

УДК 664.724

UDC 664.724

05.00.00. Технические науки

Technical sciences

**ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО СЫРЬЯ**

**FEATURES OF MODELING OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS OF AGRICULTURAL RAW MATERIALS PROCESSING**

Доценко Сергей Павлович  
 д. х. н., доцент  
 РИНЦ SPIN-код: 1263-8551  
*Кубанский государственный аграрный университет, Краснодар, Россия*

Dotsenko Sergei Pavlovich  
 Doctor of Chemical Science, Associate Professor  
 RSCI SPIN-code: 1263-8551  
*Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia*

Рассмотрены пути совершенствования работы пищевых предприятий при переработке сельскохозяйственного сырья на основе системного анализа длительностей технологических операций. Проанализированы основные математические модели технологических процессов и показана возможность использования унифицированных технологических операций для прогнозирования времени завершения работ при переработке различных партий сырья. Установлено, что построение математических моделей технологических процессов переработки сельскохозяйственного сырья должно базироваться на использовании потенциала переноса целевого компонента между изопотенциальными поверхностями. Это позволяет не только унифицировать создаваемые модели технологических процессов, но и значительно повысить их экстраполирующую способность оценки длительностей технологических операций

The ways of improving the work of food enterprises during processing of agricultural raw materials on the basis of a system analysis of the durations of technological operations are considered. The basic mathematical models of technological processes have been analyzed and the possibility of using unified technological operations to predict the time of completion of work has been shown for processing various pairs of raw materials. It is established that the construction of mathematical models of technological processes of processing of agricultural raw materials should be based on using the potential of transfer of the target component between isopotential surfaces. This allows not only to unify the created models of technological processes, but also to significantly increase their extrapolating ability to estimate the durations of technological operations

Ключевые слова: ПОТЕНЦИАЛ ПЕРЕНОСА ВЛАГИ, ГИГРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Keywords: POTENTIAL OF MOISTURE TRANSMISSION, HYGROSCOPIC PROPERTIES

Doi: 10.21515/1990-4665-131-126

В пищевой промышленности производство ценных высококачественных продуктов широкого ассортимента производится партиями на параллельно-работающих установках. Управление такими производствами представляет актуальную техническую задачу. В этом случае для расчета расписаний задается матрица длительностей операций  $\{d_{i,j}\}$  обработки видов сырья. Используя эту матрицу можно рассчитать время завершения каждой операции ( $w_{i,j}$ ) по формуле [1] (нумерация элементов матриц начинается с нуля):

$$w_{i,j} = [\Phi(i) - \Phi(i-1)] \cdot \sum_{k=0}^j [d_{\Phi(i-1),k}] + \Phi(i-1) \cdot \left\{ d_{\Phi(i),j} + \sum_{k=0}^j [d_{\Phi(i-2),k}] \right\} \quad (1)$$

где  $w_{i,j}$  – время завершения  $i$ -й операции ( $i = 1, 2, \dots, m$ )  $j$ -й партии сырья ( $j = 1, 2, \dots, n$ );  $\Phi(x)$  – ступенчатая функция Хэвисайда;  $d_{i,j}$  – длительность  $i$ -й операции  $j$ -й партии сырья. Время завершения работ в этом случае представляет собой максимальный элемент матрицы завершения работ  $\{w_{i,j}\}$ . Если длительности ( $t$ ) операций в (1) унифицированы, то время выполнение всего объема работ определяется формулой:

$$T(t, n, m) = t \cdot n + (m - 1) \cdot t \quad (2)$$

где  $m$  – число технологических операций;  $n$  – число партий перерабатываемого сырья. Время, определяемое формулой (2) позволяет определить нижнюю границу завершения работ:

$$\inf T(n, m) = \min\{d_{i,j}\} \cdot n + (m - 1) \cdot \min\{d_{i,j}\} \quad (3)$$

Формула (3) определяет длительность наиболее эффективного процесса переработки сырья. Кроме того формула (2) может быть использована для оценки верхней границы:

$$\sup T(n, m) = \max\{d_{i,j}\} \cdot n + (m - 1) \cdot \max\{d_{i,j}\} \quad (4)$$

Формула (4) определяет длительности завершения работ в наиболее неблагоприятных условиях. Таким образом, основным показателем эффективности работы пищевого предприятия является длительность операций переработки сырья в готовую продукцию. Определяющим элементом графика работы предприятия в этом случае является длительность подготовительных операций. Основной по длительности операцией является сушка поступающего на переработку сырья. Теория сушки базируется как на равновесной термодинамике [2], так и термодинамике необратимых процессов [3]. Центральное место при использовании термодинамических методов анализа влагопереноса при сушке и кондиционировании занимает понятие потенциала. Под этим понимают функцию состояния системы, которая при равновесии равна во всех точках системы и градиент которой определяет направление и скорость переноса соответствующей субстанции [4]. Если

