

УДК 66.022.51

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВВЕДЕНИЯ НАПОЛНИТЕЛЯ В КАУЧУКОВУЮ КРОШКУ

В.А. Язев

*Ярославский государственный технический университет*

В статье представлена математическая модель и проведён анализ процесса введения наполнителя в каучуковую крошку в плужном смесителе с фрезерным измельчающим диспергирующим устройством. В данной модели отражены математические зависимости для оценки степени введения наполнителя в частицы каучука и определения нагрева частиц каучука в смесителе плужного типа, оснащённого фрезерным устройством. Показаны также распределения степени введения от кратности прохода через активную часть смесителя. Рассмотренная математическая модель может использоваться для решения задачи выбора оптимальных параметров процесса приготовления порошкообразных каучуков и резиновых смесей. Проведённые исследования также легли в основу методики выбора оптимальных параметров смесителя и фрезерного диспергатора - измельчителя.

**Ключевые слова:** измельчение, порошкообразный каучук, эластомер, наполнитель, степень введения наполнителя, плужный смеситель, фрезерный измельчитель - диспергатор.

Для измельчения каучуков и приготовления резиновых смесей в порошкообразном виде используются плужные смесители, оснащённые фрезерными измельчающими и диспергирующими устройствами [1,2]. Представляет интерес изучение закономерностей процесса измельчения каучука в этих измельчителях – смесителях, а также процесса приготовления порошкообразных резиновых смесей.

Измельчение каучука, в отличие от резиновых вулканизованных материалов, связано с тем, что по мере нагревания каучуковых частиц происходит переход эластомера в вязко текучее состояние.

Это, с одной стороны, затрудняет измельчение, если оно является основной целью процесса, а, с другой стороны, позволяет осуществлять введение наполнителей и ингредиентов в каучуковую матрицу, получая, таким образом, порошкообразную резиновую смесь.

Измельчение каучука производится всегда в присутствии дезагломеранта, входящего в состав целевой композиции.

В качестве дезагломеранта может использоваться технический углерод.

Процесс переработки разделяется на 2 стадии: на первой происходит интенсивное измельчение каучука в присутствии дезагломеранта; на второй, если первая не является финишной и требуется не просто измельчить каучук, но и получить порошкообразную резиновую смесь, - происходит нагревание каучуковых частиц и введение наполнителя в каучуковую матрицу. При этом осуществляется диспергирование частиц наполнителя (технического углерода) в частицах эластомера (резиновой смеси РС).

В данной работе проведено математическое моделирование второй стадии процесса. В деформируемые частицы каучука или РС, при прохождении ими активной зоны за счёт деформации, трения и нагрева происходит введение наполнителя, его распределение и диспергирование в эластомере.

Каждая частица периодически проходит активную зону, после чего охлаждается в пассивной зоне плужного смесителя:  $k$  – число попаданий частицы в активную зону является случайным.

$$P(t, k) = (\chi t)^k e^{-\chi t} / k! \quad (1),$$

где  $\chi = q / Gm$ ,

$q$  – эффективный расход по эластомерной фазе через активную зону,  $Gm$  – масса эластомерной фазы в смесителе.

Масса свободного наполнителя  $G(t)$  уменьшается в процессе переработки. Предполагаем эту массу избыточной, то есть наполнителя всегда достаточно и не произойдет критической агломерации

$$\mu(T, \dot{\gamma}) = \mu_0 \exp(b(T - T_0)) \dot{\gamma}^{1 - \frac{1}{n}} \quad (2)$$

где  $n$  – индекс течения,  $\mu_0$  – коэффициент консистенции,  $b$  – температурный коэффициент.

$$\xi = \xi_0 (\ln(\mu(T_0, \dot{\gamma})) / \ln(\mu(T, \dot{\gamma})))^{\alpha m} \quad (3)$$

где:  $\xi_0$  и  $\alpha m$  – коэффициенты.

