

# Экспериментальное определение реологических параметров уравнения Оствальда де Виля для связи индекса течения и коэффициента консистенции с температурой процесса экструдирования высоконаполненных пластмасс при послойном течении

**Р.Ф. Сагитов**, к.т.н., ОАО НИПИЭП; **Е.А. Фёдоров**, начальник установки, ООО «Газпром добыча Оренбург»; **С.В. Антимонов**, к.т.н., **Д.Н. Кульнязов**, магистрант, ФГБОУ ВПО Оренбургский ГУ

Актуальность проблемы состоит в том, что в настоящее время в России большое внимание уделяется утилизации и вторичной переработке промышленных и бытовых отходов. Методы и способы переработки могут быть различными. На наш взгляд, менее энергоёмким и экологически чистым способом переработки промышленных и бытовых отходов является экструдирование многокомпонентных смесей в пресс-экструдере для получения на выходе высококачественных облицовочных и строительных материалов [1–4].

Для описания течения композитов в процессе экструзии чаще других на практике применяется степенное уравнение Оствальда де Виля [5–7]:

$$\tau = \mu' \cdot \gamma^n, \quad (1)$$

где  $\tau$  — напряжение сдвига в материале;

$\mu$  — коэффициент консистенции материала;

$\gamma$  — скорость сдвига;

$n$  — индекс течения.

Весьма сложную задачу представляет собой определение вязкости материала, которая в общем случае может зависеть от множества различных факторов (давления, температуры, концентрации, молекулярного веса и т.п.). Поэтому при изучении экструзии неньютоновских материалов необходимо учитывать аномалию вязкости и её зависимость от влажности и температуры.

На сегодняшний день в литературных источниках отсутствуют сведения об исследованиях реологических свойств композитов в процессе экструзии, несмотря на огромное количество работ по изучению указанных свойств различных полимеров и пищевых продуктов. Отсюда можно сделать вывод, что определение реологических свойств полимерных композитов в процессе экструдирования, которые непосредственно влияют на качество готового продукта, представляет огромный интерес и является важной задачей в наше время.

В связи с этим на кафедре МАХПП ОГУ были определены числовые значения коэффициентов консистенции  $\mu'$  и индексов течения  $n$  уравнения Оствальда де Виля для четырёх составов полимерных композитов при различных параметрах процесса экструзии.

**Объекты и методы исследования.** Для определения реологических свойств полимерных композитов в процессе экструзии тензометрическим способом осуществляли замер давления в прессуемом материале в двух сечениях фильеры пресс-экструдера с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) СС-212F, сведения с которого поступали на ЭВМ. Программа обработки данных с АЦП выдаёт их на экране ЭВМ в табличном (для дальнейшей обработки) и графическом (для наглядности) виде.

Контроль температуры в ходе процесса прессования вели в зоне формирующей головки термометром сопротивления, данные с которого также поступали на АЦП. Методика измерения давления и температуры изложена Р.Н. Абдрафиковым [8].

Шнековые пресс-экструдеры являются машинами непрерывного действия, у которых для первоначального пуска и вывода пресса на установившийся режим работы требуется определённое количество времени и некоторое количество исходного сырья.

По достижении установившегося режима работы на сырьё с заданной начальной влажностью и заданной частоте вращения шнека, характеризующегося устойчивым и равномерным выходом продукта из формирующей фильеры и фиксированным значением потребляемой электроприводом мощности и температуры экструдата, производили отбор экструдата за определённый промежуток времени (10 сек.). При этом записывали показания индикатора частоты вращения, ваттметра и с АЦП от тензодатчиков и термометра сопротивления на ЭВМ.

Затем резко увеличивали частоту вращения шнека до другого фиксированного значения и производили отбор экструдата. Наблюдения показали, что при этом температура процесса остаётся постоянной. Производили замеры контролируемых величин. Затем резко уменьшали частоту вращения шнека до третьего фиксированного значения, меньшего, чем два первых, и производили измерения контролируемых величин.

