

Профессор Е.Д. Чертов, доцент М.А. Васечкин, доцент Е.В. Матвеева,  
(Воронеж. гос. ун-т. инж. технол.) кафедра технической механики. тел. (473) 255-47-20  
E-mail: vmax77@mail.ru

профессор. О.А. Носов  
(Белгор. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова) кафедра «Технологические комплексы,  
машины и механизмы». тел. (472) 230-99-44  
E-mail: lidart2@mail.ru

Professor E.D. Chertov, associate Professor M.A. Vasechkin,  
associate Professor E.V. Matveeva,  
(Voronezh state university of engineering technologies) Department of technical mechanics.  
phone (473) 255-37-51  
E-mail: vmax77@mail.ru  
professor O.A. Nosov  
(Belgorod state technological university named after V.G. Shukhov) Department of technological  
systems, equipment and machinery. phone (472) 230-99-44  
E-mail: lidart2@mail.ru

## Высокотемпературный вакуум-смеситель

### High temperature vacuum mixer

*Реферат.* Работа посвящена созданию нового типа смесителя для получения однородных смесей из разнородных материалов применительно к переработке отходов жилищно-коммунального хозяйства. В статье описана конструкция оригинального устройства двухкамерного высокотемпературного вакуум смесителя, исследованы процессы, протекающие в камерах таких устройств. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса смешивания вторичного полиэтилена со смесью «измельченные пищевые отходы – эковата». Рассмотрена проблема оптимального выбора изгиба криволинейных лопастей в рабочем объеме уплотнителя, которая решена с помощью задания их профиля в виде дуги эвольвенты нескольких окружностей различных радиусов. Получены зависимости, позволяющие определить пределы изменения основного режимного параметра – угловой скорости вращения рабочего органа смесителя при двух способах задания профиля криволинейной лопасти смесителя. Представленную конструкцию смесителя предлагается использовать для решения широкого круга задач, связанных с перемешиванием компонентов с ярко выраженным отличием физико – химических свойств и, в частности, при производстве композитов из отходов жилищно-коммунального хозяйства.

*Summary.* The work is devoted to the creation of a new type of mixer to produce homogeneous mixtures of dissimilar materials applied to recycling of housing and communal services waste. The article describes the design of a dual-chamber device of the original high-temperature vacuum mixer, there investigated the processes occurring in the chambers of such devices. The results of theoretical and experimental research of the process of mixing recycled polyethylene with a mixture of "grinded food waste – Eco wool" are presented. The problem of the optimum choice of bending the curvilinear blades in the working volume of the seal, which is achieved by setting their profile in the form of involute arc of several circles of different radii, is examined. The dependences, allowing to define the limits of the changes of the main mode parameters - the angular velocity of rotation of the working body of the mixer using two ways of setting the profile of the curvilinear blade mixer are obtained. Represented design of the mixer is proposed to use for a wide range of tasks associated with the mixing of the components with a strongly pronounced difference of physical - chemical properties and, in particular, in the production of composites out of housing and communal services waste.

Ключевые слова: вакуум-смеситель, композиционные материалы, перемешивание, полиэтилен, пищевые отходы

Key words: vacuum mixer, composite materials, mixing, polyethylene, food waste

Проблемы разработки новых типов смесителей, несмотря на уже существующее их многообразие, остается достаточно актуальной, что объясняется особенностями ожидаемого качества готовой смеси, зависящей не только от реологических и физико-механических свойств смешиваемых компонентов, их агрегатных состояний, но и от условий протекания процесса смешивания. Как правило, конечной целью указанной технологической операции является получение смеси, отвечающей условию однородности композиций в ее составе. Проектирование оборудования по переработке разнородных

сред неизбежно связано с проблемами экологии, а также с созданием безопасных условий работы на производствах химической, пищевой промышленности и при производстве строительных материалов. В частности, разработка теоретических основ процесса получения однородных смесей из разнородных материалов, для которых характерные диаметры частиц могут быть сравнимы с наноразмерами, является одной из актуальных задач при формировании инженерных методов расчета смесителей различных типов.