провести аналогию с теплопередачей [5], где давно и успешно применяются термодинамические методы анализа, то потенциалом переноса в теплопередаче является температура, а теплосодержанию аналогично понятие массосодержания. В этом случае длительность подготовительных операций определяется как эффективностью теплообмена в слое материала [6] так и его способностью удерживать влагу в материале [7]. Промежуточные стадии влияют в основном на межоперационные простои оборудования, что связано с качеством получаемого пищевого продукта. Длительности промежуточных стадий переработки сырья определяются процессами извлечения ценных пищевых компонентов из перерабатываемого сырья. В пищевой промышленности эти этапы переработки сырья представлены как гидродинамическими [8], так и экстракционными процессами [9]. Низкая селективность этих процессов определяет необходимость использования финишных операций, формирующих потребительские свойства готовой продукции. Эффективность завершающих стадий определяется процессами эмульгирования [10], экстрагирования [11] и разделения ценных пищевых компонентов [12]. Значительное увеличение эффективности этих процессов связано в первую очередь с использованием методов создания безотходных технологий основанных на переработке вторичных ресурсов [13]. Таким образом, создание современных высокоэффективных пищевых предприятий в значительной мере базируется на прогнозировании временных интервалов работы этих технологических операций. Основным методом оценки в этом случае является построение адекватных математических моделей этих технологических процессов от факторов, определяющих длительность физико-химического воздействия в рабочей зоне машины или аппарата.

Математические модели сушки представляют собой решение задачи нестационарного конвективного тепло и массообмена, связанные с необходимостью формулировки дифференциальных уравнений переноса в кри-

волинейных координатах. Диффузия компонентов ортогональна изоконцентрационным поверхностям, что позволяет значительно облегчить вывод соответствующего уравнения переноса и в ряде случаев получить одномерное уравнение переноса по обобщенной координате [14]. Использование термодинамического метода основанного на понятии потенциала переноса, а именно частной производной от соответственно выбранной характеристической функции [15] позволяет сформулировать симметричную систему линейных дифференциальных уравнений в частных производных для описания переноса температуры, влажности и давления в объектах сушки [16]. Гидродинамические процессы извлечения пищевых компонентов зависят от пропускной способности выпускного устройства, и является линейной от скорости сдвига материала [17] и реологии перерабатываемого сырья [18]. Учитывая линейный характер влияния этих факторов возможно использование упрощенного метода решения дифференциальных уравнений гидродинамики [19]. Длительность экстракционных процессов определяется видом растворителя и степенью измельчения материала [20]. Использование потенциала переноса для описания внутреннего процесса позволяет линеаризовать интегральные кинетические зависимости процесса [21] экстракции. Технологические процессы переработки вторичных ресурсов в основном определяются зависимостью для проточной и «тупиковой» фильтрации в мембранных аппаратах под действием избыточного давления [22]. Эти зависимости определяют проницаемость полипропиленовых полуволоконных и керамических трубчатых мембран [23] широко используемых в пищевой промышленности. Например, к одной из основных операций в экстракционном производстве - рекуперации паров растворителя из смеси с неконденсирующимся газом, для разделения парогазового потока [24].

Таким образом, построение математических моделей технологических процессов переработки сельскохозяйственного сырья должно базиро-

ваться на использовании потенциала переноса целевого компонента между изопотенциальными поверхностями. Это позволит не только унифицировать создаваемые модели технологических процессов, но и значительно повысить их экстраполирующую способность оценки длительностей технологических операций.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Perov A.G., Kosachev V.S., Koshevoy E.P. Modeling of working schedule of extraction production with specialized units. News of institutes of higher education // Food Technology. 2008. № 5-6. С. 55.
2. Подгорный С.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Определение параметров математической модели равновесных свойств зерна в гигроскопической области нелинейной оптимизацией. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2010. № 5-6. С. 85-87.
3. Подгорный С.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П., Схалыхов А.А. Влажно-температурные кинетические зависимости при сушке // Новые технологии. 2014. № 1. С. 43-47.
4. Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Зверев С.В. Оценка зависимостей потенциала переноса влаги для кукурузного крахмала // Хранение и переработка сельхозсырья. 2011. № 7. С. 11-13.
5. Подгорный С.А., Меретуков З.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Метод конечных элементов в решении задач теплопроводности. Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2013. № 2 (56). С. 10-15.
6. Косачев В.С., Кошевой Е.П., Михневич А.Н., Миронов Н.А. Зависимости для описания теплообмена в слое. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2008. № 2-3. С. 82-83.
7. Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Зверев С.В. Статистическая оценка кластерной модели гигроскопичности зерна. Хранение и переработка сельхозсырья. 2011. № 6. С. 11-14.
8. Меретуков З.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Решение дифференциального уравнения отжима // Новые технологии. 2011. № 4. С. 54-57.
9. Кошевой Е.П., Косачев В.С., Тарасов В.Е. Интенсификация внутреннего массопереноса при экстракции растительных масел // Журнал прикладной химии. 1986. Т. 59. № 10. С. 2170.
10. Blyagoz Kh.R., Skhalyakhov A.A., Zaslavets A.A., Koshevoi E.P., Kosachev V.S. Modeling of membrane process of nano- and miniemulsies formation // Новые технологии. 2011. № 2. С. 15-17.
11. Кошевой Е.П., Косачев В.С., Блягоз Х.Р., Схалыхов А.А. Теоретический анализ экстракции в массообменнике с пористой перегородкой. Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2001. № 5-6. С. 66-68.
12. Схалыхов А.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Математическое моделирование процесса разделения жидких смесей в мембранном модуле с различной организацией потоков. // Известия ВУЗов. «Пищевая технология». 2009. № 2-3. С. 71-74.

