

УДК 674.8

Татарьянц М.С., Завинский С.И., Трошин А.Г., Михайличенко В.П.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО СЫРЬЯ ЧЕРЕЗ ДРОССЕЛЬНО-ПЕРЕМЕШИВАЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ

1. Введение

В современной промышленности большую роль играет производство композиционных материалов. Композиционные материалы представляют собой материалы, структура которых состоит из нескольких компонентов, различных по своим физико-механическим свойствам. По характеру своей структуры композитные материалы подразделяются на волокнистые, дисперсно-упрочнённые, слоистые [1]. Возможность сочетания в одном продукте свойств нескольких материалов-компонентов позволяет получать композиты с самыми разными характеристиками, что обуславливает наличие очень широкой номенклатуры продукта.

Соответственно для производства такого количества различных продуктов существуют разные технологические процессы и разное оборудование [2], [3]. Учитывая разнообразие оборудования, можно сделать вывод об актуальности теоретических изысканий, направленных на поиск расчётных зависимостей для определения технологических параметров такого оборудования.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Производство композиционных материалов зачастую предусматривает продавливание исходного сырья тем или иным способом (например, при помощи шнека) через матрицу для формирования продукта. Следовательно, объектом исследования (целью которого является выведение определённых расчётных зависимостей) должен стать процесс прохождения композиционного сырья через внутренние элементы прессующей машины [4]. Есть литература, в которой рассматривается движение композиционного сырья в жидком виде через конические каналы [5], [6]. В нашей работе [7] проводился силовой расчёт шнековой машины, предназначенной для прессования органического композитного сырья.

Однако существуют шнековые экструдеры, в которых сырьё может находиться не только в жидком, но и в твёрдом состоянии, в сыпучем виде. Такие машины зачастую имеют цилиндрикоконические дроссельно-перемешивающие элементы, которые располагаются соосно со шнеком внутри корпуса. Они могут использоваться для выравнивания потока сырья, разогрева материала за счёт трения, перемешивания и гомогенизации материала, также могут выполнять парозапорную функцию. Расчёт процесса движения материала в таких условиях потребует отдельных изысканий, а поскольку законы гидродинамики в данном случае неприменимы, необходимо рассмотреть процесс с позиций механики сыпучего тела, в основу которой заложено кулоновское трение материала на поверхности дроссельно-перемешивающего элемента.

3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является вывод аналитических зависимостей, позволяющих рассчитывать потери давления при движении сыпучего композитного материала через дроссельно-перемешивающий элемент с учётом его вращения.

Для достижения цели работы были решены следующие задачи:

1. Построение расчётной схемы и составление уравнений равновесия для элементарного объёма сырья, находящегося на цилиндрическом и коническом участке.
2. Определение влияния вращения дроссельного элемента на движение сырья.
3. Поиск расчётных формул для оценки перепада давления на дроссельно-перемешивающем элементе при его вращении.

4. Исследование движения сырья через цилиндрический дроссельный элемент, определение влияния вращения поверхности трения, установление расчётных зависимостей

Решение поставленных задач наиболее удобно будет проводить в несколько этапов. Мы будем рассматривать процесс прохождения сыпучего материала через дроссельный элемент, представляющий из себя цилиндрическую вставку, находящуюся в цилиндрическом корпусе. Цилиндрический и конический участки дроссельного элемента будем рассматривать поочередно.

Первым исследуем цилиндрический участок. Расчётная схема будет иметь вид, показанный на рис. 4.1.

