

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕНОВОГО МАГНЕЗИТОВОГО БРУСА НА БАЗЕ ДРЕВЕСНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ

В.Н. Тарасов¹, В.В. Тугов², С.С. Сергеев²

¹Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443090, г. Самара, Московское шоссе, 77

²Оренбургский государственный университет
460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13

E-mail: vt@ist.psati.ru

Описывается поиск оптимального управляющего воздействия на древесную смесь в процессе изготовления стенового бруса на базе древесных органических отходов. Рассмотрено применение принципа максимума, который позволяет определить значения оптимальных управляющих воздействий U на древесную смесь и обеспечить наибольшую область устойчивости.

Ключевые слова: оптимальное управление, принцип максимума, критерий оптимальности управления, фазовая плоскость, древесный брус.

Введение. Рост потребности в продуктах лесопереработки ведет за собой усугубление проблемы накопления и утилизации растительных отходов, количество которых увеличивается из года в год. Крупнотоннажные отходы растительного происхождения – щепы, опилки и стружка – до сих пор являются, особенно в России, неликвидным побочным продуктом, и в том числе в Оренбургской области. Более того, ограничен круг автоматизированных технологий, позволяющих эффективно и с положительным экономическим эффектом перерабатывать древесные отходы [1].

В России при существующих способах переработки древесного сырья в целом используется около половины всех древесных отходов, что свидетельствует о неудовлетворительном состоянии отрасли. Основные потери приходятся на древесную зелень (лесосечные отходы), кору (отходы деревообработки), опилки и стружки (отходы лесопиления) – на каждый из перечисленных видов приходится 20-25 % от общей массы. Запасы отходов в стране очень велики. В частности, только масса древесной зелени спелых древостоев оценивается в России величиной свыше 3 млрд т, из которых 30,4 млн т являются экономически доступными, в том числе в Оренбургской области [2].

По данным ФАО ООН, четыре страны мира владеют половиной площади мировых лесов: Россия (22 %), Бразилия (16 %), Канада (7 %), США (6 %). В отношении лесов бореальной и умеренной зон Россия является абсолютным монополистом, обладая почти половиной мировых ресурсов. Прогнозы свидетельствуют, что к 2020 г. мировая потребность в деловой древесине возрастет примерно на 300 млн м³ и существует только один реальный источник покрытия этой потребности – леса России. На рис. 1 представлена динамика образования древесных отходов и прогнозируемый рост к 2015 г., из которого видно, что их количество динамично возрастает с каждой пятилеткой [2].

Вениамин Николаевич Тарасов (д.т.н., проф.), зав. кафедрой «Программное обеспечение и управление в технических системах».

Виталий Валерьевич Тугов (к.т.н., доц.), зав. кафедрой «Системный анализ и управление».

Сергей Сергеевич Сергеев, аспирант.

