

**І.А.Андреєв**

## **ПРОЦЕС ВІБРОЕКСТРУЗІЇ ФІБРОБЕТОНУ**

*Рекомендовано Вченою радою  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»*

Київ  
НТУУ «КПІ»  
2016

УДК 532.137: 666.97

A65

*Рекомендовано до друку Вченою радою  
Національного технічного університету України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»  
(Протокол № 10 від 3 жовтня 2016 р.)*

Рецензенти:

В.В.Собченко, канд. техн. наук,  
заступник директора Інституту  
газу НАН України

Д.М.Корінчук, канд. техн. наук,  
старший науковий співробітник Інституту  
технічної теплофізики НАН України

Відповідальний редактор  
*Я. М. Корнієнко*, д-р техн. наук, професор,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

В авторській редакції

**Андрєєв І.А.**

A65

Процес віброекструзії фібробетону – К.: 2016. – 194 с.

Монографія містить основи теорії процесу віброекструзії, результати практичних дослідження формування фібробетонних виробів, методи розрахунку віброекструзійного обладнання.

УДК 532.137: 666.97

© І. А. Андрєєв, 2016

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	9
1. ЗАСТОСУВАННЯ ФІБРОВОЇ АРМАТУРИ. ТЕХНОЛОГІЧНЕ І АПАРАТУРНЕ ОФОРМЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ФІБРОБЕТОННИХ ВИРОБІВ.....	10
1.1. Використання в будівельних виробх фібр замість металевої арматури.....	10
1.2. Введення фібрової арматури в бетонну матрицю, змішування компонентів суміші.....	15
1.3. Технологічне й апаратурне оформлення процесу формування дисперсно-армованого фібрами бетону.....	17
1.4. Віброекструзія фібробетону.....	19
2. РЕОЛОГІЯ БЕТОННИХ І ФІБРОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ.....	26
2.1. Способи й устаткування для визначення реологічних властивостей бетонних і фібробетонних сумішей.....	26
2.2. Реологічні властивості бетонних і фібробетонних сумішей.....	29
3. ТЕОРІЯ ПЛИНУ ФІБРОБЕТОННОЇ СУМІШІ ПРИ ВІБРОЕКСТРУЗІЇ.....	31
4. ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ПЛИНУ ФІБРОБЕТОННОЇ СУМІШІ МІЖ ПЛОСКИМИ НЕРУХОМИМИ СТІНКАМИ, ЩО СХОДЯТЬСЯ.....	43
5. ПРОЦЕС ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ СУМІШІ ПРИ ВІБРОЕКСТРУЗІЇ.....	48

6. УДОСКОНАЛЕННЯ ВІБРОЕКСТРУЗІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ.....	55
7. РОЗРОБКА НОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ДОЗАТОРІВ-ЖИВИЛЬНИКІВ РОЗЧИНУ.....	61
8. УДОСКОНАЛЕННЯ ДОЗАТОРА-ЖИВИЛЬНИКА ФІБРОВОЇ АРМАТУРИ.....	86
9. ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІШУВАННЯ ФІБРОБЕТОННОЇ СУМІШІ.....	87
9.1. Подача фібробетонної суміші на перемішування.....	87
9.2. Удосконалення обладнання для перемішування.....	89
10. ОРІЄНТУВАННЯ ФІБР В ПРОЦЕСІ ВІБРОЕКСТРУЗІЇ.....	98
10.1. Розрахунок ступеня орієнтації дисперсної арматури при плинні фібробетону між плоскими паралельними нерухомими стінками.....	98
10.2. Розрахунок орієнтування фібр у симетричному плоскому каналі, який звужується.....	100
10.3. Забезпечення необхідної орієнтації дисперсної арматури при віброекструзії.....	104
10.4. Розрахунок ступеня орієнтування фібр у віброекструдері, який забезпечує переважно поперечне розташування дисперсної арматури у виробі.....	110
11. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВІБРОЕКСТРУЗІЇ ФІБРОБЕТОНУ ДЛЯ НЕСИМЕТРИЧНОГО КАНАЛУ, ЯКИЙ ЗВУЖУЄТЬСЯ.....	115
11.1. Процес плинну фібробетону в несиметричному каналі.....	115
11.2. Розрахунок процесу змішання фібробетонної суміші у плоскому збіжному несиметричному каналі при віброекструзії.....	119

