



УДК 631.171:636.085/086

И.Я. Федоренко,
И.А. Наумов

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПРЕССОВАНИЯ В КРИВОЛИНЕЙНОЙ КАМЕРЕ

Основным показателем, характеризующим уплотнение растительных материалов, является плотность получаемых брикетов и гранул [1]. Достижение больших значений плотности сопровождается приложением значительных давлений со стороны рабочих органов и высокой энергоёмкости процесса прессования. Если на ранних стадиях деформация всего образца материала происходит за счет взаимного проскальзывания и сближения частиц (структурные деформации), то на окончательных стадиях изменение длины образца возможно лишь за счет упруго-пластических деформаций самих частиц [1, 2].

В связи с этим для проектирования прессового оборудования необходимо знать зависимость между давлением p и достигнутой плотностью ρ материала, которая позволит определить усилия, действующие в деталях и механизмах прессов, и энергию, необходимую для уплотнения. Эта зависимость выражается основным законом прессования, предложенным в работе [1], который удовлетворительно описывает экспериментальные кривые прессования всех без исключения кормовых материалов:

$$p = c\gamma^m, \quad (1)$$

где p – давление прессования, Па;

c и m – экспериментально определяемые коэффициенты для каждого кормового материала;

γ – избыточная плотность, кг/м³.

$$\gamma = \rho - \rho_0, \quad (2)$$

где ρ – достигнутая плотность материала, кг/м³;

ρ_0 – начальная (естественная) плотность материала, кг/м³.

Примерный вид зависимости, получаемый по закону (1), изображен на рисунке 1.

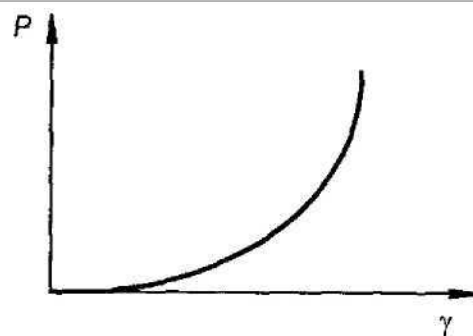


Рис. 1. Примерный вид зависимости давления от избыточной плотности прессуемого материала

При исследовании уплотнения в криволинейной камере (рис. 2) начальная и достигнутая плотность материала с учётом геометрических размеров камеры прессования определяется выражениями:

$$\rho_0 = \frac{2m_k}{\alpha h(R_k^2 - R_p^2)}, \quad (3)$$

$$\rho = \frac{2m_k}{(\alpha - \varphi)h(R_k^2 - R_p^2)}, \quad (4)$$

где m_k – масса прессуемого материала, кг;

h – ширина камеры прессования, м;

R_p – радиус ротора, м;

R_k – радиус корпуса, м;

α – начальный угол между лопаткой и заслонкой, рад.;

φ – текущий угол поворота лопатки, рад.

Подставив начальную и конечную плотность материала в основной закон прессования (1), получим уравнение давления сжатия в криволинейной камере в зависимости от угла поворота лопатки φ :

$$p = c \left(\frac{2m_k}{\alpha h(R_k^2 - R_p^2)} \right)^m \left(\frac{\varphi}{\alpha - \varphi} \right)^m. \quad (5)$$