---

© Чертов Е.Д., Васечкин М.А.,  
Матвеева Е.В., Носов О.А., 2015

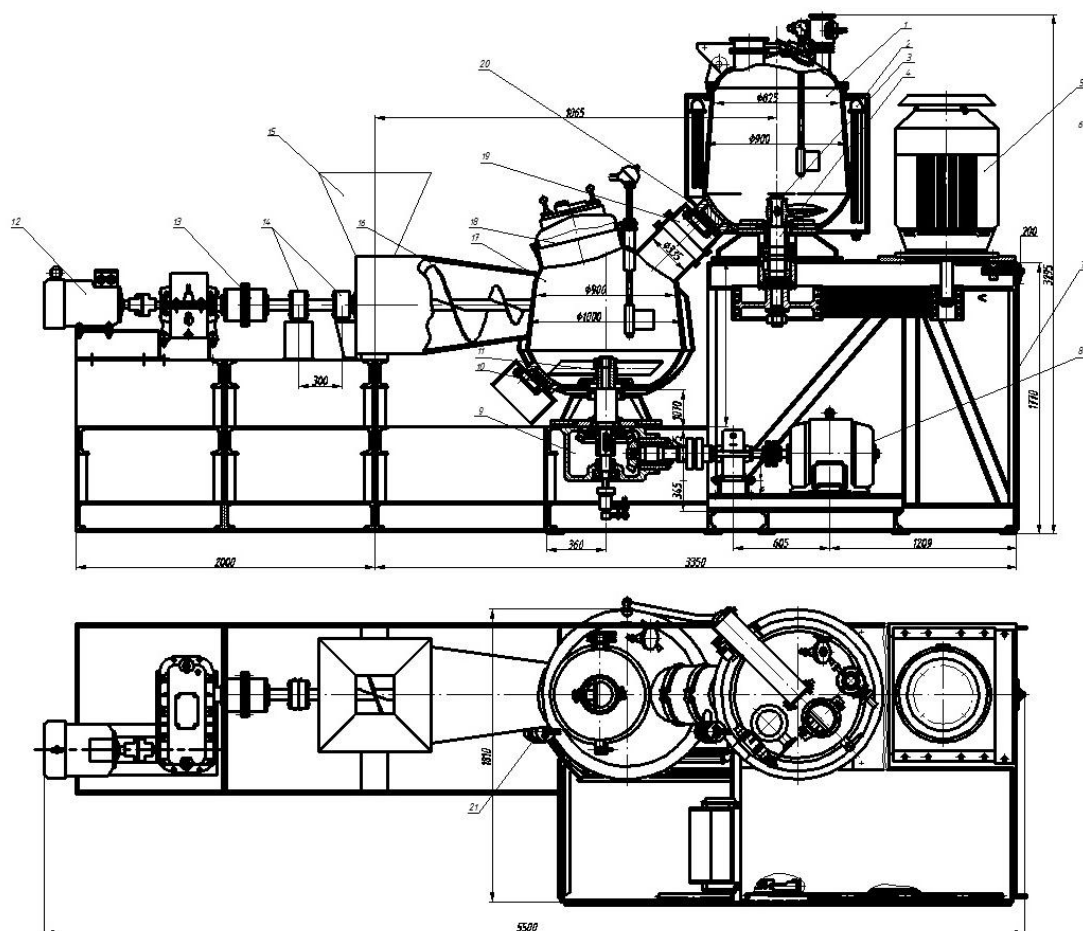
При производстве композиционных материалов зачастую необходимо перемешивать компоненты с сильно различающимися физико-механическими свойствами [1, 2]. Как правило, в качестве связующего используют расплавы какого-либо полимера. При этом температура воспламенения, армирующего или поверхностно активирующего компонентов может быть много меньше температуры плавления связующего. В таких случаях для перемешивания используют высокотемпературные вакуум-смесители [3].

Предлагается оригинальная конструкция высокотемпературного вакуум – смесителя (рисунок 1).

Смеситель снабжен двумя смесительными камерами 1 и 13, установленными вместе с приводными электродвигателями на общей сварной раме 8. Для удобства чистки обе камеры имеют откидные крышки, на которых располагаются смотровые люки с подсветкой. Обогрев верхней камеры осуществляется тэнами, установленными в рубашке 2. Верхняя ка-

мера закрывается откидной крышкой 17, на которой расположен загрузочный люк 18. В этой камере на валу 4 установлена мешалка пропеллерного типа 3. Привод ротора осуществляется от двухскоростного электродвигателя 7 через клиноременную передачу 5, обеспечивающую снижение частоты вращения ротора. Для управления направлением потоков смешиваемого материала в верхней камере установлена направляющая лопатка 19 с рукояткой 20. Внутри полой оси лопатки расположена термопара, контролирующая температуру массы.

Выгрузка смеси из верхней камеры производится через разгрузочный люк, перекрываемый затвором 16. Нижняя камера 13 также имеет рубашку 12. Перемешивание смеси в нижней камере осуществляется двухлопастным смесительным органом 10, для привода которого используется двухскоростной электродвигатель 8, соединенный с ним клиноременной передачей и редуктором. Готовая смесь выгружается через разгрузочный люк, перекрываемый затвором 11.



1,13 – смесительная камера; 2,12 – рубашка; 3 – мешалка пропеллерного типа; 4 – вал; 5 – клиноременная передача; 6 – рама; 7,8 – электродвигатель; 9 – редуктор; 10 – двухлопастной смесительный орган; 11,16 – затвор; 14,17 – крышка; 15 – разгрузочный люк; 18,23 – загрузочный люк; 19 – направляющая лопатка; 20 – рукоятка лопатки; 21 – шнек; 22 – привод шнека

Рисунок 1. Двухкамерный высокотемпературный вакуум смеситель

Во время загрузки двухлопастной смесительный орган вращается с малой скоростью. Стадия загрузки занимает 1–3 мин. Через 30 с после окончания загрузки электродвигатель привода смесительного органа камеры 13 автоматически переключается на большую скорость, и материалы в камере смешивания переходят в состояние интенсивного вихревого движения. В процессе смешивания материал разогревается за счет трения частиц друг о друга и за счет тепла, подводимого от стенок корпуса. При достижении заданной температуры термopара подает команду на выгрузку смеси в нижнюю камеру. Одновременно двигатели обеих камер переключаются на меньшую скорость вращения. Открывается заслонка разгрузочного окна, и горячая смесь по патрубку перетекает в нижнюю камеру.

