

1. Оборудование с ударным возбуждением шума. К этой группе относится оборудование древесно-подготовительных и древесно-массных цехов (рубительные машины, слешерные установки, окорочные барабаны, молотковые мельницы, лотки для перегрузки баланса), в котором ударное нагружение элементов оборудования заложено в технологическом процессе.

2. Оборудование, шумообразование в котором связано с действием вакуума и возникающими при этом аэродинамическими процессами. К этой группе оборудования относятся отсасывающие валы и вакуумные-насосы.

3. Оборудование по переработке бумаги и картона в котором преобладают шумы приводных механизмов, технологических механизмов и бумагопроводящих систем.

Принятая классификация источников шума позволила определить направления работ в области акустики оборудования ЦБП (как существующего, так и разрабатываемого).

## Список литературы

1. Доклад “О реализации государственной политики в области условий и охраны труда в Российской Федерации в 2012 году”. Министерство здравоохранения и социального развития Российской Федерации. М. 2013.- 42 с.

2. Р.2.2.2006-05 Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. Постановление главного государственного врача РФ от 29.07.2005.- 127 с.

3. ГОСТ 12.1.003-83 Шум. Общие требования безопасности. М: Издательство стандартов, 1983.- 15 с.

---

УДК 681.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТРУДА И СНИЖЕНИЯ ТРАВМАТИЗМА НА ЛЕСОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

**Костарев Сергей Николаевич,**  
д-р техн., наук, доцент,

**Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации,  
Пермский институт Федеральной службы исполнения наказаний,  
г. Пермь, E-mail: [iums@dom.raid.ru](mailto:iums@dom.raid.ru)**

**Середа Татьяна Геннадьевна,**  
д-р техн., наук, доцент,

**Пермский государственный аграрно-технологический университет  
Российская академия народного хозяйства и государственной службы при  
президенте Российской Федерации. Пермский филиал»,  
г. Пермь E-mail: [iums@dom.raid.ru](mailto:iums@dom.raid.ru)**

**Ключевые слова:** производственный поток, АСУ, лесозаготовительный комплекс.

**Аннотация.** Изучены теоретические основы связывания пространственно-временных материальных потоков предприятия лесоперерабатывающей промышленности и автоматизированной системы принятия решений для повышения производительности труда и снижения травматизма. В основе задачи описания производственного потока лежит уравнение сохранения движения механики сплошных сред. Производственный поток представлен конечномерными базисами, включая мощности оборудования и трудовые ресурсы.

*При пространственно-временном потоке учитываются возмущения типа брак и сбой. Разработано уравнение потока движения на технологическом маршруте. Полученное аналитическое выражение показывает управление потоком с учетом влияния производственного сбоя, работы оборудования и травматизма персонала.*

## **MODELING OF PROCESSES OF INCREASING THE PRODUCTIVITY OF LABOR AND DECREASING TRAUMATISM AT FOREST PROCESSING ENTERPRISES**

**Kostarev Sergej Nikolaevich,**  
holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Associate Professor,  
Perm Military Institute of the National Guard's Forces of the Russian Federation, Perm Institute of the FPS of Russia, Perm, E-mail: [iums@dom.raid.ru](mailto:iums@dom.raid.ru)

**Sereda Tat'jana Gennad'evna,**  
holder of an Advanced Doctorate in Engineering Sciences, Associate Professor,  
<sup>2</sup>Perm State Agro-Technological University named after Academician,  
<sup>2</sup>Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration.  
Perm branch, Perm, E-mail: [iums@dom.raid.ru](mailto:iums@dom.raid.ru)

*Key words:* production flow, automated control system, logging complex.

**Abstract.** The theoretical basis for linking the spatio-temporal material flows of the timber processing enterprise and the automated decision-making system for increasing labor productivity are studied. At the heart of the task of describing the production flow lies the equation of conservation of motion of the mechanics of continuous media. The production stream is represented by finite-dimensional bases, including equipment capacities and labor resources. With space-time flow, perturbations of the marriage type and failure are taken into account. The equation of the flow of motion on the technological route is developed. The resulting analytical expression expresses flow control, taking into account the impact of production malfunction, equipment operation and personnel injuries.

Технологический процесс лесозаготовки включает множество работ: валку деревьев, трелевку, погрузку. Предприятиям заготовки древесины требуется оснащение высокопроизводительными машинами и оборудованием [1]. Моделирование производственных потоков и ресурсов при изготовлении машин для лесозаготовительного комплекса является актуальной задачей.

