МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО ТА МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 532.137:666.97

І.А. Андреєв, Н.В. Комкіна

ПРОЦЕС ЛАМІНАРНОГО КОНВЕКТИВНОГО ЗМІШУВАННЯ ФІБРОБЕТОНУ ПРИ ВІБРОЕКСТРУЗІЇ В КРУГЛОМУ КІЛЬЦЕВОМУ КАНАЛІ

We clarify features of the process that occurs in a round circular channel to assess the degree of the components mixing in fiber-reinforced concrete compositions in a modern vibroextruders. We also consider the process of simple mixing in a laminar flow in the absence of diffusion occurring in such a channel. When reviewing the process we utilize the phenomenological approach, which takes the fiber-reinforced concrete composition for a homogeneous isotropic medium. We solely generalize explanations on the composition structure. Moreover, we take into account that vibrating fiber-reinforced concrete compositions in vibroextruders are pseudo Newtonian systems. We introduce analytical formulas for calculating displacement deformation, functions of allocation of deformation and residence time of composition in a round circular channel. We also found that round circular channels as compared with planes, rounds and conical provide significant reduction in nonuniformity of allocation of displacement deformation of the channel cross section. In its turn it improves mixing and hence properties of the composition throughout its volume conducing to receipt of high quality products.

Вступ

Процес змішування компонентів суміші впливає на фізико-механічні властивості та зовнішній вигляд кінцевої продукції. Ламінарне конвективне змішування має місце при застосуванні високов'язких середовищ: у процесі переробки полімерів, під час віброекструзії фібробетону тощо. Кількісним критерієм ламінарного змішування є ступінь збільшення площі поверхні розділу між компонентами, який у свою чергу залежить від сумарної деформації і початкової орієнтації поверхні. Вадою ламінарного конвективного змішування є нерівномірність зсувних деформацій у всьому об'ємі матеріалу. Для усунення цього недоліку компоненти суміші повторно пропускаються через змішувачі, доки не буде досягнуто потрібної якості суміші. При віброекструзійному формуванні фібробетонних виробів також застосовуються каскадні віброекструдери, в яких суміш пропускається через кілька каналів.

Розгляд процесу ламінарного конвективного змішування у круглій трубі, між нерухомими паралельними пластинами, у конічних і плоских каналах, які звужуються, було виконано в працях [1–6].

Для здійснення процесу виготовлення фібробетонних труб і перемішування компонентів суміші були запропоновані конструкції віброекструдерів, які мають кільцеві канали [7–9]. Однак розрахункових формул для визначення основних характеристик процесу ламінарного конвективного змішування (деформації зсуву, функції розподілу деформацій, функції розподілу часу перебування) у таких каналах запропоновано не було.

Постановка задачі

Мета статті – оцінити ступінь змішування компонентів фібробетонної суміші в сучасних віброекструдерах для з'ясування особливостей процесу, який відбувається в круглому кільцевому каналі.

Процес віброекструзійного змішування в круглому кільцевому каналі

Розглянемо процес простого змішування в умовах ламінарного плину при відсутності дифузії, який відбувається в круглому кільцевому каналі. При розгляді процесу використовується феноменологічний підхід, згідно з яким фібробетонна суміш покладається як однорідне ізотропне середовище, а про структуру суміші роблять лише загальні застереження. Враховується, що вібруючі фібробетонні суміші при віброекструзії являють собою псевдоньютонівські системи [10].

Висота стовпа суміші l в кільцевому вертикальному каналі підтримується постійною. Для випадку ізотермічного постійного прямолінійного плину ньютонівської рідини за рахунок перепаду тиску $\partial p/\partial z$ в круглому кільцевому каналі формули для розрахунку швидкості u і об'ємної витрати q наведені в літературі [11– 13]. Використовуючи ці формули, можна знайти частку об'ємної витрати на ділянці між поточним радіусом круглого кільцевого каналу r і dr

$$f(r)dr = \frac{dq}{q} =$$

$$= \frac{4\left[(R_б^2 - R_м^2)\dfrac{\ln\dfrac{r}{R_м}}{\ln\dfrac{R_б}{R_м}} - (r^2 - R_м^2)\right]r}{(R_б^2 - R_м^2)\left(R_б^2 + R_м^2 - \dfrac{R_б^2 - R_м^2}{\ln\dfrac{R_б}{R_м}}\right)}dr, \quad (1)$$

