

УТОЧНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОПИЛОК В ЗОНЕ ВЫДАВЛИВАНИЯ ГРАНУЛЯТОРА С КОЛЬЦЕВОЙ МАТРИЦЕЙ

Грануляторы широко применяются при производстве гранул из сырья растительного происхождения. Начиная с 20-х годов прошлого века их использовали для гранулирования комбикормов, а в последнее время они применяются для гранулирования древесных опилок. В связи этим возникает проблема оптимального проектирования прессующих механизмов таких грануляторов. Решение проблемы заключается в проведении идентификации и верификации математических моделей процесса экструдирования полуфабриката в прессующем механизме гранулятора. Для одной из таких моделей, описывающих напряженное экструдированное полуфабриката на контактных поверхностях рабочих органов: кольцевой матрицы и прессующего ролика такая процедура была проведена. На основании результатов экспериментального определения нормальных к поверхности прессующего ролика гранулятора напряжений при экструдировании древесных опилок хвойных пород при влажности 10% и идентификации математической модели напряженного состояния полуфабриката в зонах отставания и опережения клиновидного рабочего пространства гранулятора уточнено теоретическое описание напряженного состояния полуфабриката в зоне выдавливания – распределение в зоне выдавливания нормальных напряжений и напряжений сдвига на контактных поверхностях матрицы и прессующего ролика, между которыми существует дифференциальная зависимость. Достоверность полученного результата обоснована высоким значением коэффициента достоверности аппроксимации. Полученный результат позволяет уточнить расчеты на прочность и долговечность прессующего механизма.

Ключевые слова: пресс-гранулятор, прессование, вращающиеся рабочие органы машины, пеллеты, гранулы, клиновидное пространство, возобновляемые источники энергии.

Пресс-грануляторы с кольцевой матрицей используются в различных отраслях промышленности, однако наиболее распространены в комбикормовой промышленности и в последние годы в альтернативной энергетике для производства гранул (pellets) из древесных опилок [1], [2], [3].

Для оптимального проектирования пресс-грануляторов может быть использованы методы математического моделирования процесса гранулирования. Ранее для этой цели была разработана математическая модель, основанная на описании напряженного состояния на контактных поверхностях рабочего пространства – кольцевой матрицы и прессующего ролика [4], [5], [6].

Были предприняты попытки уточнения этой модели на основе теоретического анализа, например [7], [8], [9]. В настоящей работе идентификация и верификация математической модели выполнена на основе экспериментального определения нормальных напряжений на контактной поверхности прессующего ролика.

Для этого был разработан лабораторный стенд на базе пресс-гранулятора ПГМ-05 с горизонтально расположенной матрицей и одним прессующим роликом. Кольцевая матрица имела диаметр рабочей поверхности 0,175 м и ширину рабочей поверхности 0,044 м. Матрица имела 120 фильер диаметром 0,01 м и длиной 0,075 м. Ча-

стота вращения матрицы составляла 190 об/мин. Ролик имел рабочий диаметр 0,136 м. Его рабочая поверхность была равномерно перфорирована несквозными отверстиями для лучшего сцепления с прессуемым полуфабрикатом.

На прессующем ролике лабораторного стенда была смонтирована автономная тензометрическая система, состоящая из усилителя сигналов от тензометрических датчиков Zet 412, аналого-цифрового преобразователя Zet 220 и автономного блока питания [10]. Полученные данные сохранялись на флэш-карту.

Тензометрическая система получала сигнал от измерительного устройства встроенного в прессующий ролик.

Схема прессующего ролика лабораторного стенда с установленными тензометрическими элементами показана на рисунке 1.

В обечайке прессующего ролика 6 установлены три тензометрических штифта 7. Опорные головки каждого штифта с одной стороны соприкасаются соответственно с тремя тензометрическими пластинами 8, а с другой стороны предотвращают выпадение штифтов из обечайки.