Когда расплав полиэтилена из верхней камеры полностью перетек в нижнюю, заслонка вновь закрывается, а двигатель нижней камеры переключается на максимальную скорость вращения. Подача измельченных пищевых отходов, перемешанных с измельченной и распушенной вторичной целлюлозой, осуществляется шнековым дозатором. Готовая смесь выгружается на транспортер или в приемный бункер для дальнейшего движения по технологическому циклу.

Данный смеситель может быть использован для решения широкого круга задач, связанных с перемешиванием компонентов с ярко выраженным отличием физико-химических свойств и, в частности, при производстве композитов из отходов ЖКХ [4].

Проблема разработки новых типов смесителей, несмотря на уже существующее их многообразие, остается достаточно актуальной, что объясняется особенностями ожидаемого качества готовой смеси, зависящей не только от реологических и физико-механических свойств смешиваемых компонентов, их агрегатных состояний, но и от условий протекания процесса смешивания. Как правило, конечной целью указанной технологической операции является получение смеси, отвечающей условию однородности композиций в ее составе. Проектирование оборудования по переработке разнородных сред неизбежно связано с проблемами экологии, а также с созданием безопасных условий работы на производствах химической, пищевой промышленности и при производстве строительных материалов.

Определение степени неоднородности смеси тонкодисперсных компонентов в аппаратах с замкнутым рабочим объемом осложняется необходимостью учета стохастического характе-

ра движения смешиваемых компонентов. При этом наблюдается равновесие двух противоположных по сути процессов – перераспределение частиц ингредиентов по всей указанной области и их сосредоточение при наличии сравнимых масс под действием различного рода сил (сегрегация) в некоторых участках смесителя [5].

Обычно оценка качества получаемой смеси производится по одному или нескольким критериям. В настоящей работе, вследствие стохастичности исследуемого процесса, критерий оценки качества смеси удобно связать с вычислением удельной концентрации ключевого компонента, представив его в виде коэффициента неоднородности, который рассчитывается по следующей формуле [6]:

$$V_c = 100 (\langle c^2 \rangle / \langle c \rangle^2 - 1)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $\langle c^2 \rangle$  – среднее значение от квадрата значения функции  $c$  в зависимости от временного параметра и выбранных координат в рабочем объеме аппарата;  $\langle c \rangle^2$  – квадрат среднего значения описанной концентрации.

Аппарат может успешно работать в режиме смесителя разнородных сред при определенных пределах изменения режимного параметра – угловой скорости вращения  $\omega$ . Границы корпуса устройства определяются поверхностями двух последовательных криволинейных лопаток  $M_1M_2$  и  $M_3M_4$ , когда их число в аппарате равно  $N$  (рисунок 2).

Выделим основные условные зоны движения материала в рабочем объеме: отсутствия частиц (I) – вблизи лопасти  $M_3M_4$ ; активного смешивания (II) –  $M_1Q_1Q_2N_1$ ; транспортирования смеси (III) –  $Q_2M_2N_2Q_2$  между частью лопасти  $Q_2M_2$  и свободной границей смешиваемых компонентов  $N_2Q_2$ . Причем условная зона смешивания (II) ограничена следующими поверхностями: самой лопасти  $M_1Q_1$  с уравнением в полярной системе координат  $r_s(\theta)$ ; внутреннего цилиндра  $M_1N_1$  радиуса  $r_0$ , на котором они закреплены; границей раздела указанных зон  $Q_1Q_2$  – при задании  $r_b(\theta)$ , а также свободной поверхностью смешиваемых сред  $N_1Q_2$  (4), соответствующей уравнению  $r_h(\theta)$ .

Рассмотрим в качестве примеров два способа задания профиля криволинейной лопасти смесителя: в форме дуги окружности с радиусом  $\rho$  (рисунок 2а) и при изгибе в виде эвольвенты двух окружностей с радиусами  $\rho_1$  и  $\rho_2$  (рисунок 2б). При этом выбрана полярная система координат с центром в точке  $O_2$  (центре окружности для дуги  $M_3M_4$  с радиусом  $\rho$ ) при первом способе задания профиля лопатки или точка  $N_2$  – при эвольвентном ее изгибе (центре окружности для дуги  $M_3M_4$  с радиусом  $\rho_2$ ).