час перебування суміші в круглому кільцевому каналі

$$t = \frac{l}{u} = \frac{4\mu l}{\dfrac{\partial p}{\partial z}\left[(R_б^2 - R_м^2)\dfrac{\ln\dfrac{r}{R_м}}{\ln\dfrac{R_б}{R_м}} - (r^2 - R_м^2)\right]} \quad (2)$$

і деформацію зсуву

$$\gamma = \dot{\gamma}t = \frac{\left(\dfrac{R_б^2 - R_м^2}{r\ln\dfrac{R_б}{R_м}} - 2r\right)l}{(R_б^2 - R_м^2)\dfrac{\ln\dfrac{r}{R_м}}{\ln\dfrac{R_б}{R_м}} - (r^2 - R_м^2)}, \quad (3)$$

де $R_б$ – більший радіус круглого кільцевого каналу, $R_м$ – менший радіус круглого кільцевого каналу, r – поточний радіус круглого кільцевого каналу, μ – вібров'язкість суміші, $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву.

Звідси можна визначити середнє значення деформації зсуву в круглому кільцевому каналі $\overline{\gamma}$:

$$\overline{\gamma} = \int_{R_м}^{R_б} \gamma f(r)dr =$$

$$= \frac{4l\left[\dfrac{R_б^2 - R_м^2}{\ln\dfrac{R_б}{R_м}} - \dfrac{2}{3}(R_б^2 + R_б R_м + R_м^2)\right]}{(R_б + R_м)\left(R_б^2 + R_м^2 - \dfrac{R_б^2 - R_м^2}{\ln\dfrac{R_б}{R_м}}\right)}. \quad (4)$$

Частку об'ємної витрати на ділянці від $R_м$ до r знаходимо, використовуючи вираз (1):

$$F(r) = \int_{R_м}^{r} f(r)dr =$$

$$= \frac{\dfrac{R_б^2 - R_м^2}{\ln\dfrac{R_б}{R_м}}\left[2r^2\ln\frac{r}{R_м} - (r^2 - R_м^2)\right] - (r^2 - R_м^2)^2}{(R_б^2 - R_м^2)\left(R_б^2 + R_м^2 - \dfrac{R_б^2 - R_м^2}{\ln\dfrac{R_б}{R_м}}\right)}. \quad (5)$$

Середнє значення часу перебування суміші в круглому кільцевому каналі становить

$$\overline{t} = \int_{R_м}^{R_б} tf(r)dr = -\frac{8\mu l}{\dfrac{\partial p}{\partial z}\left(R_б^2 + R_м^2 - \dfrac{R_б^2 - R_м^2}{\ln\dfrac{R_б}{R_м}}\right)}. \quad (6)$$

На рис. 1 подано графік відносних зсувних деформацій $\gamma/\overline{\gamma}$ у круглому кільцевому каналі ($R_м = 0{,}15$ м, $R_б = 0{,}18$ м), який побудований за допомогою формул (3), (4).

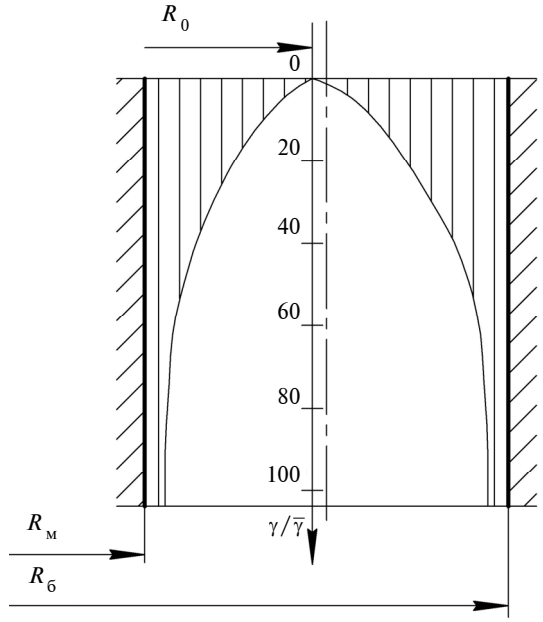

Рис. 1. Розподіл деформацій зсуву в круглому кільцевому каналі (при $r = R_м$ і $r = R_б$ деформації зсуву, відповідно до виразу (6), дорівнюють нескінченності)