Тензометрические пластины 8 оперты на полки упорной балочки 9, выполненной в форме швеллера. Балочка 9 установлена в пазу обечайки прессующего ролика 6. Своей стенкой

балочка упирается на наружные кольца подшипников прессующего ролика 5.

Использованы тензометрические датчики 2ФКП-5-200, которые наклеены клеем БФ2 ГОСТ 12172-74 на поверхность пластины 8, обратную к той, на которую воздействует штифт 7. Наклеенные датчики были стандартно термообработаны.

Электрические проводники МГТФ 0,56 от тензодатчиков были выведены к усилителю сигналов через кабель-канал 5 в верхней крышке подшипникового узла 3. Тензометрические датчики были подключены к усилителю сигналов по мостовой схеме.

Для тарировки тензометрической системы тензометрические пластины нагружались на поверенном прессе марки ПГР-10.

В эксперименте гранулировались сосновые опилки, модуль крупности которых был в пределах от 2 до 3 мм. Исходную влажность опилок определялась в сушильном шкафу СЭШ-3МЭ по ГОСТ 16483.7-71. После опилки доводили до влажности 10% и выдерживали в замкнутом объеме в течение суток для равномерного распределения влаги в опилках. Исследования данных с тензодатчиков проводили после выхода лабораторного стенда на установившийся режим в течение 10 минут.

В процессе обработки результатов эксперимента были решены следующие задачи.

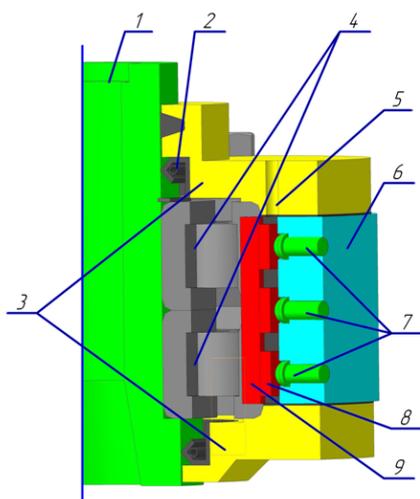


Рисунок 1. Схема измерительного устройства в прессующем ролике: 1 – ось ролика; 2 – манжета; 3 – крышки подшипникового узла верхняя и нижняя; 4 – роликовые подшипники; 5 – кабель-канал от датчиков; 6 – обечайка; 7 – штифты; 8 – тензометрические пластины; 9 – опорная балочка

Оценка величины проскальзывания ролика относительно матрицы.

Проскальзывание прессующего ролика относительно кольцевой матрицы следует отнести к стохастическим процессам, о чем свидетельствуют записи данных с тензометрических датчиков показывающие, что измеряемые напряжения имеют постоянный характер в установившемся процессе прессования. Так как флуктуации периода обнаружены не были, сделано заключение, что в данном процессе проскальзыванием прессующего ролика относительно матрицы можно пренебречь.

Оценка величины протяженности области нормальных напряжений в материале по поверхности прессующего ролика.

Исходная диаграмма данных тензометрической системы выполнена в координатах «показания датчика – время». Для преобразования этой диаграммы рассмотрим геометрические параметры рабочего пространства лабораторного стенда, которые приведены на рисунке 2.

На схеме рисунка 2 обозначено: r_1, r_2 – соответственно радиусы рабочих поверхностей матрицы и ролика; $O s_1$ и $O s_2$ – соответственно оси криволинейных систем координат по рабочей поверхности матрицы и ролика; φ_1 и φ_2 – соответственно углы поворота точек на поверхности матрицы и ролика, между которыми измеряется радиальная высота слоя полуфабриката h ; ϑ – угол клина пространства между матрицей и роликом при радиальной высоте h ; h_a – минимальная высота слоя полуфабриката.