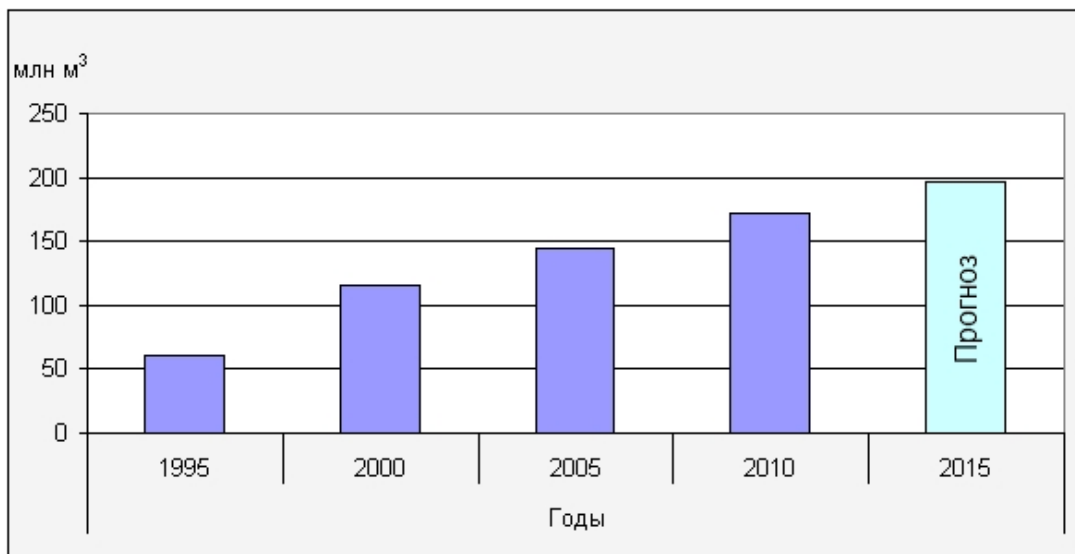


Рис. 1. Динамика образования древесных отходов

Наиболее рациональным направлением утилизации промышленных отходов является их использование как техногенного сырья при получении различного вида продукции, и прежде всего строительного назначения. Поэтому необходимо разрабатывать и совершенствовать технологии изготовления строительных материалов на основе древесных отходов, которые могут решить проблему рациональной переработки отходов растительного происхождения и способствовать снижению себестоимости строительства жилых домов и сельскохозяйственных сооружений.

Важнейший из технологических факторов, влияющих на физико-механические свойства строительных изделий на базе органических заполнителей и экономические показатели их производства, – это способ формирования и уплотнения древесных отходов, который зависит от технологии изготовления строительных материалов.

Проведенный анализ показал, что существует большое количество технологий изготовления строительных материалов на базе органических отходов, однако они обладают существенными недостатками, а именно: неоднородная плотность внутри готового изделия, невозможность получения изделий больших габаритов, высокие затраты времени, а также предъявление особых требований к свойствам древесной смеси и др. [3, 4, 5, 6, 7]. Поэтому проведение исследований, связанных с разработкой новой современной автоматизированной технологии, является актуальной задачей.

Постановка задачи. Конкретная фундаментальная задача, на решение которой направлена разработка, состоит в создании новой технологии переработки древесных органических отходов с использованием оптимальной системы управления процессом. В основе разрабатываемой технологии лежит специально разработанный пресс, который позволяет производить «двойное» прессование, что обеспечивает однородную плотность внутри готового изделия. Помимо этого он позволяет «протыкать» спрессованную древесную смесь металлическими тонкими стержнями. Полученные отверстия обеспечивают низкую теплопроводность, что в конечном итоге отражается на качестве и прочности изготовленных строительных материалов и возведенных сооружений. Одним из достоинств технологии является возможность безотходного изготовления

строительного бруса различной длины, причем в качестве материала могут быть использованы любые древесные отходы любого размера, влажности, породы древесины и др.

Решение поставленной задачи. Общей целью управления является получение стенового бруса с заданными свойствами. Основные этапы процесса изготовления представлены на рис. 2. Наиболее важным является процесс прессования, так как на этом этапе происходит формирование основных свойств бруса: однородной плотности, высокой прочности, низкой теплопроводности и др. Благодаря низкому коэффициенту теплопроводности и малому времени затрат на производство строительства из такого бруса особенно актуально в связи с целевой программой по энергосбережению.

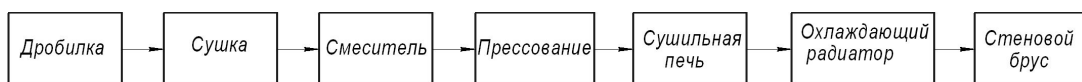


Рис. 2. Этапы процесса изготовления стенового бруса

Процессы, происходящие на этапах изготовления из древесных отходов, характеризуются большим числом взаимосвязанных параметров, наличием существенных неконтролируемых возмущений и случайным во времени изменением характеристик. Таким образом, они относятся к сложным процессам.

В качестве фазовых координат, характеризующих процесс прессования, могут рассматриваться различные показатели, такие как размер частиц древесных органических отходов S , время прессования $A(t)$, влажность древесных частиц V , усилие прессования P , соотношение органических отходов и вспомогательных веществ C , порода древесины G и др.

Критерием оптимальности процесса управления является функционал Q , зависящий от какой-либо одной, нескольких или в общем случае всех вышеперечисленных фазовых координат процесса:

$$Q = Q[S, A(t), V, P, C, G]. \quad (1)$$

Главная трудность практического использования критерия (1) заключается в том, что неясно, какие комбинации конкретных значений фазовых координат следует предпочесть другим, так как обычно нет возможности корректировать их одновременно. Поэтому на практике в качестве критерия оптимальности используют, как правило, какой-либо один технико-экономический показатель, наиболее соответствующий поставленной цели.