На ділянці, що відповідає максимальній швидкості плину (при $r = R_0$), деформація зсуву $\gamma = 0$. Аналізуючи формулу для розрахунку швидкості u, можна зробити висновок, що в

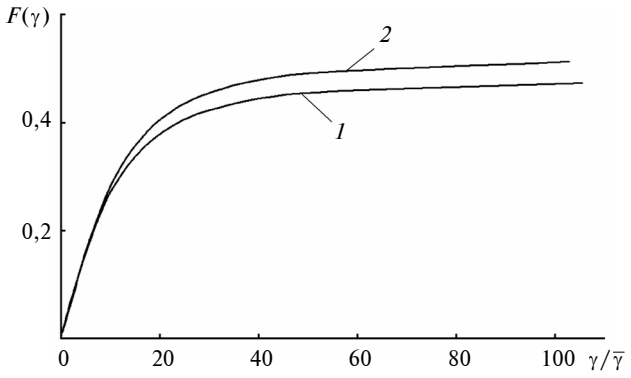

Рис. 2. Залежність функції розподілу деформацій $F(\gamma)$ від $\gamma/\overline{\gamma}$: *1* – $R_{\text{м}} \le r \le R_0$, *2* – $R_0 \le r \le R_{\text{б}}$

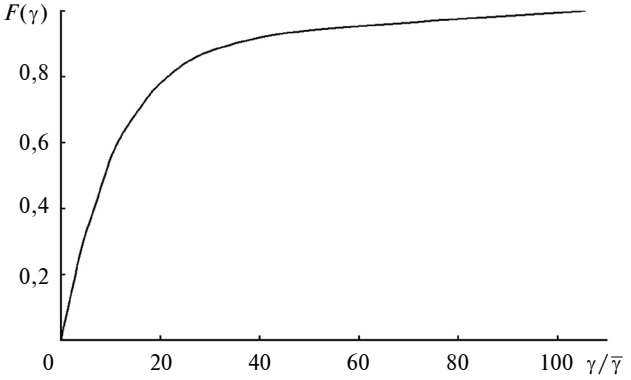

Рис. 3. Усереднена залежність функції розподілу деформацій $F(\gamma)$ від $\gamma/\overline{\gamma}$ у кільцевому каналі

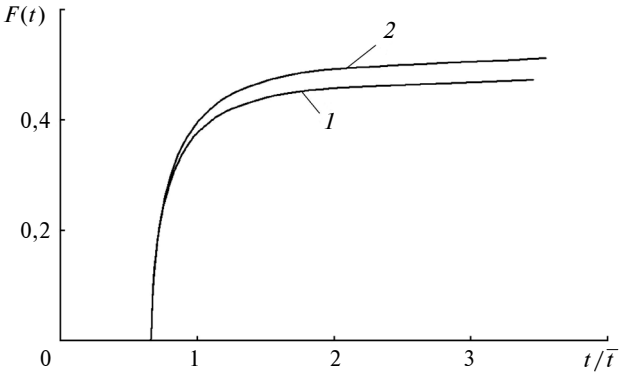

Рис. 4. Залежність функції розподілу часу перебування суміші $F(t)$ від $t/\overline{t}$: *1* – $R_{\text{м}} \le r \le R_0$, *2* – $R_0 \le r \le R_{\text{б}}$

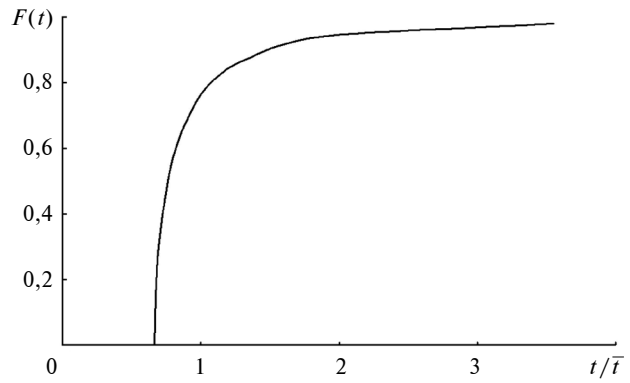

Рис. 5. Усереднена залежність функції розподілу часу перебування суміші $F(t)$ від $t/\overline{t}$ у кільцевому каналі

круглому кільцевому каналі максимальна швидкість зміщена від середньої лінії каналу в бік його осі і залежить від значень $R_{\text{м}}$ і $R_{\text{б}}$.

