

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА СМЕШЕНИЯ ВЫСОКОВЯЗКИХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

О.В. Ефремов, А.С. Клинков, П.С. Беляев, М.В. Соколов

*Кафедра «Переработка полимеров и упаковочное производство»,
ГОУ ВПО «ТГТУ»; rod@asp.tstu.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: высоковязкие полимерные композиции; смешение полимеров.

Аннотация: Описаны принцип действия, состав и возможности измерительного комплекса для прогнозирования качества смешения высоковязких полимерных композиций. Приведены примеры их конкретного использования.

В современной экономике очень важны вопросы оценки и прогнозирования качества производимой продукции. При производстве высоковязких полимерных композиций, в частности клеевых, ранее использовались различные методы, общими недостатками которых являлись относительно большое время, требующееся для оценки качества, или же приблизительность полученных результатов. Последний недостаток есть, например, у метода оценки с помощью заранее изготовленных эталонных образцов, с которыми визуально или с помощью спектрофотометра сравнивается полученный результат.

Предложенные авторами методики оценки качества и методики проведения экспериментов могут быть реализованными с помощью разработанной модельной установки (рис. 1), которая также может служить и для выявления закономерностей течения перерабатываемых материалов в каналах рабочих органов смесителей, и для проверки адекватности разработанной математической модели исследуемого процесса [1, 2].

Установка разработана на базе пластографа (торсионного реометра) Plasti-Corder® австрийской фирмы Brabender®, который был оснащен дополнительным тахометром-генератором 3, модельной приставкой 6, лазером 9 и регистрирующими приборами: цифровой камерой высокого разрешения (10 мегапикселей) 10, головкой фотометрической 12 и персональным компьютером 14.

Дополнительный тахометр-генератор 3 установлен на валу основного тахометра-генератора и служит для регистрации угловой скорости вращения двигателя в реальном времени с помощью персонального компьютера 14. Необходимость такого шага была продиктована тем, что цепь основного тахометра-генератора использовалась в схеме электронной стабилизации скорости вращения двигателя и, следовательно, отсутствовала возможность подключения к этой цепи дополнительных контуров без нарушения работы существующей схемы.

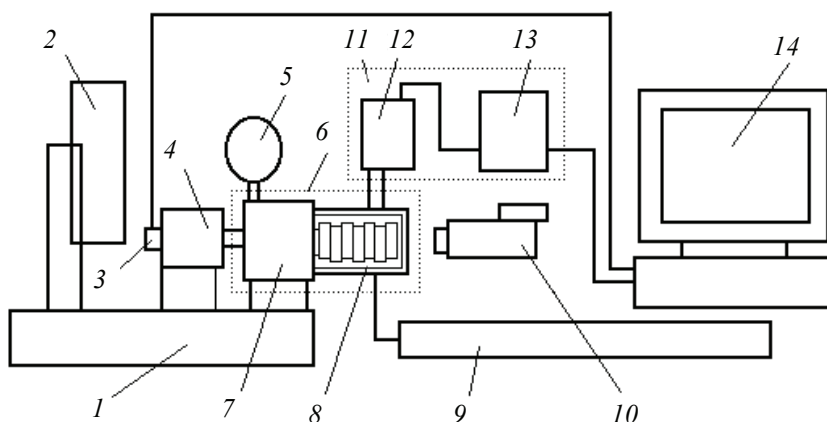


Рис. 1. Схема экспериментальной модельной установки для исследования процессов смешения высоковязких полимерных композиций:

1 – пластограф Брабендера; 2 – самописец; 3 – дополнительный тахометр-генератор; 4 – электродвигатель; 5 – тахометр; 6 – модельная приставка; 7 – редуктор-раздвоитель; 8 – прозрачная смесительная камера со сменными смесительными элементами; 9 – лазер газовый ЛГ-75-1; 10 – видеокамера; 11 – фотометр ФПЧ; 12 – головка фотометрическая; 13 – блок питания и управления; 14 – персональный компьютер

Приставка 6 состоит из редуктора-раздвоителя 7 и прозрачной смесительной камеры 8 со сменными смесительными элементами. В качестве приборов, регистрирующих ход процесса смешения, использовались цифровая камера высокого разрешения (10 мегапикселей) 10, фотометр ФПЧ 11, состоящий из фотометрической головки 12 и блока питания и управления 13, и персональный компьютер 14, оснащенный платой аналого-цифрового преобразователя (АЦП) НВЛ-08. Блок аналогового ввода обеспечивает согласование внешнего измеряемого напряжения со входным сигналом АЦП, преобразование этого сигнала в цифровой код и передачу кода на шину данных персонального компьютера IBM PC AT. Этот блок состоит из аналогового коммутатора, буферного дифференциального усилителя, схемы выборки-хранения, интегрального АЦП, источника опорного напряжения и схемы синхронизации.