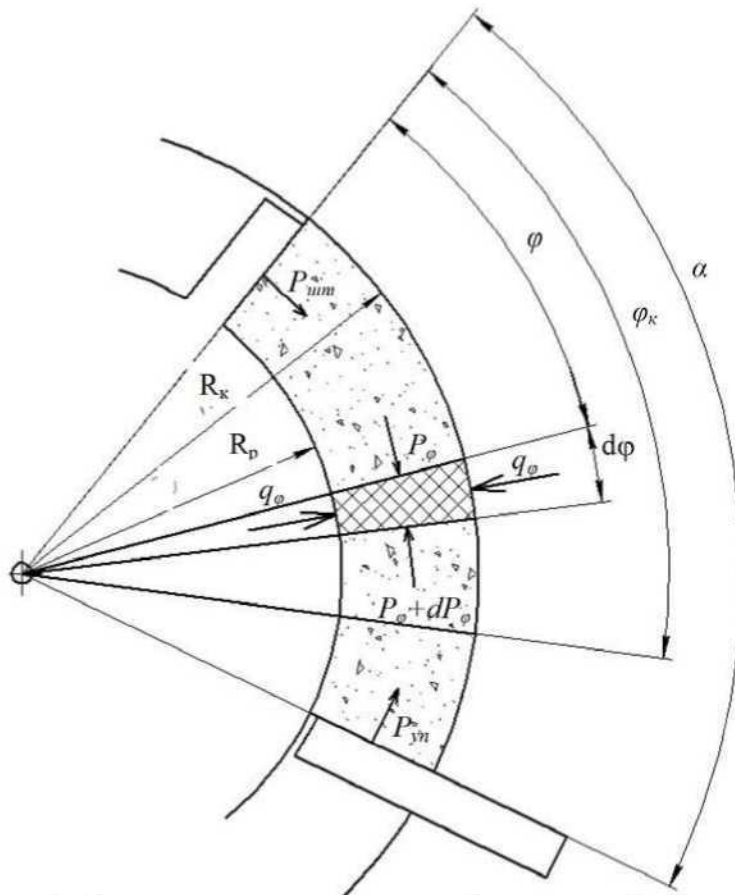


Рис. 2. Схема прессования в закрытой криволинейной камере

Реальный процесс прессования кормового материала в камере сопровождается трением между ним и стенками прессовальной камеры. В связи с этим штампель должен преодолевать дополнительные усилия [1, 3]. Следовательно, общее давление на штампеле $p_{шт}$ составит величину:

$$p_{шт} = p + p_F, \quad (6)$$

где p_F – давление, обусловленное внешним трением деформируемого материала.

Давление p_F определяется соотношением:

$$p_F = \frac{F_{тр}}{U}, \quad (7)$$

где $F_{тр}$ – равнодействующая сил трения при прессовании, Н;

U – площадь поперечного сечения камеры прессования m^2 .

Под давлением в уплотняемом материале возникают усилия, действующие по касательной вращения ротора с лопатками, материал сжимается в направлении

действия рабочего органа и стремится расширяться перпендикулярно этому направлению. Стенки камеры препятствуют расширению, вследствие чего возникает боковое давление на стенки.

Соотношение между осевым и боковым давлением примем в виде упрощённой линейной зависимости [3]:

$$q_\phi = \xi P_\phi, \quad (8)$$

где ξ – коэффициент бокового распора.

Трение, кроме дополнительных затрат энергии, приводит к другим нежелательным явлениям, в частности неравномерной плотности брикета [1, 3]. Это обусловлено падением давления в прессуемом материале по мере удаления от штампея. Для выяснения закона распределения этого давления выделим в прессуемом материале элемент $d\phi$ (рис. 2) и запишем условие его равновесия:

$$p_\phi U \frac{R_k + R_p}{2} - (p_\phi + dp_\phi) U \frac{R_k + R_p}{2} - \left(\xi p_\phi f R_k^2 h d\phi + \xi p_\phi f R_p^2 h d\phi + 2 \xi p_\phi f \frac{(R_k^2 - R_p^2)}{2} d\phi \frac{R_k + R_p}{2} \right) = 0, \quad (9)$$

где f – коэффициент трения материала о стенки прессующей камеры.

Выражение в скобках выражает элементарную силу трения, действующую на элемент $d\varphi$.

Разделим в этом уравнении переменные:

$$\frac{dp_\varphi}{p_\varphi} = -\frac{2\xi f}{U} \left(\frac{h(R_x^2 + R_p^2)}{R_x + R_p} + \frac{R_x^2 - R_p^2}{2} \right) d\varphi. \quad (10)$$

Проинтегрировав это дифференциальное уравнение, получим:

$$\ln p_\varphi + \ln C = -\frac{2\xi f}{U} \left(\frac{h(R_x^2 + R_p^2)}{R_x + R_p} + \frac{R_x^2 - R_p^2}{2} \right) \varphi. \quad (11)$$

Постоянную C определим из условия:

$$\varphi = 0; p_\varphi = p.$$

Отсюда имеем:

$$\ln C = -\ln p.$$

Подставив это значение $\ln C$ в выражение (11), окончательно получим:

$$p_\varphi = p \exp \left[-\frac{2\xi f}{U} \left(\frac{h(R_x^2 + R_p^2)}{R_x + R_p} + \frac{R_x^2 - R_p^2}{2} \right) \varphi \right]. \quad (12)$$

Таким образом, давление в камере по мере удаления от лопатки падает по экспоненциальному закону, и, соответственно, наибольшая плотность достигается у лопатки, наименьшая – у упора.