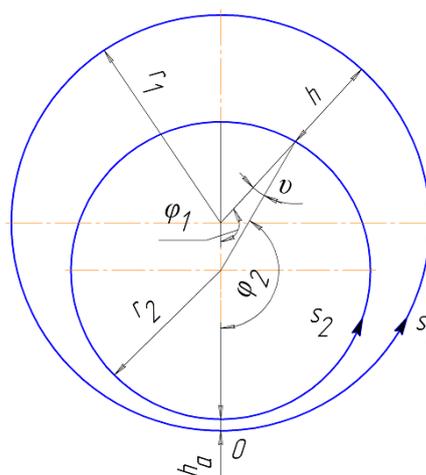


Рисунок 2. Расчетная схема геометрических параметров рабочего пространства прессующего механизма с одним роликом

С использованием тарировочного графика тензометрической системы и величины периода обращения прессующего ролика диаграмма перестроена в координатах «напряжения на поверхности ролика – координата s_2 ».

Измеренная протяженность диаграммы нормальных напряжений на поверхности превышает половину длины окружности его рабочей поверхности. Поэтому было принято предположение о начале прессования полуфабриката в сечении с максимальной величиной зазора между матрицей и прессующим роликом с координатой s_{20} . Приняв напряжения в этом сечении равными нулю при отсутствии проскальзывания между матрицей и прессующим роликом, определено положение координаты минимальной высоты слоя полуфабриката в прессующем механизме, то есть начало координат по оси Os_2 .

Построение диаграммы экспериментальных напряжений на оси координат Os_2 .

Диаграмма напряжений на отрезке $[0; s_{20}]$ разбита на 13 отрезков, начиная от координаты 0, причем протяженность отрезков 1, 2, ..., 5 в два раза меньше, чем отрезков 6, 7, ..., 13. На границах отрезков в точках s_{2i} , где $i = 0, 1, \dots, 13$ определены величины измеренных напряжений σ_i . Соответствующие пары значений s_{2i} и σ_i внесены в электронную таблицу MS Excel.

В математической модели [2] нормальное напряжение определено по координате s_1 . Для того, чтобы сравнивать экспериментальные результаты с результатами математической модели, необходимо связать координаты s_2 и s_1 . В обозначениях схемы на рисунке 2 справедливо условие

$$\frac{s_1}{r_1} + \vartheta = \frac{s_2}{r_2}; \text{ или } s_1 = r_1 \left(\frac{s_2}{r_2} - \vartheta \right). \quad (1)$$

С использованием теоремы косинусов и теоремы синусов угол ϑ связан с координатой s_2 выражением

$$\vartheta = \arcsin \frac{\sin \left(\frac{s_2}{r_2} \right)}{\sqrt{1 + \frac{r_2}{r_1 - r_2 - h_a} \left[\frac{r_2}{r_1 - r_2 - h_a} + 2 \cos \left(\frac{s_2}{r_2} \right) \right]}}. \quad (2)$$

По выражению (1) координатам s_{2i} поставлены в соответствие координаты s_{1i} . С учетом, что $\sigma_i = \sigma_{s_{1i}}$, средствами MS Excel построена диаграмма экспериментальной зависимости $\sigma_{s_1} = f(s_1)$, пример которой показан на рисунке 3.

Идентификация математической модели напряженного состояния полуфабриката между матрицей и роликом.

Математическая модель напряженного состояния полуфабриката между матрицей и роликом использована в виде [3]. Зазор h между матрицей и роликом по координате s_1 с учетом обозначений на рисунке 2 имеет вид

$$h = r_1 - (r_1 - r_2 - h_a) \cos \frac{s_1}{r_1} - \sqrt{r_2^2 - (r_1 - r_2 - h_a)^2 \sin^2 \frac{s_1}{r_1}}, \quad (3)$$

а угол ϑ связан с координатой s_1 зависимостью

$$\vartheta = \arcsin \left(\frac{r_1 - r_2 - h_a}{r_2} \sin \frac{s_1}{r_1} \right). \quad (4)$$

Рабочее пространство прессующего механизма разделено на три зоны: отставания, опережения и выдавливания. Зона отставания расположена на отрезке между координатой начала контакта ролика с полуфабрикатом s_{10} и границей зоны отставания с зоной выдавливания s_{1n0} . Зона опережения расположена на отрезке между началом координат и границей зоны опережения с зоной выдавливания s_{1n1} . σ_s

Таким образом, зона выдавливания находится между зонами отставания и опережения на отрезке $[s_{1n1}; s_{1n0}]$.

