

Л. Г. Воронін¹
 І. А. Андрєєв¹
 А. В. Копиленко¹
 Д. Ю. Шмельова¹

РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ ТЕЧІЇ НЬЮТОНІВСЬКОЇ РІДИНИ В КАНАЛАХ ДОВІЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

Отримано математичний опис течії ньютонівських рідин у різноманітних каналах, який має місце при переробці харчових продуктів, полімерних матеріалів, фібробетонних сумішей тощо. Запропоновано метод розрахунку процесу ізотермічної, ламінарної течії рідини в каналах складних поперечних перерізів. Для області з контуром криволінійної форми рівняння Нав'є–Стокса розв'язано методом скінчених різниць за припущення про нерухомість рідини біля стінок каналу. Система отриманих алгебраїчних рівнянь розв'язана методом блочної ітерації із застосуванням прогонки по рядку. Наведений метод розрахунку використано для визначення розмірів каналу віброекструдера для формування базальтофібробетонних плит покриття замість залізобетонних аналогів. При цьому забезпечена однакова продуктивність різних ділянок роздавального вікна, що припадають на одиницю відповідних площ поперечного перерізу виробів, що формуються.

Ключові слова: процес течії, ньютонівська рідина, переріз каналу, фібробетон, віброекструдер.

Вступ та постановка задачі

З'ясування особливостей течії сумішей в каналах різного поперечного перерізу необхідне під час розгляду багатьох гідромеханічних процесів, для опису змішування і виготовлення полімерних матеріалів, фібробетонних виробів при віброекструзії тощо. Течія ньютонівської рідини в каналах простої геометричної форми (круглої, кільцевої, прямокутної, щілинної у поперечному перерізі) описується відомими аналітичними рівняннями. Але на практиці багато різноманітних процесів здійснюються також і в каналах, що мають складні, часто несиметричні живі перерізи, які змінюються по довжині і це викликає значні труднощі при розробці технологічного обладнання. В таких випадках для математичного опису процесу останнім часом застосовуються чисельні методи розрахунку [1—3], які використано в цій роботі.

Відповідно до вищесказаного в роботі *поставлена задача*: створення математичну модель течії ньютонівської рідини у каналах довільного поперечного перерізу та розв'язати її на прикладі віброекструзійного формування плит покриття із фібробетонної суміші, чого раніше не було здійснено.

Математичний опис процесу

Для розв'язання задачі течії в каналі скористаємося прямокутною системою координат (x, y, z) з напрямком руху вздовж осі z .

У випадку ламінарної ізотермічної течії нестисливої ньютонівської рідини у каналі довільного поперечного перерізу рівняння Нав'є–Стокса набуде вигляду

$$\Delta U_z = \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (1)$$

де U — швидкість, м/с; μ — динамічна в'язкість рідини, Па·с; p — тиск, Па.

Для області з контуром криволінійної форми Γ :

$$U_z(x, y)|_{\Gamma} = 0. \quad (2)$$

Крайові умови задачі встановлені з припущення про нерухомість рідини біля стінок каналу.

Розв'язання задачі (1), (2) проводимо методом скінчених різниць. З цією метою введемо рівномірну по кожному напрямку різницеву сітку:

$$\bar{\omega} = \{x_i = (i-1)h; y_j = (j-1)l; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k\},$$

де h і l — кроки сітки по координатах x і y .

На сітці $\bar{\omega}$ задачі (1), (2) поставимо у відповідність різниці рівняння, апроксимуючи похідні скінчено-різницевиими співвідношеннями. Тоді в індексних позначеннях отримаємо:

$$\left[\frac{(U_{i-1,j} - 2U_{i,j} + U_{i+1,j})}{h^2} \right] + \left[\frac{(U_{i,j-1} - 2U_{i,j} + U_{i,j+1})}{l^2} \right] = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z}; \quad (3)$$

$$U_{i,j}|_{\Gamma} = 0. \quad (4)$$

У випадку області довільної форми накладаємо умову, що лінії сітки, які паралельні осі y , можуть перетинати границю Γ тільки у двох точках. Тоді систему алгебраїчних рівнянь (3), (4) можна розв'язати методом блочної ітерації із застосуванням прогонки по рядку [4].

