

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5183

УДК 674.81

Обзор

Анализ исследований по тематике прессования древесных ОТХОДОВ

Власов Юрий Николаевич

кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), robada-872@yandex.ru

Григорьев Игорь Владиславович

доктор технических наук, профессор, Якутская государственная сельскохозяйственная академия (Российская Федерация), silver73@inboxl.ru

Куницкая Ольга Анатольевна

доктор технических наук, доцент, Якутская государственная сельскохозяйственная академия (Российская Федерация), ola.ola@mail.ru

Хитров Егор Германович

кандидат технических наук, докторант, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Российская Федерация), yegorkhitrov@gmail.com

Получена: 15 февраля 2020 / Принята: 19 мая 2020 / Опубликовано: 23 июня 2020

Аннотация: Наиболее распространёнными видами биотоплива, производимого из древесных отходов, являются пеллеты и брикеты. Организация современных промышленных линий гранулирования рентабельна лишь при значительных объёмах перерабатываемого сырья, недостижимых для малых лесоперерабатывающих предприятий. Требования к фракционному составу и качеству сырья более строгие по сравнению с брикетным производством. Наилучшим сырьём для гранулирования считаются сухие опилки и стружка. Транспортная и насыпная плотность пеллет, составляющая ориентировочно 650 кг/м^3 , ниже транспортной плотности брикетов, превышающей 1000 кг/м^3 . По этим причинам брикеты представляют собой альтернативу топливным гранулам, более известным на рынке. Вместе с тем в области брикетного производства последнее фундаментальное исследование в нашей стране выполнено Н. А. Модиним в 1971 г. Недостаток научных сведений сдерживает дальнейшее совершенствование технологического процесса брикетирования отходов лесопереработки. Разработаны модели статического прессования измельчённых

древесных материалов, основывающиеся на допущении о том, что скорость обработки не оказывает существенного влияния на показатели уплотнения. Такое допущение справедливо далеко не во всех случаях, поскольку на деформации материала оказывают влияние не только инерционные эффекты, которыми при статическом прессовании справедливо можно пренебречь, но и реологические свойства брикетируемого сырья, проявляющиеся и при сравнительно «медленных» режимах обработки. Характер изменения требуемого давления прессования, стремительно увеличивающегося при плотности брикета свыше 1000 кг/м^3 , в известных моделях передан не вполне точно, что объясняется использованием линейных выражений деформативных свойств материала брикета от плотности.

Ключевые слова: математическое моделирование, прессование древесных отходов, энергетическая эффективность.

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5183

Review

Analysis of research on wood waste pressing

Yuri Vlasov

PhD in engineering, associate professor, Voronezh state forest engineering University named after G. F. Morozov (Russian Federation), pobeda-872@yandex.ru

Igor Grigorev

Doctor of engineering, professor, Yakut state agricultural Academy (Russian Federation), silver73@inboxl.ru

Olga Kunitskaya

Doctor of engineering, associate professor, Yakut state agricultural Academy (Russian Federation), ola.ola@mail.ru

Yegor Khitrov

PhD in engineering, doctoral student, Voronezh state forest engineering University named after G. F. Morozov (Russian Federation), yegorkhitrov@gmail.com

Received: 15 February 2020 / Accepted: 19 May 2020 / Published: 23 June 2020

Abstract: The most common types of biofuels produced from wood waste are pellets and briquettes. The operation of modern industrial granulation lines is profitable only when significant volumes of raw materials are processed, which is not the case for small timber processing enterprises. Requirements for the fractional composition and quality of raw materials are more stringent than in briquette production. Dry sawdust and shavings are considered the best raw materials for granulation. The transport and bulk density of pellets, which is approximately $650 \text{ kg} / \text{m}^3$, is lower than the transport density of briquettes, which exceeds $1000 \text{ kg} / \text{m}^3$. For these reasons, briquettes are an alternative to fuel pellets, which are better known on the market. At the same time, in the field of briquetting production, the last fundamental research in our country was carried out by N. A. Modin in 1971. Lack of scientific information hinders further improvement of the technological process of briquetting wood processing waste. Models of static pressing of crushed wood materials have been developed, based on the assumption that the processing speed does not significantly affect the compaction performance. This assumption is not true in all cases, since the deformation of the material is influenced not only by inertial effects, which can be fairly ignored during static pressing, but also by the rheological properties of the briquetted raw material, which are also manifested in

relatively "slow" processing modes. The nature of the required compacting pressure change that rapidly increases with the density of the briquette more than 1000 kg / m^3 , is not quite accurate in the known models due to the use of linear expressions of the material stress-related characteristics of the briquette density.

Keywords: mathematical modeling, wood waste pressing, energy efficiency.

1. Введение

Прессы для брикетирования выпускаются различных типов:

- Штемпельные механические прессы с открытой матрицей.
- Прессы-экструдеры с открытой матрицей.
- Ударно-механические прессы с открытой матрицей.
- Гидравлические прессы с закрытой матрицей.

Наиболее качественные брикеты получают с использованием гидравлических прессов с закрытой матрицей. Практика показывает, что прессовое гидравлическое оборудование получило к настоящему времени наибольшее распространение.

Анализ научных сведений по проблематике прессования измельчённых древесных материалов выполнен в данной статье.

Анализ литературных источников показывает, что исследования по брикетированию отходов лесопереработки и, в более общем случае, отходов промышленного производства и сельского хозяйства можно условно разделить на две группы: 1) с опорой на теоретическое описание процесса уплотнения материала, 2) экспериментальные исследования, посвящённые испытаниям образцов прессов при брикетировании определённых видов отходов, а также свойств получаемых брикетов, главным образом, теплотворной способности. Исследования второй группы представляют безусловный интерес с точки зрения проверки результатов теоретических разработок, но, к сожалению, на настоящий момент времени не позволяют составить комплексную картину влияния параметров операции брикетирования и свойств сырья на технологические показатели, плотность и прочность готовой продукции. Рассмотрим основные результаты, полученные в рамках теоретического подхода к описанию уплотнения органических материалов.

2. Статическое прессование

Под статическим прессованием понимается такой способ воздействия на сырьё, при котором скорость воздействия рабочего органа достаточно мала и инерционными эффектами при деформации материала можно пренебречь. Считается, что скорость обработки не оказывает существенного влияния на показатели уплотнения. Такое допущение справедливо далеко не во всех случаях, поскольку на деформации материала оказывают влияние не только инерционные эффекты, но и реологические свойства брикетируемого сырья, проявляющиеся даже при сравнительно «медленных» режимах обработки. Тем не менее статические модели прессования позволили сформулировать важные рекомендации по обоснованию параметров технологического процесса брикетирования древесных отходов.

В работе [1] проанализированы результаты промышленных испытаний штемпельных прессов, в исследовании [2] установлены степенные зависимости давления на штемпеле пресса, при котором формируется брикет определённой плотности. Основные результаты проиллюстрированы на рисунке 1.

