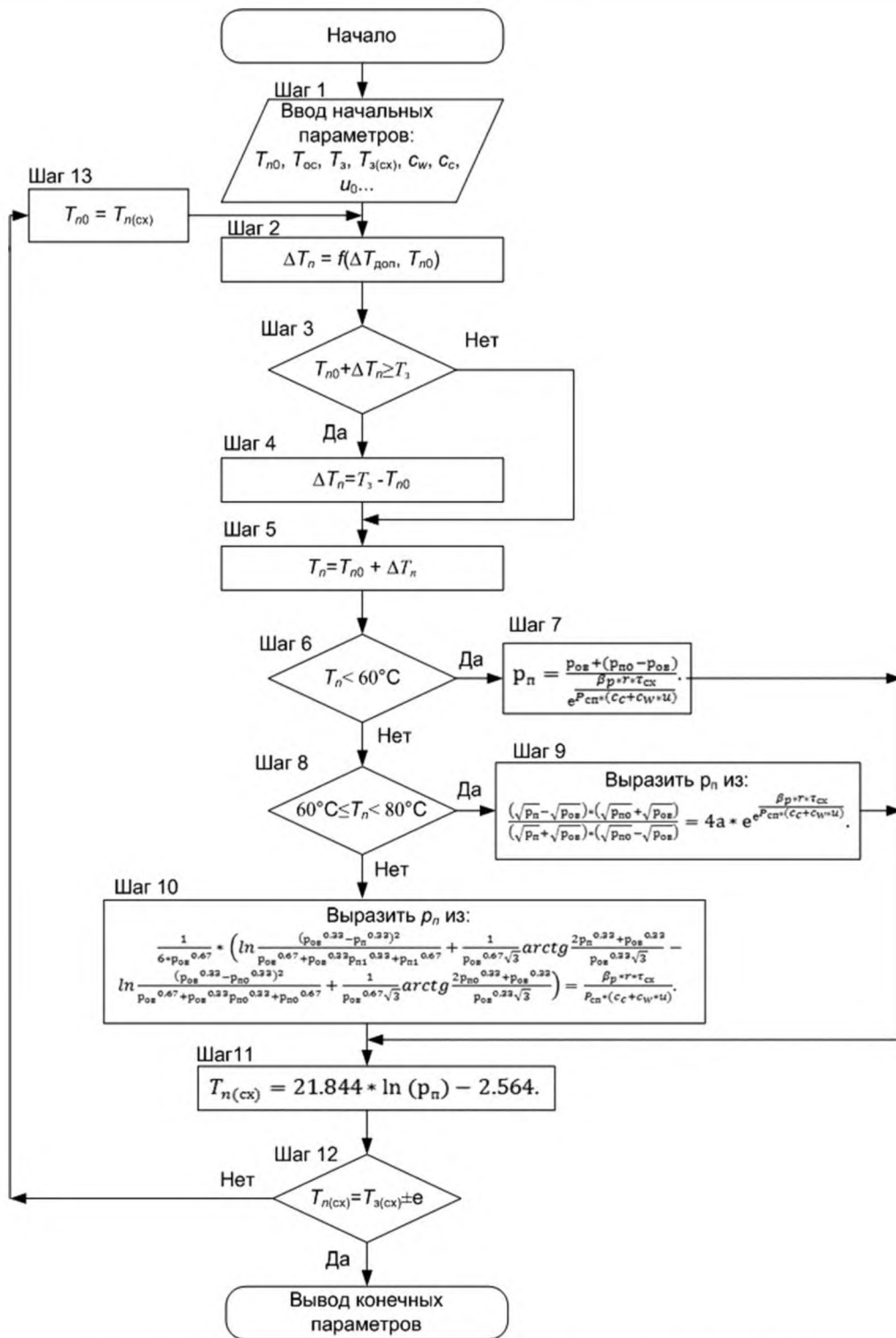


Рис. 5 – Блок-схема расчёта графика прогрева бумажного полотна

Список использованной литературы

1. Фляте Д. М. Технология бумаги / Д. М. Фляте. – М. : Лесн. пром-ть, 1988. – 440 с.
2. Примаков С. Ф. Технология бумаги и картона / С. Ф. Примаков. – М. : Экология, 1996. – 304 с.