Практичне застосування запропонованого методу розрахунку

В Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» була розроблена віброекструзійна технологія виготовлення базальтофібробетонних плит покриття (рис. 1)

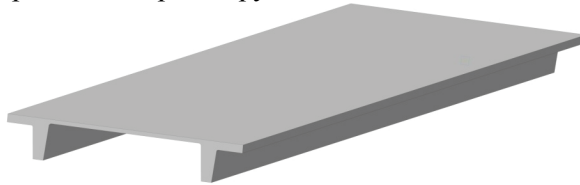


Рис. 1. Базальтофібробетонна плита покриття

замість аналогічних залізобетонних виробів 2ПГ6-3АтVт і визначені їх розміри. При цьому металева напружена арматура закладається тільки у ребрах плити, а маса плити (порівняно з залізобетонним аналогом) зменшується в 1,39 рази.

Випробування показали, що міцність виготовлених базальтофібробетонних плит покриття на руйнівне навантаження перевищує розрахункову у 1,4 рази. Але, після термовологої обробки на деяких плитах у тонкій стінці виявлялися пошкодження, які можна пояснити меншою швидкістю віброекструзії в цьому місці [5]. Тому запропоновано живий переріз роздавального вікна зменшити в місцях, де формуються ребра і торцеві стовщені частини стінки плит порівняно з відповідними ділянками поперечного перерізу цих виробів. При цьому необхідно забезпечити однакову продуктивність різних ділянок роздавального вікна (місць формування ребер, торцевих стовщених частин стінки і середньої частини стінки плит), що припадають на одиницю відповідних площ поперечного перерізу формованих виробів.

Випробування показали, що міцність виготовлених базальтофібробетонних плит покриття на

Геометрія каналу віброекструдера визначена в результаті використання запропонованого методу розрахунку. Реологічні характеристики фібробетону у вібраційному полі отримані за допомогою спеціально розроблених віскозиметрів, які моделювали процес віброекструзії суміші з грубими базальтовими фібрами [6]. В таких умовах базальтофібробетон являє собою псевдоньютонівську систему з вібров'язкістю близько 2400 Па·с. Висока вібров'язкість суміші сприяє низькій швидкості формування і ламінарній течії, що і підтверджено експериментально. Через те, що процес віброекструзії проходить безперервно без підводу і відводу теплоти, можна вважати його ізотермічним. Розрахунок швидкості, який базується на використанні зазначеного методу і врахуванні наведених припущень, дає можливість оцінити процес течії розчину в каналі віброекструдера, що має довільний поперечний переріз. Для визначення характеру зміни складової швидкості течії по перерізу каналу розроблена програма розрахунку на ПЕОМ.

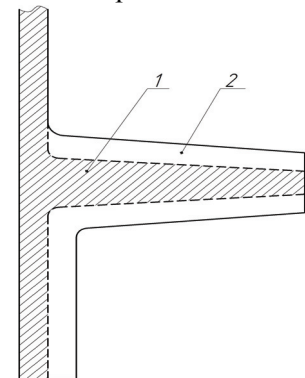


Рис. 2. Результати розрахунку живого перерізу роздавального вікна. Торцева частина: 1 — переріз роздавального вікна формуючого віброекструдера, визначеного в результаті математичного розрахунку течії (заштрихована ділянка); 2 — переріз фібробетонної плити покриття

В результаті виконаного машинного розрахунку отримані розміри роздавального вікна формувального віброекструдера для виготовлення фібробетонної плити покриття (рис. 2).

Порівняно з перерізом виробу щілини роздавального вікна зменшені у місці формування торцевих частин стінки з 50 мм до 25 мм і у місці формування нижньої частини ребер — з 65 мм до 25 мм. При цьому забезпечується однакова середня швидкість віброекструзії всіх частин плити на рівні 0,02 м/с. Вібров'язкість фібробетонної суміші для розрахунку бралася 2400 Па·с.