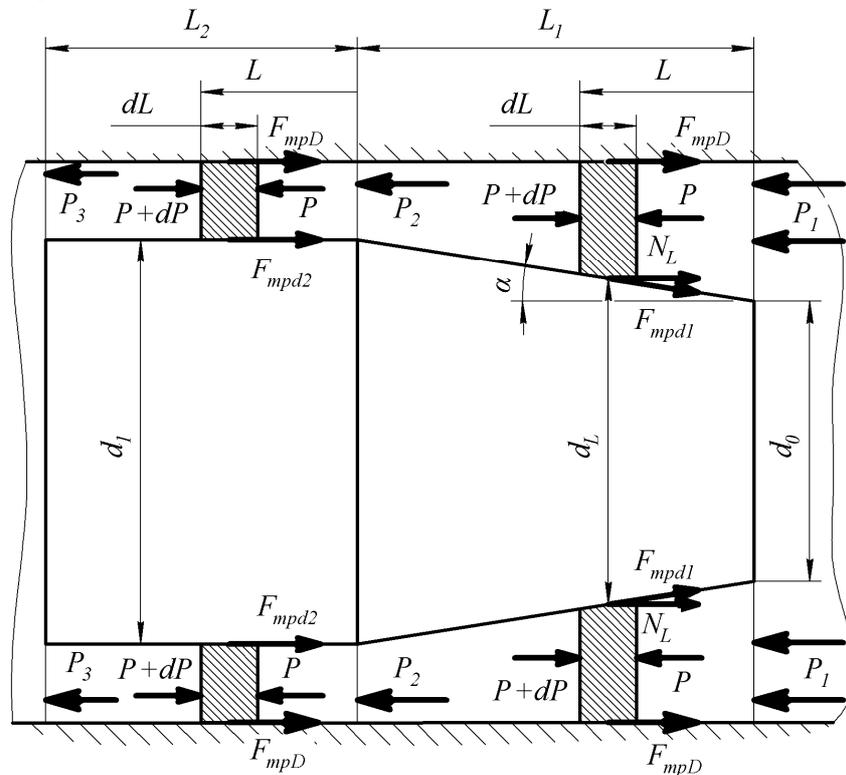


Рисунок 4.1 – Схема цилиндрической вставки

Движущей силой процесса проталкивания сырья через кольцевое сечение является осевое усилие, прикладываемое к материалу в начале участка. Силами, препятствующими движению сырья, являются силы трения, развивающиеся на боковых поверхностях потока материала, контактирующих с корпусом и вставкой.

Для определения изменения давления по длине участка, рассмотрим условия равновесия элементарного участка материала на цилиндрическом участке длиной L_2 .

Примем, что P_2 и P_3 – это соответственно давления на входе в участок и на выходе из него, P – давление на элементарный участок сырья, F_{mpd2} – сила трения, возникающая на поверхности вставки, F_{mpD} – сила трения, возникающая на поверхности кор-

пуса, dL – ширина елементарного участка, dP – приращение давления на длине dL . В данном случае приращение давления отрицательно, поскольку давление максимально в начале участка и минимально в конце. Диаметр корпуса – D , а диаметр вставки – d_1 , а L – текущее расстояние от начала вставки до элементарного участка.

Таким образом, сила трения, возникающая на внутренней поверхности корпуса, будет равна:

$$F_{mpD} = \xi \cdot k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot D \cdot dL, \quad (4.1)$$

где ξ – коэффициент трения, k_{σ} – коэффициент бокового давления.

Коэффициент бокового давления – величина, характерная для сыпучих материалов. Она определяет, какое давление материал оказывает на стенки сосуда в зависимости от приложенного к материалу осевого усилия.

Сила трения для поверхности вставки определяется выражением:

$$F_{mpd2} = \xi \cdot k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot d_1 \cdot dL. \quad (4.2)$$

Предположим, что произведение коэффициента бокового давления на коэффициент трения практически не изменяется по длине участка.

Запишем условие равновесия действующих сил для участка материала длиной dL :

$$\frac{\pi \cdot (D^2 - d_1^2)}{4} \cdot P = \frac{\pi \cdot (D^2 - d_1^2)}{4} \cdot (P + dP) + F_{mpD} + F_{mpd2}. \quad (4.3)$$

Откуда:

$$-\frac{\pi \cdot (D^2 - d_1^2)}{4} \cdot dP = F_{mpD} + F_{mpd2} = \xi \cdot k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot D \cdot dL + \xi \cdot k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot d_1 \cdot dL. \quad (4.3a)$$

После преобразования получим:

$$-\frac{dP}{P} = 4 \cdot \xi \cdot k_{\sigma} \cdot \frac{1}{D - d_1} \cdot dL. \quad (4.4)$$

Проинтегрируем:

$$-\int_{P_2}^{P_3} \frac{dP}{P} = 4 \cdot \xi \cdot k_{\sigma} \cdot \frac{1}{D - d_1} \cdot \int_0^{L_2} dL. \quad (4.4a)$$

Получим:

$$P_3 = P_2 \cdot \exp\left(-4 \cdot \xi \cdot k_{\sigma} \cdot \frac{L_2}{D - d_1}\right). \quad (4.5)$$

Потери давления составят:

$$\begin{aligned} \Delta P_2 = P_2 - P_3 &= P_2 - P_2 \cdot \exp\left(-4 \cdot \xi \cdot k_{\sigma} \cdot \frac{L_2}{D - d_1}\right) = \\ &= P_2 \left(1 - \exp\left(-4 \cdot \xi \cdot k_{\sigma} \cdot \frac{L_2}{D - d_1}\right)\right). \end{aligned} \quad (4.5a)$$

Таким образом, мы получили выражение для определения потерь давления на цилиндрическом участке при прохождении через него сыпучего материала. Как видно из уравнения (4.5), величина потерь давления экспоненциально увеличивается при увеличении длины участка.