В качестве источника света использовался газовый лазер 9 марки ЛГ-75-1 мощностью 125 мВт. Конструкция камеры 8 позволяет использовать смесительные модули различной конфигурации (рис. 2). Рабочие органы вращаются в одну сторону. Луч лазера отклоняется зеркалом с наружным напылением (на рис. 1 не показано), проходит через перерабатываемый материал и далее улавливается фотометрической головкой 12. Расстояние, проходимое лучом лазера в рабочем пространстве камеры 8, зависит от степени прозрачности исследуемой композиции. Например, для раствора натурального каучука в нефрасе С2-80/120 оно составляло 15 мм. Опыты показали, что это максимальное расстояние, при котором осуществляется уверенная передача светового потока через внутреннее пространство камеры.

Питание электродвигателя 4 мощностью 1,5 кВт осуществлялось от специального блока питания, оснащенного системой электронной стабилизации числа оборотов. Вращение вала электродвигателя передавалось редуктору-раздвоителю 7, расстояние между выходными валами которого составляло 35 мм. Частота вращения рабочих органов варьировалась в диапазоне $2,1 \dots 8,4 \text{ с}^{-1}$.

Фиксация колебаний концентрации исследуемой смеси в ее элементарном объеме осуществлялась по следующей схеме. Сигнал, снимаемый с ФПЧ-БПУ, регистрировался компьютером 14, оснащенным платой аналого-цифрового преобразователя типа НВЛ-08, далее результаты экспериментов регистрировались и

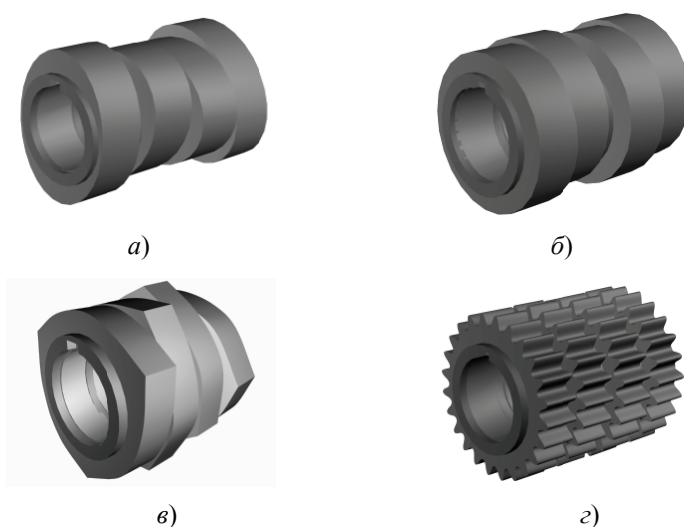


Рис. 2. Виды насадок, применяемые в экспериментах:
а – эллиптические; *б* – эксцентриковые;
в – треугольные; *г* – зубчатые

обрабатывались с помощью специально разработанных компьютерных программ [3].

Установка предназначена для проведения следующих экспериментов:

- исследование реологических свойств полимерных композиций на разных стадиях их деформирования в зоне смешения. На этом же этапе на основании полученных зависимостей крутящего момента от угловой скорости вращения шнеков и корреляции результатов, полученных на вискозиметре «Реотест-2»;
- исследование изменения во времени коэффициента неоднородности композиции при различных частотах вращения шнеков для смешительных кулачков различных конфигураций и различных концентрациях полимера в растворителе;
- определение технологической мощности, затрачиваемой на деформирование перерабатываемой композиции в каналах рабочих органов при различных технологических параметрах и конструкциях смешительных органов.

В описываемых экспериментах использовались смешительные насадки четырех видов: эллиптические, эксцентриковые, треугольные и зубчатые (см. рис. 2) [4]. Их геометрические параметры приведены в табл. 1.

Для исследований выбирались материалы с концентрацией растворяемого компонента 20, 50 и 80 %. Такой выбор диапазона изменения концентраций обусловлен тем, что при изготовлении по непрерывному способу подавляющего большинства композиций начальная концентрация растворяемого компонента, загружаемого в зону питания, составляет не более 70–80 % [5, 6]. В дальнейшем, по мере продвижения к выходному отверстию смесителя, происходит добавление

Таблица 1

Геометрические параметры смешительных насадок

Виды кулачков	Геометрические параметры
Эллиптические	$a_{эл} = 0,019$ м; $b_{эл} = 0,014$ м
Эксцентриковые	$r_{эксц} = 0,017$ м
Треугольные	$r_{тр} = 0,019$ м; $R_{тр} = 0,034$ м
Зубчатые	$r_{зуб} = 0,015$ м; $n_{зуб} = 17$; $a_{зуб} = 0,002$ м; $b_{зуб} = 0,004$ м; $h = 0,004$ м

растворителя, то есть имеет место картина ступенчатого уменьшения концентрации. Такая схема обеспечивает необходимые условия для успешного смешения, растворения, диспергирования и/или гомогенизации. Кроме того, именно в зонах питания смесителей с высококонцентрированной композицией рассеивается наибольшая доля мощности, расходуемая на смешение.