За результатами виконаних розрахунків запропонована до впровадження конструкція віброекструдера для виготовлення плит покриття, в якому живий переріз роздавального вікна звужений (порівняно з поперечним перерізом виробів) в місцях, де формуються ребра і торцеві стовщені частини стінки виробу [7] (рис. 3). Виходячи з роздавального вікна 3 напівфабрикат плити покриття з сформованою середньою частиною стінки укладається у вібруючу форму 5, де ребра і торцеві частини стінки плити приймають остаточну конфігурацію. При цьому виключається розрив суцільності фібробетонної суміші у плитах і, відповідно, підвищується їх якість.

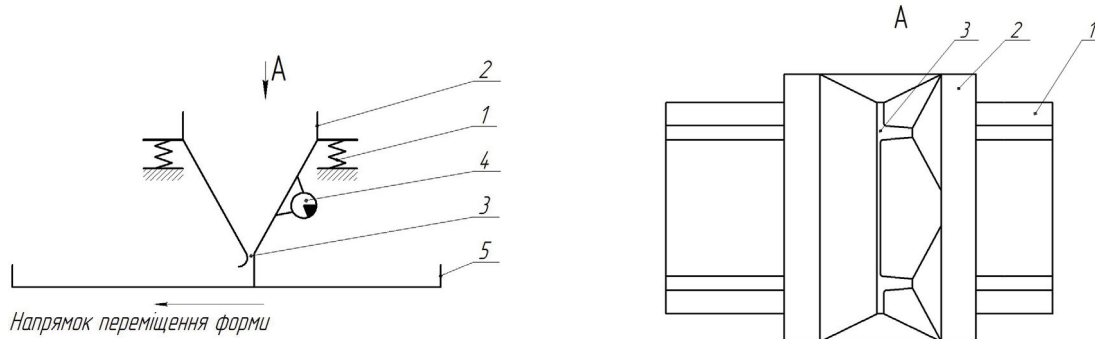


Рис. 3. Віброекструдер для формування фібробетонних плит покриття:
1 — пружні опори; 2 — бункер; 3 — роздавальне вікно; 4 — збудник коливаль; 5 — форма

Висновки

Запропонований метод розрахунку може застосовуватися для опису процесу ізотермічної, ламінарної течії ньютонівської рідини в каналах складних поперечних перерізів.

Запропонований віброекструдер пропонується для застосування при виготовленні фібробетонних плит покриття замість аналогічних залізобетонних виробів 2ПГ6-3АтVт.

У подальших дослідженнях планується розглянути особливості процесу віброекструзійного формування фібробетонних виробів іншої конфігурації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Воронін Л. Г. Фібробетон. Удосконалення процесу змішування під час віброекструзії / Л. Г. Воронін, І. А. Андреев, Г. Ю. Ан // Хімічна промисловість України : наук.-вироб. журнал. — 2013. — № 1 (114). — С. 10—12.
2. Воронін Л. Г. Процес течії цементно-піщаного розчину в каналі з поперечним перерізом у вигляді зрізаного кола / Л. Г. Воронін, І. А. Андреев, С. С. Валуйскова // Хімічна промисловість України : наук.-вироб. журнал. — 2012. — № 6 (113). — С. 12—13.
3. Воронін Л. Г. Постановка задачі течії фібробетонної суміші в каналі складного перерізу при віброекструзії / Воронін Л. Г., Андреев І. А., Гончарова І. С. // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання : V Міжнар. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених (Київ, 20—23 листопада 2013 р.) : тез. доп. — 2013. — С. 44—45.
4. Демидович Б. П. Численные методы анализа / Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. — М. : Наука, 1967. — 368 с.
5. Андреев І. А. Виготовлення фібробетонних плит покриття / І. А. Андреев, Д. Ю. Шмельова // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання : V Міжнар. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів і молодих вчених (Київ, 20—23 листопада 2013 р.) : тез. допов. — 2013. — С. 33—34.
6. Андреев И. А. Вискозиметр для виброэкструдированного фибробетона / И. А. Андреев, П. Н. Магазий // Хим. машиностроение : Респ. межвед. науч.-техн. сб. — 1987. — Вып. 45. — С. 95—99.
7. Пат. 93518 Україна, МПК (2014.01) B28B 13/00. Віброекструдер для формування фібробетонних плит покриття / Андреев І. А., Воронін Л. Г., Шмельова Д. Ю.; заявник і патентовласник вони ж. — № u201402784; заявл. 19.03.2014; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 19.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 2.04.2015