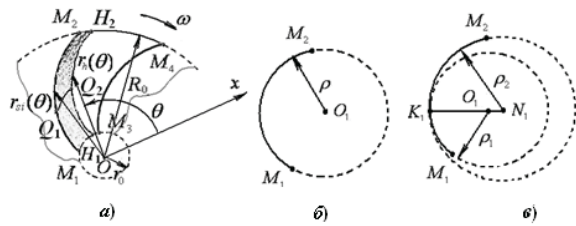


Рисунок 2. Задание изгиба криволинейной лопасти: а) схема рабочей ячейки; б) в виде дуги окружности  $M_1M_2$ ; в) в форме эвольвенты двух окружностей ( $M_1M_2$  – эвольвента;  $K_1N_1$  – эволюта)

Уравнения лопастей в ячейке  $M_1M_2M_3M_4$  имеют следующий вид:

– для дуг окружностей, когда  $r_s(\theta)$  – для  $M_1M_2$ ;  $r_w(\theta)$  – для  $M_3M_4$ :

$$r_{s,w} = \begin{cases} r_{01} \cos(\theta_s - \theta_{01}) + [\rho^2 - r_{01}^2 \sin^2(\theta_s - \theta_{01})]^{\frac{1}{2}}; & (2) \\ r_{01} \cos \theta_w + [\rho^2 - r_{01}^2 \sin^2 \theta_w]^{\frac{1}{2}}; \end{cases}$$

– для эвольвенты  $M_1M_2$ , когда  $r_{s1}(\theta)$  имеет смысл при  $r_0 \leq r_{s1} \leq r_{K1}$ ,  $\theta_{K1} \leq \theta \leq \theta_{M1}$ ;  $r_{s2}(\theta)$  – при  $r_{K1} \leq r_{s2} \leq R_0$ ,  $\theta_{M2} \leq \theta \leq \theta_{K1}$  и точка  $K_1$  является общей для составляющих дуг эвольвенты  $M_1M_2$  (рисунок 2б):

$$r_{s,w} = \begin{cases} r_{01} \cos(\theta_s - \theta_{01}) + [\rho_1^2 - r_{01}^2 \sin^2(\theta_s - \theta_{01})]^{\frac{1}{2}}; & (3) \\ r_{N1} \cos(\theta_{s2} - \theta_{N1}) + [\rho_2^2 - r_{N1}^2 \sin^2(\theta_{s2} - \theta_{N2})]^{\frac{1}{2}}. \end{cases}$$

Согласно соответствующим способам задания криволинейных лопастей можно определить угловые координаты точек  $M_1, M_2, M_3, M_4, O_1, N_1$ . В частности, в формулы (2) и (3) входят координаты характерных точек корпуса смесителя, вычисляемые с помощью выражений:

$$\theta_{M1} = \begin{cases} \theta_{01} + \theta_{M3}, & r = r_s \\ \theta_{N1} + \theta_{M3}, & r = r_{s1} \end{cases} \quad (4)$$

$$\theta_{M2} = \begin{cases} \theta_{01} + \theta_{M4}, & r = r_s \\ \theta_{N1} + \theta_{M4}, & r = r_{s2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\theta_{N1} = \frac{2\pi}{N}, \quad (6)$$

$$\psi = \arccos \left[ \frac{r_{01}^2 + r_{N1}^2 - (\rho_2 - \rho_1)^2}{(2r_{01}r_{N1})} \right], \quad (7)$$

$$\theta_{M3} = \begin{cases} \arccos \left[ \frac{r_0^2 + r_{01}^2 - \rho^2}{(2r_{01}r_0)} \right], & r = r_s; \\ \psi + \arccos \left[ \frac{r_0^2 + r_{01}^2 - \rho^2}{(2r_{01}r_0)} \right], & r = r_{s1}; \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta_{M4} = \begin{cases} \arccos \left[ \frac{r_0^2 + r_{01}^2 - \rho^2}{(2r_{01}R_0)} \right], & r = r_s; \\ \arccos \left[ \frac{R_0^2 + r_{N1}^2 - \rho_2^2}{(2r_{N1}R_0)} \right], & r = r_{s1}; \end{cases} \quad (9)$$

Необходимо отметить, что эволюте  $O_1N_1$ , где  $O_1$  и  $N_1$  (рисунок 2б) представляют собой центры ее окружностей, которые имеют радиусы  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , принадлежит точка  $K_1$  с координатами:

$$r_{K1} = \frac{1}{2} \left( r_{01} \cos(\theta_{K1} - \theta_{01}) - r_{N1} \cos(\theta_{K1} - \theta_{01}) + \left( \rho_1^2 - r_{01} \sin(\theta_{K1} - \theta_{01}) \right)^{\frac{1}{2}} + \left( \rho_2^2 - r_{N1} \sin(\theta_{K1} - \theta_{01}) \right)^{\frac{1}{2}} \right), \quad (10)$$

$$\theta_{K1} = \frac{\theta_{N1} + \psi + \arccos \left( \frac{r_{K1}^2 + r_{01}^2 - \rho_1^2}{2r_{K1}r_0} \right)}{2r_{K1}r_0}. \quad (11)$$

Заметим, что проблема оптимального выбора изгиба криволинейных лопастей в рабочем объеме уплотнителя может быть решена с помощью задания их профиля в виде дуги эвольвенты нескольких окружностей различных радиусов. Воспользуемся следующим приближением для значения удельной концентрации ключевого компонента  $c(r, t')$  в полярной системе координат в зоне активного смешивания:

$$c^{(1)}(r, t') = \frac{F(r, t') - F(r_b(\theta_Q, t'), t')}{F(r_0, t') - F(r_b(\theta_Q, t'), t')}, \quad (12)$$

