

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 532.137

АНДРЕЄВ І. А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВИМІРЮВАННЯ В'ЯЗКОСТІ ПРИ ВІБРОЕКСТРУЗІЇ ФІБРОБЕТОНУ

Для розгляду процесу плинну і розрахунку реологічних характеристик фібробетонних сумішей при віброекструзії були застосовані гідродинамічні теорії через те, що ці суміші у вібраційному полі, поводить себе подібно рідинам. При вирішенні задач плинну враховується, що, віброуючі фібробетонні суміші являють собою ньютонівські системи. Для одержання об'єктивних реологічних характеристик фібробетонних сумішей запропоновано вимірювання в'язкості проводити безпосередньо при віброекструзійному формуванні виробів. Розглянуто особливості плинну ньютонівських рідин між плоскими нерухомими стінками, які сходяться і у плоскому симетричному прямокутному каналі, що звужується. Запропоновано визначати зменшення витрати суміші у прямокутному каналі порівняно з плинном між пластинами за допомогою коефіцієнта гальмування K_r . Побудовано графік залежності коефіцієнта гальмування від співвідношення сторін поперечного перерізу прямокутного каналу. Запропоновано 2 формули для розрахунку коефіцієнта гальмування. Порівняльний аналіз запропонованих формул дає гарне сходження результатів розрахунків, середня похибка апроксимації при цьому дорівнює 0,0126 %, що свідчить про високий рівень збігу рівняння регресії з більш складною аналітичною формулою. Запропонована формула для розрахунку в'язкості фібробетонних сумішей за часом витікання матеріалу з віброекструдера.

Ключові слова: ресурсозбереження, в'язкість, реологія, віброекструзія, фібробетон

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2024.319013

*Corresponding author: Andreiev@ukr.net

Received 01 October 2024; Accepted 14 November 2024

Постановка проблеми. Вирішенню проблем ресурсозбереження та сталого розвитку сприяє широке використання нових конструкційних фібробетонних матеріалів замість традиційних бетонних і залізобетонних аналогів, що дозволяє виключити застосування сталеві арматури і значно знизити габарити і вагу виробів. В КПІ ім. Ігоря Сікорського був запропонований спосіб віброекструзійного формування, який дозволяє формувати вироби без руйнування і грудкування дисперсної арматури і з забезпеченням необхідної орієнтації фібр. Віброекструзійне обладнання відноситься до нового напрямку промисловості і вимагає постійного удосконалювання. Процес виробництва фібробетонних виробів значною мірою залежить від в'язкості сумішей, що переробляються. При практичному визначенні реологічних властивостей фібробетонних сумішей використовується феноменологічний підхід, що приймає розглянутий матеріал, як однорідне ізотропне середовище. Про структуру матеріалу робляться лише загальні застереження. Грунтуючись на представленнях суцільності, значно облегується математичний опис плинну, можливе введення таких макроскопічних параметрів, як тиск і температура. В даний час реологічні властивості цементних розчинів, що містять дисперсну арматуру, досліджені замало і дослідники пропонують різноманітні методики для визначення цих величин [1–4].

Для одержання об'єктивних реологічних характеристик фібробетонних сумішей необхідно застосовувати віскозиметри, плин матеріалу в яких моделював би технологічний процес. Особливо ця вимога стосується процесу віброекструзійного формування виробів.

Тому виникає потреба у розробці методики визначення в'язкості фібробетонних сумішей безпосередньо в процесі віброекструзійного формування виробів залежно від конкретних параметрів вібрації обладнання, що і реалізується у статті.

Аналіз попередніх досліджень. За результатами проведених експериментальних дослідів було визначено, що віброуючі досліджувані фібробетонні суміші являють собою ньютонівські системи при амплітуді 2...5 мм і частотах коливань, які виникають при застосуванні пневматичного вібратора ІВ-29 і стандартних інерційних електричних вібраторів серії ІВ (47 Гц) [5, 6]. Зі збільшенням інтенсивності вібрації, яка залежить від амплітуди і частоти, зменшується в'язкість фібробетонної суміші. Тому для отримання об'єктивних значень в'язкості фібробетону при безпосередньому формуванні плоских виробів було запропоновано використовувати наявний віброекструдер зі щілинним вихідним отвором. В цьому випадку можна отримати кількісні фізичні реологічні характеристики за допомогою наявних теоретичних передумов [7]. Недоліком такого способу вимірювання є зменшення витрати матеріалу в торцевих зонах каналу, що не враховується при розрахунку в'язкості, і така похибка буде збільшуватися зі збільшенням відношення ширини щілинного вихідного отвору до його довжини.

