

УДК 66.028

**Л.П. Гаранин, А.В. Теплыгин**

ОАО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов»,  
Пермь, Россия

**ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА  
ОТКЛОНЕНИЙ В СОДЕРЖАНИИ КОМПОНЕНТОВ  
В КОМПОЗИЦИИ, ПОЛУЧАЕМОЙ В СМЕСИТЕЛЕ  
НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ, ПРИ ИЗВЕСТНЫХ  
ФЛУКТУАЦИЯХ В ДОЗИРОВКЕ КОМПОНЕНТОВ**

Предлагается упрощенный графоаналитический метод для оперативного определения характеристик кривых отклика на выходе из смесителя непрерывного действия в зависимости от колебаний содержания компонентов в потоке на входе в смеситель. Для этой цели авторы предлагают использовать графическое изображение кривой отклика в безразмерных координатах  $\Delta C_{\text{вых}}/\Delta C_{\text{вх}}$  и  $t/T$ , где  $\Delta C_{\text{вых}}$  и  $\Delta C_{\text{вх}}$  – амплитуды отклонения концентрации компонента соответственно на выходе смесителя и на входе в смеситель;  $t$  – текущее время;  $T$  – постоянная времени смесителя. Предложенный авторами метод позволяет решать целый ряд характерных технологических задач, например прогнозировать отклонения содержания компонентов в готовой смеси в рабочем режиме ведения реального технологического процесса при каких-то случайных отклонениях в дозировании компонентов; определять максимально возможное отклонение величины дозы компонентов в течение единичного цикла дозирования.

Предлагаемый метод пригоден для применения как на этапе проектирования новых технологий, так и для экспертной оценки существующих производств, где применяются смесители непрерывного действия с автоматизированными системами дозирования компонентов. Изложенный в статье материал может быть также полезен специалистам, обслуживающим существующие технологические линии.

**Ключевые слова:** дозирование, смеситель, перемешивание, компонент, метод, расчет, отклик, флуктуация, концентрация, амплитуда.

**L.P. Garanin, A.V. Teplygin**

OJSC „Research Institute of the Polymeric Materials“,  
Perm, Russian Federation

**GRAPH-ANALYTIC METHOD FOR CALCULATION  
OF DEVIATIONS IN THE COMPONENTS CONTENT  
OF COMPOSITION OBTAINED IN A CONTINUOUS MIXER  
AT KNOWN FLUCTUATIONS IN A DOSAGE OF COMPONENTS**

The simplified graph-analytic method for prompt determination of characteristics of the response curves at output of continuous mixer depending on variations of components content in a flow at mixer input is offered. For this purpose authors suggest to use graphical representation of the response curve in the dimensionless coordinates  $\Delta C_{out}/\Delta C_{inp}$  and  $\tau/T$ , where  $\Delta C_{out}$  and  $\Delta C_{inp}$  are deviation amplitudes of the component concentration, accordingly, at the mixer output and at the mixer input;  $\tau$  – the running time;  $T$  – mixer time constant. The method suggested by authors allows to solve variety of the characteristic technological problems, for example: to predict deviations of the contents of components in a finished mixture in the operating conditions of management of the real operating procedure at any random deviations in dosage of components; to determine the maximum allowable deviation of the dose value of components during the single dosing cycle.

The suggested method is suitable for application, both on a design stage of new production engineering, and for an expert evaluation of existing productions where continuous mixers with the computerized systems of dosage of components are applied. The paper can be useful also to the specialists maintaining existing processing lines.

**Keywords:** dosage, mixer, mixing, component, method, calculation, response, fluctuation, concentration, amplitude.

Во многих отраслях промышленности широко распространены процессы приготовления смесей различных компонентов. На технологических фазах, где готовый продукт является результатом перемешивания нескольких порошкообразных или порошкообразных и жидковязких компонентов, важную роль играет определение требований к дозировке последних.

В статье рассмотрен наиболее распространенный вариант задачи, когда в смесителе перемешивают 2 компонента. При этом имеется в виду, что на практике любую многокомпонентную смесь можно рассматривать как двухкомпонентную, например при последовательном приготовлении промежуточных смесей и введении в них очередного компонента.