где при введении связанных с коэффициентом макродиффузии  $D$ , временем  $t$  и угловой скоростью вращения вспомогательных параметров Лагранжа:

$$D' = \frac{D}{2\omega}, \quad t' = \theta + \omega t, \quad (13)$$

$$F(r, t') = \exp \left[ 2^{\frac{3}{2}} r (D't')^{-\frac{1}{2}} \right], \quad (14)$$

$$r_b(\theta_Q, t') = \frac{r_0 \Phi(r_0, t') F(r_s(\theta), t') \Phi(r_0, t') [F(r_s(\theta), t') - 1]}{F(r_s(\theta), t') - F(r_0, t')} - \frac{r_0 \Phi(r_0, t') (r_s(\theta) \Phi(r_s(\theta), t') [F(r_0, t') - 1])}{F(r_s(\theta), t') - F(r_0, t')}, \quad (15)$$

$$\Phi(r_s, t') = \exp [2^{-3} r^2 (D't')^{-1}]. \quad (16)$$

Выражения (12), (15) учитывают геометрические особенности ячейки центробежного аппарата с криволинейным рабочим органом, форма которого задается уравнением  $r_s(\theta)$  из (2) или (3). При этом  $r_0$  – радиус цилиндрической поверхности, к которой крепятся лопасти,  $\theta_{Q1}$  и  $\theta_{Q2}$  – соответственно угловые координаты точек пересечения свободной границы движения компонентов  $H_1Q_2$  и описанной эвольвенты с  $Q_1Q_2$  – условной границей раздела расположенных вдоль лопатки  $M_1M_2$  зон – активного смешения и преимущественного транспортирования:

$$\theta_Q = (\theta_{Q1} + \theta_{Q2})/2. \quad (17)$$

Тогда величины, входящие в критерий неоднородности (1) с учетом вида профиля лопасти  $M_1M_2$ :  $r_s(\theta)$  – для дуги окружности или  $r_{s1}(\theta)$  для части эвольвенты  $r_0 \leq r_{s1} \leq r_{K1}$ ,  $\theta_{K1} \leq \theta \leq \theta_{M1}$  соответственно согласно выражениям (2) или (3) есть:

$$< c \geq \begin{cases} [S_c(t')]^{-1} \int_{r_0}^{r_b(\theta_Q, t')} r c^{(1)}(r, t') dr \int_{\theta_h(r, t')}^{\theta_s(r)} d\theta, & r = r_s \\ [S_c(t')]^{-1} \int_{r_0}^{r_b(\theta_Q, t')} r c^{(1)}(r, t') dr \int_{\theta_h(r, t')}^{\theta_{s1}(r)} d\theta, & r = r_{s1} \end{cases} \quad (18)$$

$$< c^2 \geq \begin{cases} [S_c(t')]^{-1} \int_{r_0}^{r_b(\theta_Q, t')} r [c^{(1)}(r, t')]^2 dr \int_{\theta_h(r, t')}^{\theta_s(r)} d\theta, & r = r_s \\ [S_c(t')]^{-1} \int_{r_0}^{r_b(\theta_Q, t')} r [c^{(1)}(r, t')]^2 dr \int_{\theta_h(r, t')}^{\theta_{s1}(r)} d\theta, & r = r_{s1} \end{cases} \quad (19)$$

где  $S_c(t')$  – площадь  $M_1Q_1 Q_2H_1$  – зоны активного смещения;  $\theta_h(r, t')$ ,  $\theta_s(r)$  – соответственно уравнения – свободной границы  $H_1 Q_2$  из уравнения (16) кривой лопасти  $M_1M_2$  и из выражений (2), (3) при учете (11), получим:

$$\theta_{s, s1}(r) = \begin{cases} \frac{2\pi}{N} + \arccos\left(\frac{r^2 + r_{01}^2 - \rho^2}{2r_{01}r}\right), & r = r_s; \\ \frac{2\pi}{N} + \arccos\left(\frac{r^2 + r_{01}^2 - \rho^2}{2r_{01}r}\right), & r = r_{s1}. \end{cases} \quad (20)$$

Дальнейший расчет коэффициента неоднородности при помощи выражения (1) связан с конкретизацией вида изгиба криволинейной лопасти  $M_1M_2$ . Выражению для площади имеет вид:

$$S_c(t') = 2^{-1} G(t') \left( [r_b(\theta_Q, t')]^2 - r_0^2 \right) \quad (21)$$

здесь обозначено:

$$u_1(r) = \frac{r^2 + a}{br}, \quad (22)$$

$$u_2(r) = (b^2 - 2a)r^2 - r^4 - a^2, \quad (23)$$

$$u_3(r) = 2r^2 - (b^2 - 2a), \quad b = 2r_{01}, \quad (24)$$

$$U_0(r) = \frac{u_3(r)}{2\sqrt{u_2(r)}}, \quad (25)$$

$$a = \begin{cases} r_{01}^2 - \rho^2, & r = r_s, \\ r_{01}^2 - \rho_1^2, & r = r_{s1}, \end{cases} \quad (26)$$

$$G(t') = \frac{\pi}{N} - \frac{\theta_{Q2}}{2} + \frac{2[\theta_{Q2} - \theta_{H1}(t')]}{[r_b(\theta_{Q1}, t')]^2 - r_0^2} 4 \ln[r_0^{-1} r_b(\theta_{Q2}, t')] \times \quad (27)$$

$$\times \{r_0^2 + [r_b(\theta_{Q2}, t')]^2 (2 \ln[r_0^{-1} r_b(\theta_{Q2}, t')] - 1) + J_1(t')\} \\ J_1(t') = \frac{1}{4} \left( \frac{2r_b(\theta_{Q2}, t')^2 u_1(r_b(\theta_{Q2}, t')) - r_0^2 u_1(r_0) -}{-\frac{1}{2} \sqrt{u_2(r_b(\theta_{Q2}, t'))} - u_2 r_0 + (4a + b^2) \times} \right. \\ \left. \times [\arctg[U_0 r_b(\theta_{Q1}, t')] - \arctg[U_0(r_0)]] \right) \quad (28)$$