За один проход через активную зону, при избытке наполнителя, в частицу введётся следующий его объём:

$$\Delta V_k = \frac{2y}{\delta \rho_n} \xi(\bar{T}_k) \quad (4)$$

где:  $y$  – объём частицы,  $\delta$  – зазор,  $\rho_n$  – плотность наполнителя,

$$\bar{T}_k = \frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} T(t) dt \quad (5)$$

где:  $\bar{T}_k$  – средняя температура частицы при прохождении ею активной зоны за время  $t_k$ , причём:  $t_k = x_k k_\phi / \omega R_f$  (6),  $k$  – номер прохода частицей активной

$$\frac{dT}{dt} = \mu(T, \dot{\gamma}) \frac{\omega^2 R_f^2}{\rho_k c \delta^2} + E_0 \frac{\ln(\mu(T, \dot{\gamma}))}{\ln(\mu(T_0, \dot{\gamma}))} (\varepsilon_{sg} \sqrt{x_k^2 Sch(x_k)}) \frac{m_{tr} \omega R_f}{\rho_k c y_k} \quad (8)$$

где:  $\rho_k$  – плотность резиновой смеси после  $k^{zo}$  прохождения,  $c$  – теплоёмкость,  $T_0$  – температура приведения,

Вероятность  $P$  в пуассоновском приближении в зависимости от времени имеет вид:

резиновой смеси и аварийного останова смесителя [1,2].

При каждом прохождении частицы, её вязкость изменяется от температуры  $T$  и скорости сдвига  $\dot{\gamma}$ , в соответствии с формулой [3]:

Удельная степень введения наполнителя  $\xi$  зависит от вязкости и определяется формулой [4]:

зоны,  $\omega$  – угловая частота,  $R_f$  – радиус фрезы,  $k_\phi$  – коэффициент формы, связанный с расплющиванием частицы в зазоре  $x_k$  – размер частицы после  $k^{zo}$  прохода. Таким образом, объём частицы при  $k^{om}$  прохождении:

$$y_k = y_{k-1} + \frac{2y_{k-1}}{\delta \rho_n} \xi(\bar{T}_k) \quad (7)$$

Изменение температуры при  $k^{om}$  прохождении, связанное с деформацией и трением частицы в зазоре, описывается уравнением:

$\varepsilon_{sg}$  – степень сжатия,  $Sch(x_k) = x_k^2 / \delta$ ,  $y_k = x_k^3$ ,  $m_{tr}$  – коэффициент трения,  $E_0$  – начальный модуль [3].

После  $k^{\text{co}}$  прохода активной зоны частица (резиновой смеси) поступает в пассивную зону, где охлаждается и затем снова попадает в активную зону уже

$$\bar{\theta} = \sum_{l=1}^{\infty} 6Bi^2 \exp(-\mu_l^2 Fo) / (\mu_l^2 (\mu_l^2 + Bi^2 - Bi)) \quad (9)$$

где:  $\bar{\theta}$  - относительная средняя температура частицы после её охлаждения,  $Bi$  – критерий Био,  $Fo$  – критерий Фурье,  $\mu_l$  - корни характеристического уравнения [5] при решении задачи нестационарной теплопроводности для шара,  $x$  – размер частицы,  $R = x/2$ ,  $Bi = \alpha R / \lambda$ ,  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от частицы к среде охла-

$(k+1)^{\text{ii}}$  раз. Её температура входа (относительная) оценивается по формуле [5]:

ждения,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности каучука или резиновой смеси,  $Fo = a\tau / R^2$ ,  $\tau$  - время охлаждения, коэффициент температуропроводности каучука или смеси  $a = \lambda / \rho c$ , где  $\rho$  - плотность,  $c$  – удельная теплоёмкость каучука или смеси.

При моделировании принималась температура входа частицы в активную зону  $(k+1)^{\text{ii}}$  раз:

$$T_0^{<k+1>} = (T_n^{<k>} - T_0^{<k>})\varphi_T + T_0^{<k>} \quad (10)$$

где:  $\varphi_T$  - коэффициент остывания,  $T_0^{<k>}$ ,  $T_n^{<k>}$  – соответственно входная и конечная температуры частицы при её  $k^{\text{ii}}$  проходе через активную зону.

$$\varphi_k = \frac{\sum_{l=0}^k 2y_l \xi_l / \delta}{\rho_e y_0} \quad (11)$$

где:  $\rho_e$  – плотность эластомера,  $y_0$  – объём частицы до введения напол-

После  $k$  проходов через активную зону массовая доля введённого в эластомер наполнителя выразится формулой:

нителя (объём каучука в частице РС),  $\xi_l = \xi(\bar{T}_l)$ .