Исследуемая композиция должна быть полупрозрачной субстанцией, способной пропускать свет. Это является необходимым условием проведения части экспериментов, так как для определения коэффициента неоднородности смеси использовалась методика, требующая пропускания через исследуемую композицию луча света с частотой в видимой области спектра.

В смесительную камеру загружалось такое количество исследуемого материала, чтобы она была полностью заполнена.

В качестве примера в табл. 2 приведены данные о плотности растворов натурального каучука в нефрасе С2-80/120.

Для оценки технологической мощности, затрачиваемой в процессе приготовления высоковязких полимерных композиций, необходимо знание величины эффективной вязкости композиции в зависимости от скорости сдвига и температурных режимов обработки. Для проведения реологических исследований обычно используют капиллярные или ротационные вискозиметры различных типов, к недостаткам которых можно отнести ограниченный диапазон скоростей сдвига в существующих капиллярных и ротационных вискозиметрах.

Поэтому для оценки интенсивности деформационного воздействия смесительных элементов различной конфигурации на перерабатываемый материал по отдельным рабочим зонам смесителя был использован модернизированный пластограф Брабендера с заменой редуктора смесительной камеры и рабочими валами с вращением в одну сторону. Установка на валах пластографа рабочих элементов различных конфигураций (см. рис. 2) позволяет моделировать и оценивать характер силового воздействия на материал по аналогии со смесителем непрерывного действия, однако сложная геометрия и неравномерность скоростей сдвига затрудняют пересчет получаемой зависимости вращающего момента от скорости вращения рабочих органов в реологические единицы – напряжения и скорости сдвига. Для интерпретации результатов измерений были использованы поправки, вычисленные калибровкой прибора по ньютоновской жидкости, вязкость которой не зависит от характера силового воздействия и зависимостям вязкости от скорости сдвига для полимерных композиций.

Реологические исследования свойств растворов высоковязких полимерных композиций с различной концентрацией проводились методом ротационной вискозиметрии на приборе «Реотест-2», что позволило расширить рабочий диапазон скоростей сдвига. Полученные зависимости напряжения сдвига от скорости сдвига показали, что исследованные материалы относятся к неньютоновским жидкостям степенного закона вида $\tau = k\dot{\gamma}^n$

(описывает зависимость между напряжением τ и скоростью сдвига $\dot{\gamma}$), а обработка кривых течения позволила определить реологические константы k и n этого закона в диапазоне скоростей сдвига от 40 до 400 с^{-1} [7, 8].

Исследования, проведенные на ротационном вискозиметре «Реотест-2», позволили представить и

Таблица 2

Значения концентрации и плотности растворов натурального каучука в нефрасе С2-80/120

Концентрация C , %	Плотность ρ , кг/м^3
20	730
50	789
80	848

обработать данные, полученные на пласмографе Брабендера с целью непосредственной оценки реологических свойств полимерных композиций при различных режимах их обработки.

Пример зависимостей крутящего момента от скорости вращения роторов для зоны зубчатых кулачков представлены на рис. 3. Такие же зависимости были определены для зон эллиптических, эксцентриковых и треугольных кулачков.

Далее, аппроксимировав полученные данные и найдя аналитические уравнения для зависимостей $M_{кр}$ от ω и τ от $\dot{\gamma}$, можно определить постоянные Брабендера, позволяющие непосредственно переходить от зависимости $M_{кр} = f(\omega)$ к реологическому уравнению, описывающему зависимость напряжения от скорости сдвига.

Полученные таким образом реологические зависимости можно использовать для расчета мощности, затрачиваемой на процесс смешения и для прогнозирования процесса растворения полимера в ходе смешения.

Далее, с помощью разработанного программного обеспечения, базируясь на описанных выше показателях, можно рассчитать и спрогнозировать для зон с разными смесительными элементами такой показатель качества высоковязких полимерных композиций, как коэффициент неоднородности смеси. Для прозрачных (полупрозрачных) композиций этот коэффициент можно рассчитать по методике, предусматривающей пропускание через смесь в процессе смешения луча лазера и регистрацию на выходе его интенсивности; а для непрозрачных – посредством определения дисперсии цвета в пробах композиции, взятых на разных стадиях смешения из различных зон.

Таким образом, разработанный измерительный комплекс позволяет прогнозировать качество смешения полимерных композиций, в частности дает возможность проводить оценку интенсивности процесса смешения для широкого класса смесителей (вальцы, роторные и лопастные смесители периодического и непрерывного действия и др.) с применением современной вычислительной техники, с малыми затратами времени и удовлетворительной (не более 12 %) точностью, что допустимо для процессов смешения высоковязких полимерных композиций.