В удосконаленому вібровіскозиметрі [8, 9] забезпечується відбір фібробетонної суміші з серединної частини роздавального прямокутного вікна, де відсутній вплив торцевих зон на швидкість її плинину, а отже і надається можливість коректного використання існуючої аналітичної формули, що описує плин між плоскими нерухомими стінками, які сходяться. В цьому випадку потрібен додатковий пристрій для відводу суміші з торцевих зон каналу.

Невирішеною частиною наукової проблеми є винайдення формули для коректного розрахунку в'язкості фібробетонних сумішей безпосередньо в процесі віброекструзійного формування без додаткового застосування спеціальних пристроїв.

Метою статті є отримання формули для розрахунку об'єктивних реологічних характеристик фібробетонних сумішей в процесі віброекструзії.

Виклад основного матеріалу. Запропонована формула [8] для розрахунку в'язкості фібробетонної суміші μ при віброекструзії за часом повного витікання t_v певної кількості цієї суміші між плоскими нерухомими стінками, які сходяться (розрахункова схема плинину в симетричному каналі наведена на рисунку 1):

$$\mu = \frac{\rho g L_1^2 L_2^2 (2\varphi_0 \cos 2\varphi_0 - \sin 2\varphi_0) t_v}{\sin 2\varphi_0 \cos 2\varphi_0 (L_1 + L_2) (L_1^2 - L_2^2)} \quad (1)$$

де L_1 – відстань від точки 0 (місця сходження продовження стінок) до вихідного зрізу каналу, м; L_2 – висота стовпа суміші в каналі, м; ρ – густина оброблюваної суміші, кг/м³; $g = 9,81$ м/с² – прискорення сили тяжіння; φ_0 – кут нахилу похилої стінки каналу до вертикалі, рад. ($\varphi_0 < 45^\circ$).

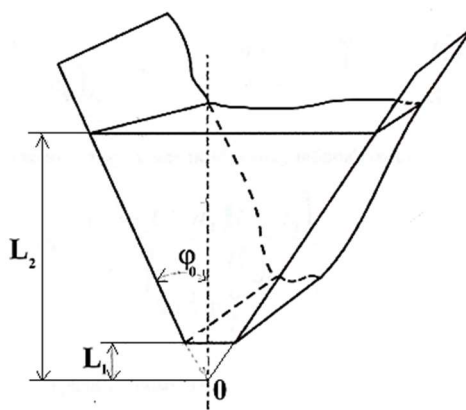


Рис. 1 – Розрахункові схема плинину у нескінченному плоскому симетричному каналі, що звужується

В процесі віброекструзії плоских виробів в торцевих зонах прямокутного каналу, що звужується (рис. 2), відбувається гальмування плинину матеріалу. Поперечний переріз такого каналу має прямокутну форму. Тому для подальшого розгляду процесу скористаємось формулою для розрахунку витрати ньютонівської рідини в прямокутному каналі [10]:

$$Q_n = \frac{WH^3}{12\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \left[1 - \frac{129H}{\pi^5 W} \sum_{i=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^5} \operatorname{th} \left(\frac{i\pi W}{2H} \right) \right], \quad (2)$$

де H – ширина поперечного перерізу прямокутного каналу, м; W – довжина поперечного перерізу прямокутного каналу, м; ΔP – перепад тиску в каналі, Па; L – довжина каналу, м.

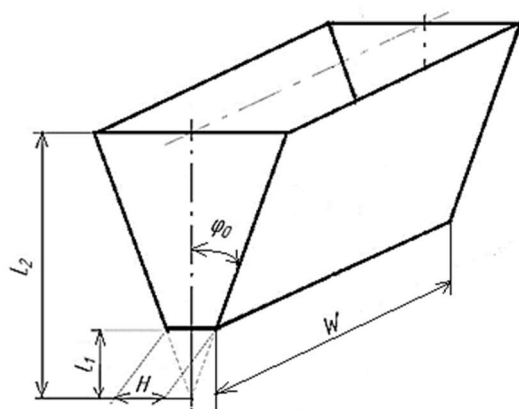


Рис. 2 – Розрахункові схема плинину у плоскому симетричному прямокутному каналі, що звужується