13. Схаляхов А.А., Верещагин А.Г., Косачев В.С., Кошевой Е.П. Разработка модели конденсации парогазовых смесей с полимерными полуволоконными мембранами. Новые технологии. 2009. № 1. С. 39-43.

14. Кошевой Е.П., Косачев В.С., Алексеев В.С. Анализ метрических коэффициентов одномерного уравнения диффузии в криволинейных координатах // Журнал прикладной химии. 1987. № 60. С. 2384-2388.

15. Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Термодинамический подход в теории сушки // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2015. № 4. С. 88-91.

16. Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Схаляхов А.А. Постановка задачи описания переноса тепла, массы и давления при сушке // Новые технологии. 2014. № 3. С. 20-27.

17. Гукасян А.В., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Тарбин А.Н. Течение маслянистого материала в выпускном устройстве пресса // В сборнике: Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств материалы II Международной научно-практической конференции. 2016. С. 146-150.

18. Меретуков З.А., Кошевой Е.П., Следь Н.И., Косачев В.С., Верещагин А.Г. Моделирование структуры потоков в транспортере со спиральным шнеком // Новые технологии. 2010. № 4. С. 33-37.

19. Меретуков З.А., Заславец А.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Методы решения дифференциальных уравнений гидродинамики // Новые технологии. 2012. № 1. С. 36-41.

20. Шорсткий И.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Меретуков З.А. Оценка влияния вида растворителя и подготовки маслянистого подсолнечного материала на кинетические зависимости процесса экстракции // Новые технологии. 2015. № 2. С. 46-50.

21. Подгорный С.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П., Схаляхов А.А. Постановка задачи потенциалопроводности для зерна эллипсоидной формы и обоснование решения численными методами // Новые технологии. 2015. № 2. С. 16-23.

22. Схаляхов А.А., Косачев В.С., Кошевой Е.П., Никонов Е.О. Определение проницаемости полуволоконных и трубчатых мембран // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2009. № 2-3. С. 96-98.

23. Заславец А.А., Схаляхов А.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С., Кошевая С.Е. Гидравлика реверсивного течения внутри мембраны контактора // Новые технологии. 2013. № 2. С. 91-94.

24. Кошевой Е.П., Косачев В.С., Верещагин А.Г., Гукасян А.В., Схаляхов А.А. Конденсатор // патент на полезную модель RUS 61401 27.11.2006.

## References

1. Perov A.G., Kosachev V.S., Koshevoj E.P. Modeling of working schedule of extraction production with specialized units. News of institutes of higher education // Food Technology. 2008. № 5-6. S. 55.

2. Podgornyj S.A., Kosachev V.S., Koshevoj E.P. Opredelenie parametrov matematicheskoy modeli ravnovesnyh svojstv zerna v gigroskopicheskoy oblasti nelinej-noj optimizaciej. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija. 2010. № 5-6. S. 85-87.

3. Podgornyj S.A., Kosachev V.S., Koshevoj E.P., Shaljahov A.A. Vlazhnostno-temperaturnye kineticheskie zavisimosti pri sushke // Novye tehnologii. 2014. № 1. S. 43-47.