Напряжения в материале в зоне отставания рабочего пространства в математической модели определены зависимостью

$$\sigma_s = -\frac{1}{\beta} \ln \left[1 + \beta \tau_{T0} \int_{s_{10}}^{s_1} \Phi ds_1 \right]. \quad (5)$$

Напряжения в материале в зоне опережения рабочего пространства в математической модели определены зависимостью

$$\sigma_s = -\frac{1}{\beta} \ln \left[\exp(-\beta \sigma_{s_{1a}}) - \beta \tau_{T0} \int_0^{s_1} \Phi ds_1 \right], \quad (6)$$

где $\sigma_{s_{1a}}$ – нормальное напряжение в рабочем пространстве с высотой h_a .

Коэффициент геометрических параметров Φ для прессующих механизмов с внутренним контактом рабочих органов имеет вид [2]

$$\Phi = \frac{2r_1 - h}{r_1 - h} + tg^2 \vartheta \times \frac{r_1 - r_2 - h_a}{r_1} \sin \frac{s_1}{r_1} \left[1 + \frac{2(r_1 - r_2 - h_a) \cos \frac{s_1}{r_1}}{\sqrt{r_2^2 - (r_1 - r_2 - h_a)^2 \sin^2 \frac{s_1}{r_1}}} \right]. \quad (7)$$

Границы зон отставания и опережения с зоной выдавливания s_{1n0} и s_{1n1} определены средствами MS Excel по диаграмме экспериментально измеренных напряжений (диаграмма 1 на рисунке 3) в точках изменения кривизны этой диаграммы.

Использование формул (5) и (6) ограничено тем, что интегралы в этих формулах не могут быть выражены в элементарных функциях. Поэтому применено численное интегрирование методом трапеций. Зоны отставания и опережения были разделены на десять шагов интегрирования каждая.

Идентификация математической модели (определение неизвестных внешних величин модели τ_{TO} , β и h_a в зонах опережения и отставания), заключается в достаточно точном совпадении экспериментальных и вычисленных напряжений. Величины τ_{TO} и β задаются одинаковыми для зон отставания и опережения. Вычисленные напряжения в зонах опережения и отставания показаны на рисунке 3 соответственно на диаграммах 2 и 3. Цикл идентификации начинается с подбора значения β , которая влияет в основном на кривизну диаграмм, затем подбирается величина τ_{TO} , которая влияет в основном на верхнюю границу диаграмм, затем подбором величины h_a выравняются положения верхних границ диаграмм. Цикл повторяется пока

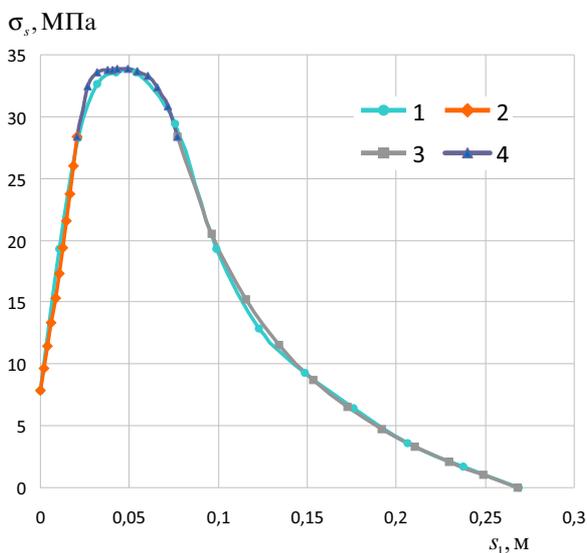


Рисунок 3. Диаграммы напряженного состояния полуфабриката в рабочем пространстве прессующего механизма: 1 – диаграмма экспериментально измеренных напряжений; 2, 3 – диаграмма вычисленных напряжений соответственно в зонах опережения и отставания; 4 – диаграмма вычисленных напряжений в зоне выдавливания