В той же час витрата ньютонівської рідини між паралельними пластинами на ширині H [10]:

$$Q = \frac{WH^3}{12\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (3)$$

Введемо коефіцієнт гальмування $K_\Gamma = Q_n/Q$ для визначення степеню впливу розмірів прямокутного перерізу каналу на зменшення витрати порівняно з плинном між паралельними пластинами. Для цього скористаємось формулами (2) і (3). В результаті отримаємо:

$$K_\Gamma = 1 - \frac{129H}{\pi^5 W} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{i^5} \operatorname{th} \left(\frac{i\pi W}{2H} \right) \quad (4)$$

Плоскі фібробетонні вироби найчастіше виготовляються товщиною 30...50 мм і шириною від 0,5 м до 1 м. Це відповідає співвідношенню ширини до довжини прямокутного вихідного отвору каналу, що звужується $H/W = 0,03 \dots 0,1$ (рис. 2). З урахуванням останнього і за допомогою рівняння (4) побудуємо графік залежності коефіцієнту гальмування K_Γ від співвідношення H/W (рис. 3).

За допомогою побудованого графіка залежність коефіцієнту гальмування K_Γ від співвідношення H/W в розглянутому діапазоні змінювання аргументу можна описати кубічною регресією:

$$K_\Gamma = 20,2020(H/W)^3 - 3,9394(H/W)^2 - 0,1817H/W + 0,9954, \quad (5)$$

яка набагато простіша за формулу (4). Середня похибка апроксимації при цьому дорівнює 0,0126 %.

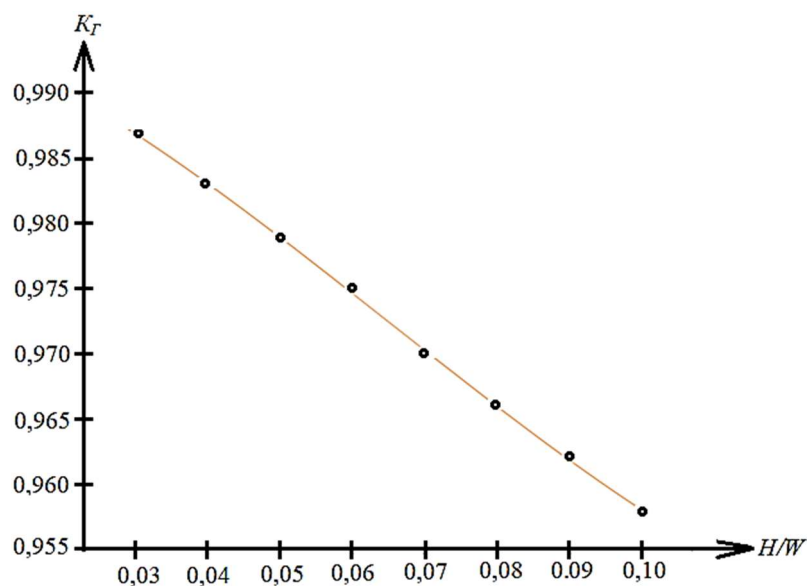


Рис. 3 – Графік залежності коефіцієнту гальмування K_G від співвідношення H/W

Враховуючи гальмування плину суміші в торцевих зонах прямокутного каналу, що звужується, запишемо формулу для розрахунку в'язкості μ за допомогою рівнянь (1) і (5). При розрахунку коефіцієнту гальмування K_G в цьому випадку в формулу (5) належить підставляти ширину H і довжину W вихідного прямокутного отвору (рис. 2).

З рівнянь (1) і (5) отримаємо:

$$\mu = \frac{\rho g L_1^2 L_2^2 (2\varphi_0 \cos 2\varphi_0 - \sin 2\varphi_0) t_B}{\sin 2\varphi_0 \cos 2\varphi_0 (L_1 + L_2)(L_1^2 - L_2^2)} K_G = \frac{\rho g t_B}{C_K} K_G,$$

де C_K – конструктивний параметр [м^{-1}], який розраховується за формулою:

$$C_K = \frac{\sin 2\varphi_0 \cos 2\varphi_0 (L_1 + L_2)(L_1^2 - L_2^2)}{L_1^2 L_2^2 (2\varphi_0 \cos 2\varphi_0 - \sin 2\varphi_0)}.$$

Таким чином вимірювання в'язкості за запропонованою формулою зводиться до фіксації часу повного витікання фібробетонної суміші з віброекструдера при формуванні плоских виробів.