11.3. Орієнтування фібр у плоскому збіжному несиметричному каналі при віброекструзії.....	124
12. ПРОЦЕС ПЛИНУ ФІБРОБЕТОННОЇ СУМІШІ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ ВІБРОЕКСТРУДЕРАХ.....	126
13. УДОСКОНАЛЕННЯ ВІБРОЕКСТРУЗІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ПРЯМОКУТНИХ У ПОПЕРЕЧНОМУ ПЕРЕРІЗІ ВИРОБІВ.....	130
13.1. Розрахунок перерізу формуючого мундштука віброекструдера для формування плити покриття.....	130
13.2. Віброекструдери з прямокутним роздавальним вікном.....	133
14. ВІБРОЕКСТРУЗІЯ ФІБРОБЕТОННИХ ВИРОБІВ СКЛАДНОГО ПРОФІЛЮ.....	143
14.1. Віброекструзійне формування фібробетонних швелерних виробів.....	143
14.2. Віброекструзія фібробетонних лотоків у горизонтально розташовану форму, виконану з шарнірно з'єднаних секцій.....	147
14.3. Віброекструзія фібробетонних плит покриття.....	148
15. ПРОЦЕС ФОРМУВАННЯ ФІБРОБЕТОННИХ ТРУБ.....	159
15.1. Конструкції віброекструдерів для формування фібробетонних труб.....	159
15.2. Фізична модель процесу віброекструзії.....	162
15.3. Математична модель процесу віброекструзії.....	164
15.4. Експериментальні дослідження процесу віброекструзії .....	177
Список посилань.....	180

## ПЕРЕЛІК ПОЗНАЧЕНЬ

$a$  – амплітуда, м;

$a_o$  – мінімально допустима амплітуда, яка забезпечують плин бетонних сумішей в умовах вібрації, м;

$d$  – діаметр фібр, м;

$E_m$  – модуль пружності в умовах розтягу бетонної матриці, МПа;

$E_\phi$  – модуль пружності в умовах розтягу матеріалу фібр, МПа;

$F_C$  – сила опору, Н;

$F \gamma$  – інтегральна функція розподілу деформацій;

$f$  – частота, Гц;

$f_o$  – мінімально допустима частота, яка забезпечують плин бетонних сумішей в умовах вібрації, Гц;

$H$  – менша сторона прямокутного каналу, м;

$h$  – половина ширини щілини, м;

$I$  – складова рівняння для визначення вібров'язкості;

$j$  – кут, град.;

$L$  – довжина каналу, м;

$L_1$  – відстань від початку координат до вихідного перерізу каналу, що звужується, м;

$L_2$  – відстань від початку координат до рівня рідини в каналі, що звужується, м;

$\ell$  – довжина фібр, м;

$\ell$  – довжина плоскої щілини, м;

$m$  – індекс підсумовування;

$m_k$  – масова доля зерен заповнювача, більших 4 мм;

$m_s$  – масова доля зерен заповнювача, менших 4 мм;

$n$  – індекс підсумовування;  
 $P$  – тиск, МПа;  
 $q$  – об'ємна витрата, м<sup>3</sup>/с;  
 $q_c$  – об'ємна витрата через одиницю ширини каналу, що звужується, м<sup>3</sup>/с;  
 $R$  – внутрішній радіус каналу круглого перерізу, м;  
 $R_1$  – внутрішній радіус на вході у конус, м;  
 $R_2$  – внутрішній радіус на виході з конусу, м;  
 $R_6$  – більший радіус круглого кільцевого каналу, м;  
 $R_m$  – менший радіус круглого кільцевого каналу, м;  
 $R_c$  – радіус сферичного тіла, м;  
 $r$  – поточний радіус каналу, м;  
 $t_c$  – час перебування рідини в плоскому каналі, який звужується, с;  
 $U$  – швидкість на осі каналу (або максимальне значення швидкості у плоскій щілині), м/с;  
 $U_c$  – швидкість руху сферичного тіла, м/с;  
 $U_{cp}$  – середня швидкість руху у збіжному каналі, м/с;  
 $U_r$  – радіальна швидкість, м/с;  
 $U_\varphi$  – окружна швидкість руху у збіжному каналі, м/с;  
 $u$  – швидкість плинину рідини, м/с;  
 $u_{r,cp}$  – середня по довжині каналу, що звужується, швидкість віброекструзії, м/с;  
 $u_{z\max}$  – максимальна швидкість плинину рідини у напрямку осі  $z$ , м/с;  
 $W$  – більша сторона прямокутного каналу, м;  
 $\Delta p$  – перепад тиску, Па;  
 $\alpha$  – кут нахилу фібр по товщині виробу відносно осі формування, рад.;  
 $\alpha, \alpha_o$  – коефіцієнт тиксотропії;  
 $\bar{\alpha}$  – середнє значення кута нахилу фібр, рад.;