Для выбора критерия оптимальности следует первоначально проанализировать вид возмущения и ряд ограничений (по размеру частиц, влажности, времени, усилию прессования и т. п.). Проведенный анализ различных источников, а также лабораторные испытания показали, что для получения однородной плотности и сцепления связующих с древесным наполнителем при прессовании смеси из древесных отходов и вспомогательных веществ усилие прессования P является ключевым критерием оптимальности. В этом случае P_{ij} не должно превышать некоторого критического значения $P_{ij \text{ крит}}$, следовательно, при любом приемлемом управляющем воздействии U на координаты системы должны быть наложены ограничения вида [8]

$$P_{ij}(U) \leq P_{ij \text{ крит}}(U), \quad (2)$$

где $i, j = 1, 2, \dots; i \neq j$.

Невыполнение условия (2) будет означать нарушение динамической устойчивости. Поэтому для получения наибольшей плотности и уменьшения отрицательного влияния на процессы твердения связующих оптимальное управление должно обеспечивать минимальное отклонение параметров ограничений древесных отходов. Это требование можно записать как

$$|\Delta P_{\max}(U_{\text{опт}})| \leq |\Delta P_{\max}(U)| \in F|\Delta P(U)|, \quad (3)$$

где F – область допустимых отклонений ограничений координат системы.

Рассмотренный подход может быть применен для параметров системы управления: размера частиц древесных органических отходов, их влажности, соотношения органических отходов и вспомогательных веществ, времени смешивания опилок со связующими веществами, усилия прессования, времени сушки и температуры в сушильной печи и др.

Рассмотрим процесс управления для усилия прессования и запишем его в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dp^i}{dt} = f^i(p_1, \dots, p_n; u_1, \dots, u_r), \quad (4)$$

где $i, j = 1, 2, \dots, n$; $p_1 \dots p_n$ – фазовые координаты управляемого объекта, определяющие его состояние в каждый момент времени t ; $u_1 \dots u_r$ – параметры управления, определяющие ход процесса; t – время.

Для нахождения оптимального управления рассмотрим интегральный функционал [8]

$$J = \int_{t_0}^{t_1} f_0(p_1, \dots, p_n, u_1, \dots, u_r) dt, \quad (5)$$

где $f_0(p_1, \dots, p_n, u_1, \dots, u_r)$ – заданная функция на отрезке $t_0 \leq t \leq t_1$.

Для каждого управляющего воздействия u_i , заданного на отрезке $t_0 \leq t \leq t_1$, определяется ход управляемого процесса и интеграл (5) принимает определенное значение.

В общем случае оптимальное управление в каждый момент времени t будет являться суммой интегральных функционалов:

$$J = \sum_1^n (J_1, \dots, J_n). \quad (6)$$

При прессовании древесной смеси оптимальное управление будет происходить по границе допустимой области ограничений. Применение принципа максимума дает возможность установить структуру оптимального управления $U(t)$ и осуществить синтез оптимальной системы.

Поведение системы управления описывается как

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2, \quad (7)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = U, \quad (8)$$

где x_1, x_2 – фазовые координаты.

Ограничением будет являться условие

$$|U_j| \leq 1. \quad (9)$$

Для определения оптимального управления каждому допустимому управлению $u_1(t), \dots, u_r(t)$, заданному на отрезке $t_0 \leq t \leq t_1$, и произвольному постоянному вектору ψ фазового пространства ставится в соответствие функция $H(t, u_1, \dots, u_r)$ [8].

Функция H имеет следующий вид:

$$H = \Psi x_2 + \Psi_2 U, \quad (10)$$

где Ψ_1, Ψ_2 – вспомогательные переменные.

Для $|U_j| \leq 1$ максимум H будет достигаться при $U = \text{sign } \Psi_2$, т. е. $U(t) = +1$ при $\Psi_2 > 0$ и $U(t) = -1$ при $\Psi_2 < 0$. Вспомогательные переменные Ψ_i определяют из системы уравнений [9]

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = \frac{\partial H}{\partial x_1}, \quad (11)$$

$$\frac{d\Psi_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_2} = -\Psi_1. \quad (12)$$

Из уравнений (16) и (17) получим

$$\Psi_1 = C_1, \quad (13)$$

$$\Psi_2 = C_2 - C_1 t. \quad (14)$$

Решением системы (12) и (13) при управлении $U = +1$ будет являться

$$x_1 = 0.5x_2^2 + C. \quad (15)$$

На фазовой плоскости это изобразится семейством парабол, показанных на рис. 3.

При управлении $U = -1$ система уравнений (12) и (13) имеет решение в виде

$$x_1 = -0.5x_2^2 + C. \quad (16)$$

В таком случае семейство парабол будет иметь вид, представленный на рис. 4.