не достигается приемлемая величина совпадения экспериментальной и вычисленных диаграмм.

В результате обработки диаграмм на рисунке 3 получены следующие значения неизвестных внешних величин математической модели $\tau_{TO} = 1,5$ МПа; $\beta = 0,02$ МПа⁻¹; $h_a = 0,0048$ м с коэффициентом достоверности аппроксимации $R^2 = 0,96$.

Верификация математической модели напряженного состояния полуфабриката между матрицей и роликом в зоне выдавливания.

В зоне выдавливания содержится нейтральное сечение с координатой s_{1nn} , где касательное напряжение на поверхности матрицы равно нулю, а нормальное напряжение σ_s наибольшее в рабочем пространстве [1].

Зависимость изменения касательного напряжения на контактной поверхности в зоне выдавливания невозможно определить из уравнения равновесия, поэтому введена функция связи касательных напряжений с геометрией рабочего пространства в рассматриваемой зоне F.

Будем считать, что касательные напряжения в зоне выдавливания изменяются по зависимостям [3]

$$\tau = -F\tau_{TO} \exp(\beta\sigma_s), \quad s_{1nn} \leq s_1 \leq s_{1n0}; \quad (8)$$

$$\tau = F\tau_{TO} \exp(\beta\sigma_s), \quad s_{1n1} \leq s_1 \leq s_{1nn}; \quad (9)$$

где σ_s – приближенно принято в качестве всестороннего напряжения сжатия.

Тогда распределение напряжений в зоне выдавливания [2] с учетом (8) и (9) имеет вид

$$\sigma_s = -\frac{1}{\beta} \ln \left[\exp(-\beta\sigma_{sn0}) + \tau_{TO}\beta \int_{s_{1n0}}^{s_1} F\Phi ds_1 \right], \quad s_{1nn} \leq s_1 \leq s_{1n0}; \quad (10)$$

$$\sigma_s = -\frac{1}{\beta} \ln \left[\exp(-\beta\sigma_{sn1}) + \tau_{TO}\beta \int_{s_{1n1}}^{s_1} F\Phi ds_1 \right], \quad s_{1n1} \leq s_1 \leq s_{1nn}; \quad (11)$$

где σ_{sn0} – напряжение в полуфабрикате на границе зоны отставания и зоны выдавливания;

σ_{sn1} – напряжение в полуфабрикате на границе зоны опережения и зоны выдавливания.

Приравнивая правые части уравнений (10) и (11), получим интегральное уравнение для определения координаты s_{1nn}

$$\int_{s_{1n0}}^{s_{1nn}} F\Phi ds_1 = \int_{s_{1n1}}^{s_{1nn}} F\Phi ds_1. \quad (12)$$

Уравнение (12) решается численными методами.

Функция F принята в виде

$$F = \left(\frac{s_1 - s_{1m}}{s_{1n0} - s_{1m}} \right)^3, s_{1m} \leq s_1 \leq s_{1n0}; \quad (13)$$

$$F = \left(\frac{s_{1m} - s_1}{s_{1m} - s_{1n1}} \right)^3, s_{1n1} \leq s_1 \leq s_{1m}. \quad (14)$$

При решении уравнения (12) использованы результаты идентификации математической модели, выполненной выше: $h_a = 0,0048$ м, $s_{1n0} = 0,077$ м, $s_{1n1} = 0,0208$ м. Использован метод трапеций. Интегрирование произведено с переменным шагом интегрирования. Средствами MS Excel найдена координата нейтрального сечения $s_{1m} = 0,0405$ м.