$\beta$  – кут нахилу фібр відносно осі  $r$  в циліндричній системі координат, рад;  
 $\delta$  – модуль фібрового армування;  
 $\gamma$  – деформація зсуву;  
 $\gamma_i$  – кут повороту фібри від горизонтального положення, рад;  
 $\bar{\gamma}_c$  – середнє значення деформації зсуву в каналі, що звужується;  
 $\bar{\gamma}_c \varphi$  – середня по довжині каналу, що звужується, деформації зсуву;  
 $\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву, 1/с;  
 $\dot{\gamma}_{c,sp}$  – середня по довжині каналу, що звужується, швидкість зсуву, 1/с;  
 $\varepsilon$  – відносна деформація елементарного шару суміші;  
 $\lambda$  – коефіцієнт;  
 $\mu$  – в'язкість системи, Па·с;  
 $\mu_B$  – вібров'язкість системи, Па·с;  
 $\mu_m$  – найменша в'язкість гранично зруйнованої структури, Па·с;  
 $\mu_0$  – найбільша в'язкість практично незруйнованої структури, Па·с;  
 $\xi_v$  – кількість фібр, % об.;  
 $\xi_{v,max}$  – максимально можлива кількість фібр, % об.;  
 $\rho_M$  – густина матеріалу бетонної матриці, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho_\Phi$  – густина матеріалу фібр, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\tau$  – напруження зсуву, Па;  
 $\tau_0$  – граничне напруження зсуву, Па;  
 $\varphi$  – поточний кут нахилу стінки до вертикалі, рад;  
 $\varphi_0$  – кут нахилу стінки до вертикалі, рад;  
 $\varphi_1, \varphi_2$  – кути нахилу до вертикалі проєкцій поточного радіуса  $r$  на площини  $yoz$  і  $xoz$ , відповідно, град.



## ВСТУП

Фібробетонні вироби в наш час широко використовуються замість їх бетонних і залізобетонних аналогів. Застосування традиційного обладнання заводів збірного залізобетону для змішування фібр з розчином або бетоном і подальшого формування з цієї суміші виробів безперспективно через особливості армованого фібрами матеріалу. Спеціально розроблені способи також мають свої недоліки і не завжди забезпечують ефективне використання дисперсної арматури. Через це, в результаті виконаних в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» пошукових робіт, був запропонований спосіб віброекструзійного формування, який дозволяє формувати вироби без руйнування і грудкування дисперсної арматури і з забезпеченням необхідної орієнтації фібр.

В монографії розглядається сучасний стан виготовлення бетонних виробів з фібровою арматурою, реологічні властивості формуємих сумішей, подані результати теоретичних і практичних досліджень процесу віброекструзії плоских, профільних і трубчатих фібробетонних виробів, наведені конструкції запропонованого обладнання.

# **1. ЗАСТОСУВАННЯ ФІБРОВОЇ АРМАТУРИ. ТЕХНОЛОГІЧНЕ І АПАРАТУРНЕ ОФОРМЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ФІБРОБЕТОННИХ ВИРОБІВ**

## **1.1. Використання в будівельних виробих фібр замість металеві арматури**

Одним з напрямків зниження енергоємності і матеріалоемності є використання принципово нових конструкційних матеріалів, які перевищують за своїми властивостями застосовні в наш час.

Основними матеріалами сучасного будівництва є бетон і залізобетон. Бетон, поряд з незаперечними перевагами (високі міцність на стискання, атмосферостійкість, технологічність, низька вартість), має ряд істотних недоліків: низькі міцність на розтягання, ударна в'язкість, опір стиранню. Для поліпшення роботи бетону в зоні, яка розтягується, встановлюється металева арматура. Однак, у тонкостінних конструкціях це не завжди можна виконати через те, що для уникнення корозії арматури необхідно забезпечити належний захисний бетонний шар товщиною 20-30 мм.

Низька міцність бетону на розтяг приводить до ранньої появи тріщин у залізобетонних конструкціях і зниженню експлуатаційної надійності, а підвищення марки бетону від М100 до М600 дає збільшення міцності на розтяг тільки в три рази.

Дисперсне армування бетону є сучасним напрямком покращення практично всіх його основних фізико-механічних характеристик за рахунок залучання фібр у спільну роботу з бетоном при виникненні напружень.