Таким образом, при фиксированном значении температуры, характерной для данного состава композита заданной влажности, при выходе пресс-экструдера с заданными кинематическими параметрами на режим и нескольких различных частотах вращения шнека получали массив данных, необходимых для построения кривой течения. Приведённую выше последовательность операций повторяли для каждого состава полимерного композита. Процесс прессования исходного сырья протекал при трёх значениях влажности 20; 30 и 40%.

Следующий этап экспериментальных исследований заключался в определении зависимости реологических свойств полимерных композитов от влажности при фиксированных значениях температуры. Для этого приведённую выше последовательность операций повторяли для каждого состава полимерного композита при трёх значениях влажности, не дожидаясь выхода пресс-экструдера на режим, а при достижении экструдатом определённой температуры.

Дальнейшим этапом экспериментальных исследований было выявление зависимости реологических свойств композитов от температуры при фиксированных значениях влажности.

Полученные образцы взвешивали на рычажных лабораторных весах, определяли среднеарифметический показатель и находили часовую производительность для каждого замера.

В общей сложности было проведено 90 опытов, в шести повторностях каждый.

**Результаты исследований.** В результате экспериментальных исследований получили значения нормальных напряжений в прессуемом материале в двух сечениях фильеры и производительностей пресс-экструдера в зависимости от частоты вращения шнека, рецепта, влажности полимерного композита и температуры экструзии.

По полученным данным определяли реологические свойства экструдированного сырья, используя методику, изложенную выше [8].

Были определены числовые значения коэффициентов консистенции  $\mu'$  и индексов течения  $n$  для различных составов полимерного композита в фильере пресс-экструдера в зависимости от частоты вращения шнека, начальной влажности композита и температуры экструзии, которая в процессе эксперимента изменялась от 50 до 90 °С.

По полученным значениям выведены уравнения для определения  $\mu'$  и  $n$  для данных композитов в рабочем интервале угловых скоростей рабочего шнека пресс-экструдера (скорость = 10–25 рад/с).

Зависимость коэффициента консистенции  $\mu'$  (МПа·с<sup>n</sup>) от влажности исходного сырья  $W$  (%) и температуры процесса экструзии  $T$  (°С) хорошо описывается следующим выражением:

$$\mu' = \mu_0' \cdot \exp(a \cdot W \cdot T - b \cdot W - c \cdot T), \quad (2)$$

где  $\mu'$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты, величина которых приведена в таблице.

На рисунке 1 показана поверхность, построенная по этому выражению для состава (опилки (мука) – 30%; отруби – 35%; пропилен Бален 02003 – 35%), которая наглядно демонстрирует, что с увеличением влажности исходного сырья и температуры процесса экструзии значение коэффициента консистенции  $\mu'$  уменьшается.

Изменение влажности исходного сырья не влияет на индекс течения  $n$ . Зависимость индекса течения от температуры процесса экструзии  $T$  (°С) хорошо описывается выражением:

Значения коэффициентов уравнений (2) и (3)

| Состав композита                                                               | Реологические параметры |         |        |          |        |        |
|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------|--------|----------|--------|--------|
|                                                                                | $\mu'$                  | $n$     | $d$    | $a$      | $b$    | $c$    |
| Опилки (мука) – 50%; отруби – 20%; ПЭНД Р-У342 – 30%, влажность – 20%          | $3,7 \cdot 10^{10}$     | 0,02715 | 0,672  | 0,00672  | 0,8912 | 0,3316 |
| Лузга – 40%; отруби – 40%; ПЭНД Р-У342 – 20%, влажность – 30%                  | $2,01 \cdot 10^9$       | 0,01531 | 1,2761 | 0,001452 | 0,4272 | 0,1918 |
| Лузга – 40%; отруби – 40%; ПЭНД Р-У342 – 20%, влажность – 40%                  | $1,16 \cdot 10^{12}$    | 0,02476 | 1,3765 | 0,00342  | 0,5677 | 0,2476 |
| Опилки (мука) – 30%; отруби – 35%; пропилен Бален 02003 – 35%, влажность – 40% | $2,79 \cdot 10^{11}$    | 0,01124 | 0,8971 | 0,00421  | 0,9127 | 0,3108 |