Екстремальне значення функції u можна розрахувати, диференціюючи її і прирівнюючи похідну від швидкості до нуля. Для визначення радіуса R_0 розв'яжемо рівняння $\frac{du}{dr} = 0$. В результаті отримаємо

$$R_0 = \sqrt{\frac{R_{\text{б}}^2 - R_{\text{м}}^2}{2\ln\frac{R_{\text{б}}}{R_{\text{м}}}}}. \qquad (7)$$

Кількісний опис відмінностей у деформуванні суміші при віброекструзії для круглого кільцевого каналу можна здійснити за допомогою функції розподілу деформацій [14]. Для каналу віброекструдера, який розглядається як змішувач безперервної дії, функція розподілу деформацій (ФРД) $f(\gamma)d\gamma$ визначається як частка об'ємної витрати на виході з каналу із сумарною деформацією зсуву в інтервалі між γ і $\gamma + d\gamma$. Інтегральна ФРД $F(\gamma) = \int_0^{\gamma} f(\gamma)d\gamma$ є частиною об'ємної витрати на виході з каналу, яка характеризується деформацією, меншою або рівною γ.

Залежності функцій розподілу деформацій $F(\gamma)$ від $\gamma/\overline{\gamma}$ на ділянках $R_{\text{м}} \le r \le R_0$ і $R_0 \le r \le R_{\text{б}}$ й усередненої $F(\gamma)$ для всього кільцевого каналу при $R_{\text{м}} = 0{,}15$ м, $R_{\text{б}} = 0{,}18$ м (рис. 2, 3) розраховані за допомогою формул (3)–(5), (7), а залежності функцій розподілу часу перебування суміші $F(t)$ від $t/\overline{t}$ (рис. 4, 5) – за допомогою формул (2), (5)–(7). Розгляд розподілу наведених функцій починався з точки $r = R_0$, де деформація зсуву дорівнює нулю, а час перебування суміші – мінімальний.

Результати досліджень, їх аналіз і рекомендації

Недоліком процесу змішування в круглому кільцевому каналі, як і при течії в будь-яких

каналах, є нерівномірність деформацій зсуву у всьому об'ємі матеріалу (див. рис. 1). Особливістю плину суміші в такому каналі є нерівномірність витрати на ділянках каналу по обидва боки від місця, де швидкість максимальна (для розглянутого випадку – 0,48 об'ємної витрати на ділянці $R_м \le r \le R_0$ і 0,52 об'ємної витрати на ділянці $R_0 \le r \le R_б$). Це в свою чергу впливає на характер розподілу функцій $F(\gamma)$ і $F(t)$ (див. рис. 2, 4). Усереднені криві функцій розподілу деформацій і розподілу часу перебування в круглому кільцевому каналі наведені на рис. 3 і 5.

В круглому кільцевому каналі ($R_м = 0{,}15$ м, $R_б = 0{,}18$ м) суміш, яка становить 0,95 об'ємної витрати, піддається деформації вище середнього рівня (рис. 3), і цей показник набагато більший, ніж для розглянутих раніше течій у конічному і круглому каналах та між плоскими паралельними і збіжними пластинами [1–6]. Час перебування суміші в круглому кільцевому каналі, що становить 80 % об'ємної витрати, менший середнього (рис. 5). Ця величина менша тільки в конічному каналі. Таким чином, процес змішування компонентів суміші в круглому кільцевому каналі бункера віброекструдера більш рівномірний, ніж у плоских, круглих і конічних каналах.

Розрахунок необхідної сумарної деформації зсуву для забезпечення якісного змішування залежить від компонентів суміші, а також від матеріалу і питомої поверхні фібр. Для якісного змішування всього об'єму матеріалу (особливо для сильно наповнених фібрами складів) недостатнім є використання одного каналу, що виражається в неповному змочуванні розчином фібр, які перебувають менше усього в змішувачі. Практично ступінь змішування характеризується швидкістю віброекструзії. Через те що при віброекструзійному змішуванні не відбувається руйнування фібрової арматури, в результаті послідовного проходження суміші через кілька каналів настає момент, коли швидкість віброекструзії стабілізується (ріст її припиняється). Це свідчить про повне змочування фібр розчином. Тому при розробленні нових конструкцій віброекструдерів необхідне проведення нескладних дослідів, які моделюють процес плину суміші в кільцевих каналах і виконання розрахунку за запропонованими формулами відповідної необхідної сумарної деформації зсуву, що забезпечує задовільне змішування.