Воронін Леонід Григорович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри машин і апаратів хімічних та нафтохімічних виробництв;

Андреев Ігор Анатолійович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри машин і апаратів хімічних та нафтохімічних виробництв, e-mail: unk@kpi.ua;

Копиленко Анатолій Васильович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри машин і апаратів хімічних та нафтохімічних виробництв;

Шмельова Дар'я Юрійвна — студентка.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

L. H. Voronin¹
 I. A. Andreiev¹
 A. V. Kopylenko¹
 D. Yu. Shmeliova¹

The solution of the problem of the Newtonian fluid flow in channels with arbitrary cross-section

¹National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

The aim of this work was the mathematical description of the flow of Newtonian fluid in different channels, which occurs during the processing of food products, polymeric materials, fiberconcrete mixtures and others, the calculation method of isothermal process, laminar fluid flow in channels of complicated cross-sections. For areas with curvilinear outline form, the Navier-Stokes converted by the finite difference method, provided the stillness of the fluid in the channel walls. The system of obtained algebraic equations is solved by the method of block iteration using lessons on line. A method of calculation is used to determine the size of the channel of vibro extruder for forming basaltfibrous of the covering instead of concrete counterparts. We ensured the equal performance of different parts of the transfer window, per unit of the relevant areas of the cross-section being formed products.

Keywords: process of flow, Newtonian fluid, cross section of channel, fiberconcrete, vibro extruder.

Voronin Leonid H. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Machines and Equipment for Chemical and Petrochemical Plants;

Andreiev Ihor A. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Machines and Equipment for Chemical and Petrochemical Plants, e-mail: ynk@kpi.ua;

Kopylenko Anatolii V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Machines and Equipment for Chemical and Petrochemical Plants;

Shmeliova Dariia Yu. — Student

Л. Г. Воронин¹
 И. А. Андреев¹
 А. В. Копыленко¹
 Д. Ю. Шмелёва¹

Решение задачи течения ньютоновской жидкости в каналах произвольного поперечного сечения

¹Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Получено математическое описание течения ньютоновской жидкости в различных каналах, которое встречается при переработке пищевых продуктов, полимерных материалов, фибробетонных смесей и др. Предложен метод расчета процесса изотермического, ламинарного течения жидкости в каналах сложных поперечных сечений. Для области с контуром криволинейной формы уравнение Навье–Стокса преобразовано методом конечных разностей при условии неподвижности жидкости у стенок канала. Система полученных алгебраических уравнений решена методом блочной итерации с использованием прогонки по строке. Приведенный метод расчета использован при определении размеров канала виброэкструдера для формования базальтофибробетонных плит покрытия вместо железобетонных аналогов. При этом обеспечена одинаковая производительность разных участков раздаточного окна, приходящихся на единицу соответствующих площадей поперечного сечения формируемых изделий.

Ключевые слова: процесс течения, ньютоновская жидкость, сечение канала, фибробетон, виброэкструдер.

Воронин Леонид Григорьевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры машин и аппаратов химических и нефтехимических производств;

Андреев Игорь Анатольевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры машин и аппаратов химических и нефтехимических производств, e-mail: ynk@kpi.ua;

Копыленко Анатолий Васильевич — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры машин и аппаратов химических и нефтехимических производств;

Шмелева Дарья Юрьевна — студент