Використання фібр для покращення властивостей різних матеріалів відомо з давніх часів. У Фінляндії були знайдені гончарні вироби, армовані азбестовими волокнами, які відносяться до 2500 року до нашої ери. Більше 3000 років тому джут і кінський волос використовувались для скріплення розчину. Джут – однорічна волокниста рослина з родини липових, яка найбільш поширена в Індії. Волокна джуту добре фарбуються. Застосовується для виготовлення тари (мішків), брезентів, канатів, оббивних тканин і т. ін.

Прикладом також може бути саман (висушена на повітрі, але необпалена цегла з глини і різаної соломи) і шифер (будівельні вироби з цементного розчину з азбестовим волокном).

У 1907-1908 р. р. В.П.Некрасовим були виконані перші наукові дослідження по рівномірному армуванню об'єму бетону відрізками дроту малого діаметру з метою придання йому якісно нових властивостей. Через низький рівень розвитку техніки в той час дисперсно-армований бетон не отримав розповсюдження.

У 1941 р. А.К.Буров вперше запропонував армувати бетон скляними волокнами.

Комерційне застосування армованих фібрами цементуючих матеріалів, за виключенням азбестоцементу, почалось у 60-х роках 20 століття.

Розширення виробництва і застосування конструкцій з дисперсно-армованих бетонів є важливим резервом зниження вартості будівництва, економії трудовитрат, підвищення експлуатаційної надійності і довговічності будівельних конструкцій. Дисперсне армування підвищує не тільки міцність бетону, але, і що особливо важливо, поліпшує експлуатаційні характеристики конструкцій, наприклад, стійкість до

динамічних впливів, температури, вологи, зносу і т. ін., що дозволяє одержати істотний економічний ефект при виробництві й експлуатації фібробетонних конструкцій.

В наш час, для армування бетону (цементу), досліджуються і застосовуються фібри зі сталі, скла й інших мінеральних матеріалів (базальту, вуглецю, шлаку, кварцу, кераміки), із полімерів (поліпропілену, нейлону, віскози, поліаміду, поліетилену, полікристаліну, капролактаму), органічних матеріалів (оброблених волокон технічних агав, бавовни, джуту, пеньки, целюлози).

Запропоновано розділяти фібри на 2 категорії залежно від їхнього модуля пружності :

- 1 – низькомодульні (нейлон, поліпропілен, поліетилен і т. ін.);
- 2 - високomodульні (сталь, азбест, скло, базальт, вуглець).

Армування низькомодульними фібрами, що сильно розтягуються, не веде до збільшення міцності композиції в умовах розтягу і вигину (деякі дослідники стверджують, що ці показники навіть знижуються), але веде до здатності добре поглинати енергію. При цьому також знижується стирання бетонного матеріалу.

Фіброва арматура другої категорії поліпшує опір фібробетону як удару, так і розтягу (вигину) тим значніше чим більше співвідношення модулів пружності фібр і матриці  $E_f/E_m$  за інших рівних умов.

Фізико-механічні характеристики композиційного матеріалу залежать від способу його виготовлення, віку, умов витримки, властивостей дисперсної арматури і поліпшуються при збільшенні кількості фібр, їх довжини і при зменшенні їх діаметра і водоцементного співвідношення. Позитивний вплив на властивості фібробетону дає також рівномірний розподіл і орієнтація фібр уздовж напрямку розтягуючи

напружень у виробі, більш високі міцність бетонної матриці і зусилля зчеплення фібр з матрицею. Але збільшення вмісту фібр у композиційному матеріалі можливе до визначеної межі, яка лімітована можливостями технологічного способу виготовлення, після чого спостерігається зниження однорідності і підвищення пористості фібробетону.

Якщо дисперсна арматура не перекриває одна одну по довжині виробу, композиція зміцнюватися не буде. Кращі результати при однаковому проценті армування дає використання більш довгих і тонких фібр через їх більшу питому поверхню і, відповідно, більшу площу контакту з матрицею.

Використання дисперсної арматури у ряді випадків дозволяє підвищити границю міцності матеріалу в умовах розтягу у 1,5 – 6 разів, при вигині – у 1,5 – 5 разів, при стиску – на 15 – 90 %, опір тріщиноутворенню – у 2 – 5 разів, ударну в'язкість – у 3–35 разів, опір стиранню – у 2–4 рази, морозостійкість – у 2–4 рази. Крім цього відзначене збільшення водонепроникності і опору вибуховому навантаженню. При армуванні неорганічними фібрами зростає вогнестійкість у 3–20 разів, відсутня схильність до гниття, пліснявіння, поразці шкідниками і композиція не розкладається при впливі радіації [1].