Плотность РС частицы определится как:

$$\rho_k = \frac{y_0 \rho_e (1 + \varphi_k)}{y_k} \quad (12)$$

Некоторые результаты математического моделирования представлены на рисунках 1,2,3,4. Для всех случаев имеет место избыток свободного наполнителя  $G(t)$ :  $G(t) = G_0 - \varphi(t) * Gm > 0$ , где  $G_0$  –

общая масса загруженного в смеситель наполнителя,  $\varphi(t)$  - общая массовая доля наполнителя на 100% каучука в момент времени  $t$ .

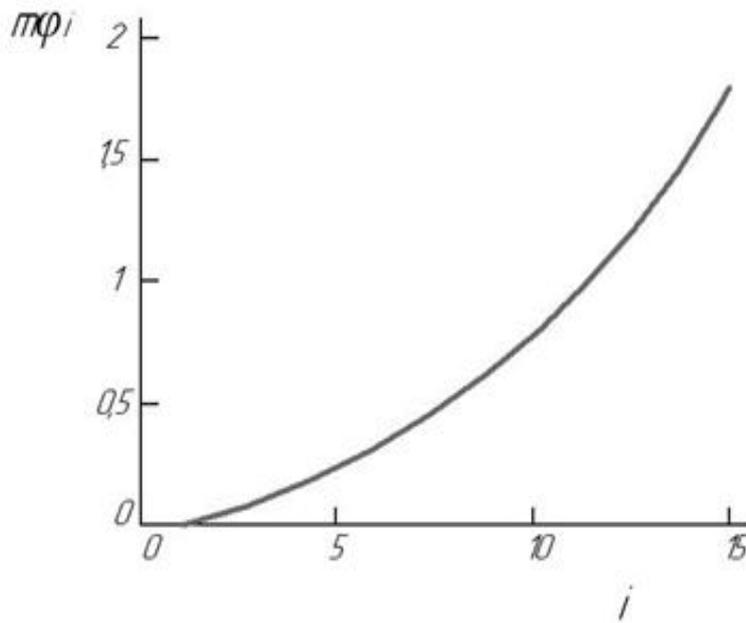