Известно несколько форм моделей: балансовые; поточно-непрерывные стационарные; теории расписаний; дискретно-логические и сетевые модели [2]. Балансовая модель производства является одной из наиболее простых моделей. Теория балансовых моделей была сформулирована Леонтьевым В.В. в середине 30-х годов. В основу поточно-непрерывной стационарной модели положена модель заданного пространственно-распределённого пооперационного потока, реализация которого гарантирует выполнение заданных объёмных показателей в течение предусмотренного периода. Модели теории расписаний непосредственно приводят к постановке задачи формирования расписаний выполнения последовательности операций, составляющих технологический маршрут. Рассмотренные выше модели широко распространены в практике построения автоматизированных систем управления. Эти модели относятся к классу «Just in time» [3].

В моделях распределенной динамики ставится задача учёта инерционного запаздывания в выполнении производственных заданий на технологических операциях путём аппроксимации процесса эквивалентными инерционными звеньями. Дискретно-логические модели используются для мелкосерийных типов производств и характеризуются комбинаторным подходом для решения задач распределения ресурсов. При формировании сменно-

суточных заданий выявляется большое количество сочетаний ресурсов. Данный подход не может обеспечить решение поставленной задачи на уровне выше участка цеха.

Сетевые модели используются в сборочно-распределительной системе и представлены в виде графов, вершинами которых являются технологические операции, а дугами представлены перемещения деталей. По характеру формализации объекта моделирования существует два подхода создания моделей: дискретный и непрерывный. Возникновение непрерывного подхода к построению имитационных моделей связано с появлением аналоговых вычислительных машин и их использованием для решения дифференциальных уравнений. Непрерывный подход первоначально применялся для моделирования непрерывных реальных объектов, которые описывались дифференциальными уравнениями.

Непрерывные модели можно разделить на: аналитические; дискретно-непрерывные и стохастические. Аналитические модели включают в себя динамические модели процессов: на базе обыкновенных дифференциальных уравнений; на базе дифференциальных уравнений в частных производных. А также алгебраические модели состояний, которые подразделяются на модели: линейной алгебры; сетевые и систем массового обслуживания. Дискретно-непрерывная форма является усложнённой модификацией аналитической модели, учитывающей факт, что объект управления наблюдается и управляется в определённые дискретные моменты времени.

Стохастические модели – вариант более сложный, но более близкий к реальным процессам. Они позволяют решать задачи с учётом случайных возмущений. Модель алгебры логики – фундаментальный математический аппарат описания дискретно-логических процессов. Они используются для описания сравнительно простых технических устройств.

Алгоритмические модели - форма имитации широкого класса математических и физических объектов на цифровом автомате. Ситуационные и семантические подходы используются в построении экспертных систем. Модели на нечётких представлениях используются в системах искусственного интеллекта и экспертных системах.

При обосновании методов и алгоритмов повышения производительности труда на предприятиях лесозаготовительного комплекса использовались методы системного анализа, общая теория систем, теория автоматического управления, методы математического и имитационного моделирования.

Описание среды проводили исходя из идеи упорядоченно движущихся частиц производственного потока. Рассмотрим движение деталей вдоль оси  $x$ . На отрезке  $[x, x+\Delta x]$ , будет находиться  $\Delta n$  материала за время  $\Delta t$  (рис. 1).

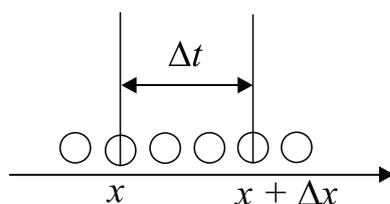


Рис. 1. Движение материала вдоль оси  $x$

Дискретную систему заменим на непрерывную модель [3]. Закон движения материала будет определяться функцией  $n=n(x,t)$  от 2 переменных  $x,t$ . Рассмотрим эту зависимость при  $x=\text{const}$ ,  $t=\text{const}$  и  $x,t=\text{const}$  [4]. При  $x=\text{const}$  переходим к понятию потока, какое количество деталей пройдет за время  $\Delta t$  через фиксированную точку на оси  $x$ :

$$q = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta n_t}{\Delta t} \Big|_x = \frac{dn}{dt} \Big|_x, \quad dn_t = q(t)dt, \quad n = \int_{t_1}^{t_2} q(t)dt \Big|_x. \quad (1)$$