Наведені властивості фібробетону дозволяють його ефективно використовувати в якості покриттів для автомобільних доріг, аеродромів і танкодромів, стінових панелей, плит покриття, підвісних стель, сферичних оболонки, панелей огороження, сходових маршів, повітроводів, облицьовувальних елементів будов, віконних рам, перемичок, підвіконь, підлог промислових будов, труб, оголовок забивних паль, корпусів суден, резервуарів для нафти, виробів для гідротехнічного і гідромеліоративного

будівництва, шпал, сховищ вибухових речовин, банківських будов, печей і котлів, силосів для зберігання зерна, звукозахисних екранів.

Досвід практичного застосування показує, що використання фібробетону технічно і економічно доцільно у ряді конструкцій, особливо тонкостінних, за рахунок високої міцності композиції.

Заміна фібробетоном армоцементу або звичайного залізобетону дозволяє ліквідувати арматурні роботи, зменшити металоємність і матеріалоємність конструкцій.

Порівняно з азбестоцементними виробами аналогічні фібробетонні мають більш високу ударну в'язкість. Крім того, при цьому ліквідується обмеженість сировинних джерел і шкідлива дія азбесту на організм людини.

### **Металеві фібри**

Значно поширені для армування спеціально виготовлені різноманітні металеві фібри, які характеризуються підвищеною міцністю зчеплення з бетонною матрицею. Але, при цьому витрачається доволі багато металу більш високої вартості і більш дефіцитного порівняно зі звичайною стержневою арматурою. Для захисту від корозії металевих фібр необхідно передбачити бетонний захисний шар товщиною 2–5 мм., що обмежує створення тонкостінних конструкцій.

### **Неметалеві фібри**

У зв'язку зі збільшенням дефіциту сталі найбільш перспективним є армування неметалевими фібрами.

Основна частина світового виробництва цементу припадає на портландцемент, але лужне середовище (рН 12–13), що утворюється при його гідратації неминує руйнує фібри із скла, бавовни, віскози, акрилу,

поліестеру, у меншій мірі – із базальту. Ефективність використання саме базальтових фібр, як найкращих з класу неметалевої дисперсної арматури підтвердили результати останніх дослідів, які були проведені в Інституті електрозварки ім. Е.О.Патона НАН України, НДІСК, КНУСА і закордоном [2].

Для фібрової арматури були спеціально розроблені лугостійкі склади скла, які містять велику кількість  $ZrO_2$ . Використовуються також різні захисні покриття для дисперсної арматури. Встановлено, що фібри з діаметром більше 25 мкм більш стійкі в середовищі портландцементного каменю.

## **1.2. Введення фібрової арматури в бетонну матрицю, змішування компонентів суміші**

При виготовленні фібробетону найбільш складним у технологічному плані є рівномірне введення по всьому об'єму бетонної матриці необхідної кількості фібр. При використанні традиційних змішувачів бетону або розчину гравітаційної і примусової дії спостерігається утворення характерних скупчень фібрової арматури у вигляді грудок, що ускладнює подальші операції, а в окремих випадках призводить до дроблення фібр і, в остаточному підсумку, погіршує якість виробів.

Для поліпшення перемішування збільшують водоцементне відношення (В/Ц), додають поверхнево-активні речовини (окис поліетилену, метилцелюлозу), дотримують визначеної черговості завантаження компонентів суміші, накладають обмеження на параметри фібрової арматури і час перемішування, покривають волокна спеціальними складами, фібри вводять у змішувач за допомогою різного типу

спеціальних роздавальників. Однак, проведення наведених операцій не завжди приводить до очікуваного ефекту.

У результаті добавки фібр, що принципово відрізняються від компонентів бетонної матриці, виникає ряд технологічних проблем. Особливості фібробетонного матеріалу вимагають створення спеціального змішувального устаткування.

В даний час одержала поширення технологія розпилення-усмоктування (spray-suction), при якій цементний розчин з В/Ц=0,5-0,6 подається через сито у лійку частини насоса, що розприскує. Відрізки фібр безпосередньо з пристрою, що ріже, ежектуються в потік розчину, де і відбувається процес змішування. Недоліком способу є високе водовміст суміші.

До числа спеціально розроблених змішувачів відносяться також апарати зі спіралью-вихровим потоком руху матеріалу, що змішується, в еластичному корпусі; з інерційно-імпульсним механізмом обертання, що забезпечує розбивання грудок і з імпульсним впливом лопатей на бетон під час уведення фібрової арматури для зниження в'язкості суміші. Ці мішалки розроблені для визначеного типу фібр і характеризуються дискретністю роботи.