Для определения давления упора подставим вместо φ в уравнение (12) величину $(\alpha - \varphi)$, равную углу между лопаткой и упором:

$$p_{\text{уп}} = p \exp \left[-\frac{2\xi f}{U} \left(\frac{h(R_x^2 + R_p^2)}{R_x + R_p} + \frac{R_x^2 - R_p^2}{2} \right) (\alpha - \varphi) \right]. \quad (13)$$

Под давлением в уплотняемом материале возникают усилия, действующие перпендикулярно оси вращения. В результате воздействия брикет принимает форму трапеции. Рассмотрим распределение сил, действующих на брикет в криволинейной камере без учета трения материала о стенки прессующей камеры (рис. 3).

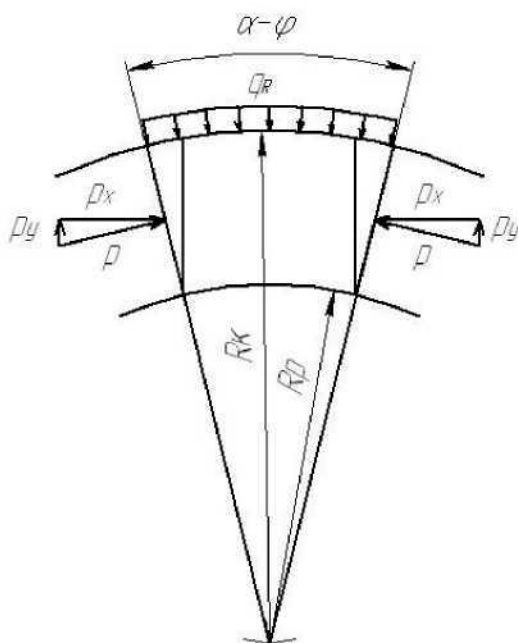


Рис. 3. Распределение сил, действующих на брикет в криволинейной камере

Разложим давление, создаваемое лопаткой p , на две составляющие p_x и p_y . Составляющая давления p_x сжимает материал, а p_y стремится прижать материал к поверхности корпуса, ограниченной радиусом R_k , в результате чего со стороны корпуса возникает противодействующая распределённая нагрузка. Запишем уравнение равновесия по оси y :

$$2p \sin \frac{\alpha - \varphi}{2} (R_x - R_p) h - q_R R_x \alpha h = 0, \quad (14)$$

где q_R – боковое давление, вызванное кривизной камеры прессования, МПа.

Выразив распределённую нагрузку, получим:

$$q_R = \frac{2p \sin \frac{\alpha - \varphi}{2} (R_x - R_p)}{R_x \alpha}. \quad (15)$$

Из уравнения (15) следует, что с увеличением угла поворота лопатки неравномерность распределения давления в материале снижается, тоже происходит и с увеличением радиусов при условии, что $R_x - R_p = \text{const}$. С увеличением радиуса давление, оказываемое на слой брикета, увеличивается.

По данным, полученным численным вычислением уравнения (21), при прессовании костра влажностью $W = 16\%$, со-

отношении резки к диаметру камеры прессования $l/d = 1$ до плотности $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, при давлении $p = 6 \text{ МПа}$ построены график бокового давления, вызванного кривизной камеры прессования при увеличении слоя материала от радиуса корпуса R_p до радиуса корпуса R_k (рис. 4), и график зависимости бокового давления от радиуса ротора прессования (рис. 5).

Из графика (рис. 5) следует, что с увеличением радиуса камеры прессования дополнительное боковое давление падает, что снижает неравномерность плотности брикета.