Рис.1 Влияние числа проходов  $k$  на массовую часть введённого наполнителя

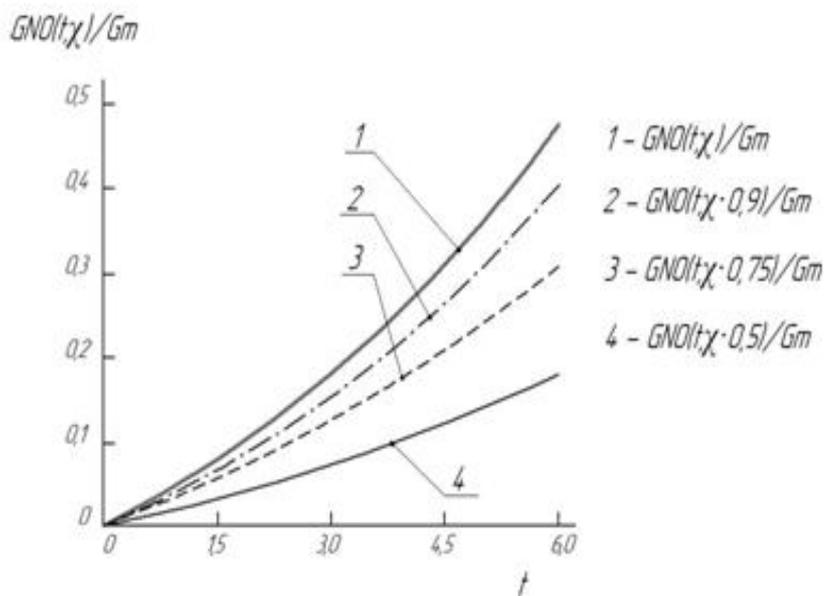
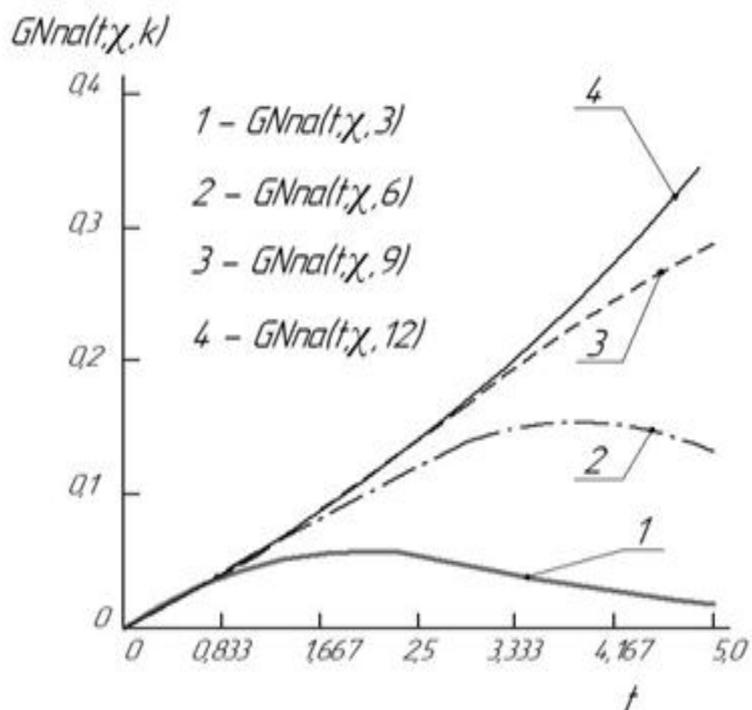
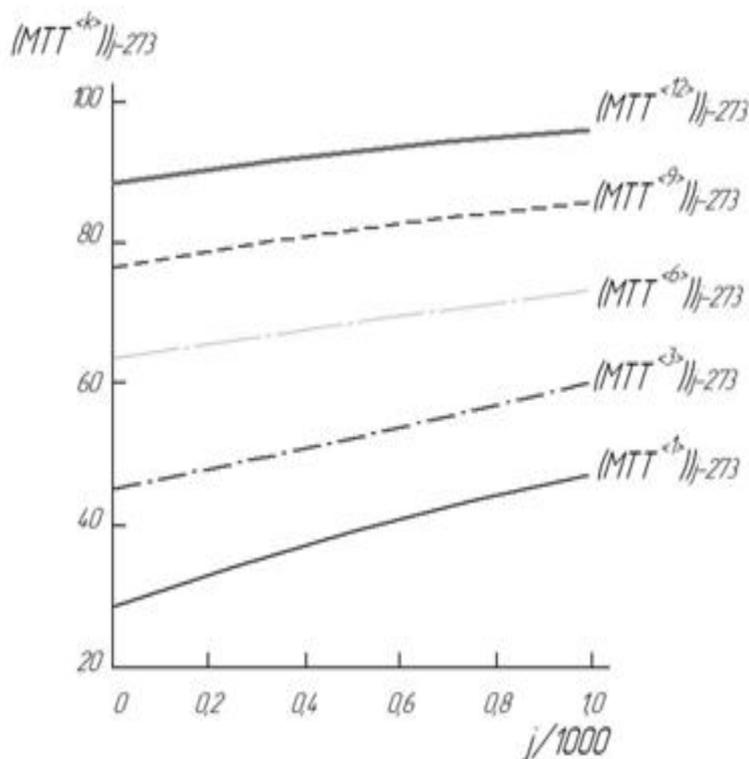


Рис. 2 Зависимость введённой доли наполнителя от производительности диспергатора

На рисунке 1 представлена зависимость массовой части наполнителя  $\varphi_k$ , введённого в эластомерную матрицу частицы, в зависимости от числа прохождений ею активной зоны смесителя  $k$ .