3. Бельский А. П. Тепломассообмен при сушке бумаги на многоцилиндровых установках / А. П. Бельский // Межвуз. сб. науч. тр. «Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС». – 2007. – С. 36-45.
4. Ghosh A. K. Optimization of paper machine dryer section / A. K. Ghosh // Proc. of 7th Int. Conf. on Pulp, Paper and Conversion Ind., New Delhi. 2005.
5. Some aspects of the combined contact-impingement drying of paper / R. Talja, O. Timofeev, J. Keränen, N. Milosavljevic // Int. State-of-the-Art Conf. «Resource- and energy saving in the pulp and paper industry and municipal economy (process, equipment, automation)». – Spb : State Technological University of Plant Polymers, 2005. – P. 237-242.
6. Karlsson M., Stenström S. (2005) Static and Dynamic Modelling of Carboard drying, Part I: Theoretical model, Drying Technology 23 (1-2), p. 143-163.
7. Slätteke O. (2006) Modeling and Control of the Paper Machine Drying Section, Doctoral Dissertation, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden.
8. Yeo Y.-K.; Hwang K.-S.; Chul Yi, S. and Kang, H. Modeling of the Drying Process in Paper Plants, Korean J. Chem. Eng., 21(4), 761-766, 2004.

Надійшла до редакції 15.09.2014

---

**Zhuchenko A., Cheropkin E.**

### CALCULATION OF HEATING PAINTINGS

*The aim of the article is to provide the reader with the new method of creation an optimal temperature schedule during the warming of the paper web process in drying section of papermaking machine. The work starts with the analysis of previous studies mad by foreign experts. The basic features of the works have been marked and set up questions that require more detailed study. The description of the paper web drying process in the dryer section papermaking machine and, in particular, the process of heating (first step drying process) was made.*

*The main focus of the work was done to study the parameters of quality of product and the influence of the intensity of the temperature increase of the paper web or their values. During the study war formulated range of limitations on the paper temperature in the end of the heating process, and the maximum permissible temperature increase at each drying cylinder.*

*On the basis of the data obtained during the research was built general warming temperature graph for paper web in accounting to constraints on the temperature that shown the dynamics of temperature change at the end of each drying cylinder and the area of free running.*

*As a result of this work was created algorithm for calculating the optimal temperature schedule that allows quickly heating the paper web up to working temperature rate without loss of quality parameters. The algorithm shown the general form and has a unit of setting the initial parameters which may be different for different paper grades and types of paper machines. This algorithm is implemented as an application program that is part of the automatic control system of the drying section of a paper machine. Data obtained from the work, will be used for further calculation of optimum temperature mode of all drying section of papermaking machine.*

**Keywords:** paper production, the first stage of drying, quality settings, heating of the paper.

### References

1. Fliate D. M. Tekhnolohyia bumahy [Technology paper] / D. M. Fliate. – M. : Lesnaia promyshlennost, 1988. – 440 s.
2. Prymakov S. F. Tekhnolohyia bumahy y kartona [The technology of paper and paperboard] / S. F. Prymakov. – M. : Ekolohyia, 1996. – 304 s.
3. Belskyi A. P. Teplomassoobmen pry sushke bumahy na mnohotsylindrovyykh us-tanovkakh [Heat and mass transfer in drying paper on multi-cylinder installations] / A. P. Belskyi // Mezhvuz. sb. науч. тр. «Problemy ekonomyy toplivno-enerhetycheskykh resursov na prompredpriyatiyakh i TES». – 2007. – С. 36-45.
4. Ghosh A. K. Optimization of paper machine dryer section / A. K. Ghosh // Proc. of 7th Int. Conf. on Pulp, Paper and Conversion Ind., New Delhi. 2005.
5. Some aspects of the combined contact-impingement drying of paper / R. Talja, O. Timofeev, J. Keränen, N. Milosavljevic // Int. State-of-the-Art Conf. «Resource- and energy saving in the pulp and paper industry and municipal economy (process, equipment, automation)». – SPb : State Technological University of Plant Polymers, 2005. – P. 237-242.