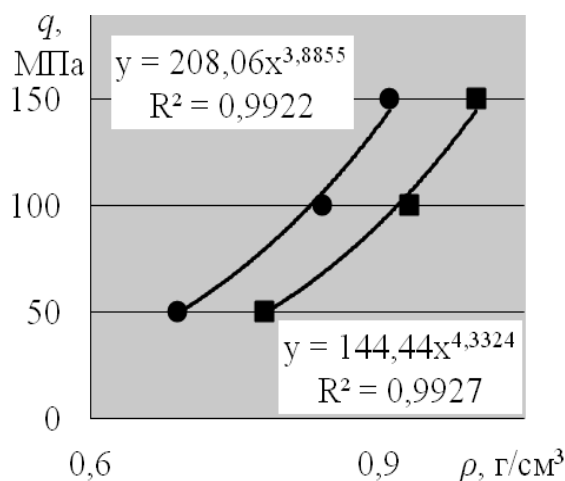


Рисунок 1. Зависимость потребного давления на штемпеле прессы от плотности брикета

Соотношения впоследствии уточнены экспериментальными данными, полученными при проведении производственных опытов по брикетированию с использованием современных гидравлических прессов фирмы RUF. Экспериментальный опыт обобщён и на его основе предложена дифференциальная зависимость модуля упругой деформации древесного сырья E и его относительной деформации сжатия ε :

$$\frac{dP_1}{d\varepsilon} = E, \quad (1)$$

где P_1 — давление рабочего органа, направленное на уплотнение материала брикета.

Далее проведены исследования по определению модуля E для конгломерата древесных частиц, хаотически ориентированных в пространстве прессформы. Модуль деформации E вычислен с учётом математических ожиданий технических упругих постоянных древесины при равномерном разбросе углов, характеризующих положение частиц в пространстве прессформы (методы осреднения Фойгта и Ройсса). Этот же подход апробирован и ранее использовался при теоретическом определении деформативных свойств сырья в плитном производстве. Зависимость модуля E от плотности конгломерата древесных частиц ρ проиллюстрирована на рисунке 2, аналогичная зависимость для коэффициента Пуассона ν представлена на рисунке 3.

В результате аппроксимации расчётных данных получены линейные зависимости E , ν от плотности прессуемого сырья:

$$E = 6101\rho - 2482,2, \quad (2)$$

$$\nu = -0,0532\rho + 0,3536. \quad (3)$$

Плотность ρ , в свою очередь, связана с начальной плотностью прессуемого сырья ρ_0 и относительной деформацией сжатия:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 - \varepsilon}, \quad (4)$$

где ρ_0 — начальная плотность материала брикета.

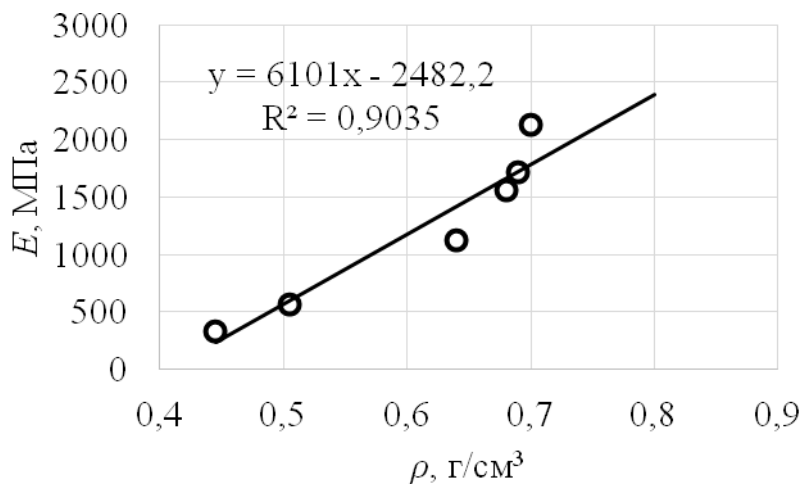


Рисунок 2. Зависимость осреднённого модуля упругости конгломерата древесных частиц от плотности цельной древесины

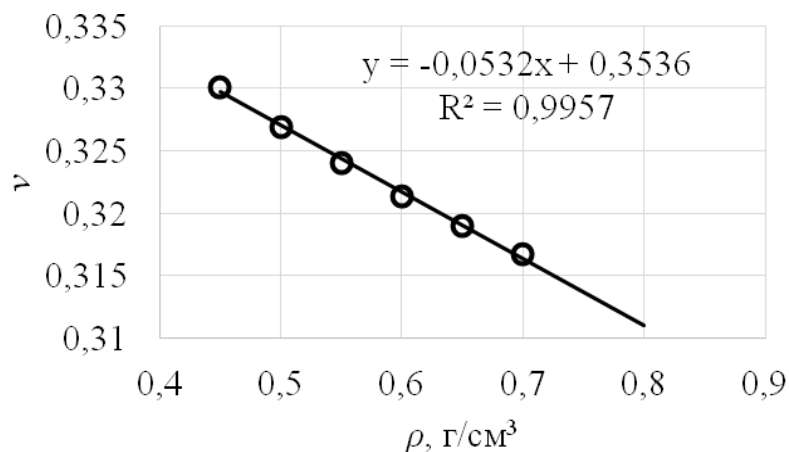


Рисунок 3. Коэффициент Пуассона конгломерата древесных частиц в зависимости от плотности

Интегрирование выражения (1), с учётом обобщения:

$$E = a\rho + b, \quad (5)$$

где a, b — числовые коэффициенты, и начального условия:

$$P_1(0) = 0, \quad (6)$$

позволило получить выражения для составляющей общего давления рабочего органа прессы, обуславливающей сжатие (уплотнение) материала брикета:

$$P_1 = -a\rho_0 \ln(1 - \varepsilon) + b\varepsilon. \quad (7)$$

Для составляющей давления рабочего органа P_2 , преодолевающей трение материала брикета о стенки прессформы, использована зависимость:

$$P_2 = \nu P_1, \quad (8)$$

в которой уравнение коэффициента Пуассона представлено в общем виде следующим образом:

$$\nu = c\rho + d, \quad (9)$$

где c, d — числовые коэффициенты зависимости (3).

Общее давление рабочего органа, формирующее брикет, находится суммированием составляющих:

$$P = P_1 + P_2, \quad (10)$$

таким образом,

$$P = \{-a\rho_0 \ln(1 - \varepsilon) + b\varepsilon\} \cdot \{1 + c\rho + d\}. \quad (11)$$

С учётом выражения (4) для потребного давления прессования получено уравнение

$$P = \left\{ -a\rho_0 \ln\left(\frac{\rho_0}{\rho}\right) + b\frac{\rho - \rho_0}{\rho} \right\} \cdot \{1 + c\rho + d\}, \quad (12)$$

в котором числовые коэффициенты a, b, c, d определяются из формул (2), (3).

Пример результатов расчёта по формуле (12) приведён на рисунке 4.

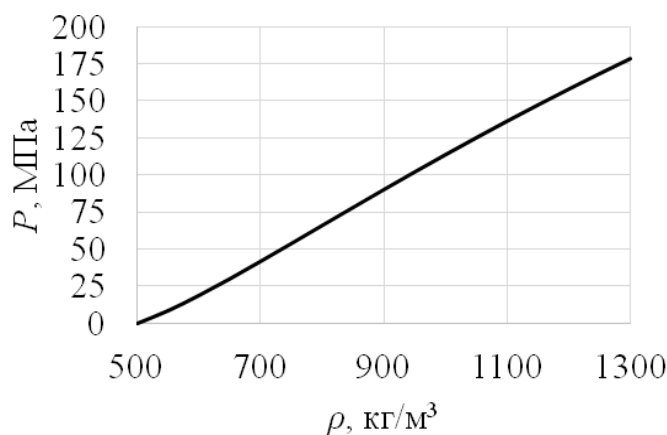


Рисунок 4. Потребное давление рабочего органа гидравлического прессы в зависимости от плотности брикета

Полученная оценка согласуется с практикой в плане порядка величин. Согласно работе [3], брикет с плотностью свыше 1 г/см^3 формируется под давлением рабочего органа прессы при давлении свыше 100 МПа. Однако характер изменения потребного давления прессования передан не вполне точно, что объясняется использованием линейных уравнений для модуля деформации E , и нуждается в дальнейшем уточнении. Кроме того, уравнение (1), положенное в основу модели, свидетельствует о квазиупругой постановке задачи. Тем не менее важным результатом является введение в математическую модель переменной величины модуля деформации E ; это обстоятельство учтём в наших теоретических исследованиях. Полагаем, что для развития подхода к расчёту давления по деформативным свойствам материала следует рассматривать модели материала, отличные от модели тела Гука с упрочнением, например, реологические материалы вязко-упругих, вязко-пластических и вязко-упруго-пластических тел, параметры которых переменны и зависят от их деформации.