Выяснив, что давление в камере по мере удаления от лопатки падает и также снижается давление от корпуса к ротору, получим, что распределение плотности

брикета по объёму имеет максимальное значение у лопатки и корпуса, а минимальное – у упора и ротора.

Библиографический список

1. Федоренко И.Я. Технологические процессы и оборудование для приготовления кормов: учебное пособие / И.Я. Федоренко. Барнаул: Изд-во АГАУ, 2004. 180 с.
2. Мельников С.В. Механизация и автоматизация животноводческих ферм / С.В. Мельников. Л.: Колос, 1978. 560 с.
3. Особов В.И. Машины и оборудование для уплотнения сено-соломистых материалов / В.И. Особов, Г.К. Васильев, А.В. Голяновский. М.: Машиностроение, 1974. 231 с.

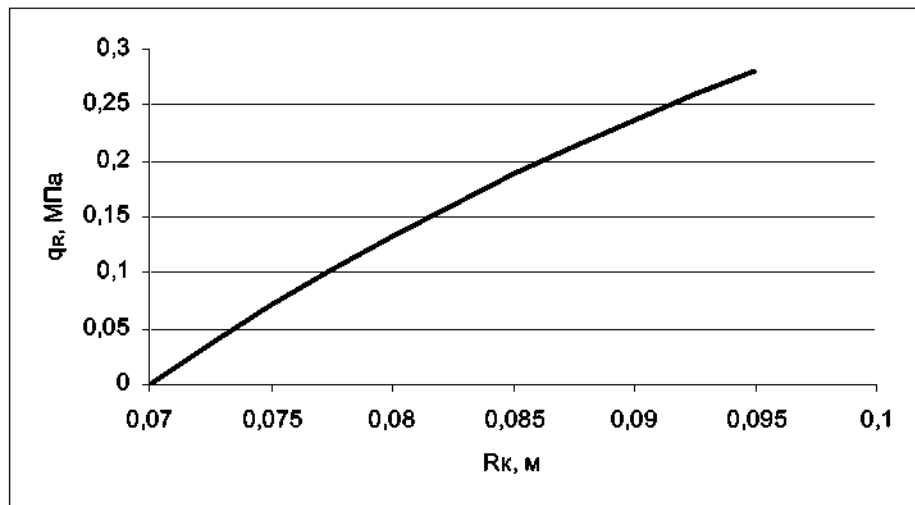


Рис. 4. График зависимости бокового давления от радиуса корпуса при уплотнении ковра влажностью $W = 16\%$ и соотношении резки $l/d = 1$ до плотности $\rho = 1000 \text{ кг*м}^3$

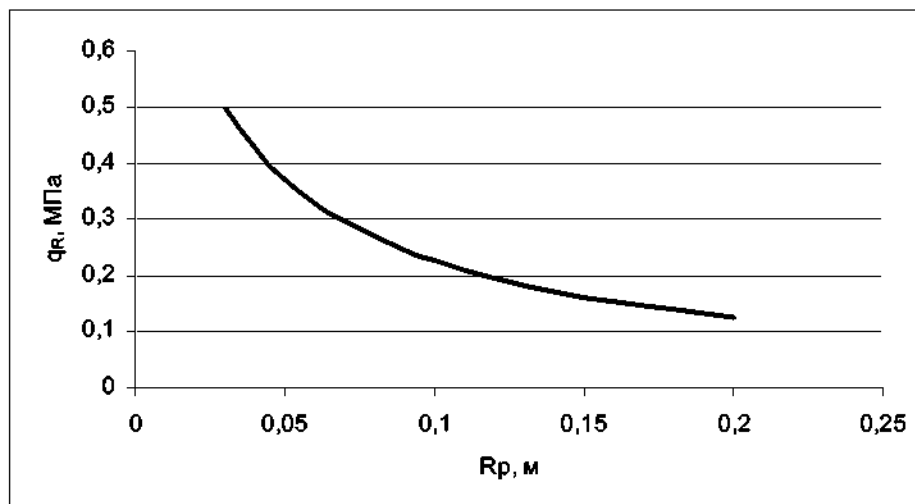


Рис. 5. График зависимости бокового давления от радиуса ротора при уплотнении ковра влажностью $W = 16\%$ и соотношении резки $l/d = 1$ до плотности $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$