Висновки. Для розгляду плину ньютонівських рідин у прямокутному каналі введено коефіцієнт гальмування K_G . Запропоновано 2 формули для розрахунку коефіцієнта гальмування. Порівняльний аналіз запропонованих формул дає гарне сходження результатів розрахунків, середня похибка апроксимації при цьому дорівнює 0,0126 %, що свідчить про високий рівень збігу рівняння регресії з більш складною аналітичною формулою. Враховуючи гальмування плину рідини в торцевих зонах прямокутного каналу була отримана формула для розрахунку в'язкості фібробетонної суміші безпосередньо в процесі віброекструзії плоских виробів залежно від конкретних параметрів вібрації обладнання. Запропоновані формулу і методику розрахунку в'язкості можна використовувати для визначення реологічних характеристик будь-яких ньютонівських рідин у плоскому симетричному прямокутному каналі, що звужується.

Перспективи подальших досліджень. У подальшому планується продовжити дослідження властивостей фібробетонних сумішей під впливом вібрації.

Список використаної літератури

1. Bentegri I., Boukendakdji O., Kadri E-H., Ngo T.T., Soualhi H. Rheological and tribological behaviors of polypropylene fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 261. Art. 119962. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006182031967X>
2. De La Rosa Ángel, Ruiz Gonzalo, Castillo Enrique, Moreno Rodrigo. Probabilistic Assessment of the Dynamic Viscosity of Self-Compacting Steel-Fiber Reinforced Concrete through a Micromechanical Model. *Materials (Basel)*. 2022. Vol. 15(8). Art. 2763. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9032889/>
3. Saruhan Vedat, Keskinates Muhammer, Felekoğlu Kamile Tosun, Felekoğlu Burak. Effect of fiber reinforcement on extrudability and buildability of mineral additive modified Portland cement mortars: A rheometer based simulation analysis. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 54. Art. 104636. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-building-engineering/vol/54/suppl/C>
4. Bian Jiwei, Fall Mamadou, Haruna Sada. Sulfate-induced changes in rheological properties of fibre-reinforced cemented paste backfill. *Magazine of Concrete Research*. 2021. Vol. 73. № 11. P. 574–583.
5. Андреев І. А. Процес віброекструзії фібробетону: монографія. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 194 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/17692>
6. Андреев І. А., Пінчук А. Є., Крамар О. В. Віброекструзійний плин бетонних сумішей у правильному чотирикутному пірамідальному каналі. Вісник національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, серія „Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження”. 2021. № 3 (20). С. 9–15.
7. Андреев І. А., Прокоф'єв К. В. Вимірювання в'язкості фібробетону при віброекструзії. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2000. № 5. С. 64–67.
8. Andreiev I. A., Kramar A. V. Improvement of measurement of viscosity of concrete mixtures during vibroextrusion. *Modern engineering and innovative technologies*. 2020. Vol. 12. № 1. P. 19–25.
9. Вібровіскозиметр для бетонних сумішей: пат. 140266 У Україна: МПК G01N 11/00 (2006.01). № u201908142; заявл. 15.07.2019; опубл. 10.02.2020, Бюл. № 3. 6 с.
10. Tadmor Zehev, Gogoc Costas G. Principles of polymer processing: monograph. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: A John Wiley & Sons Inc., 2006. XVI, 961 p.

Igor Andreiev

MEASUREMENT OF VISCOSITY DURING VIBROEXTRUSION OF FIBER CONCRETE

Currently, the rheological properties of cement mortars containing dispersed reinforcement have not been studied enough, so it is important to develop a method for measuring the viscosity of fiber concrete mixtures that would simulate the technological process.

To consider the flow process and calculate the rheological characteristics of fiber concrete mixtures during vibroextrusion, hydrodynamic theories were applied due to the fact that these mixtures behave like liquids in a vibration field. When solving flow problems, it is taken into account that vibrating fiber concrete mixtures are Newtonian systems.