Формулы (18), (19) после интегрирования в приближении усреднения по  $r$ -координате в выражениях для указанных пределов, т.е. при замене  $\theta_h(r, t')$ ,  $\theta_s(r)$  на  $\theta_h(r_{H1}, t')$ ,  $\theta_s(r_{H1})$  когда  $r_{H1}$  определяется следующим образом:

$$r_{H1}(t') = \frac{r_{Q1}(t') + r_{M1}}{2}, \quad (29)$$

а также согласно выражениям (14) и (16) для функций  $F(y)$ ,  $\Phi(y)$  и подстановкам из уравнения (14) с учётом того, что:

$$\gamma = [q(r, t')]^2, \quad (30)$$

$$q(r, t') = \frac{r}{\sqrt{2D't'}} \quad (31)$$

принимают вид:

$$< c \geq \frac{D't'b_0(t')}{\sqrt{F(\gamma_0(t')) - F(\gamma_b(\theta_Q, t'))}} \times \\ \times [2 - \gamma_0(t')] [F(\gamma_0(t')) - F(\gamma_b(\theta_Q, t')) + J_2(t')] \quad (32)$$

$$< c^2 \geq \frac{D't'b_0(t')}{(F(\gamma_0(t')) - F(\gamma_b(\theta_Q, t')))^2} \times \\ \times [F(\gamma_b(\theta_Q, t'))]^2 [2 - \gamma_b(\theta_Q, t') - \gamma_b(t')] + J_3(t') - J_2(t') + 2F(\gamma_b(\theta_Q, t')) [F(\gamma_0(t')) [\gamma_0(t') - 2]] \quad (33)$$

$$E_0(t') = \frac{\theta_s(r_{H1}) - \theta_h(r_{H1}, t')}{G(t')} \quad (34)$$

$$J_2(t') = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ \frac{\Phi(\gamma_b(\theta_Q, t')) \sqrt{\gamma_b(\theta_Q, t')}}{-\Phi(\gamma_0(t')) \sqrt{\gamma_0(t')}} \right] \quad (35)$$

$$J_3(t') = \frac{4}{\pi} \left[ \frac{\Phi(\gamma_b(\theta_Q, t')) - \Phi(\gamma_0(t')) +}{\times \sqrt{\pi \gamma_b(\theta_Q, t')}} \right] - \\ - (\gamma_b(\theta_Q, t') - 2) [F(\gamma_b(\theta_Q, t'))]^2 - \\ - (\gamma_b(t') - 2) [F(\gamma_b(t'))]^2 \quad (36)$$

Заметим, что наличие временного параметра  $t'$  в выражениях (32), (33) не следует интерпретировать как отражение накопления массы ключевого компонента в силу непрерывности процесса смещения дисперсных потоков в рассматриваемом аппарате с криволинейным рабочим органом. Полученная твердофазная смесь из зоны активного смещения (II) переходит в зону транспортирования (III), уступая место дисперсным потокам, получаемым при дозировании сыпучих компонентов. Переход из одной зоны в другую для полученной смеси осуществляется согласно (13) при значении временного параметра  $t' = t_n$ . Причем время пребывания в области смещения  $t_n$  может несколько превосходить  $t_p$  – время достижения равновесия между процессами постепенного перераспределения частиц транспортируемых и ключевых ингредиентов ( $t_n \geq t_p$ ), а также их сегрегации в корпусе устройства. Данный факт чаще всего объясняется физико-механическими свойствами сыпучих материалов, способами их дозирования, выбором режимного параметра.

Итак, согласно (1) соответствующий коэффициент неоднородности при  $t'=t'_n$  в формулах (32), (33) рассчитывается как  $V_c(\gamma_{bn}, \gamma_{0n})$ :

$$V_c(\gamma_{bn}, \gamma_{0n}) = 100 \times \left( \frac{(F_{0n} - F_{bn})(\gamma_{bn} - \gamma_{0n}) \times [F_{bn}^2(\gamma_{bn} - \gamma_{0n}) + J_{5n}]}{F_{bn}} \times \frac{1}{2E_{0n}[J_{4n} - F_{bn}(\gamma_{bn} - \gamma_{0n})]} \right), \quad (37)$$