Следующий этап – это исследование участка с конической частью вставки.

Тут L_1 – длина конического участка; P_1 – давление на входе в участок.

Сила трения для вставки будет определяться по формуле:

$$F_{mpd1} = \xi \cdot k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot d_L \cdot \cos(\alpha) \cdot dL, \quad (4.6)$$

где d_L – переменное значение диаметра конической части вставки, равное:

$$d_L = d_0 + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\alpha), \quad (4.7)$$

где α – угол наклона поверхности конической части вставки.

Также возникает сила N_L – проекция на осевое направление силы нормальной реакции поверхности N вставки, равная:

$$N_L = k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot d_L \cdot \sin(\alpha) \cdot dL. \quad (4.8)$$

Условие равновесия для данной схемы будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} -\frac{\pi \cdot (D^2 - d_L^2)}{4} \cdot dP &= F_{mpD} + F_{mpd1} + N_L = \xi \cdot k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot D \cdot dL + \\ &+ \xi \cdot k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot d_L \cdot \cos(\alpha) \cdot dL + k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot d_L \cdot \sin(\alpha) \cdot dL. \end{aligned} \quad (4.9)$$

После преобразования и интегрирования аналогично с (4.4a) выражение примет следующий вид:

$$\begin{aligned} -\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} &= 4 \cdot k_{\sigma} \int_0^{L_1} \left(\frac{\xi \cdot D + \xi \cdot [d_0 + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\alpha)] \cdot \cos(\alpha)}{D^2 - [d_0 + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\alpha)]^2} + \right. \\ &\left. + \frac{[d_0 + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\alpha)] \cdot \sin(\alpha)}{D^2 - [d_0 + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\alpha)]^2} \right) dL. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Поскольку характер полученного уравнения схож с уравнением (4.4), потери давления также имеют экспоненциальную зависимость от длины участка. Однако за-

труднение составляет аналитическое решение правой части уравнения, имеющее неприемлемо громоздкий вид. Решение уравнения возможно численными методами.

В случае, если вставка вращается с проскальзыванием относительно материала, это оказывает влияние на осевую составляющую силы трения (см рис. 4.2).

Для упрощения схемы выберем корпус с цилиндрической вставкой в качестве объекта исследования.

Сила кулоновского трения определяется как $F_{mp\Sigma} = \xi \cdot N$. В нашем случае суммарная сила трения может быть разложена на две составляющие, одна из которых направлена по оси X , а вторая – по оси Y .

Ими являются вектор силы \bar{F}_{mpX} , который направлен в сторону, противоположную $\bar{V}_{поступн}$ и вектор \bar{F}_{mpY} , который направлен противоположно $\bar{V}_{окр}$, а векторная сумма \bar{F}_{mpX} с \bar{F}_{mpY} и будет являться $\bar{F}_{mp\Sigma}$.

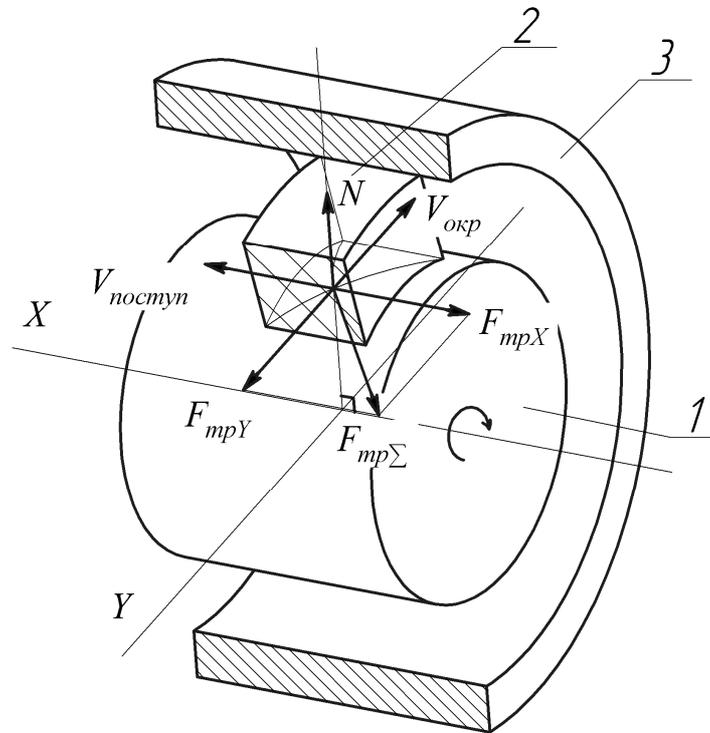


Рисунок 4.2 – Расположение сил при совмещении поступательного движения материала и вращательного движения вставки в корпусе:

1 – вставка; 2 – элементарный участок сырья; 3 – корпус

Тогда отношение $V_{поступн}$ к $V_{окр}$ при неизменном по значению векторе $\bar{F}_{mp\Sigma}$ будет влиять на пространственное положение этого вектора и соответственно на величину его проекций F_{mpX} и F_{mpY} следующим образом:

$$\frac{V_{поступн}}{V_{окр}} = \frac{F_{mpX}}{F_{mpY}}. \quad (4.11)$$

Сложение двух взаимно перпендикулярных векторов для вектора $\bar{F}_{mp\Sigma}$ даёт:

$$F_{mpX}^2 + F_{mpY}^2 = F_{mp\Sigma}^2 \quad (4.12)$$

Зная F_{mpX} , можно значение найти вектора, направленного по оси Y :

$$F_{mpY} = \frac{V_{окр}}{V_{поступ}} \cdot F_{mpX} \quad (4.13)$$

Дадим численную оценку соотношения $\frac{V_{окр}}{V_{поступ}}$. Для этого возьмём типичные параметры установок:

$D = (80 \dots 150)$ мм; $d = (75 \dots 145)$ мм; $\rho = 550$ кг/м³;
 $F = 250; 350$ кг/ч – производительность установки;
 $n = 450; 550$ об/мин.

Окружную скорость определим по формуле:

$$V_{окр} = D \cdot \frac{n \cdot \pi}{60} \quad (4.14)$$

Для установления поступательной скорости материала используем формулу:

$$V_{поступ} = \frac{4 \cdot F}{\rho \cdot 3600 \cdot \pi (D^2 - d_1^2)} \quad (4.15)$$

Получим следующие соотношения:

- для $D = 80$ мм; $d = 75$ мм; $F = 250$ кг/ч; $n = 450$ об/мин:
 $V_{окр} / V_{поступ} = 9,3$
- для $D = 150$ мм; $d = 145$ мм; $F = 350$ кг/ч; $n = 550$ об/мин:
 $V_{окр} / V_{поступ} = 27$

Таким образом, мы можем сделать вывод о том, что наличие вращения вставки ведёт к уменьшению осевой составляющей силы трения за счёт отклонения от оси X к оси Y суммарного вектора трения, что облегчает движение материала на участке. На основании полученных данных можно говорить о возможности упрощения правой части уравнения (4.9) путём пренебрежения компонентой $F_{mpdl} = F_{mpX}$ в случае, если вставка вращается внутри корпуса. При упрощении получим из (4.10):

$$-\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} = 4 \cdot k_{\sigma} \int_0^{L_1} \left(\frac{\xi \cdot D + d_L \cdot \sin(\alpha)}{D^2 - d_L^2} \right) dL \quad (4.16)$$

Но, это упрощение является недостаточным для выведения аналитического решения правой части уравнения, поскольку в уравнении (4.16) присутствует компонента

$d_L = d_0 + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$, чрезмерно усложняющая уравнение. Для дополнительного упрощения уравнения принимаем решение рассматривать диаметр конической части втулки как постоянный – $d_L = \operatorname{const}$ и равный:

$$d_L = d_{cp} = 0,5 \cdot (d_1 + d_0). \quad (4.17)$$

Рассмотрим условие равновесия элементарной области материала, находящейся на участке L_1 . С учётом упрощений $d_L = d_{cp}$ и $F_{mpd1} = 0$ из уравнения (4.9) получим:

$$\begin{aligned} -\frac{\pi \cdot (D^2 - d_{cp}^2)}{4} \cdot dP = F_{mpD} + N_L = \xi \cdot k_{\delta} \cdot P \cdot \pi \cdot D \cdot dL + \\ + k_{\delta} \cdot P \cdot \pi \cdot d_{cp} \cdot \sin(\alpha) \cdot dL. \end{aligned} \quad (4.18)$$