Когда для приготовления смесей используются смесители периодического действия, для расчета отклонения массовой доли компонента от заданной обычно пользуются следующей формулой:

$$\Delta C_1 = -\Delta C_2 = \left\{ \frac{P_1 + \delta_1}{(P_1 + \delta_1) + (P_2 + \delta_2)} \right\} - \frac{P_1}{P_1 + P_2},$$

где  $\Delta C_1$ ,  $\Delta C_2$  – отклонения массовой доли 1-го и 2-го компонента в смеси;  $P_1$ ,  $P_2$  – заданные дозы (массы) 1-го и 2-го компонента;  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  – погрешности дозирования 1-го и 2-го компонента.

При работе систем дозирования в комплексе со смесителями непрерывного действия эта зависимость также применима, но только для оценки содержания компонентов на входе в смеситель. Дело в том, что характеристики смеси на выходе из смесителя непрерывного действия в значительной степени зависят еще и от равномерности потоков компонентов на входе в смеситель во времени и от способности его к сглаживанию входных флуктуаций.

Современные смесители непрерывного действия по своим динамическим характеристикам близки к идеальным [1–6]. Для таких смесителей зависимость между концентрацией субстанции в потоке на входе  $C_{\text{вх}}$  и выходе  $C_{\text{вых}}$  при ступенчатом возмущении имеет вид [7–9]

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{вх}} (1 - e^{-\tau/T}), \quad (1)$$

где  $\tau$  – текущее время;  $T$  – постоянная времени смесителя. Постоянная времени смесителя определяется как отношение рабочего объема смесителя  $V$  к его объемной производительности  $V_c$ :

$$T = \frac{V}{V_c}.$$

При установившемся режиме  $T$  является для каждого конкретного смесителя постоянной величиной. Чем больше рабочий объем смесителя непрерывного действия и, соответственно, постоянная времени, тем больше сглаживающая способность смесителя, тем медленнее он реагирует на колебания содержания компонентов в потоке на входе в смеситель.

Используя математическую модель смесителя и необходимое программное обеспечение для выполнения расчетов на ПК, специалист с достаточно высокой квалификацией может определить характеристики кривой отклика и уровень пиковых значений этих кривых на выходе из смесителя при заданных входных возмущениях. Однако такой подход не всегда доступен в производственных условиях.

В данной статье в целях облегчения оперативного определения характеристик кривых отклика на выходе из смесителя на колебания содержания компонентов на входе в смеситель предлагается упрощенный графоаналитический метод.

Для этого выражаем  $C_{\text{вх}}$  и  $C_{\text{вых}}$  через их отклонения и записываем зависимость (1) в виде

$$\Delta C_{\text{вых}} = \Delta C_{\text{вх}} (1 - e^{-\tau/T}), \quad (2)$$

где  $\Delta C_{\text{вых}}$  – амплитуда отклонения концентрации соответствующего компонента на выходе из смесителя;  $\Delta C_{\text{вх}}$  – амплитуда отклонения концентрации компонента на входе в смеситель.

Выражение (2) преобразуем в зависимость  $\Delta C_{\text{вых}}/\Delta C_{\text{вх}} = 1 - e^{-\tau/T}$ , что позволяет построить графическое изображение кривой переходного процесса как отклика на ступенчатое возмущение (рис. 1, а) в безразмерных относительных координатах  $\Delta C_{\text{вых}}/\Delta C_{\text{вх}}$  и  $\tau/T$ . Как видно из рис. 1, б, чем дольше продолжается ступенчатое возмущение, т.е. чем больше  $\tau/T$ , тем ближе к единице (максимально возможному значению отношения  $\Delta C_{\text{вых}}/\Delta C_{\text{вх}}$ ) приближается кривая переходного процесса.