3. Динамические нагрузки

В работах [4], [5], [6] рассмотрено воздействие динамических (ударных и вибрационных нагрузок) на измельчённые древесные материалы. Принципиальным отличием от исследований по статическому воздействию на сырьё является учёт скоростей и ускорений рабочего органа в процессе формирования брикета, а также вызванных его воздействием дополнительных динамических напряжений в уплотняемом материале. Проанализируем основные полученные результаты.

В диссертации [4] моделью формируемого брикета является стержневая система, схема которой представлена на рисунке 5.

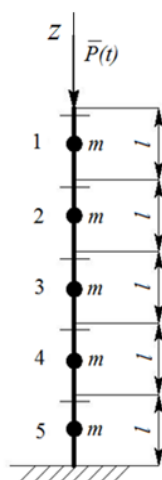


Рисунок 5. Модель формируемого брикета в виде стержневой системы

Рассматривается динамика стержневой системы в соответствии с матричным уравнением

$$K\bar{z} + \Gamma\dot{\bar{z}} + m\ddot{\bar{z}} = \bar{P}(t), \quad (13)$$

где K — матрица жёсткости элементов стержневой модели, коэффициенты которой зависят от деформативных свойств материала кирпича, Γ — диссипативная матрица, учитывающая силы внутреннего и внешнего трения в стержневой модели, m — матрица масс элементов стержневой модели, учитывающая силы инерции, возникающие при динамическом воздействии, \bar{z} — вектор обобщённых перемещений элементов стержневой модели.

Решение уравнения (13) предлагается искать в виде вектора:

$$\bar{z} = \Phi \bar{a}(t), \quad (14)$$

где Φ — некоторая квадратная матрица, $\bar{a}(t)$ — вектор динамических коэффициентов, значения элементов которого зависят от времени.

Уравнение (12) преобразовано с учётом общего вида решения формулы (14) и элементарных матричных преобразований:

$$\bar{\ddot{a}}(t) + \Psi^T \Gamma_m \Psi \bar{\dot{a}}(t) + \Psi^T K_m \Psi \bar{a}(t) = b(t), \quad (15)$$

где $m^{0.5}$ — матрица, составленная из квадратных корней соответствующих элементов матрицы масс, $K_m = \left((m^{0.5})^{-1} \right)^T \times K \times (m^{0.5})^{-1}$, $\Gamma_m = \left((m^{0.5})^{-1} \right)^T \times \Gamma \times (m^{0.5})^{-1}$, $b(t) = \Psi^T \times \left((m^{0.5})^{-1} \right)^T \times \bar{P}(t)$, Ψ — матрица собственных векторов K_m , тогда

$$\Psi^T K_m \Psi = \Lambda, \quad (16)$$

где Λ — матрица собственных значений матрицы K_m .

В уравнении (15) матрица собственных векторов диссипативной матрицы Γ имеет те же собственные векторы, что и матрица жёсткости K , таким образом,

$$\Psi^T \Gamma_m \Psi = \Lambda_\Gamma, \quad (17)$$

причём матрица Λ_Γ является функцией матрицы Λ :

$$\Lambda_\Gamma = f(\Lambda), \quad (18)$$

С учётом принятых обозначений и соотношений уравнение (15) приводится к форме:

$$\bar{\ddot{a}}(t) + \gamma \bar{\dot{a}}(t) + p^2 \bar{a}(t) = b(t), \quad (19)$$

его решение находится с использованием интеграла Дюамеля:

$$\bar{a}_j(t) = \int_0^t k_j(t-\tau) b_j(\tau) d\tau, \quad (20)$$

где k_j — импульсная переходная функция (ИПФ) стержневой системы:

$$k_j(t) = \frac{1}{p_{1j}} \exp\left(\frac{-\gamma_j t}{2}\right) \sin(p_{1j} t), \quad (21)$$

в которой использовано обозначение

$$p_{1j} = p_j \sqrt{1 - \frac{\gamma^2}{4}}. \quad (22)$$

Векторы перемещений \bar{z} находятся по векторам коэффициентов $\bar{a}(t)$, затем по векторам перемещений определяются внутренние усилия в стержневой модели:

$$\bar{S}(t) = L_s K \bar{v}(t), \quad (23)$$

где L_s — матрица влияния внутренних усилий, определяемая геометрическими параметрами стержневой модели.

Реализация математической модели выполнена численными методами в среде MathCAD, проведен расчёт ударного прессования опилок древесины берёзы и сосны с модулями упругости 1950,7 МПа и 1311,6 МПа соответственно. Начальная расчётная плотность материала брикета принята равной 0,6 г/см³. Импульс ударной нагрузки в расчётах составлял 300 Н·с. Расчёты выполнены для круглого сечения прессформы с внутренним диаметром $d_{\text{внутр}}$. Результаты проведённых вычислений представлены в таблице.

Таблица. Расчётные значения плотности брикета из опилок, получаемого ударом

| Порода древесины | $d_{\text{внутр}}$, мм | h_0 , мм | Δz_{max} , мм | $\rho_{\text{теор}}$, г/см ³ |
|------------------|-------------------------|------------|------------------------------|--|
| Сосна | 20 | 106 | 59,61 | 1,37 |
| Сосна | 50 | 20 | 9,21 | 1,11 |
| Берёза | 20 | 106 | 48,50 | 1,11 |
| Берёза | 50 | 20 | 7,52 | 0,96 |

По результатам реализации стержневой модели брикета также установлены распределения напряжений, возникающих вследствие ударного воздействия (номера сечений соответствуют схеме на рисунке 6).

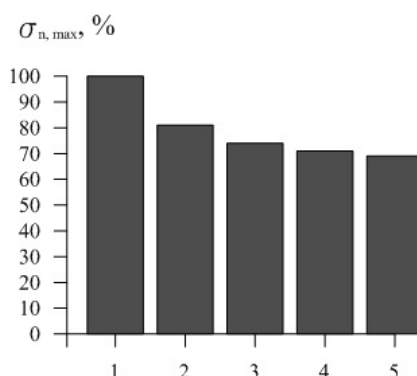


Рисунок 6. Распределение внутренних напряжений в брикете при ударном воздействии

Стержневые модели брикета позволяют учесть распределение напряжений и, как следствие, решить задачу формирования брикета, равноплотного по длине. Однако вопрос равноплотности не столь актуален при производстве брикетов с геометрическими параметрами, отвечающими современным стандартам, — высота брикетов находится в пределах 10—15 см. Сложности теоретического описания и несформированность методики определения элементов диссипативной матрицы обусловили в дальнейшем необходимость разработки более простых моделей, позволяющих, тем не менее, учесть основные параметры динамического воздействия.

В работе [4] динамическое прессование древесной коры исследовано на основе расчётной схемы, представленной на рисунке 7.