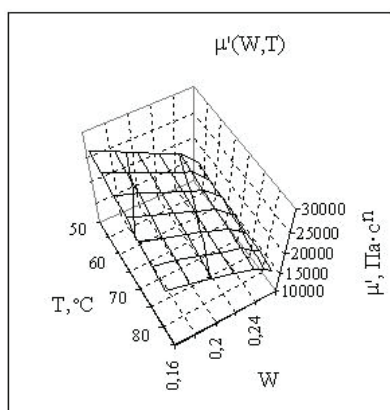


Рис. 1 – Зависимость коэффициента консистенции от влажности композита и температуры экструзии

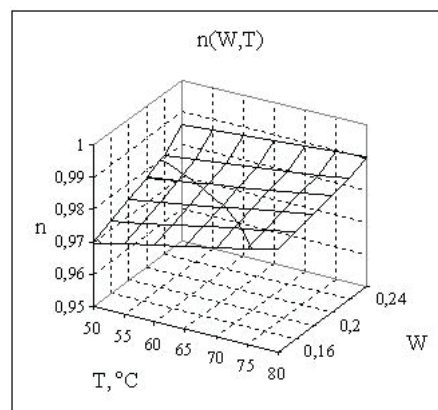


Рис. 2 – Зависимость индекса течения от температуры экструзии и влажности композита

$$n = n_1 \cdot T^{-d}, \quad (3)$$

где  $n$  — коэффициенты, величина которых приведена в таблице.

На рисунке 2 представлена поверхность, построенная по этому выражению для состава (опилки (мука) — 30%; отруби — 35%; пропилен Бален 02003 — 35%), из которой видно, что с увеличением температуры процесса экструзии значение  $n$  возрастает.

Необходимо отметить, что уравнения (2) и (3) справедливы только для исследованного диапазона изменения температуры, влажности и частоты вращения шнека.

Полученные результаты позволяют решить задачу адекватного математического описания процесса экструдирования полимерных композитов, что обусловит возможность создания новых продуктов с заранее заданными свойствами и осуществления ресурсосберегающего процесса экструдирования.

Полученные числовые значения индексов течения  $n$  и коэффициентов консистенции  $\mu'$  при различных параметрах процесса экструзии для исследованных рецептов полимерных композитов позволяют производить оптимизацию конструкций

пресс-экструдеров методами математического моделирования.

### Литература

1. Сагитов Р.Ф., Фёдоров Е.А. Технология получения древесно-полимерных композитов методом экструзии // Инноватика-2010: сб. матер. VI Всерос. науч.-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных с элементами научной школы (12–16 апреля 2010 г.). Т. 1. Томск: ТМЛ-Пресс, 2010. С. 188–189.
2. Ковриков И.Т., Антимонов С.В., Сагитов Р.Ф. и др. Получение ДПКТ способом экструзии из пластиковых и целлюлозосодержащих отходов // Проблемы и инновационные решения в химической технологии «ПИРХТ-2010»: матер. междунар. науч.-практич. конф. ВГТА. Воронеж: ВГТА, 2010. С. 77–83.
3. Сагитов, Р.Ф., Соловых С.Ю., Антимонов С.В. и др. Исследование возможности получения ДПКТ методом экструзии на основе отходов различных производств // Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология: докл. Междунар. конф. «Композит-2010». Саратов, 2010.
4. Сагитов Р.Ф., Антимонов С.В., Фёдоров Е.А. и др. Экструдирование различных видов пластиковых и целлюлозосодержащих отходов с целью получения древесно-наполненных пластмасс // Вестник Ижевского государственного технического университета. 2010. № 3. С. 4–7.
5. Груздев И.Э., Мирзоев Р.Г., Янков В.И. Теория шнековых устройств. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 144.
6. Мачихин Ю.А., Берман Г.К., Клаповский Ю.В. Формование пищевых масс. М.: Колос, 1992. 272 с.
7. Мачихин Ю.А., Мачихин С.А. Инженерная реология пищевых материалов. М.: Лёгкая и пищевая пром-сть, 1981. 216 с.
8. Абдрафиков Р.Н. Определение параметров процесса экструдирования с использованием аналого-цифрового преобразователя // Вестник Оренбургского государственного университета. 2002. № 2. С. 214–217.