Для вычисления напряжений по формулам (10) и (11) помимо приведенных выше использованы дополнительно результаты идентификации $\sigma_{sn0} = \sigma_{sn1} = 28,4$ МПа. Применено числен-

ное интегрирование методом трапеций, аналогично поиску решения уравнения (12).

Получена диаграмма 4 изменения напряжений в зоне выдавливания на рисунке 3. Максимальное напряжение в нейтральном сечении $\sigma_{max} = 33,85$ МПа. Коэффициент достоверности аппроксимации диаграммой 4 диаграммы 1 в зоне выдавливания равен $R^2 = 0,96$.

Заключение

В результате настоящего исследования уточнена математическая модель напряженного состояния полуфабриката (древесных опилок хвойных пород с влажностью 10%) в зоне выдавливания прессующего механизма с кольцевой матрицей, в которой учтено изменение предельного напряжения сдвига от всестороннего напряжения сжатия по зависимостям (8) и (9) и предложена оригинальная функция связи касательных напряжений с геометрией рабочего пространства по зависимостям (13) и (14).

9.11.2014

Список литературы:

1. Гомонай, М.В. Производство топливных брикетов. Древесное сырье, оборудование, технологии, режимы работы: монография / М.В. Гомонай. – М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2006. – 68 с.
2. Кучинскас, З.М. Оборудование для сушки, гранулирования и брикетирования кормов / З.М. Кучинскас, В.И. Особов, Ю.М. Фрегер. – М.: Агропромиздат, 1988. – 207 с.
3. Назаров, В.И. Особенности разработки процесса прессового гранулирования биотоплива на основе древесных и растительных отходов / В.И. Назаров, И.А. Булатов, Д.А. Макаренков // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – №2. – С. 35–39.
4. Диденко, В.Н. Пеллеты – древесное гранулированное топливо. Как снизить стоимость? / В.Н. Диденко, Д.А. Плотноков // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2007. – №8. – С. 57–60.
5. Головков, С.И. Энергетическое использование древесных отходов / С.И. Головков, И.Ф. Коперин, В.И. Найденов. – М.: Лесная промышленность, 1987. – С. 10–33.
6. Унков, Е.П. Инженерная теория пластичности / Е.П. Унков. – М.: Машгиз, 1959. – 328 с.
7. Карташов, Л.П. Системный синтез технологических объектов АПК / Л.П. Карташов, В.Ю. Полищук. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 185 с.
8. Полищук, В.Ю. Определение необходимого давления выпрессовывания материала через фильтры кольцевой матрицы / В.Ю. Полищук // Модернизация существующего и разработка новых видов оборудования для пищевой промышленности. – М.: МТИПП, 1977. – С. 113–122.
9. Напряженное состояние полуфабриката между рабочими органами пресс-гранулятора / Е.И. Панов [и др.] // Вестник СамГУПС. – 2013. – №2 (20). – С. 32–37.
10. Программное обеспечение ZETLab. Руководство оператора. Ч. 1. ЗТМС.00068-01 34, Изд. 2-е, доп. – 385 с.

Сведения об авторах:

Панов Евгений Игоревич, ведущий инженер кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств факультета прикладной биотехнологии и инженерии Оренбургского института путей сообщения – филиал СамГУПС,
e-mail: lysijj@yandex.ru

Полищук Владимир Юрьевич, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и пищевых производств, факультет прикладной биотехнологии и инженерии
Оренбургского государственного университета, доктор технических наук, профессор

Ханин Виктор Петрович, доцент кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств, факультет прикладной биотехнологии и инженерии Оренбургского государственного университета, кандидат технических наук, доцент
460018, г. Оренбург, пр-т Победы, 13, ауд. 3110, тел. (3532) 372464, e-mail: kodster@mail.ru