К.Комлошем, на основі власних випробувань, був уточнений вираз Еджингтона, Ханнанта і Уільямса для визначення максимально можливої кількості фібр, які вводяться у бетон традиційними методами, перевищення якого робить суміш практично необроблюваною:

$$\xi_{v,\max} = \lambda \frac{\rho_{\Phi} \cdot d \cdot m_s}{\rho_M \cdot \ell \cdot (n_s + m_k)} \quad (1.1)$$



де  $\xi_{v,\max}$  – максимально можлива кількість фібр, в об'ємних процентах;  
 $\rho_{\Phi}, \rho_M$  – густина, відповідно, фібр и матриці, кг/м<sup>3</sup>;  $d, \ell$  – діаметр і довжина фібр, м;  $m_s, m_k$  – масові долі зерен заповнювача, менших и більших 4 мм, відповідно.

Залежно від матеріалу фібрової арматури коефіцієнт  $\lambda$  приймає такі значення: для сталі – 55, для скла – 80, для базальту – 160.

При визначенні залежності (1.1) використовувались витрати цементу - 250...450 кг/м<sup>3</sup> бетону; В/Ц=0,32...0,7; сталеві фібри діаметром  $2 \cdot 10^{-4}$  м і  $3 \cdot 10^{-4}$  м і довжиною, відповідно,  $2 \cdot 10^{-2}$  м і  $3 \cdot 10^{-2}$  м в кількості 0,25...1% по об'єму; скляні волокна типу Е в кількості 0,03...0,5% и базальтові фібри в кількості 0,1...1%.

Для характеристики перемішування сталевих фібр у стандартних бетонозмішувачах Л.Г.Курбатовим і В.П.Романовим запропоновано використовувати модуль фібрового армування  $\delta$ :

$$\delta = \frac{\xi_v \cdot \ell}{d},$$

де  $\xi_v$  - кількість фібр, в об'ємних процентах.

Тільки у випадку  $\delta \leq 2...2,5$  вдавалося отримувати однорідну суміш без грудок фібр.

### **1.3. Технологічне й апаратурне оформлення процесу формування дисперсно-армованого фібрами бетону**

Формування фібробетону відноситься до нового напрямку промисловості і вимагає подальшого удосконалювання. Однак, поки питанням технології фібробетонних виробів приділяється значно менше уваги, чим дослідженню властивостей цього композиційного матеріалу.

При традиційному виготовленні у формі фібри безладно орієнтуються в матриці. Відоме використання різних способів підведення вібрації до матеріалу. Перевага віддається зовнішній вібрації через стінки форми, що забезпечує більш високу міцність затверділої композиції.

При використанні ковзного віброштампу утворюються розриви у матеріалі.

На стандартних віброплощадках достатнього ущільнення можна досягти тільки у випадку високого вмісту води у суміші. При цьому можливе деяке розшарування матеріалу.

Кращі результати були отримані при використанні віброкатка.

При формуванні пресуванням необхідно надлишкову воду видаляти під час процесу.

Недоліком лиття під тиском є наявність включень повітря, що важко видалити з виробів через присутність фібрової арматури.

Труби діаметром менше 0,2 м виготовляють методом навивання. Для виготовлення труб більших діаметрів використовують центрифугування, при якому суміш збезводнюється і ущільнюється під дією відцентрових сил.

Шнекова екструзія забезпечує безупинний процес формування й орієнтацію фібр. Однак, при цьому спостерігається опливання екструдату, яке не можна усунути збільшенням вмісту добавки, що ущільнює, а також має місце втягнення повітря, що викликає розширення виробів при їхньому виході з насадки.

Представлені вище способи формування накладають обмеження на обсяг фібр, що може бути включений у композиційний матеріал.

Спеціально розроблений для виготовлення фібробетонних виробів метод розпилення-усмоктування дозволяє збільшити кількість дисперсного

матеріалу в матриці. У цьому випадку потік змішаного цементного тіста з відрізками фібр необхідної довжини наноситься на покриту папером перфоровану металеву лицьову поверхню форми, що відсмоктується. Оператор регулює нанесення матеріалу на форму, забезпечуючи необхідну товщину виробу. Надлишкова вода із суміші віддаляється вакуумуванням через дно форми, що виконує роль фільтра. При використанні розпилення-усмоктування вдається одержати дуже тонкий шар матеріалу товщиною  $(2...3) \cdot 10^{-3}$  м з однорідним розподілом фібр. Спосіб забезпечує довільну двоспрямовану орієнтацію фібр у композиції, придатний для формування широкої номенклатури виробів. Однак, при набризку бетону необхідно збільшувати кількість фібр стосовно розрахункового через те, що при попаданні суміші на місце укладання майже 1/3 дисперсної арматури відскакує.