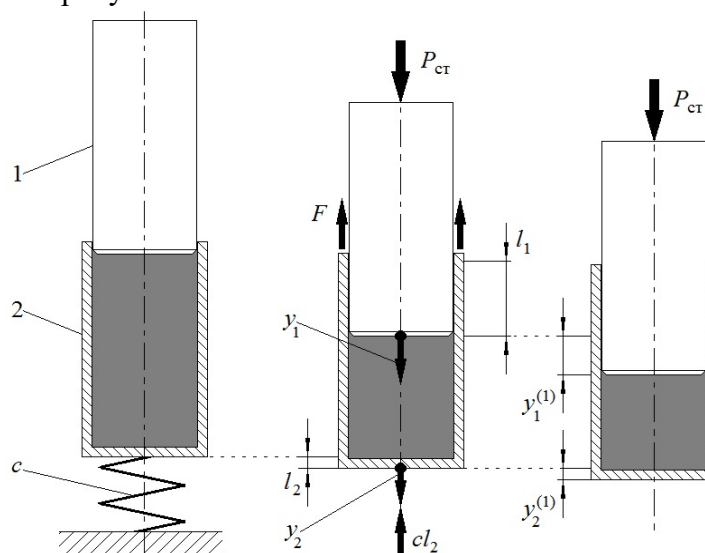


Рисунок 7. Расчётная схема прессования измельчённых древесных материалов под воздействием ударной нагрузки: 1 — пуансон, 2 — матрица

Рабочий орган ударного пресса считается жёстким телом 1, материал формируемого брикета является сплошным деформируемым телом. Рассматривается взаимодействие жёсткого тела с деформируемым и перемещение сечения модели, соответствующего поверхности контакта тел. Перемещение определяется из решения дифференциального уравнения динамики

$$m \frac{d^2 y_1^{(i)}}{dt^2} + F(\Delta y_0) + F(y_1^{(i)}) = P_{cm}, \quad (24)$$

где верхний индекс при переменной y соответствует номеру удара.

Зависимость сопротивления материала брикета перемещению рабочего органа определяется по результатам статических испытаний:

$$P_{cm} = F(\Delta y_0). \quad (25)$$

Усилие P_{cm} прикладывается до удара, и его зависимость от перемещения пуансона определяет жёсткость прессуемого материала, зависимость вида (25) далее используется при определении функции сопротивления $F(y_1^{(i)})$.

Уравнение (24) после подстановки выражения (25) приводится к следующему виду:

$$m \frac{d^2 y_1^{(i)}}{dt^2} + F(y_1^{(i)}) = 0, \quad (26)$$

причём выражение для расчёта суммарного перемещения $Y_1^{(i)}$ рабочего органа после i -го удара следующее:

$$m \frac{d^2 Y_1^{(i)}}{dt^2} + F(Y_1^{(i)}) = 0, \quad (27)$$

где обозначено:

$$i = 2, 3, \dots, Y_1^{(i)} = \Delta y_0 + \sum_i y_1^{(i)}. \quad (28)$$

Начальные условия, при которых решается уравнение (26), (27), определяются физическим смыслом задачи:

$$\begin{cases} Y_1^{(i)}|_{t=0} = \Delta y_0 + y_{1\text{кон}}^{(1)} + \dots + y_1^{(i-1)} \\ \frac{dY_1^{(i)}}{dt}|_{t=0} = V_0^{(i)} \end{cases}, \quad (29)$$

где V_0 — начальная скорость рабочего органа при воздействии на материал брикета.

В работе [5] использована экспоненциальная зависимость $F(y)$:

$$F = A \exp(By). \quad (30)$$

При зависимости (30) уравнение (26) приводится к следующему виду:

$$m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + A e^{By(t)-C} = 0, \quad (31)$$

где A, B, C — эмпирические коэффициенты, общее решение его следующее:

$$y(t) = - \frac{- \ln \left(- \frac{C_1 e^C}{2A} \left(-1 + \text{th}^2 \left(\frac{(t + C_2) \sqrt{C_1 B m e^C}}{2 m e^C} \right) \right) \right)}{B} + C, \quad (32)$$

откуда следует выражение для скорости рабочего органа после начала контакта с обрабатываемым материалом брикета:

$$\frac{dy(t)}{dt} = - \frac{\sqrt{C_1 B m e^C}}{B m e^C} \text{th} \left(\frac{(t + C_2) \sqrt{C_1 B m e^C}}{2 m e^C} \right). \quad (33)$$

Для определения постоянных интегрирования в формулах (32), (33) используются начальные условия, полученные с учётом уравнений (28), (29):

$$\begin{cases} y(t)|_{t=0} = \Delta h \\ \frac{dy(t)}{dt}|_{t=0} = V_0 \end{cases}, \quad (34)$$

где Δh — изменение высоты прессуемого материала в матрице, вызванное воздействием рабочего органа пресса.

Тогда для постоянных интегрирования имеем:

$$C_1 = \frac{2Ae^{C\Delta h+B} + Bme^{2C}V_0^2}{e^C}, \quad (35)$$

$$C_2 = -\frac{e^C m \tanh^{-1}\left(\sqrt{Bm(2Ae^{C\Delta h+B} + Bme^{2C}V_0^2)}\right)}{\sqrt{Bm(2Ae^{C\Delta h+B} + Bme^{2C}V_0^2)}}. \quad (36)$$

Продолжительность ударного воздействия определяется с учётом условия

$$\frac{dy(t)}{dt} = 0, \quad (37)$$

т. е. из решения уравнения (33):

$$-\frac{\sqrt{C_1 B m e^C}}{B m e^C} \operatorname{th}\left(\frac{(t + C_2)\sqrt{C_1 B m e^C}}{2 m e^C}\right) = 0. \quad (38)$$

Для уравнения (38) справедливо:

$$C_1 = 0, \quad (39)$$

$$t + C_2 = 0, \quad (40)$$

тогда время ударного воздействия рабочего органа будет:

$$T = -C_2 = \frac{e^C m \operatorname{th}^{-1}\left(\sqrt{Bm(2Ae^{C\Delta h+B} + Bme^{2C}V_0^2)}\right)}{\sqrt{Bm(2Ae^{C\Delta h+B} + Bme^{2C}V_0^2)}}. \quad (41)$$

Таким образом, на основании формул (32), (35), (36) суммарное изменение высоты модели материала, вызванное i -кратным воздействием рабочего органа, определится по формуле

$$\Delta h_{\max}^{(i)} = \frac{C - \ln\left(\frac{2Ae^{C\Delta h+B} + Bme^{2C}V_0^2}{2A}\right)}{B}, \quad (42)$$

при этом расчётное значение плотности брикета находится по уравнению

$$\rho_{\text{бр}}^{\text{теор}} = \rho_0 \frac{h_0}{h_0 - \Delta h_{\max}^{(i)}}. \quad (43)$$

В работе [5] выполнены расчёты по полученным уравнениям, результаты их для случаев ударного уплотнения опилок и измельчённой коры проиллюстрированы на рисунках 8—13.

На рисунке 14 приведён фазовый портрет ударного прессования коры рабочим органом массой 50 кг при начальной скорости 8 м/с.

К сожалению, в выполненных исследованиях не учитывалось вязкое сопротивление древесного материала уплотнению ввиду отсутствия возможности управления скоростью рабочего органа пресса на стадии экспериментов. Этот вопрос остаётся одним из перспективных направлений дальнейших исследований.

Впоследствии исследования динамического уплотнения древесных материалов были продолжены [6]. Изучено динамическое уплотнение измельчённой коры под воздействием вибрационной нагрузки, при проведении исследования использована схема по рисунку 15.