После преобразования имеем:

$$-\frac{dP}{P} = 4 \cdot k_{\delta} \frac{\xi \cdot D + d_{cp} \cdot \sin(\alpha)}{D^2 - d_{cp}^2} dL. \quad (4.19)$$

Проинтегрируем:

$$-\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} = 4 \cdot k_{\delta} \frac{\xi \cdot D + d_{cp} \cdot \sin(\alpha)}{D^2 - d_{cp}^2} \cdot \int_0^{L_1} dL. \quad (4.20)$$

Получим:

$$P_2 = P_1 \cdot \exp \left[-4 \cdot k_{\delta} \cdot L_1 \frac{\xi \cdot D + d_{cp} \cdot \sin(\alpha)}{D^2 - d_{cp}^2} \right]. \quad (4.21)$$

Перепад давлений на участке дроссельно-перемешивающего элемента составит:

$$\begin{aligned} \Delta P_1 = P_1 - P_2 = P_1 - P_1 \cdot \exp \left[-4 \cdot k_{\delta} \cdot L_1 \frac{\xi \cdot D + d_{cp} \cdot \sin(\alpha)}{D^2 - d_{cp}^2} \right] = \\ = P_1 \left(1 - \exp \left[-4 \cdot k_{\delta} \cdot L_1 \frac{\xi \cdot D + d_{cp} \cdot \sin(\alpha)}{D^2 - d_{cp}^2} \right] \right). \end{aligned} \quad (4.21a)$$

По сравнению с точностью вычислений по уравнению (4.16), замена $d_L = d_{cp}$ даёт в данном случае малую погрешность (<10 %) и позволяет получить аналитическое решение уравнения.

Аналогично исследуем цилиндрический участок шириной L_2 с учётом, что $F_{mpd2} = 0$.

$$-\frac{\pi \cdot (D^2 - d_1^2)}{4} \cdot dP = F_{mpD} = \xi \cdot k_{\delta} \cdot P \cdot \pi \cdot D \cdot dL. \quad (4.22)$$

После преобразования имеем:

$$-\frac{dP}{P} = 4 \cdot k_{\delta} \cdot \xi \frac{D}{D^2 - d_1^2} dL. \quad (4.23)$$

Проинтегрируем:

$$-\int_{P_2}^{P_3} \frac{dP}{P} = 4 \cdot k_{\delta} \cdot \xi \frac{D}{D^2 - d_1^2} \int_0^{L_2} dL. \quad (4.24)$$

Получим:

$$P_3 = P_2 \cdot \exp \left[-4 \cdot k_{\delta} \cdot \xi \cdot L_2 \frac{D}{D^2 - d_1^2} \right]. \quad (4.25)$$

Определим перепад давлений на участке дроссельно-перемешивающего элемента:

$$\begin{aligned} \Delta P_2 = P_2 - P_3 &= P_2 - P_2 \cdot \exp \left[-4 \cdot k_{\delta} \cdot \xi \cdot L_2 \frac{D}{D^2 - d_1^2} \right] = \\ &= P_2 \left(1 - \exp \left[-4 \cdot k_{\delta} \cdot \xi \cdot L_2 \frac{D}{D^2 - d_1^2} \right] \right). \end{aligned} \quad (4.26)$$

Общий перепад давлений на цилиндрическом дроссельно-перемешивающем элементе составит:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2. \quad (4.27)$$

5. Выводы

1. Получены уравнения, характеризующие перепад давления для цилиндрического и конического участков дроссельно-перемешивающего элемента. Установлено, что зависимость изменения давления по длине дроссельного элемента носит экспоненциальный характер.

2. Установлено, что вращение дроссельно-перемешивающего элемента уменьшает сопротивление трения при движении материала в осевом направлении.

3. После упрощений получена аналитическая зависимость для определения перепада давлений при прохождении сырья через вращающийся цилиндрический дроссельно-перемешивающий элемент.