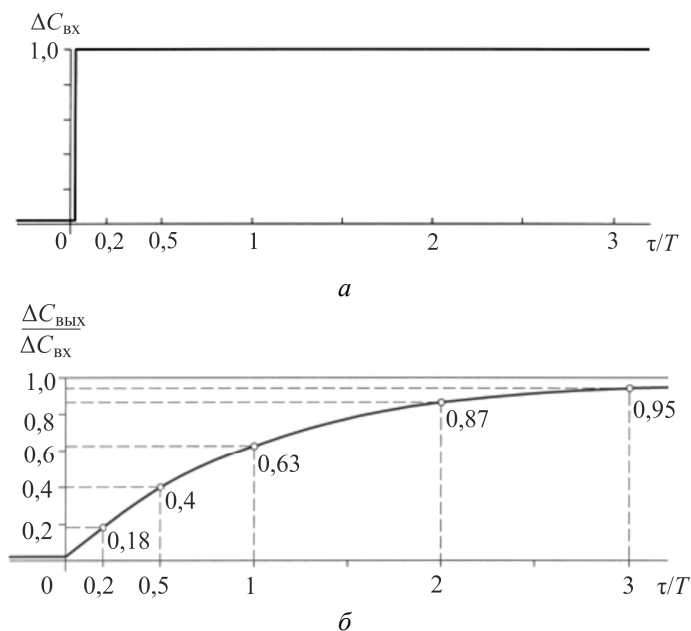


Рис. 1. Характер кривой отклика идеального смесителя непрерывного действия на ступенчатое возмущение: а – ступенчатое возмущение  $\Delta C_{\text{вх}}$  на входе в смеситель; б – кривая отклика на ступенчатое возмущение

На рис. 2 приведены кривые переходных процессов на ступенчатые возмущения различной продолжительности, т.е. на возмущения в виде прямоугольного импульса. Прямоугольный импульс можно рассматривать как сумму двух ступенчатых функций с амплитудами  $+\Delta C_{\text{вх}}$  и  $-\Delta C_{\text{вх}}$  [10]. Промежуток времени между этими возмущениями принимается за длительность импульса. При нанесении ступенчатого возмущения с амплитудой  $+\Delta C_{\text{вх}}$  начинается рост отношения  $\Delta C_{\text{вых}}/\Delta C_{\text{вх}}$ , как показано на рис 1, б. После снятия возмущения, т.е. при нанесении ступенчатого возмущения с амплитудой  $-\Delta C_{\text{вх}}$ , происходит перелом кривой и снижение отношения  $\Delta C_{\text{вых}}/\Delta C_{\text{вх}}$  до нуля по кривой, являющейся результатом вычитания из первой экспоненты (реакции на возмущение  $+\Delta C_{\text{вх}}$ ) второй экспоненты (реакции на возмущение  $-\Delta C_{\text{вх}}$ ). Таким образом, зная относительную длительность ступенчатого возмущения на входе в смеситель ( $\tau/T$ ), по кривой 1, б можем определить относительное изменение  $\Delta C_{\text{вых}}/\Delta C_{\text{вх}}$ . Зная уровень возмущения на входе в смеситель  $\Delta C_{\text{вх}}$  в абсолютных величинах (например, в процентах) и умножив его на  $\Delta C_{\text{вых}}/\Delta C_{\text{вх}}$ , определенное из графика 1, б, получаем пиковое значение отклонения концентрации компонента на выходе из смесителя.

На рис. 2 показаны примеры такого определения, иллюстрирующие характер и величину выходного возмущения при длительности входного импульсного возмущения  $\tau = 0,2T$ , т.е.  $\tau/T = 0,2$  (рис. 2, б), а также при  $\tau = T$ , т.е.  $\tau/T = 1$  (рис. 2, в).

Из рис. 1, б видно, что при  $\tau/T = 0,2$  отношение  $\Delta C_{\text{вых}}/\Delta C_{\text{вх}} = 0,18$ , при  $\tau/T = 1$  отношение  $\Delta C_{\text{вых}}/\Delta C_{\text{вх}} = 0,63$ . Нетрудно убедиться, что  $\Delta C_{\text{вых}}$  при дальнейшем увеличении  $\tau/T$  будет приближаться к  $\Delta C_{\text{вх}}$ , и при  $\tau/T > 3$  отношение  $\Delta C_{\text{вых}}/\Delta C_{\text{вх}} \approx 1$ , т.е.  $\Delta C_{\text{вых}} \approx \Delta C_{\text{вх}}$ .

Проиллюстрируем применение предложенного метода на практическом примере.