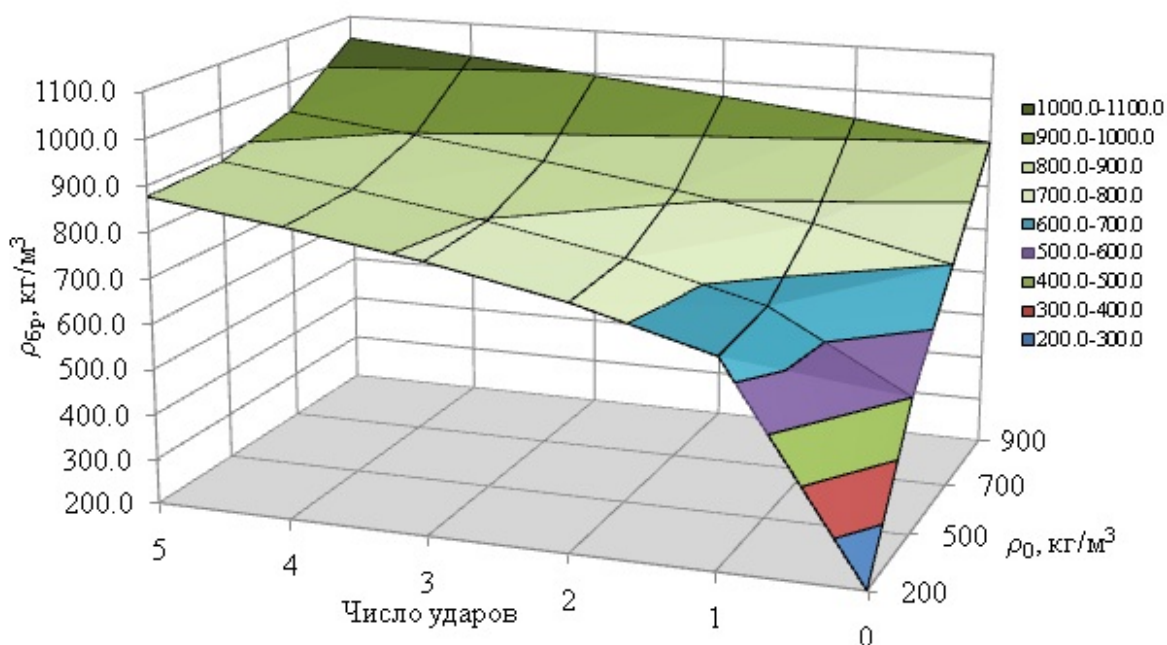


Рисунок 8. Результаты расчёта ударного уплотнения древесной коры (масса рабочего органа 25 кг, начальная скорость рабочего органа 8 м/с)

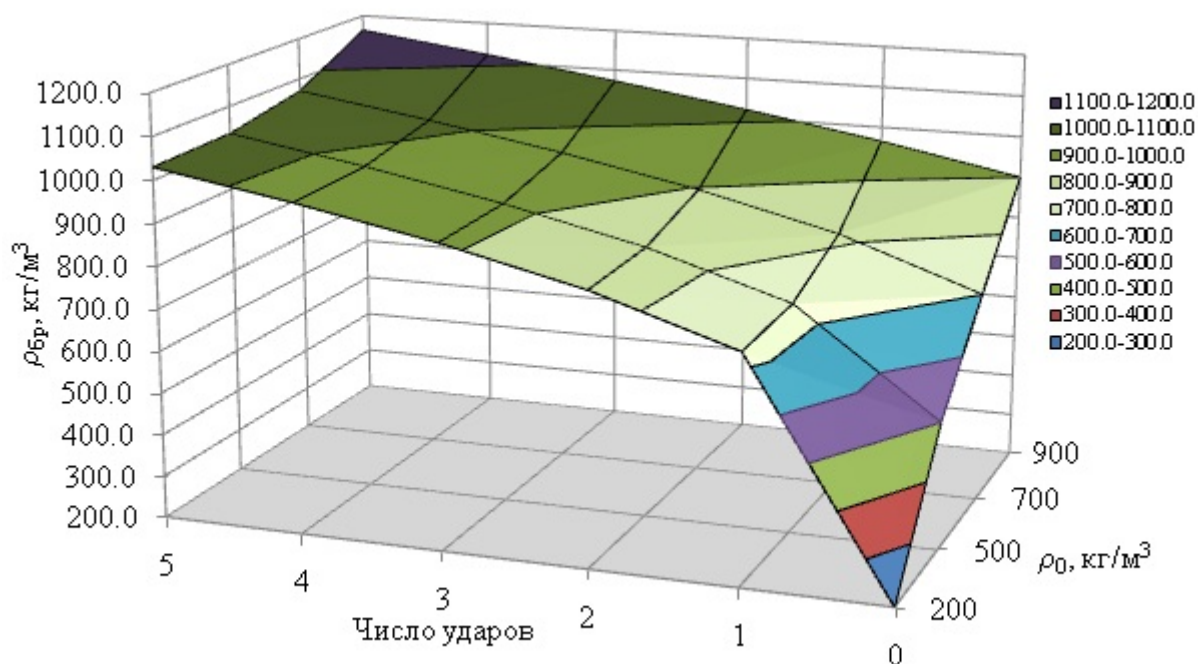


Рисунок 9. Результаты расчёта ударного уплотнения древесной коры (масса рабочего органа 50 кг, начальная скорость рабочего органа 8 м/с)

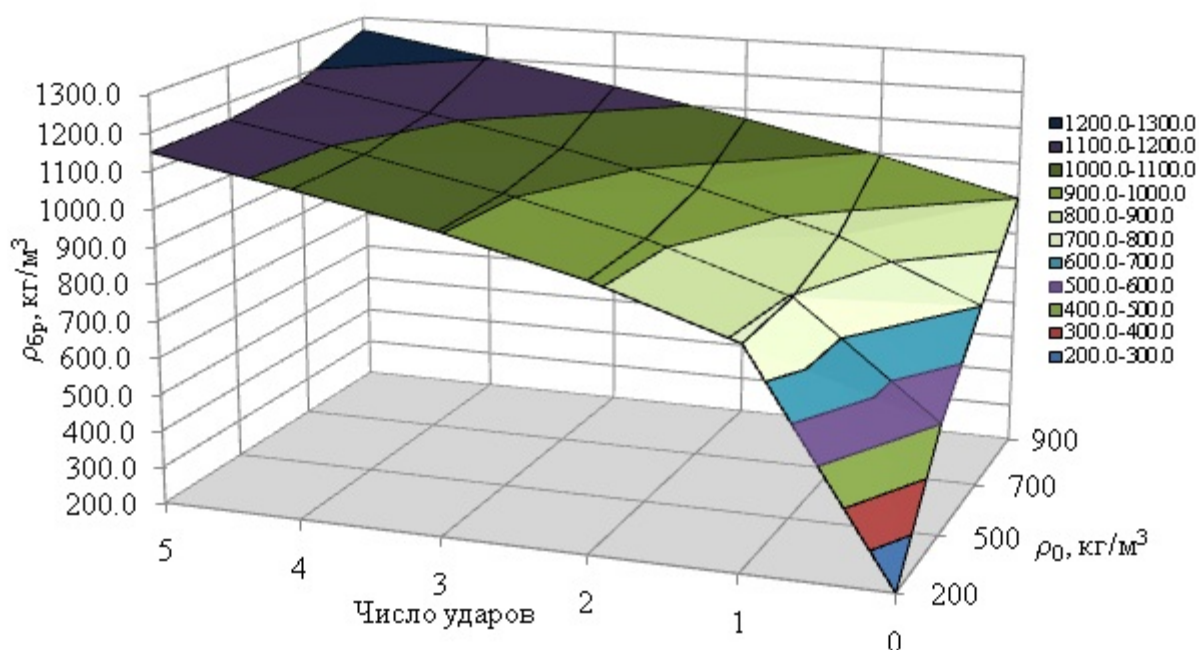


Рисунок 10. Результаты расчёта ударного уплотнения древесной коры (масса рабочего органа 75 кг, начальная скорость рабочего органа 8 м/с)