Литература

1. Современные композиционные материалы / под ред. П. Крока и Л. Броумана; пер. с англ. – М., 1978.
2. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов : учебное пособие / В.Е. Галыгин, Г.С. Баронин, В.П. Таров, Д.О. Завражин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 180 с.
3. Мельникова Л.В. Технология композиционных материалов из древесины : учебник для студентов спец. «Технология деревообработки» / Л.В. Мельникова. – 3-е изд. – М. : МГУЛ, 2007. – 235 с.
4. Булатов И.Г. Разработка процесса прессового гранулирования мелкодисперсных сред на примере минеральных порошков и древесных отходов: Автореф... дис. канд. техн. наук. – Москва, МГУИЭ, 2012. – 22 с.
5. Завинский С.И. Теоретический подход к описанию процесса экструзии композитного органического сырья [Электронный ресурс] // Технологический аудит и резервы производства.– 2013.– № 5/4(13).– URL:<http://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskiy-podhod-k-opisaniyu-protssesa-ekstruzii-kompozitnogo-organicheskogo-syrya> (дата обращения: 06.10.2015).
6. Ламинарные течения в соосных конических каналах : Монография : В 2-х томах / Л.М. Ульев ; Под ред. Л.Л. Товажнянского ; Нац. техн. ун-т "Харьковский политехнический институт".– Харьков : НТУ "ХПИ", 2006.
7. Татарьянц М.С., Завинский С.И., Трошин А.Г. Разработка методики расчёта нагрузок на шнек и энергозатрат шнековых прессов [Электронный ресурс] // Scientific Journal «ScienceRise».– 2015.– №6/2(11).– URL:<http://journals.uran.ua/sciencerise/article/view/44378/41072> (дата обращения: 06.10.2015).

Bibliography (transliterated)

1. Sovremennyye kompozitsionnyye materialy. pod red. P. Kroka i L. Broumana; per. s angl. – M., 1978.
2. Sovremennyye tehnologii polucheniya i pererabotki polimernykh i kompozitsionnykh materialov : uchebnoye posobie. V.E. Galyigin, G.S. Baronin, V.P. Tarov, D.O. Zavrazhin. – Tambov : Izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 2012. – 180 p.
3. Melnikova L.V. Tehnologiya kompozitsionnykh materialov iz drevesiny : uchebnik dlya studentov spets. «Tehnologiya derevoobrabotki». L.V. Melnikova. – 3-e izd. – M. : MGUL, 2007. – 235 p.
4. Bulatov I.G. Razrabotka protssesa pressovogo granulirovaniya melkodispersnykh sred na primere mineralnykh poroshkov i drevesnykh othodov: Avtoref... dis. kand. tehn. nauk. – Moskva, MGUIE, 2012. – 22 p.
5. Zavinskiy S.I. Teoreticheskiy podhod k opisaniyu protssesa ekstruzii kompozitnogo organicheskogo syrya [Elektronnyiy resurs]. Tehnologicheskiy audit i rezervy proizvodstva.– 2013.– # 5/4(13).– URL:<http://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskiy-podhod-k-opisaniyu-protssesa-ekstruzii-kompozitnogo-organicheskogo-syrya> (data obrascheniya: 06.10.2015).

6. Laminarnyie techeniya v soosnyih konicheskikh kanalah : Monografiya : V 2-h tomah. L.M. Ulyev; Pod red. L.L. Tovazhnyanskogo ; Nats. tehn. un-t "Harkovskiy poli-tehnicheskii institut".– Harkov : NTU "HPI", 2006.

7. Tatoryants M.S., Zavinskiy S.I., Troshin A.G. Razrabotka metodiki raschyota na-gruzok na shnek i energozatrat shnekovyih pressov [Elektronnyiy resurs]. Scientific Journal «ScienceRise».– 2015.– #6/2(11).– URL:<http://journals.uran.ua/sciencerise/article/view/44378/41072> (data obrascheniya: 06.10.2015).

УДК 674.8

Татар'янц М.С., Завинський С.І., Трошин О.Г., Михайличенко В.П.

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ КОМПОЗИТНОЇ СИРОВИНИ КРІЗЬ ДРОСЕЛЬНО-ПЕРЕМІШУЮЧИЙ ЕЛЕМЕНТ

Досліджено процес руху композитної сировини крізь дросельно-перемішуючий елемент шнекового екструдеру. Побудована схема навантажень, отримані рівняння рівноваги для елементарного об'єму сировини. Отримана аналітична залежність для визначення перепаду тиску на дросельно-перемішуючому елементі з урахуванням його (елементу) обертання.

Tatariants M.S., Zavinskyi S.I., Troshin A.G, Mikhalichenko V.P.

THEORETICAL STUDY OF THE RAW COMPOSITE MATERIAL MOVEMENT THROUGH THROTTLE-MIXING ELEMENT

The work deals with raw composite material movement through throttle-mixing element of the screw extruder. Scheme of acting forces is drawn and balance equations for infinitesimal material element formed. As the result, analytic equation, which allows to determinate pressure drop on throttle-mixing rotating element, is obtained.