Висновки

Круглі кільцеві канали порівняно з плоскими, круглими і конічними забезпечують істотне зменшення нерівномірності розподілу деформацій зсуву по перерізу каналу. Це у свою чергу покращує процес змішування, а отже, і властивості суміші по всьому її об'єму, що сприяє одержанню продукції високої якості.

Вперше були отримані і наведені аналітичні формули для розрахунку швидкості зсуву $\dot{\gamma}$, деформації зсуву γ, функцій розподілу деформацій $F(\gamma)$ і розподілу часу перебування суміші $F(t)$ для круглого кільцевого каналу. Це дає можливість кількісного опису відмінностей у деформуванні суміші.

Отримані аналітичні залежності передбачається застосувати для розрахунку нового віброекструзійного обладнання для перемішування фібробетонних сумішей і формування дисперсноармованих виробів.

У подальших дослідженнях планується розглянути процес природного орієнтування фібр при течії фібробетонної суміші в круглому кільцевому каналі, який виникає через наявність у ньому зсувних деформацій.

1. *Тадмор З., Гогос К.* Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
2. *Андреев И.А., Лукач Ю.Е., Магазий П.Н.* Процесс смешения при виброэкструзии фибробетона // Хим. машиностроение: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1989. – Вып. 49. – С. 34–37.
3. *Андреєв І.А., Безугла Л.О.* Особливості віброекструзійного змішування фібробетону в несиметричному каналі // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2009. – № 2. – С. 61–65.
4. *Андреєв І.А., Безугла Л.О.* Перемішування фібробетонної суміші в каналі бункера віброекструдера // Зб. тез доповідей XI Міжнар. наук.-прак. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених "Екологія. Людина. Суспільство", 13–18 травня 2008 р., м. Київ, Україна. – К., 2008. – С. 88–89.
5. *Андреєв І.А., Безугла Л.О.* Процес змішання фібробетонної суміші у плоскому збіжному несиметричному каналі при віброекструзії // Наук. праці Одеської

нац. академії харчових технологій. – Одеса, 2008. – Вип. 32. – С. 44–47.

6. *Андреєв І.А., Столінець В.М.* Особливості процесу ламінарного конвективного змішування при віброекструзії фібробетону у конічному каналі // Керамика: наука и жизнь. – 2009. – № 2 (4). – С. 4–10.
7. *Пат. 59930 Україна, МПК (2011.01) B28B 13/00.* Пристрій для формування фібробетонних труб / І.А. Андреєв, Н.В. Комкіна; заявник і патентовласник вони ж. – Заявка № u201012272; Заяв. 18.10.10; Опуб. 10.06.11, Бюл. № 11.
8. *Пат. 41539 Україна, МПК (2009) B28B 13/00.* Віброекструдер для змішання бетонних сумішей / І.А. Андреєв, В.М. Столінець; НТУУ "КПІ". – Заявка № u200814993; Заяв. 25.12.08; Опуб. 25.05.09, Бюл. № 10.
9. *Пат. 48361 Україна: МПК (2009) B28B 13/00.* Віброекструдер для змішання бетонних сумішей / І.А. Андреєв, В.М. Столінець; заявник і патентовласник вони ж. – Заявка № u200910828; Заяв. 27.10.09; Опуб. 10.03.10, Бюл. № 5.
10. *Андреев И.А., Магазий П.Н.* Вискозиметр для виброэкструдируемого фибробетона // Хим. машиностроение: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1987. – Вып. 45. – С. 95–99.
11. *Слезкин Н.А.* Динамика вязкой несжимаемой жидкости: Учеб. для гос. ун-тов. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры, 1955. – 520 с.
12. *Микаэли В.* Экструзионные головки для пластмасс и резины: конструкции и технические расчеты. – СПб.: Профессия, 2007. – 472 с.
13. *Бернхардт Э.* Переработка термопластичных материалов. – М.: Госхимиздат, 1962. – 748 с.
14. *Lidor G., Tadmor Z.* Theoretical Analysis of Residence Time Distribution Functions and Strain Distribution Functions in Plasticating Screw Extruders // Polymer Engineering a Science. – 1976. – **16**. – P. 450–461.

Рекомендована Радою
інженерно-хімічного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
6 квітня 2011 року