На рисунке 2 показано влияние производительности диспергатора ( $q=1, 0,9, 0,75$  и  $0,5$  кг/с, при  $G_m=50$  кг) на общую степень введения наполнителя в смесителе.

Рис. 3 Динамика изменения общей степени введения наполнителя в зависимости от  $k$ Рис. 4 Нагревание частиц в активной части смесителя в зависимости от  $k$

На рисунке 3 представлено изменение во времени второй стадии процесса степени введения в зависимости от числа прохождения к частицей активной части смесителя.

На рисунке 4 показаны зависимости роса температуры частицы в зазоре активной части смесителя при  $k = 1, 3, 6, 9, 12$ .

Проведённые исследования легли в основу методики расчёта режимов переработки порошкообразных каучуков и получения порошкообразных резиновых смесей и выбора оптимальных параметров смесителя и фрезерного диспергатора - измельчителя.

*Статья публикуется при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках реализации проекта №18-03-20102-г.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Язев В.А. Моделирование процесса агломерации при измельчении каучука в ножевых и фрезерных дробилках // Сборник трудов 25 Международной научной конференции ММТТ-25. Саратов. 2012. Т 7. с. 89 - 90.
2. Язев В.А. Особенности процесса механического измельчения эластичных материалов в ножевых мельницах // Сборник трудов ЭРПО-2014. Секция 2. Иваново. 2014. Т 2. с. 409 - 413.
3. Торнер Р.В. Основные процессы переработки полимеров (теория и методы расчёта). М.: Химия, 1972. 456 с.
4. Вострокнутов Е.Г. Переработка каучуков и резиновых смесей (реологические основы, технология, оборудование). / Е.Г. Вострокнутов, М.И. Новиков, В.И. Новиков, Н.В. Прозоровская. М.: Химия, 1980. 280 с.
5. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под ред. Григорьева В.А. и Зорина В.М. М.: Энергоиздат, 1982. 517 с.

*Рукопись поступила в редакцию 22.10.2018*

#### MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF INTRODUCING THE FILLER INTO THE RUBBER CRUMB

*V. Yazev*

In article the mathematical model is presented and the analysis of process of introduction filler into a rubber crumb in a plow mixer with a milling disintegrating dispersing device is carried out. In the given model mathematical dependences for an estimation of degree of introduction of filler in particles of rubber and definition of heating of particles of rubber in a mixer of plow type, equipped the milling device are reflected. Distributions of degree of introduction from frequency rate of pass through an active part of the of the mixer are shown also. The considered mathematical model can be used for the decision of a problem of a choice of optimum parameters of process of preparation of powdered rubbers and rubber mixes. The conducted researches also have laid down in a basis of a technique of a choice of optimum parameters of the mixer and milling dispersant- a grinder.

Key words: grinding, powdered rubber, elastomer, filler, ddegree of introduction of the filler, plow mixer, milling grinder - dispersant.

#### References

1. YAzev V.A. Modelirovanie processa aglomeracii pri izmel'chenii kauchuka v nozhevyyh i frezernyyh drobilkah. Sbornik trudov 25 Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii MMTT-25. Saratov. 2012. T 7. s. 89 - 90.
2. YAzev V.A. Osobennosti processa mekhanicheskogo izmel'cheniya ehlastichnyh materialov v nozhevyyh mel'nicah. Sbornik trudov EHRPO-2014. Sekciya 2. Ivanovo. 2014. T 2. s. 409 - 413.
3. Torner R.V. Osnovnye processy pererabotki polimerov (teoriya i metody raschyota). M.: Himiya, 1972. 456 s.
4. Vostroknutov E.G. Pererabotka kauchukov i rezinovyh smesey (reologicheskie osnovy, tekhnologiya, oborudovanie). / E.G. Vostroknutov, M.I. Novikov, V.I. Novikov, N.V. Prozorovskaya. M.: Himiya, 1980. 280 s.
5. Тепло- i massobmen. Teplotekhnicheskij ehksperiment: Spravochnik / Pod red. Grigor'eva V.A. i Zorina V.M. M.: EHnergoizdat, 1982. 517 s.