В технологической линии, предназначенной для приготовления заданной смеси, имеется смеситель непрерывного действия с рабочим объемом  $V = 0,2 \text{ м}^3$  и объемной производительностью  $V_c = 0,6 \text{ м}^3/\text{ч}$ . В смеситель дозаторами подаются 2 компонента. Дозаторы дискретного типа с циклом дозирования 1 мин. В какой-то момент произошел сбой в работе одного из дозаторов. В результате этого в течение 4 циклов ( $\tau = 4 \text{ мин}$ ) на вход в смеситель стало поступать одного компонента больше, что привело к повышению содержания этого компонента  $\Delta C_{\text{вх}}$  в суммарном входном потоке, например на 2 %. Затем дозировка была восстановлена.

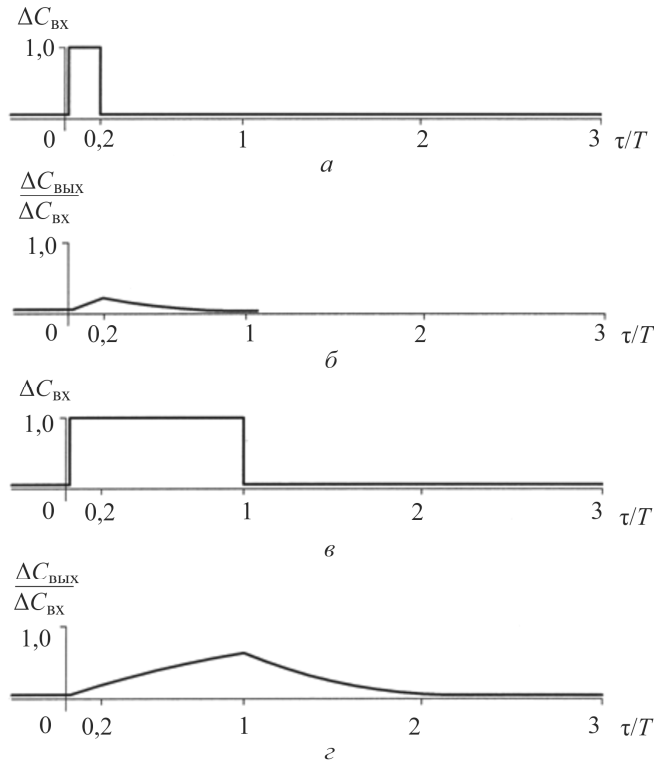


Рис. 2. Характер кривых отклика смесителя непрерывного действия на импульсные возмущения различной продолжительности: *a* – импульсное возмущение продолжительностью  $\tau = 0,2T$ ; *б* – кривая отклика на возмущение по графику *a*; *в* – импульсное возмущение продолжительностью  $\tau = T$ ; *г* – кривая отклика на возмущение по графику *в*

Следует определить максимальное отклонение содержания данного компонента в готовой смеси  $\Delta C_{\text{вых}}$  на выходе из смесителя.

Находим постоянную времени смесителя

$$T = \frac{V}{V_c} = \frac{0,2}{0,6} = \frac{1}{3} \text{ ч} = 20 \text{ мин.}$$

Соотношение времени действия отклонения  $\tau$  в дозировке к постоянной времени  $T$  составляет  $4 \text{ мин} / 20 \text{ мин} = 3/15 = 0,2$ .

По кривой на рис. 1, *б* находим, что при  $\tau/T = 0,2$  соотношение  $\Delta C_{\text{вых}}/\Delta C_{\text{вх}} = 0,18$ , поскольку  $\Delta C_{\text{вх}} = 2\%$ , то  $\Delta C_{\text{вых}} = 2 \cdot 0,18 = 0,36\%$ .

В случае, если такое же отклонение в дозировке будет продолжаться в течение 10 циклов ( $\tau = 10 \text{ мин}$ ) и  $\tau/T = 10/20 = 0,5$ , по той же кривой на рис. 1, *б* находим, что  $\Delta C_{\text{вых}}/\Delta C_{\text{вх}} = 0,4$ , тогда  $\Delta C_{\text{вых}} = 2 \cdot 0,4 = 0,8\%$ .