To obtain objective rheological characteristics of fiber concrete mixtures, it is proposed to measure viscosity directly during vibro-extrusion molding of flat products. The peculiarities of the flow of Newtonian fluids between flat fixed walls, which converge in a flat symmetrical rectangular narrowing channel, are considered. It is proposed to determine the reduction of the flow rate of the mixture in the rectangular channel compared to the flow between the plates by the braking coefficient. A graph of the dependence of the braking coefficient on the ratio of the sides of the cross section of the rectangular channel is plotted. 2 formulas are proposed for calculating the braking coefficient.

The comparative analysis of the proposed formulas gives a good convergence of the calculation results, the average approximation error is equal to 0.0126%, which indicates a high level of coincidence of the regression equation with a more complex analytical formula.

Taking into account the inhibition of the liquid flow in the end zones of the rectangular channel, a formula was proposed for calculating the viscosity of the fiber concrete mixture during the formation of flat products in the narrowing vibroextruder channel. The calculation formula contains the geometric dimensions of the channel, the density and the flow time of the fiber concrete mixture, and to determine the viscosity of the mixture, it is necessary to measure only the time of its complete flow during vibroextrusion.

The proposed formula and methodology for calculating viscosity can be used to determine the rheological characteristics of any Newtonian fluids using a flat symmetrical rectangular narrowing channel.

In the future, it is planned to continue researching the properties of fiber concrete mixtures under the influence of vibration.

Keywords: *resource conservation, viscosity, rheology, vibroextrusion, fiber concrete*

References

1. Bentegri I., Boukendakdji O., Kadri E-H., Ngo T.T., Soualhi H. (2020). Rheological and tribological behaviors of polypropylene fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, Vol. 261. Art. 119962. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006182031967X> [In English].
2. De La Rosa Ángel, Ruiz Gonzalo, Castillo Enrique, Moreno Rodrigo (2022). Probabilistic Assessment of the Dynamic Viscosity of Self-Compacting Steel-Fiber Reinforced Concrete through a Micromechanical Model. *Materials (Basel)*, Vol. 15(8). Art. 2763. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9032889/> [In English].
3. Saruhan Vedat, Keskinates Muhammed, Felekoğlu Kamile Tosun, Felekoğlu Burak (2022). Effect of fiber reinforcement on extrudability and buildability of mineral additive modified Portland cement mortars: A rheometer based simulation analysis. *Journal of Building Engineering*, Vol. 54. Art. 104636. URL: <https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-building-engineering/vol/54/suppl/C> [In English].
4. Bian Jiwei, Fall Mamadou, Haruna Sada (2021). Sulfate-induced changes in rheological properties of fibre-reinforced cemented paste backfill. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 73. № 11. P. 574–583 [In English].
5. Andreiev I. A. Protses vibroekstruzii fibrobetonu: monohrafiia. Kyiv: NTUU «KPI», 2016. 194 s. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/17692> [In Ukrainian].
6. Andreiev I. A., Pinchuk A. Ye., Kramar O. V. Vibroekstruzijnyj plyn betonnykh sumishej u pravyl'nomu chotyrykutnomu piramidal'nomu kanali. *Visnyk natsional'noho tekhnichnoho universytetu Ukrainy “Kyivs'kyj politekhnichnyj instytut imeni Ihoria Sikors'koho”*, seriia „Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursozberezhennia”. 2021. № 3 (20). S. 9–15 [In Ukrainian].
7. Andreiev I. A., Prokofiev K. V. (2000). Vymiriuвання v'iazkosti fibrobetonu pry vibroekstruzii. *Naukovi visti NTUU «KPI»*, № 5, pp. 64–67 [In Ukrainian].
8. Andreiev I. A., Kramar A. V. (2020). Improvement of measurement of viscosity of concrete mixtures during vibroextrusion. *Modern engineering and innovative technologies*, Vol. 12, № 1, pp. 19–25 [In Ukrainian].
9. Vibroviskozometr dlia betonnykh sumishej (2020): pat. 140266 U Ukraina: MPK G01N 11/00 (2006.01). № u201908142; zaiavl. 15.07.2019; opubl. 10.02.2020, Biul. № 3, 6 p. [In Ukrainian].
10. Tadmor Zehev, Gogoc Costas G. (2006). Principles of polymer processing: monograph. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: A John Wiley & Sons Inc., XVI, 961 p. [In English].