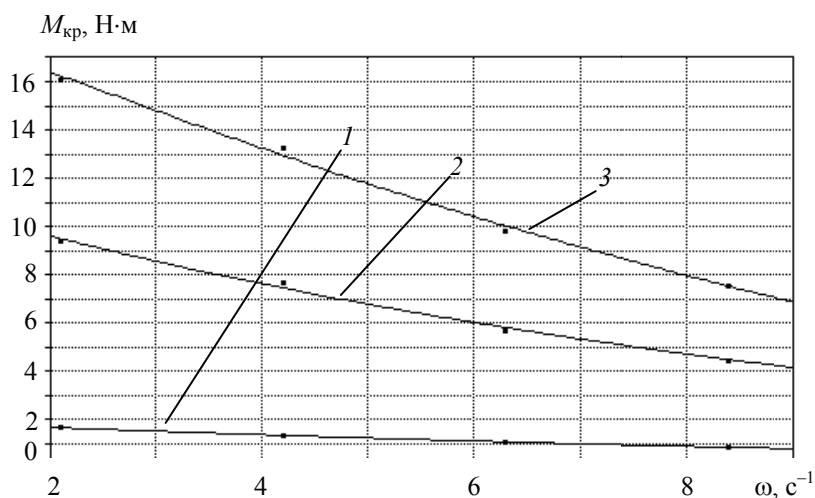


Рис. 3. Зависимость крутящего момента от частоты вращения шнеков в зоне зубчатых кулачков для растворов натурального каучука в нефрасе С2-80/120: 1, 2, 3 – концентрация каучука в растворе 20, 50, 80 %, соответственно

Список литературы

1. Axelsson, O. A Class of Iterative Methods for Finite Element Equations / O. Axelsson // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 1976. – Vol. 9. – P. 123–137.
2. Ершов, Н.Ф. Метод конечных элементов в задачах гидродинамики и гидроупругости / Н.Ф. Ершов, Г.Г. Шахверди. – Л. : Судостроение, 1984. – 240 с.
3. Свидетельство № 2001611816 о регистрации программы для ЭВМ. Система автоматизированного проектирования двухшнековых смесителей непрерывного действия MixerCAD / Ефремов О.В., Клинков А.С. (РФ) ; опубл. 26.12.2001.
4. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 392 с.
5. Коннор, Д. Метод конечных элементов в механике жидкости / Д. Коннор, К. Бреббия. – Л. : Судостроение, 1979. – 263 с.
6. Thomasset, F. Implementation of Finite Element Methods for Navier-Stokes Equation / F. Thomasset. – New York : Springer-Verlag, 1981. – 159 p.
7. Тобольский, А.В. Структура и свойства полимеров / А.В. Тобольский. – М. : Химия, 1964. – 322 с.
8. Справочник по пластическим массам. В 2-х т. / Под ред. В.М. Катаева. – М. : Химия, 1975. – 427 с.

Measurement System for Forecasting of Quality of High-Viscosity Polymer Composites

O.V. Efremov, A.S. Klinkov, P.S. Belyaev, M.V. Sokolov

*Department "Processing of Polymers and Packaging", TSTU;
rod@asp.tstu.ru*

Key words and phrases: high-viscosity polymer composites; polymer mixing.

Abstract: The paper describes the principle of operation, composition and possibilities of the measurement system for forecasting of the quality of mixing of high-viscosity polymer composites. The examples of practical application are given.

Meßkomplex für die Prognostizierung der Qualität der Mischung der hochzähflüssigen Polymerkompositionen

Zusammenfassung: Es sind das Prinzip des Funktionierens, den Zustand und die Möglichkeiten des Meßkomplexes für die Prognostizierung der Qualität der Mischung der hochzähflüssigen Polymerkompositionen beschrieben. Es sind die Beispiele der Konkretbenutzung angeführt.

Complexe de mesure pour la prévision de la qualité du déplacement des composites polymères de la haute viscosité

Résumé: Est décrit le principe du fonctionnement, la composition et possibilité du complexe de mesure pour la prévision de la qualité du déplacement des composites polymères de la haute viscosité. Sont cités les exemples de l'application concrète.

Авторы: *Ефремов Олег Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Переработка полимеров и упаковочное производство»; *Клинков Алексей Степанович* – кандидат технических наук, профессор кафедры «Переработка полимеров и упаковочное производство»; *Беляев Павел Серафимович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Переработка полимеров и упаковочное производство»; *Соколов Михаил Владимирович* – доктор технических наук, доцент кафедры «Переработка полимеров и упаковочное производство», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Гатапова Наталья Цибиковна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химическая инженерия», ГОУ ВПО «ТГТУ».