При застосуванні методу роздільного укладання фібрового матеріалу і дрібнозернистого бетону можна використовувати необмежені по довжині фібри. але, при цьому, істотним недоліком є шаруватість виробів.

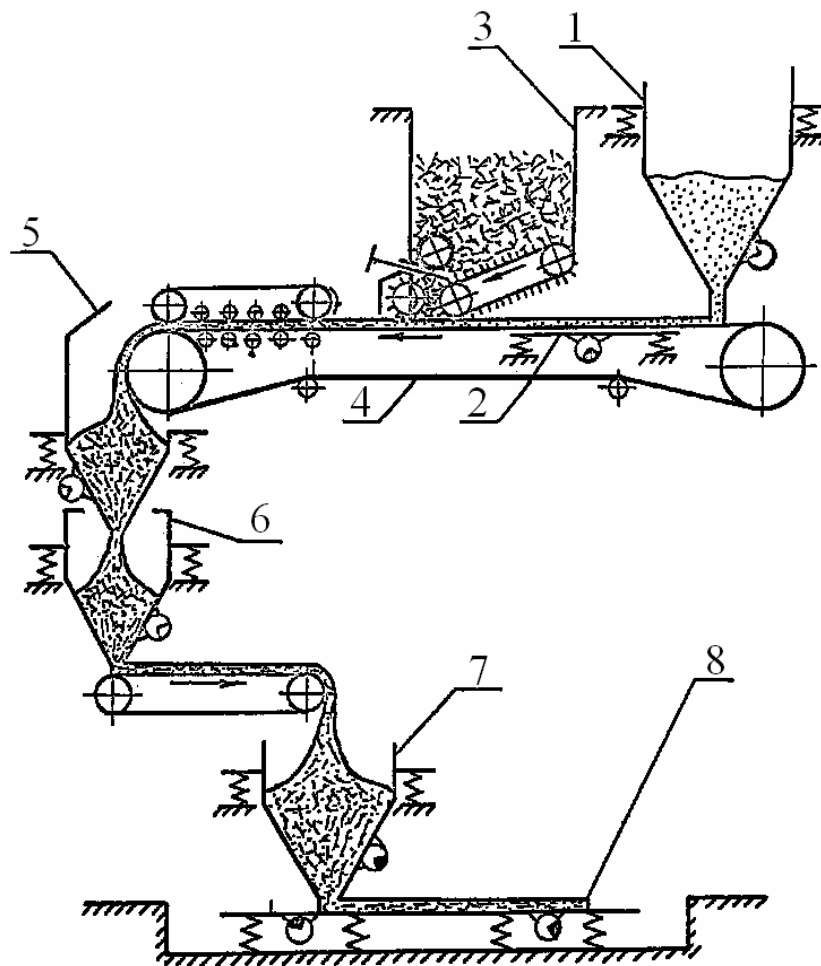
Порівняльні випробування, проведені А.Дж.Маджумдаром і Р.У.Нурсом, показали, що найбільша міцність спостерігалася у зразках, які виготовлені методом розпилення-усмоктування і екструзії, що пояснюється, в основному, ефектом орієнтування фібрової арматури.

#### **1.4. Віброекструзія фіробетону**

Значне зниження в'язкості матриці, при якому можливо здійснювати її армування будь-якими фібрами при знижених водоцементних відношеннях і без використання поверхнево – активних речовин можна досягти застосуванням віброекструзійного способу формування, розробленого в НТУУ "КПІ". Крім того віброекструзійний спосіб дає

можливість орієнтувати фібри вздовж осі формування, тобто більш ефективно використовувати армуючі властивості фібр і виготовляти більш тонкостінні вироби порівняно з традиційною технологією.

Базова установка віброекструзії (рисунок 1.1) складається з дозаторів-живильників цементного розчину 1 і фібр 3, вібростола 2, конвеєра 4, трьох віброекструдерів (двох, що змішують 5, 6 і формуючого 7), форми 8 [3].



1 – дозатор-живильник цементного розчину; 2 – вібростол; 3 – дозатор-живильник фібр; 4 – конвеєр; 5, 6 – віброекструдери, що змішують; 7 – формуючий віброекструдер; 8 – форма

Рис. 1.1. Установка віброекструзії

Установка віброекструзії призначена для відпрацювання технології формування фібробетонних виробів у промислових умовах і випуску дослідних партій виробів для потреб сільського будівництва.