где

$$F_{bn} = F(\gamma_b(\theta_Q, t'_n)); \quad (37)$$

$$F_{0n} = F(\gamma_0(t'_n)); \quad (38)$$

$$\gamma_{bn} = \gamma_b(\theta_Q, t'_n); \quad (39)$$

$$\gamma_{0n} = \gamma_0(t'_n); \quad (40)$$

$$E_{0n} = E_0(t'_n); \quad (41)$$

$$J_{4n} = J_2(t') + [F_{bn}(\gamma_{bn} - 2) - F_{bn}(\gamma_{02} - 2)]; \quad (42)$$

$$J_{5n} = 4(J_2(t') + 2F_{bn}J_{4n}). \quad (43)$$

Кроме того, при введении новых безразмерных параметров в виде:

$$\xi = r_0(r_{bn} - r_0), \quad (44)$$

$$\zeta = 2D't'_n(r_{bn} - r_0)^2, \quad (45)$$

$$\gamma_{bn} = [(\xi - 1)/\zeta]^2, \quad (46)$$

$$\gamma_{bn} - \gamma_{0n} = (1 - 2\xi)/\zeta^2, \quad (47)$$

$$\gamma_{bn} + \gamma_{0n} = (2\xi^2 - 2\xi + 1)/\zeta^2, \quad (48)$$

коэффициент неоднородности может иметь другое представление  $V_c(\xi, \zeta)$ :

$$V_c(\gamma_{bn}, \gamma_{0n}) = 100 \times \left( \frac{(F_{0n}(\xi, \zeta) - F_{bn}(\xi, \zeta)) [F_{bn}(\xi, \zeta)]^2 \times [2(\zeta^2 - \xi^2 + \xi) - 1] + 4F_{bn}(\xi, \zeta) [F_{0n}(\xi, \zeta)(2\zeta^2 - \xi^2) + \zeta^2 J_{2n}(\xi, \zeta)]}{1} \times \frac{1}{\sqrt{2E_{0n}\zeta^2 \left( (2\zeta^2 - \xi^2) \left[ \frac{F_{0n}(\xi, \zeta)}{-F_{bn}(\xi, \zeta)} \right] + \zeta^2 J_{7n} \right)^2 - 1}} \right), \quad (49)$$

где обозначено:

$$F_{0n}(\xi, \zeta) = \text{erf}[\xi/2\zeta], \quad (50)$$

$$F_{bn}(\xi, \zeta) = \text{erf}[(\xi - 1)/\zeta], \quad (51)$$

$$\Phi_{bn}(\xi, \zeta) = \exp\left(-[(\xi - 1)/2\zeta]^2\right), \quad (52)$$

$$\Phi_{0n}(\xi, \zeta) = \exp\left(-[(\xi)/2\zeta]^2\right), \quad (53)$$

$$J_{2n}(\xi, \zeta) = \frac{4}{\pi} \left[ \Phi_{bn}(\xi, \zeta) - \Phi_{0n}(\xi, \zeta) + \sqrt{\pi} \left( \left[ \frac{\xi - 1}{\zeta} F_{bn}(\xi, \zeta) - \frac{\xi \Phi_{0n}(\xi, \zeta)}{\zeta} F_{0n}(\xi, \zeta) \right] - \left[ \Phi(\gamma_0(t')) F(\gamma_0(t')) \sqrt{\gamma_0(t')} \right] - \left[ \frac{(\xi - 1)^2}{\zeta^2} - 2 \right] [\Phi_{bn}(\xi, \zeta)]^2 + \left[ \frac{\xi}{\zeta} - 2 \right] [\Phi_{0n}(\xi, \zeta)]^2 \right), \quad (54)$$

$$J_{7n}(\xi, \zeta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[ \left[ \frac{\xi - 1}{\zeta} \right] \Phi_{bn}(\xi, \zeta) - \frac{\xi}{\zeta} \Phi_{0n}(\xi, \zeta) \right]. \quad (55)$$

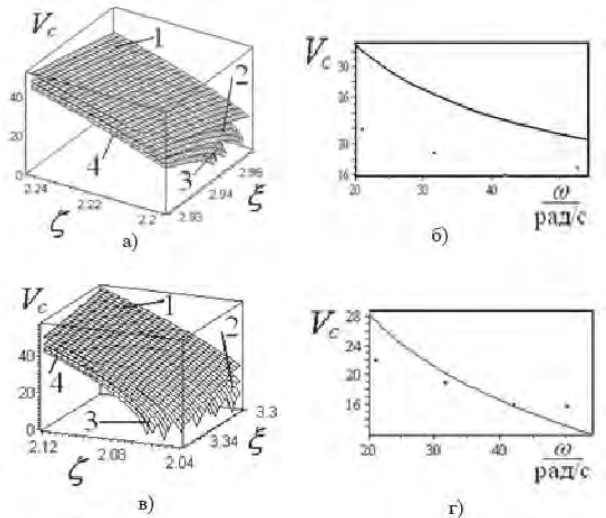


Рисунок 3. Расчётные и экспериментальные зависимости для коэффициента неоднородности при смешивании расплава вторичного полиэтилена со смесью «измельченные пищевые отходы – эковата»: а, б)  $V_c(\xi, \zeta)$ ,  $\omega=20,94$  рад/с (1),  $\omega=31,42$  рад/с (2),  $\omega=41,89$  рад/с (3);  $\omega=52,36$  рад/с (4); в, г)  $V_c(\omega)$ .