6. Karlsson M., Stenström S. (2005) Static and Dynamic Modelling of Carboard drying, Part I: Theoretical model, *Drying Technology* 23 (1-2), p. 143-163.
7. Slätteke O. (2006) Modeling and Control of the Paper Machine Drying Section, Doctoral Dissertation, Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden.
8. Yeo Y.-K.; Hwang K.-S.; Chul Yi, S. and Kang, H. Modeling of the Drying Process in Paper Plants, *Korean J. Chem. Eng.*, 21(4), 761-766, 2004.

УДК 681.664.519

ЯРОЩУК Л. Д., к.т.н., доц.; ОРКУША Д. О., студент  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ У СИСТЕМІ АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИПАРНОГО АПАРАТА

Описано автоматичну систему керування рівнем соку у випарному апараті цукрового виробництва. Систему побудовано на положеннях нечітких множин і продукційних правил. Використання цих положень реалізовано у математичному забезпеченні нечіткого регулятора. Подано функції приналежності керованої змінної, керувального впливу та правила. Побудовано модель системи керування засобами *Simulink*. Виконано порівняння роботи систем керування з ПІ-регулятором і нечітким регулятором.

**Ключові слова:** цукор, випарний апарат, рівень соку, нечіткий регулятор.

**Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень.** Випарна установка (ВУ) займає центральне місце у хіміко-технологічній системі (ХТС) цукрового виробництва за складністю функцій та обсягом споживаної енергії. Установка складається з окремих випарних апаратів (ВА) [1]. Актуальною є проблема створення алгоритмів і систем керування процесом випарювання, спрямованих на зменшення енергетичних затрат із збереженням якості продукції.

Сучасні науково-технічні розробки з автоматизації випарювання, спрямовані на підвищення ефективності роботи ВА, присвячено визначенню й підтриманню оптимальних режимів [2], впровадженню нових технічних засобів автоматизації та сучасних алгоритмів управління [3-6]. Проте особливості кожного виробництва й сировини потребують специфічних рішень, зокрема математичного забезпечення систем керування. Найближчою до теми статті є праця [7], де розглянуто нечітку систему керування ВА цукрового виробництва, але в ній не розкрито математичний апарат, покладений в основу такої системи.

**Метою статті** є створення та дослідження автоматичної системи керування (АСК) рівнем соку у випарному апараті з нечітким регулятором та її порівняння із системою з традиційним ПІ-регулятором.

**Виклад матеріалу дослідження.** Буряковий сік надходить під нижню трубну решітку ВА і частково заповнює кип'ятильні труби нагрівальної камери. Під час кипіння об'єм соку збільшується, він заповнює кип'ятильні труби й виливається над верхньою трубною решіткою. Рівень соку в кип'ятильних трубах є важливим показником роботи ВА, оскільки він пов'язаний з умовами розкладання редуруючих речовин та їхньою взаємодією з амінокислотами, розчинністю солей кальцію, утворенням фарбувальних речовин тощо. Зазвичай цю змінну обирають так, щоб верхня трубна решітка омивалася соком, що кипить.

Для прикладу наведемо орієнтовні діапазони рівнів соку, що не кипить, в апаратах п'ятикорпусної випарної установки: у корпусі I – 30...35 %; II – 35...40; III – 40...45; IV – 45...50; V – 50...55 % від загальної висоти кип'ятильних труб. У виробничих умовах рівень соку вибирають орієнтовно, базуючись на досвіді персоналу, оскільки через нестабільну поверхню кипіння він є псевдорівнем.

Автори пропонують реалізувати емпіричні знання фахівців в автоматичній системі керування, побудовавши її на математичних основах нечітких множин і нечіткої логіки. Для створення такої системи вибрано перший корпус ВУ, оскільки в ньому випарюється найбільша кількість вологи і в його нагрівальну камеру подають гостру пару (усі наступні обіграють вторинною парю). Вихідною змінною (керованою) в АСК вибрано рівень соку, керованою – частота обертання ротора насоса, що регулює подачу соку у ВА.

Реалізацію нечіткої системи виконано введенням до АСК нечіткого регулятора з лінгвістичними змінними «Помилка» (після відхилення рівня від заданого значення) і «Кількість обертів». Моделювання системи нечіткого керування виконано в середовищі *MatLab* за допомогою бібліотеки *Simulink* (рис. 1).