При переходе от значения $U = +1$ к значению $U = -1$ или наоборот поведение системы будет характеризоваться системой парабол, изображенных на рис. 5.

Опишем оптимальное управляющее воздействие на древесную смесь. Оптимальная система должна обеспечивать на выходе сигнал $U = +1$, если x_1 и x_2 таковы, что точка, изображающая поведение системы, находится ниже линии переключения АВ (см. рис. 5), и наоборот. При внешних воздействиях система изменяет свои координаты x и x_2 ; при попадании точки на кривую АВ сигнал на выходе переключается от значения $U = +1$ к значению $U = -1$, и наоборот. Таким образом, система будет являться оптимальной при следующих условиях:

$$U = +1 \text{ при } X_1 < 0; X_2 < 0, \quad (17)$$

$$U = -1 \text{ при } X_1 > 0; X_2 > 0. \quad (18)$$

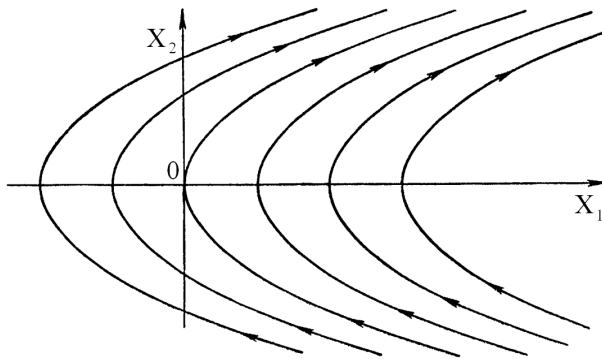


Рис. 3. Семейство парабол при управлении $U = +1$

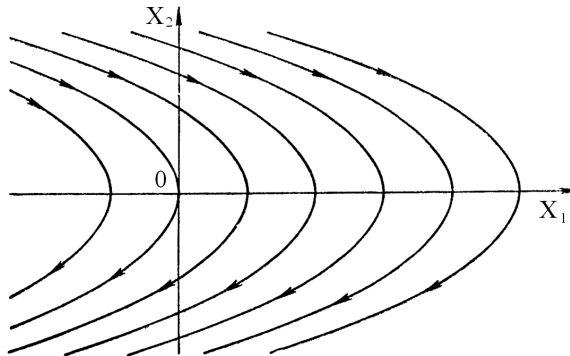


Рис. 4. Семейство парабол при управлении $U = -1$

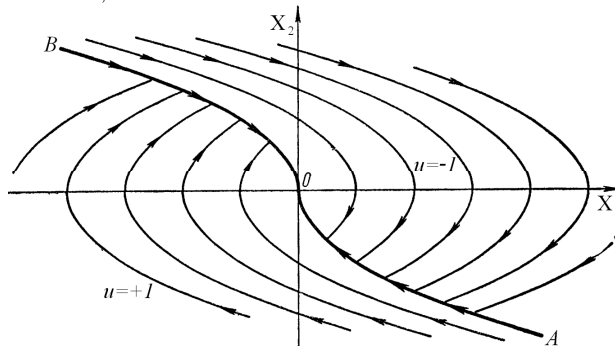


Рис. 5. Семейство парабол при переходе системы от значения $U = +1$ к значению $U = -1$ и обратно

В обобщенном виде переменные (выход лигнина, содержание воды, расход связующих и т. д.) можно представить в качестве компонент вектора X . Компонентой вектора U могут быть следующие характеристики: количество древесной смеси, подаваемой на пресс, время прессования, усилие прессования, температура в печи, соотношение органических отходов и вспомогательных веществ и др. Тогда состояние системы описывается как

$$\frac{dX}{dt} = f(X; U). \quad (19)$$

В установившемся режиме производные всех переменных равны нулю. При управлении усилие прессования ограничивается диапазоном

$$-U_{f_{\max}} < U_f < +U_{f_{\max}}. \quad (20)$$

В ходе работы для исследования влияния дисперсности древесных частиц на эффективность процесса прессования были проведены эксперименты в лабораторных условиях.

В качестве экспериментальных материалов были использованы: пенопласт (пенополистерол) в измельченном виде дисперсностью 0,5-2 мм; древесные опилки дисперсностью 3-5 мм; древесная стружка среднего размера 30-50 мм; различный материал растительного происхождения (ветки, кора, костра и проч.).