Нередко в технологических процессах используются смесительные установки каскадного типа, состоящие из нескольких последовательно установленных смесителей. В большинстве случаев это установки из 2 смесителей. В первом смесителе производится предварительное перемешивание компонентов, во втором – дегазация и окончательное перемешивание компонентов. Предлагаемый метод применим и для расчета отклонений на выходе второго смесителя двухкаскадной смесительной установки.

Обозначим повышение содержания компонента на входе первого смесителя  $\Delta C_{\text{вх}_1}$ , а отклонение содержания данного компонента в смеси на выходе из первого смесителя  $\Delta C_{\text{вых}_1}$ . Соответственно, повышение содержания компонента на входе второго смесителя  $\Delta C_{\text{вх}_2}$ , а отклонение содержания данного компонента в смеси на выходе из второго смесителя  $\Delta C_{\text{вых}_2}$ .

Очевидно, что  $\Delta C_{\text{вых}_1} = \Delta C_{\text{вх}_2}$ . Аппроксимируем кривую отклика на выходе первого смесителя в прямоугольный импульс с амплитудой, равной максимальному значению  $\Delta C_{\text{вх}_1}$ , и такой же продолжительностью импульса  $\tau/T$ , которая была принята на входе первого смесителя. Такая аппроксимация при расчете дает несколько завышенное пиковое значение на кривой отклика на выходе второго смесителя (примерно на 10 %), но это лишь повышает надежность оценки при оперативных расчетах.

Используя результат предыдущего расчета, где  $\tau/T = 0,5$ , повышение содержания одного компонента  $\Delta C_{\text{вх}}$  в суммарном потоке на входе в первый смеситель составляло 2 %, а на выходе смесителя пиковое значение составляло  $\Delta C_{\text{вых}} = 0,8$  %, определяем предложенным методом пиковое значение отклонения содержания компонентов на выходе из второго смесителя.

Обозначаем повышение содержания одного компонента в суммарном потоке на входе в первый смеситель  $\Delta C_{\text{вх}_1}$ , пиковое значение отклонения содержания компонентов на выходе первого смесителя  $\Delta C_{\text{вых}_1}$ . Повышение содержания одного компонента на входе во второй смеситель  $\Delta C_{\text{вх}_2}$ , а пиковое значение отклонения содержания компо-

нентов на выходе второго смесителя  $\Delta C_{\text{ВЫХ}_2}$ . Выше мы приняли, что  $\Delta C_{\text{ВЫХ}_1} = \Delta C_{\text{ВХ}_2} = 0,8\%$ , а  $\tau/T = 0,5$ .

Снова обращаясь к графику на рис. 1, б, видим, что при  $\tau/T = 0,5$  отношение  $\Delta C_{\text{ВЫХ}_2} / \Delta C_{\text{ВХ}_2} = 0,4$ , тогда  $\Delta C_{\text{ВЫХ}_2} = 0,8 \cdot 0,4 = 0,32\%$ .

Таким образом, при повышении содержания компонента на входе первого смесителя на 2 % после первого смесителя пиковое значение отклонения было 0,8 %, после второго смесителя – уменьшилось до 0,32 %.

Изложенный графоаналитический метод позволяет решать следующие характерные технологические задачи при известных допустимых колебаниях концентрации компонентов в готовой смеси:

- определение максимально возможного цикла дозирования в случае подачи компонентов в смеситель непрерывного действия дозаторами дискретного действия, поскольку циклическую подачу можно рассматривать как импульсное возмущение на входе в смеситель;
- определение максимально возможного отклонения величины порции компонента в течение единичного цикла дозирования;
- определение максимально допустимого временного промежутка при возникновении систематической погрешности дозирования в течение ряда последовательных циклов;
- прогнозирование отклонений содержания компонентов в готовой смеси при оперативном решении о допустимости каких-то случайных отклонений в дозировании компонентов, возникших при ведении реального технологического процесса;
- определение пригодности того или иного дозатора (дискретного или непрерывного) для работы с конкретным смесителем непрерывного действия.

Метод может быть рекомендован для применения как на этапе проектирования новых технологий, так и для оценки существующих производств, где для получения продукции применяются смесители непрерывного действия и обеспечивающие их работу системы дозирования компонентов.