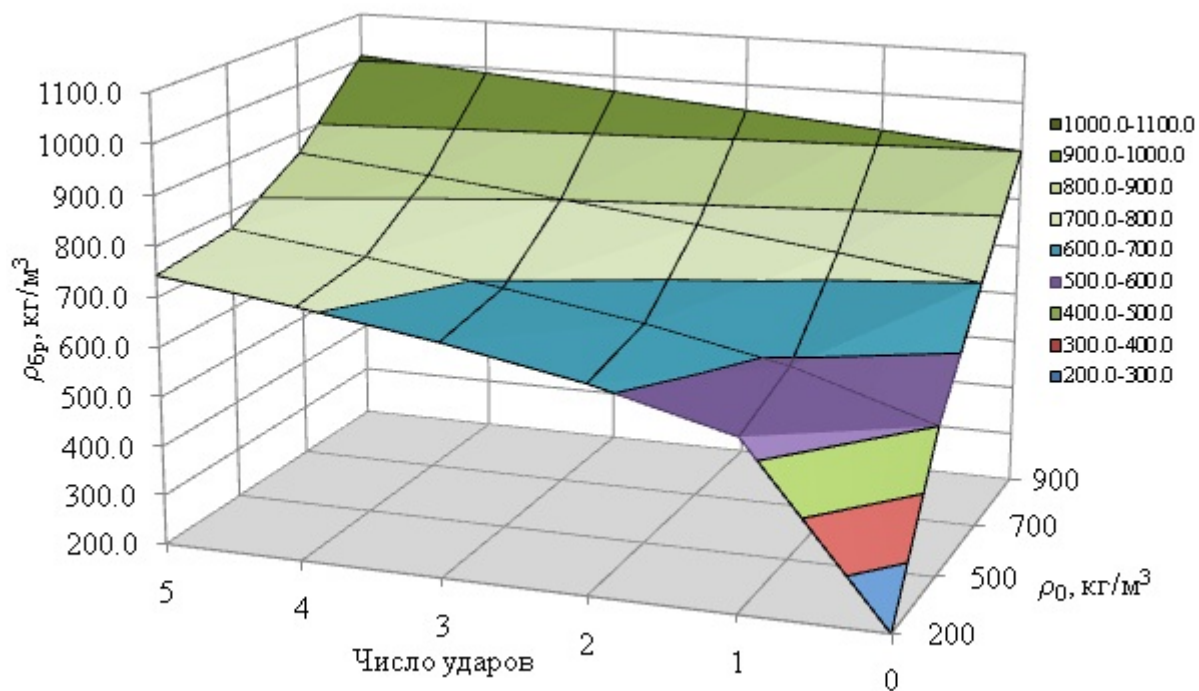


Рисунок 11. Результаты расчёта ударного уплотнения опилок (масса рабочего органа 25 кг, начальная скорость рабочего органа 8 м/с)

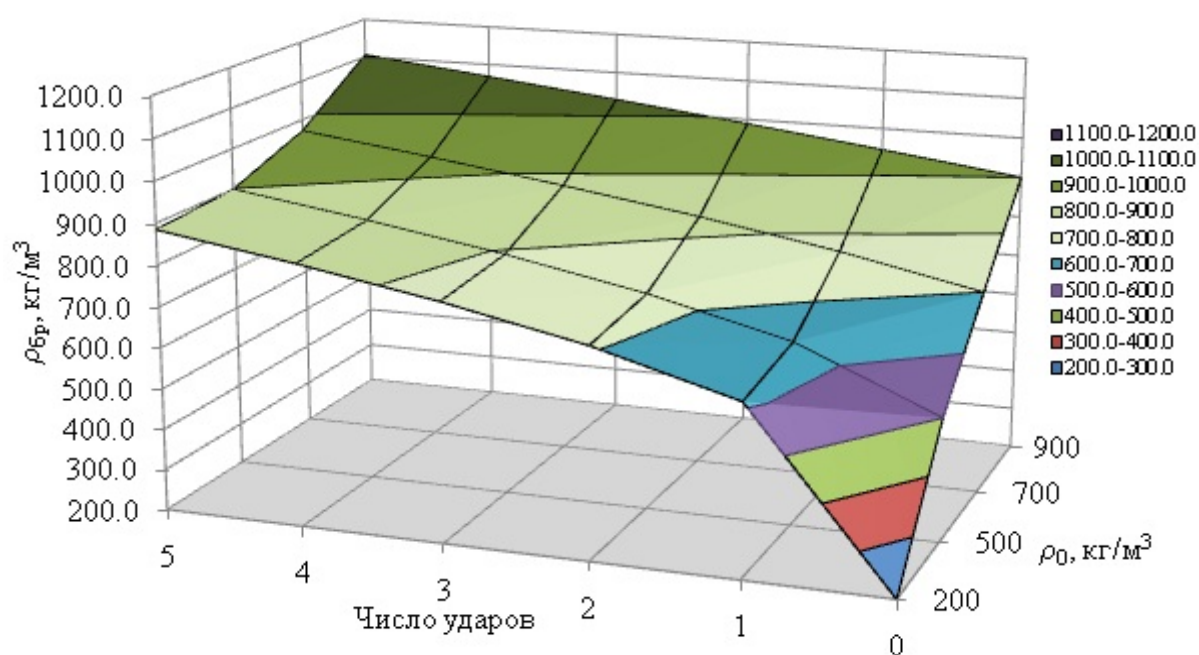


Рисунок 12. Результаты расчёта ударного уплотнения опилок (масса рабочего органа 50 кг, начальная скорость рабочего органа 8 м/с)

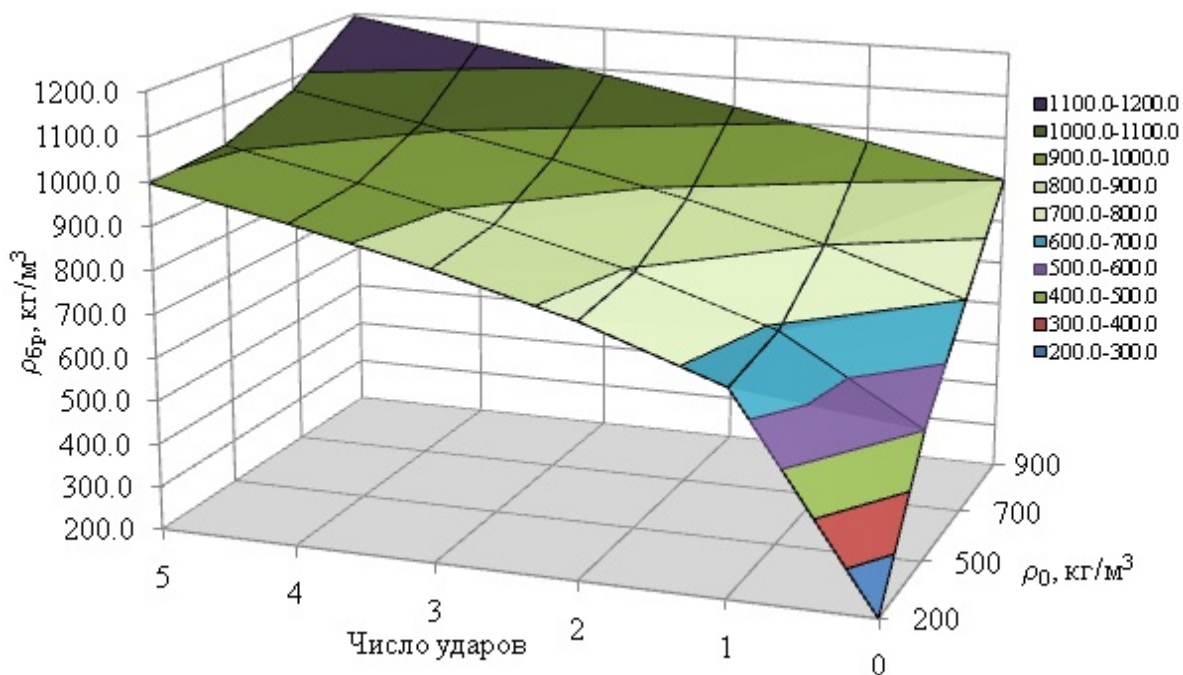


Рисунок 13. Результаты расчёта ударного уплотнения опилок (масса рабочего органа 75 кг, начальная скорость рабочего органа 8 м/с)