При  $t = \text{const}$  переходим к понятию плотности, какое количество материала находится на отрезке  $\Delta x$  в момент времени  $t$ :

$$\rho = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta n_x}{\Delta x_t} \Big|_t = \frac{dn}{dx} \Big|_t, \quad n = \int_{x_1}^{x_2} \rho(x) dx \Big|_t. \quad (2)$$

При  $x, t = \text{const}$  переходим к понятию скорости, какое расстояние  $\Delta x$  пройдет материал за время  $\Delta t$ :

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \Big|_{x,t}. \quad (3)$$

Нарушение равномерности распределения материала на технологическом маршруте могут быть 2 типов: брак и сбой. При браке часть материала сходит с конвейера, а при сбое происходит нарушение распределения плотности (рис. 2.). Корректировка материального потока заключается в изменении скорости  $v(x, t)$  или интенсивности потока  $q(x, t)$ .

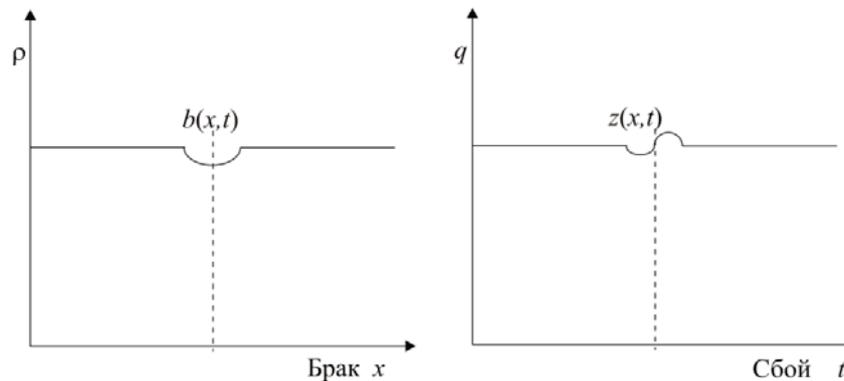


Рис. 2. Нарушение распределения движения материала по технологическому маршруту

Движение материала рассмотрим в трехмерной декартовой системе координат. Выделим интервал с концами, на котором находится порция материала. Ось  $x$  используем для описания состояния материального потока деталей от брака, ось  $y$  для описания состояния потока от сбоя, связанного с работой оборудования и ось  $z$  для описания состояния потока от работы персонала.

Обозначим  $X = (x, y, z), \Xi = (\xi, \eta, \zeta), d^3\Xi = d\xi d\eta d\zeta$ . (4)

Можно предложить следующие аналитические формы законов управления движения материала. Интегральный закон по времени относительно потока:

$$v(x, y, z, t) = -k_{11}(x)k_{12}(y)k_{13}(z) \int_t q(x, y, z, t) dt. \quad (5)$$

Интегральный закон по маршруту относительно плотности:

$$q_1(t) = -k_{21}(x)k_{22}(y)k_{23}(z) \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z_1}^{z_2} \rho(x, y, z, t) dx dy dz. \quad (6)$$

Практически закон сглаживания функций  $q, \rho$  и  $v$ , приближает фактический производственный процесс к желаемому. Если  $\int_t q_1(x, y, z, t) dt \neq 0$ , значит  $Q \neq q$ , т.е. происходит недо-выпуск или перевыпуск изделий, нужно изменить скорость, чтобы отклонение от потока  $\int_t q_1(x, y, z, t) dt \rightarrow 0$ .

Окончательно имеем систему уравнений, характеризующих состояние объекта в отклонениях от заданного режима и управление объектом с помощью скорости  $v$  или интенсивности потока  $q$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial \rho(X,t)}{\partial x} - \frac{\partial \rho(X,t)}{\partial y} - \frac{\partial \rho(X,t)}{\partial z} + b(X,t) \quad \text{Объект} \\ v(x,y,z,t) = -k_{11}(x)k_{12}(y)k_{13}(z) \int_t q(x,y,z,t) dt \quad \text{Управление} \end{array} \right. \quad (7)$$

$$x_0 \leq x \leq x_k, y_0 \leq y \leq y_k, z_0 \leq z \leq z_k, t \geq t_0, q(x_0, y_0, z_0, t) = q_0(t),$$

$$q(x_k, y_k, z_k, t) = q_k(t), \rho(x, y, z, t_0) = \rho_0(x, y, z),$$

$$\rho_x = u q_x, \rho_y = v q_y, \rho_z = w q_z.$$

Система уравнений имеет аналитическое решение при известных начальных и краевых условиях, которое может быть получено на основе импульсной функции Дирака [5]. Функция Грина является решением уравнения для рассматриваемой краевой задачи

$$f(x, y, z, t) = \delta(x - \xi) \delta(y - \eta) \delta(z - \zeta) \delta(t - \tau). \quad (8)$$