### Библиографический список

1. Бернхардт Э. Переработка термопластических материалов. – М.: Госхимиздат, 1962. – С. 140–165.
2. Ким В.С., Скачков В.В. Диспергирование и смешение в процессах производства и переработки пластмасс. – М.: Химия, 1988. – С. 75–86.
3. Арис Р. Анализ процессов в химических реакторах. – Л.: Химия, 1967. – С. 149–213.
4. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – С. 120–126.
5. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности. – Л.: Госхимиздат, 1963. – С. 233–246.
6. Бояринов А.И., Кафаров В.В. Методы оптимизации в химической технологии. – М.: Химия, 1975. – С. 58–59.
7. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. – М.: Химия, 1968. – С. 25–27.
8. Кутепов А.М., Бондарева Т.И., Беренгартен М.Г. Общая химическая технология. – М.: Академкнига, 2004. – С. 96–107.
9. Васильцов Э.А., Ушаков В.Г. Аппараты для перемешивания жидких сред. – Л.: Машиностроение, 1979. – С. 156–160.
10. Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов. – М.: Энергия, 1967. – С. 79.

### References

1. Bernhardt E. Pererabotka termoplasticheskikh materialov [Processing of thermoplastic materials]. Moscow: Goskhimizdat, 1962, p. 140-165.
2. Kim V.S., Skachkov V.V. Dispergirovanie i smeshenie v protsessakh proizvodstva i pererabotki plastmass [Dispersion and mixing in the processes of production and processing of plastics]. Moscow: Khimiya, 1988, p. 75-86.
3. Aris R. Analiz protsessov v khimicheskikh reaktorakh [Analysis of the processes in chemical reactors]. Leningrad: Khimiya, 1967, p. 149-213.
4. Kasatkin A.G. Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii [The main processes and apparatus of chemical engineering]. Moscow: Khimiya, 1973, p. 120-126.
5. Shterbachek Z., Tausk P. Peremeshivanie v khimicheskoy promyshlennosti [Mixing in chemical industry]. Leningrad: Goskhimizdat, 1963, p. 233-246.

6. Boyarinov A.I., Kafarov V.V. *Metody optimizatsii v khimicheskoy tekhnologii* [Optimization methods in chemical engineering]. Moscow: Khimiya, 1975, p. 58-59.

7. Kafarov V.V. *Metody kibernetiki v khimii i khimicheskoy tekhnologii* [Methods of cybernetics in chemistry and chemical technology]. Moscow: Khimiya, 1968, p. 25-27.

8. Kutepov A.M., Bondareva T.I., Berengarten M.G. *Obschchaya khimicheskaya tekhnologiya* [General chemical technology]. Moscow: Akademiya, 2004, p. 96-107.

9. Vasiltsov E.A., Ushakov V.G. *Apparaty dlya peremeshivaniya zhidkikh sred* [Devices for liquid media mixing]. Leningrad: Mashinostroenie, 1979, p. 156-160.

10. Balakirev V.S., Dudnikov E.G., Tsirlin A.M. *Ekspperimentalnoe opredelenie dinamicheskikh kharakteristik promyshlennykh obektov* [Experimental determination of dynamic characteristics of industrial projects]. Moscow: Energiya, 1967, p. 79.

#### **Сведения об авторах**

**Гаранин Леонид Петрович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, заместитель начальника отдела, старший научный сотрудник ОАО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов» (614113, г. Пермь, ул. Чистопольская, д. 16, e-mail: niipm@pi.ccl.ru).

**Теплыгин Алексей Владимирович** (Пермь, Россия) – начальник лаборатории ОАО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов» (614113, г. Пермь, ул. Чистопольская, д. 16, e-mail: niipm@pi.ccl.ru).

#### **About the authors**

**Garanin Leonid Petrovich** (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Deputy Chief of Department, Senior Staff Scientist, OJSC “Research Institute of the Polymeric Materials” (16, Chistopolsky st., Perm, 614113, Russian Federation, e-mail: niipm@pi.ccl.ru).

**Tepligin Aleksey Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) – Chief of Laboratory, OJSC “Research Institute of the Polymeric Materials” (16, Chistopolsky st., Perm, 614113, Russian Federation, e-mail: niipm@pi.ccl.ru).

Получено 23.01.2014