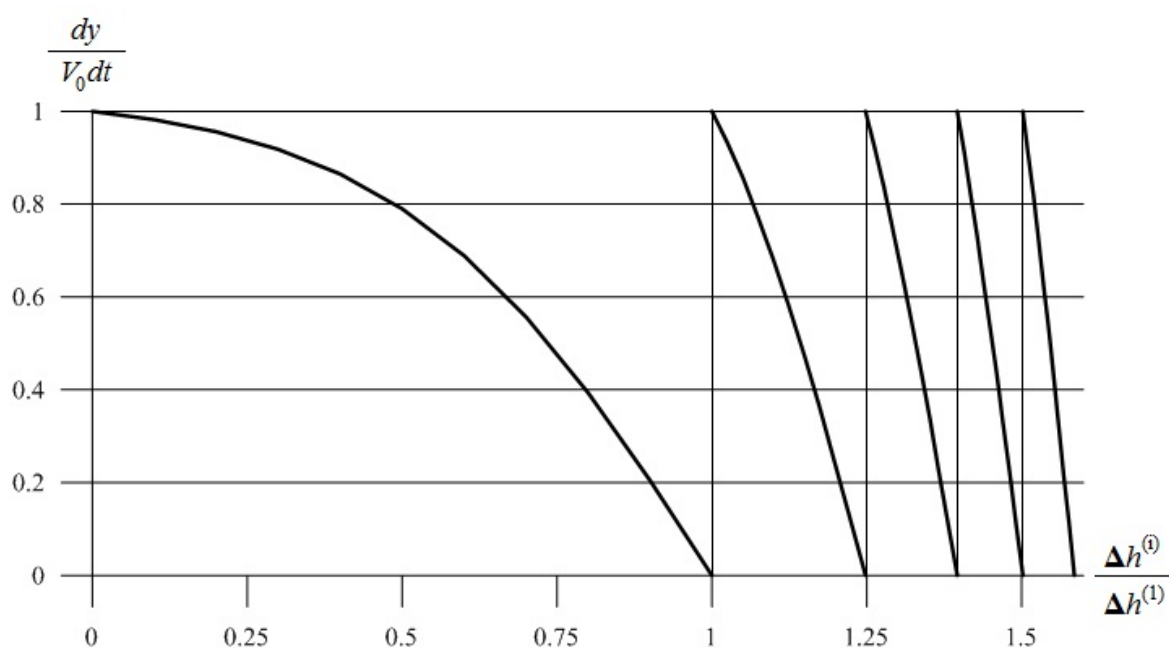


Рисунок 14. Фазовый портрет процесса ударного уплотнения коры

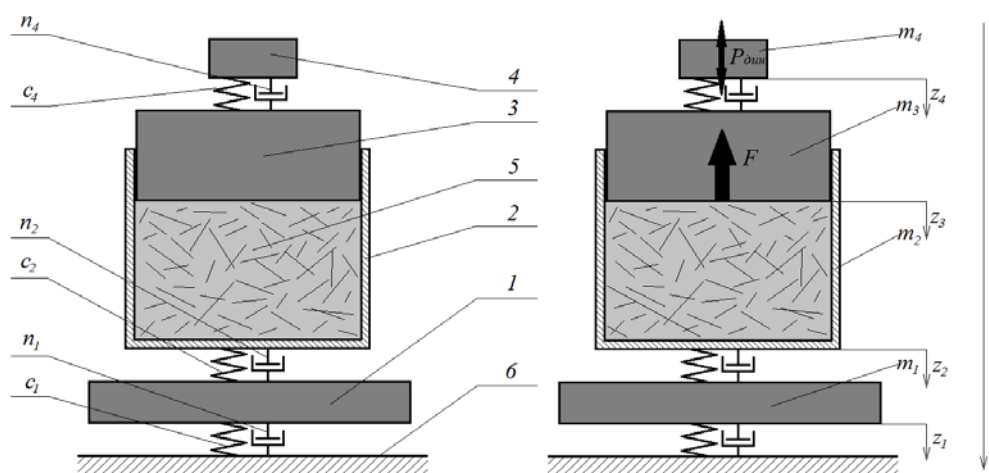


Рисунок 15. Расчётная схема уплотнения измельчённых древесных материалов под воздействием вибрации: 1 — промежуточная масса; 2 — прессформа; 3 — шток; 4 — вибровозбудитель; 5 — древесная кора; 6 — жёсткое основание

Система дифференциальных уравнений, описывающих поведение модели по рисунку 14, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d^2 z_4}{dt^2} = -\frac{1}{m_4} \left\{ c_4(z_4 - z_3) + n_4 \left(\frac{dz_4}{dt} - \frac{dz_3}{dt} \right) - P \sin \omega t \right\} \\ \frac{d^2 z_3}{dt^2} = -\frac{1}{m_3} \left\{ -c_4(z_4 - z_3) - n_4 \left(\frac{dz_4}{dt} - \frac{dz_3}{dt} \right) - F \operatorname{sgn} \left(\frac{dz_3}{dt} - \frac{dz_2}{dt} \right) \right\}, \\ \frac{d^2 z_2}{dt^2} = -\frac{1}{m_2} \left\{ c_2(z_2 - z_1) + n_2 \left(\frac{dz_2}{dt} - \frac{dz_1}{dt} \right) + F \operatorname{sgn} \left(\frac{dz_3}{dt} - \frac{dz_2}{dt} \right) \right\} \\ \frac{d^2 z_1}{dt^2} = -\frac{1}{m_1} \left\{ -c_2(z_2 - z_1) - n_2 \left(\frac{dz_2}{dt} - \frac{dz_1}{dt} \right) + c_1 z_1 + n_1 \dot{z}_1 \right\} \end{cases}, \quad (44)$$

где m — масса, n — параметр вязкого сопротивления, c — параметр жёсткости, z — перемещение (нижние индексы соответствуют номерам элементов системы по рисунку 15)

К решению системы (44) приняты начальные условия:

$$t = 0, \frac{d^2 z_1}{dt^2} = 0, \frac{d^2 z_2}{dt^2} = 0, \frac{d^2 z_3}{dt^2} = 0, \frac{d^2 z_4}{dt^2} = 0 \quad (45)$$

На рисунке 16 приведена оценка плотности пакета древесной коры, полученная на основе решения системы дифференциальных уравнений (44). Параметр вязкости принят ориентировочно с опорой на экспериментальные данные [4].