4. Podgornyj S.A., Koshevoj E.P., Kosachev B.C., Zverev S.V. Ocenka zavisimo-stej potencijala perenosa vlagi dlja kukuruznogo krahmala // Hranenie i pererabotka sel'hozsyr'ja. 2011. № 7. S. 11-13.
5. Podgornyj S.A., Meretukov Z.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S. Metod konechnyh jelementov v reshenii zadach teploprovodnosti. Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inženernyh tehnologij. 2013. № 2 (56). S. 10-15.
6. Kosachev V.S., Koshevoj E.P., Mihnevich A.N., Mironov N.A. Zavisimosti dlja opisanija teploobmena v sloe. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija. 2008. № 2-3. S. 82-83.
7. Podgornyj S.A., Koshevoj E.P., Kosachev B.C., Zverev S.V. Statisticheskaja ocenka klasternoj modeli gigroskopichnosti zerna. Hranenie i pererabotka sel'hoz-syr'ja. 2011. № 6. S. 11-14.
8. Meretukov Z.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S. Reshenie differencial'nogo uravnenija otzhima // Novye tehnologii. 2011. № 4. S. 54-57.
9. Koshevoj E.P., Kosachev V.S., Tarasov V.E. Intensifikacija vnutrennego mas-soperenosa pri jekstrakcii rastitel'nyh masel // Zhurnal prikladnoj himii. 1986. T. 59. № 10. S. 2170.
10. Blyagoz Kh.R., Skhalyakhov A.A., Zaslavets A.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S. Modeling of membrane process of nano- and miniemulsies formation // Novye tehnologii. 2011. № 2. S. 15-17.
11. Koshevoj E.P., Kosachev B.C., Bljagoz H.R., Shaljahov A.A. Teoreticheskij analiz jekstrakcii v massoobmennike s poristoj peregorodkoj. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija. 2001. № 5-6. S. 66-68.
12. Shaljahov A.A., Kosachev V.S., Koshevoj E.P. Matematicheskoe modelirovanie processa razdelenija zhidkih smesej v membrannom module s razlichnoj organizaciej potokov. // Izvestija VUZov. «Pishhevaja tehnologija». 2009. № 2-3. S. 71-74.
13. Shaljahov A.A., Vereshhagin A.G., Kosachev V.S., Koshevoj E.P. Razrabotka modeli kondensacii parogazovyh smesej s polimernymi polovolokonnymi membranami. Novye tehnologii. 2009. № 1. S. 39-43.
14. Koshevoj E.P., Kosachev V.S., Alekseev V.S. Analiz metriceskikh koefefficientov odnomernogo uravnenija diffuzii v krivolinejnyh koordinatah // Zhurnal prikladnoj himii. 1987. № 60. S. 2384-2388.
15. Podgornyj S.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S. Termodinamicheskij podhod v teoriii sushki // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija. 2015. № 4. S. 88-91.
16. Podgornyj S.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S., Shaljahov A.A. Postanovka zadachi opisanija perenosa tepla, massy i davlenija pri sushke // Novye tehnologii. 2014. № 3. S. 20-27.
17. Gukasjan A.V., Koshevoj E.P., Kosachev V.S., Tarbin A.N. Tечenie maslichnogo materiala v vypusknom ustrojstve pressa // V sbornike: Javlenija perenosa v processah i apparatah himicheskikh i pishhevnyh proizvodstv materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoi konferencii. 2016. S. 146-150.
18. Meretukov Z.A., Koshevoj E.P., Sled' N.I., Kosachev V.S., Vereshhagin A.G. Modelirovanie struktury potokov v transportere so spiral'nym shnekom // Novye tehnologii. 2010. № 4. S. 33-37.
19. Meretukov Z.A., Zaslavec A.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S. Metody reshenija differencial'nyh uravnenij gidrodinamiki // Novye tehnologii. 2012. № 1. S. 36-41.
20. Shorstkij I.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S., Meretukov Z.A. Ocenka vlijanija vida rastvoritelja i podgotovki maslichnogo podsolnechnogo materiala na kineticheskie zavisimosti processa jekstrakcii // Novye tehnologii. 2015. № 2. S. 46-50.

21. Podgornyj S.A., Kosachev V.S., Koshevoj E.P., Shaljahov A.A. Postanovka zadachi potencialprovodnosti dlja zerna jellipsovidnoj formy i obosnovanie reshenija chislennymi metodami // *Novye tehnologii*. 2015. № 2. S. 16-23.

22. Shaljahov A.A., Kosachev V.S., Koshevoj E.P., Nikonov E.O. Opredelenie pronicaemosti polovolokonnyh i trubchatyh membran // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Pishhevaja tehnologija*. 2009. № 2-3. S. 96-98.

23. Zaslavec A.A., Shaljahov A.A., Koshevoj E.P., Kosachev V.S., Koshevaja S.E. Gidravlika reversivnogo techenija vnutri membrany kontaktora // *Novye tehnologii*. 2013. № 2. S. 91-94.

24. Koshevoj E.P., Kosachev V.S., Vereshhagin A.G., Gukasjan A.V., Shaljahov A.A. Kondensator // patent na poleznuju model' RUS 61401 27.11.2006.