На основании полученных экспериментальных данных по результату процесса прессования построены графики зависимости величины сжатия материала от усилия прессования, где L – длина пресс-камеры, мм; P – усилие прессования, Н (рис. 6-9). Размеры камеры прессования по длине и ширине соответствуют размерам настоящей камеры прессования пресс-станка, но в уменьшенном масштабе – 1:10. Каждый вид экспериментальных исследований проводился 3 раза, после чего для анализа полученных результатов брались средние значения полученных опытных данных.

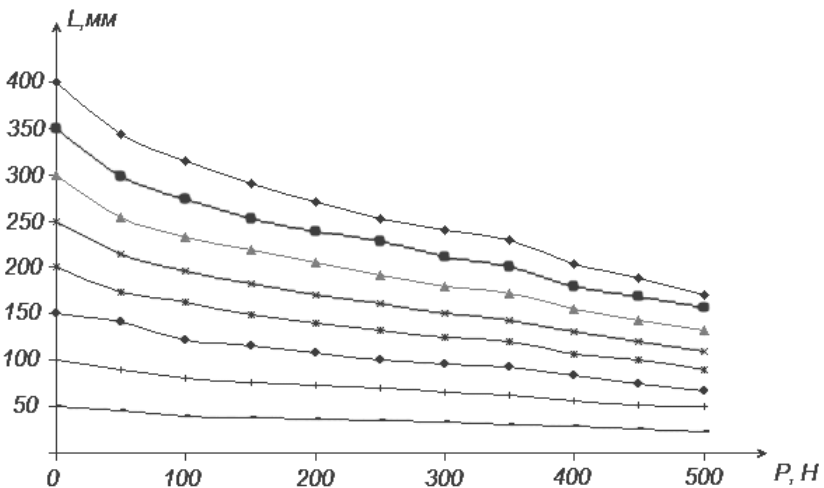


Рис. 6. График зависимости уровня сжатия пенопласта от усилия прессования

Проведенные эксперименты показали, что при прессовании древесных отходов необходимо учитывать, что усилие прессования зависит от дисперсности материалов, т. е. чем меньше размер древесных частиц, тем выше должно быть давление прессования для достижения однородной плотности готового изделия. Кроме того, возможно определить оптимальное усилие прессования для различных материалов.