Рассмотрим вариант скоростей равных нулю при описании плотности потока от сбоя, связанного с работой оборудования и описания плотности потока от травматизма оператора

$$G(x, y, z, t, \xi, \eta, \zeta, \tau) = \frac{\delta(x - \xi - v(x, \eta, \zeta)t)}{4\pi t \sqrt{K_{yy} K_{zz}}} \exp\left[-\frac{(y - \eta)^2}{4K_{yy}t}\right] + \exp\left[-\frac{(z - \zeta)^2}{4K_{yy}t}\right] + \exp\left[-\frac{(z + \zeta)^2}{4K_{yy}t}\right].$$

Для точечного источника потери количества деталей  $N_0$  функция брака опишется:

$$b(x, y, z, t) = N_0 \theta(t) \delta(x - \xi) \delta(y - \eta) \delta(z - \zeta) \delta(t - \tau). \quad (9)$$

Решение для  $q$  имеет вид:

$$q(X, t) = q_0 + \int_0^t d\tau \int_{D_{\Xi}} \partial^3 \Xi G(X, \Xi, t - \tau) + N_0 \theta(\tau) \delta(\xi - x_0) \delta(\eta - y_0) \delta(\zeta - z_0). \quad (10)$$

Проведя интегрирование, получим

$$q(X, t) = q_0 + \frac{N_0 \exp c}{16\pi \sqrt{K_{xx} K_{yy} K_{zz}}} + \frac{1}{a_+} \left[ \exp(2a_+ b) \operatorname{erfc}\left(\frac{a_+}{\sqrt{t}} + b\sqrt{t}\right) + \exp(-2a_+ b) \operatorname{erfc}\left(\frac{a_+}{\sqrt{t}} - b\sqrt{t}\right) \right] +$$

$$+ \frac{1}{a_-} \left[ \exp(2a_- b) \operatorname{erfc}\left(\frac{a_-}{\sqrt{t}} + b\sqrt{t}\right) + \exp(2a_- b) \operatorname{erfc}\left(\frac{a_-}{\sqrt{t}} - b\sqrt{t}\right) \right],$$

где

$$a_{\pm} = \sqrt{\frac{(x - x_0)^2}{4K_{xx}} + \frac{(y - y_0)^2}{4K_{yy}} + \frac{(z \pm z_0)^2}{4K_{zz}}}, b = \frac{u}{2\sqrt{K_{xx}}}, c = \frac{u(x - x_0)}{2K_{xx}}, \operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-u^2) du.$$

Полученное аналитическое выражение выражает состояние потока движения деталей с учетом влияния работы оборудования и травматизма персонала.

Использование модели, направленной на повышение производительности труда и снижения травматизма на предприятиях лесоперерабатывающей промышленности, основанной на методах математической физики, позволило установить связь между непрерывным движением деталей и дискретно-номенклатурными операциями.

Параметры выпуска продукции и незавершённого производства при этом являются непрерывными функциями, зависящими от времени и координаты. Процесс перемещения деталей по технологической линии формализован системой дифференциальных уравнений в частных производных.

### Список литературы

1. Казаков С.В. Лесоперерабатывающие комплексы (Архитектору-проектировщику). – М.: Стройиздат, 1984. – 136 с.

2. Костарев, С.Н. Математическое моделирование бизнес-процесса предприятия / С.Н. Костарев, О.Б. Низамутдинов, Н.М. Беляева: сб. тр. / Перм. ин-т Моск. гос. ун-та коммерции. – Пермь, 1998. – С. 120–137.
3. Dolgova E.V., Faizrakhmanov R.A. Identification of situations at the management of factory material streams // *Pribory i Sistemy Upravleniya*, 2005. № 5. С. 60–62.
4. Серeda Т.Г. Научные технологии в проектировании искусственных экосистем хранения отходов / Т.Г. Серeda, Р.А. Файзрахманов, С.Н. Костарев; Перм. филиал Института экономики УрО РАН, Перм. гос. техн. ун-т. – Пермь, 2006. – 292 с.
5. Костарев С.Н. [Мониторинг безопасности](#) / учебно-методическое пособие. – Пермь, Издательство ПНИПУ, 2015.– 204 с.