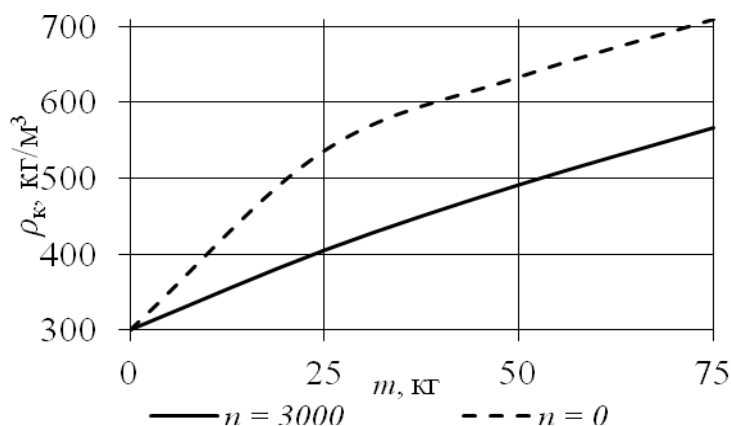


Рисунок 16. Плотность древесной коры после приложения ударной нагрузки с учётом и без учёта вязкого сопротивления

В результате установлено, что пренебрежение вязкой составляющей сопротивлению уплотнению приводит к завышенным на 15—25 % оценкам плотности пакета. В связи с этим обстоятельством были выполнены дополнительные эксперименты по оценке вязкого сопротивления древесной коры механическому воздействию [6]. Использована установка для изучения динамического уплотнения древесных материалов, при этом скорость рабочего органа установки являлась управляемым параметром, изменявшимся в пределах от 2 до 8 м/с. В результате обработки опытных данных получено уравнение регрессии для вязкости измельчённой древесной коры:

$$n = 0,00189\rho_0^2 - 0,983\rho_0 - 24,9v^2 + 2501v + 0,125\rho_0v + 1759 \quad (46)$$

Уравнение (46) проиллюстрировано на рисунке 17.

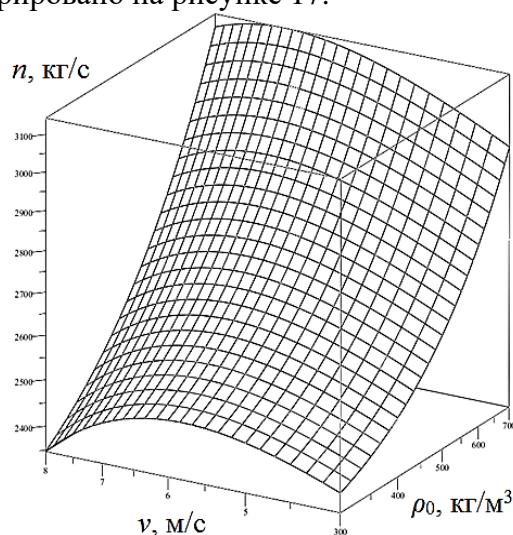


Рисунок 17. Влияние плотности и скорости рабочего органа на коэффициент вязкого сопротивления при уплотнении измельчённой древесной коры

Отметим, что коэффициент вязкого сопротивления, согласно опытным данным, не является константой для древесного материала, но изменяется в зависимости от плотности.

4. Выводы

Модели статического прессования измельчённых древесных материалов основываются на допущении о том, что скорость обработки не оказывает существенного влияния на показатели уплотнения. Такое допущение справедливо далеко не во всех случаях, поскольку на деформации материала оказывают влияние не только инерционные эффекты, которыми при статическом прессовании справедливо можно пренебречь, но и реологические свойства брикетируемого сырья, проявляющиеся и при сравнительно «медленных» режимах обработки.

Теоретически и экспериментально установлено, что брикет с плотностью свыше 1000 кг/м^3 формируется под давлением рабочего органа пресса при давлении свыше 100 МПа. Однако характер изменения требуемого давления прессования, стремительно увеличивающегося при плотности брикета свыше 1000 кг/м^3 , в известных моделях передан не вполне точно. Это объясняется использованием линейных выражений деформативных свойств материала брикета от плотности. Для развития подхода к расчёту давления по деформативным свойствам материала следует рассматривать модели материала, отличные от модели тела Гука с упрочнением, т. е. нелинейные реологические модели вязко-упругих, вязко-пластических и вязко-упруго-пластических тел, параметры которых переменны и зависят от их деформации.

В общем виде рассмотрено воздействие динамических (ударных и вибрационных) нагрузок на измельчённые древесные материалы при постоянных значениях деформативных параметров. Принципиальным отличием от исследований по статическому воздействию на сырьё является учёт скоростей и ускорений рабочего органа в процессе формирования брикета, а также вызванных его воздействием дополнительных динамических напряжений в уплотняемом материале. Экспериментально установлено, что коэффициент вязкого сопротивления не является константой для древесного материала, но изменяется в зависимости от плотности, что подтверждает необходимость учёта нелинейных моделей уплотняемого материала.

Список литературы

1. Чибирев О. В., Куницкая О. А., Григорьев М. Ф. Расчёт требуемого давления прессования опилок при формировании брикета // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 2. С. 22—25.
2. Модин Н. А., Ерошкин А. Н. Брикетирование измельчённой древесины и древесной коры. М.: Лесная пром-сть, 1971. 112 с.
3. Чибирев О. В., Куницкая О. А., Ильюшенко Д. А. Экспериментальные исследования прессования опилок древесины сосны на гидравлическом прессе // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2016. № 217. С. 120—130.

4. *Коршак А. В.* Устройство для изготовления древесных брикетов. Обоснование технологии производства древесных брикетов на прессовом оборудовании ударного типа: дис. ... канд. техн. наук / Коршак Андрей Валентинович. СПб.: СПбГЛТА, 2011. 151 с.
5. *Ильюшенко Д. А.* Разработка технологии производства брикетов из отходов окорки: дис. ... канд. техн. наук / Ильюшенко Дмитрий Александрович. СПб.: Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С. М. Кирова, 2012. 135 с.
6. *Швецова В. В.* Повышение эффективности использования отходов окорки путём вибрационного уплотнения транспортного пакета: дис. ... канд. техн. наук / Швецова Виктория Викторовна. СПб.: СПбГЛТУ, 2013. 136 с.

References

1. *Chibirev O. V., Kunitskaya O. A., Grigorev M. F.* Calculation of the required pressure for pressing sawdust when forming a briquette // Repair. Recovery. Modernization. 2019. No. 2. Pp. 22—25. (In Russ.)
2. *Modin N. A., Eroshkin A. N.* Briquetting of crushed wood and wood. Moscow: Forest industry, 1971. 112 p. (In Russ.)
3. *Chibirev O. V., Kunitskaya O. A., Ilyushenko D. A.* Experimental studies of pressing sawdust of pine wood on a hydraulic press // Izvestia of the St. Petersburg forestry Academy. 2016. No. 217. Pp. 120—130. (In Russ.)
4. *Korshak V. A.* Device for production of wood briquettes. Substantiation of the technology of production of wood briquettes on press equipment of impact type: Diss. Cand. Techn. sciences' / Korshak A. V. St. Petersburg: Spbgltta, 2011. 151 p. (In Russ.)
5. *Ilyushenko D. A.* Development of technology for production of briquettes from waste debarking: the Dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences / Ilyushenko D. A. St. Petersburg: Saint-Petersburg state forest engineering Academy S. M. Kirov, 2012. 135 p. (In Russ.)
6. *Shvetsova V. V.* Improving the efficiency of using okorki waste by vibration compaction of the transport package: Diss. Cand. Techn. sciences' / Shvetsova V. V. St. Petersburg: Spbgltu, 2013. 136 p. (In Russ.)