Таким образом, в приближении (12) для удельной концентрации ключевого компонента получены различные представления  $V_c(\gamma_{bn}, \gamma_{0n})$  и  $V_c(\xi, \zeta)$  коэффициента неоднородности в форме выражений (49) и (54).

В качестве примера на рисунке 3 представлено сопоставление теоретических и опытных данных для зависимости  $V_c(\omega)$ , полученных при смешивании вторичного полиэтилена со смесью «измельченные пищевые отходы – эковата» в устройстве с конструктивными параметрами рабочего объема ( $R_0=0,27$  м,  $r_0=0,07$  м) и лопастей при  $N=6$  для дуги окружности ( $\rho=0,15$  м,  $r_{01}=0,13$  м) или эвольвенты ( $r_{01}=0,0$  м,  $r_{N1}=0,10$  м,  $\rho_1=0,145$  м,  $\rho_2=0,195$  м), когда параметр для каждого из профилей лопасти соответственно  $D'=5,18 \cdot 10^4$  м<sup>2</sup> или  $D'=4,50 \cdot 10^4$  м<sup>2</sup>. Значения коэффициента неоднородности для расчетной кривой при выборе изгиба лопасти в форме дуги окружности несколько превышают опытные показатели (рисунок 2.2 б). Предпочтительная область применения указанной формулы (1) согласно выражениям (32), (36) при изменении режимного параметра смесителя в пределах  $\omega=(30,0 - 43,0)$  рад/с при эвольвентном профиле рабочего органа как раз соответствует опытным минимальным значениям  $V_c$  [21].

ЛИТЕРАТУРА

1 Романович А.А., Ильина Т.Н., Солопов Н.В., Варданыан Г.Р. Технологический комплекс для утилизации техногенных волокнистых материалов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2005. №11. С. 203-205.

2 Чертов Е.Д., Васечкин М.А., Носов О.А., Варданыан Г.Р. Бесконтактный метод формования элементов транспортных сооружений из органоминеральных композиционных материалов // Вестник ВГУИТ. 2014. №2. С. 71-76.

3 Клинков А.С., Соколов М.В., Однолько В.Г., Беляев П.С. Проектирование смесителей периодического действия при получении композитов заданного качества из отходов термопластов. М.: Издательский дом «Спектр», 2012. 196 с.

4 Севостьянов В.С., Носов О.А., Бережной О.Л., Варданыан Г.Р. Программа «Белый город - эко-город» // Экология: образование, наука, промышленность и здоровье: сб. докл. V Международ. науч.-практ. конф. Белгород: Изд-во БГТУ, 2013. С 156-161.

5 Бакин И.А. Сибиль А.В., Иванец В.Н. Разработка смесителей с интенсивным механическим воздействием на перерабатываемые материалы // Современные проблемы техники и технологии пищевых производств: Сб.материалов 10 ой научно-практ. конф. с международным участием. Барнаул, АлтГТУ, 2007. С. 291-294.

6 Капранова А.Б. Метод определения коэффициента макроdiffузии в процессе смешивания вязких сред в центробежном аппарате // Математическое моделирование. 2009. Т. 21. №3.

REFERENCES

1 Romanovich A.A., Il'ina T.N., Solopov N.V., Vardanyan G.R. Technological complex for utilization of technogenic fiber materials. *Vestnik BGTU*. [Bulletin of Belgorod State Technological University by V.G. Shukhov], 2005, no.11, pp. 203-205. (In Russ.).

2 Chertov E.D., Vasechkin M.A., Nosov O.A., Berezhnoi O.L., Vardanyan G.R. Contactless method of forming elements of the transport constructions of organic composite materials. *Vestnik VGUI*. [Bulletin of VSUET], 2014, no. 2, pp. 71-76. (In Russ.).

3 Klinkov A.S., Sokolov M.V., Odnol'ko V.G., Belyaev P.S. Proektirovanie smesitelei periodicheskogo deistviya pri poluchenii kompozitov zadannogo kachestva iz otkhodov termoplastov [Design of batch action mixers in obtaining composites of specified quality out of the waste products of thermoplastics]. Moscow, Spektr, 2012. 196 p. (In Russ.).

4 Sevost'yanov V.S., Nosov O.A., Berezhnoi O.L., Vardanyan G.R. Program "White city - eco-city". *Ekologiya: obrazovanie, nauka, promyshlennost' i zdorov'e: sb. dokl. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Ecology: education, science, industry and health: Digest of reports of V Intern. scientific and practical conf]. Belgorod: Izd-vo BGTU, 2013, pp. 156-161. (In Russ.).

5 Bakin I.A., Sibylle A.V., Ivanets V.N. Development of mixers with intense mechanical influence on the recycling materials. *Sovremennye problem tekhniki i tekhnologii pishchevykh proizvodstv* [Modern problems of technique and technology of food production: Digest of reports of 10th scientific and practical conf. with international participation]. Barnaul: AltGTU, 2007, pp. 291-294. (In Russ.).

6 Kapranova A.B. The method of determining the coefficient of macro diffusion during mixing viscous fluids in the centrifugal set. *Matematicheskoe modelirovanie*. [Mathematical modeling], 2009, vol. 21, no. 3. (In Russ.).