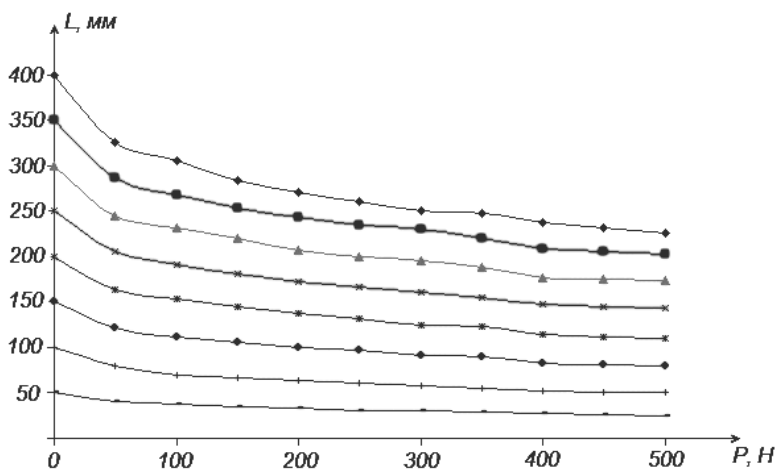


Рис. 7. График зависимости уровня сжатия древесных опилок от усилия прессования

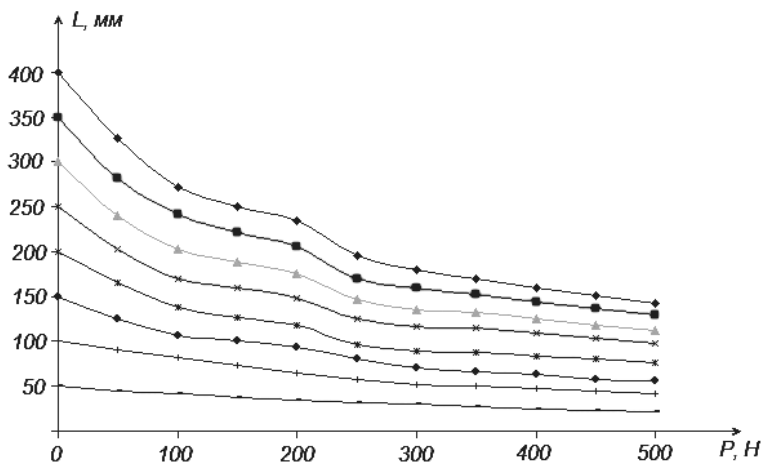


Рис. 8. График зависимости уровня сжатия древесной стружки от усилия прессования

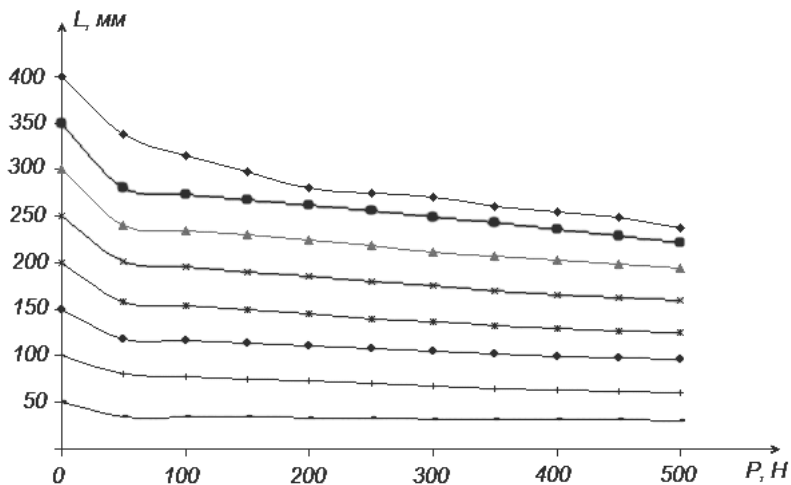


Рис. 9. График зависимости уровня сжатия древесных отходов от усилия прессования

Заключение. Таким образом, применение принципа максимума при изготовлении стенового магнезитового бруса из древесных органических отходов позволяет определить значения функции оптимального управления U , обеспечивающие наибольшую область устойчивости. Оптимальная функция U должна приводить к максимуму гамильтониана H . Ограничение (20) позволяет достигнуть максимума H при чередовании максимальной форсировки давления $U_f = +1$ с максимальной форсировкой обратного знака давления $U_f = -1$. Такой подход, обладая общностью, позволяет получить оптимальные алгоритмы и структуры АСУ производства стенового бруса на базе древесных отходов, инвариантные к особенностям конкретных процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рейнберг С.А. Вопросы экономии древесины. – М.-Л.: Гослесбумиздат, 1956. – 268 с.
2. Степень Р.А., Ренях С.М. Альтернативные пути переработки древесных отходов // Инновационный потенциал лесопромышленного комплекса Красноярского края. – Лесосибирск: СибГТУ, 2001. – С. 116-121.
3. Кортаев Э.И., Симонов В.И. Производство строительных материалов из древесных отходов. – М.: Лесная промышленность, 1972. – 144 с.
4. Клименко М.И. Исследование арболита на основе высокопрочного гипса: Автореф. дисс. ВНИИНСМ, м. 1971. – 14 с.
5. Ващицкий И.М. Использование еловой коры в строительстве // Сельский строитель. – М., 1972. – 114 с.
6. Харатишвили И.А. Прогрессивные строительные материалы: технология, применение, экономика. – М.: Стройиздат, 1987. – 214 с.
7. Качелкин Л.И. Комплексное использование отходов древесины. – М.: Гослесбумиздат, 1971. – 126 с.
8. Понтрягин Л.С. Математическая теория оптимальных процессов. – М.: Наука, 1969. – 384 с.
9. Дубовицкий А.Я. Необходимые условия слабого экстремума в общей задаче оптимального управления. – М.: Наука, 1971. – 115 с.

Статья поступила в редакцию 2 октября 2012 г.

OPTIMAL CONTROL OF THE MANUFACTURING BUILDING MAGNESITE BEAM BASED ON TREE ORGANIC WASTE

V.N. Tarasov¹, V.V. Tugov², S.S. Sergeev²

¹Volga State University of Telecommunications and Computer Science
77, Moscow sh., Samara, 443090

²Orenburg State University
13, Pobedy st., Orenburg, 460018

This paper describes the search for the optimal control action on a mixture of wood in the manufacture wall beam from woody organic waste. The application of the maximum principle, which measures the value of the control actions U for wood blend as best for speed and at the same time providing the greatest stability region.

Keywords: *optimal control, the maximum principle, the criterion for optimal control, phase plane, wood beams.*

*Veniamin N. Tarasov Dr. Sci. (Techn.), Professor.
Vitaly V. Tugov Dr. Sci. (Techn.), Professor.
Sergey S. Sergeev, Postgraduate Student.*