Пересувна віброекструзійна установка (ВЕУ) змонтована на самохідному шасі і складається з дозаторів-живильників цементного розчину 1 і грубого мінерального волокна 3, вібростолу 2, конвеєра 4, каскаду віброекструдерів (двох що змішують 5, 6 і формуючого 7), електроустаткування.

На ділянці одержання тонкого шару розчину цементний розчин з живильника-дозатора 1 витікає на транспортерну стрічку у вигляді чотирьох джгутів регульованого перерізу. Цементні джгути під дією вібрації, яка передається від вібростолу 2, розтікаються по всій ширині стрічки, утворюючи шар розчину товщиною  $2...8 \cdot 10^{-3}$  м.

Живильник-дозатор розчину складається з пірамідальної ємності, звареної з листової сталі ( $0,85 \text{ м}^3$ ), вібратора ІВ-22, пружинної підвіски, звареної рами. Нижня частина ємності виконана з твердої гуми, у якій прорізані чотири вертикальні щілини, що закриваються шиберами із гвинтовим механізмом регулювання.

Продуктивність ділянки одержання тонкого шару розчину, забезпечується зміною живого перерізу щілин шиберами і швидкістю конвеєрної стрічки і варіюється в межах  $1,4...14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ .

Дозатор-живильник грубого базальтового волокна 3 забезпечує безупинну рівномірну подачу фібр на шар розчину, що рухається.

Основною частиною дозатора-живильника грубого мінерального (базальтового) волокна є бункерна ємність, днище якої виконане у вигляді

похилого транспортера зі спеціальною голчатою стрічкою шириною 0,65 м.

Над приводним барабаном транспортера усередині ємності встановлений голчастий барабан, що обертається назустріч напрямку руху стрічки. На виході з дозатора-живильника є розпушуючий голчастий барабан (швидкість обертання  $8,5 \text{ хв}^{-1}$ ).

Продуктивність дозатора-живильника волокна регулюється шибером з ручним гвинтовим приводом і швидкістю транспортера і складає  $0,08 \dots 0,7 \text{ кг/с}$ .

Конвеєр 4 призначений для подачі шару розчину з розподіленими і зафіксованими на ньому волокнами в перший віброекструдер каскаду, що змішує.

Конвеєр має привід з регулюванням швидкості транспортерної стрічки шириною 0,65 м від 0,05 до 1,5 м/с.

На ділянці фіксації волокон у розчині притискна стрічка встановлена з можливістю регулювання вихідного отвору і кута нахилу стрічки щодо конвеєра.

Віброекструдери, що змішують, призначені для змішування розчину з волокнами.

Перший віброекструдер 5 складається зі звареного пірамідального бункера висотою 0,5 м, встановленого стаціонарно на пружинах під приводним барабаном конвеєра. Вібратор ІВ-104 жорстко закріплений на передній стінці бункера. Розмір вихідного отвору віброекструдера регулюється шибером з ручним гвинтовим приводом. На рамі з боків бункера встановлені два ударники, що представляють собою ексцентрикові механізми з бойками, які працюють синхронно від одного приводу.

Другий віброекструдер, що змішує 6 по конструкції аналогічний першому, має додатково стрічковий роздавальний транспортер.

Кут повороту роздавального транспортера встановлюється, виходячи з умови забезпечення рівномірного завантаження формуючого віброекструдера по всій його ширині. Привід хитання здійснюється від редуктора приводу роздавального транспортера.

У формуючому віброекструдері 7 здійснюється остаточне змішування фібр з розчином і формування необхідного профілю. Формуючий віброекструдер установлений на пружинній підвісці в прорізі піднімальної силової рами і складається з корпуса коробчастого перерізу і змінної формуючої голівки висотою 0,5 м. Підйом і опускання силової рами здійснюється в направляючих за допомогою лебідки. Вертикальна вібрація надається двома спеціальними синхронізованими вібраторами, ударні коливання – двома синхронізованими ударниками, встановленими по торцях силової рами.

Самохідне шасі призначене для розміщення на ньому вузлів установки і переміщення ВЕУ по рейковому шляху. Самохідне шасі являє собою зварений портал з приводом переміщення. На верхній рамі порталу розміщується площадка для обслуговування ВЕУ і розміщення агрегатів установки. Привід переміщення забезпечує робочу швидкість формування  $4 \dots 25 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$  з безступінчастим регулюванням і транспортне переміщення установки з постійною швидкістю 0,42 м/с.

Для включення приводу в режим робочого ходу використовується електромагнітна багатодискова муфта з дистанційним керуванням.

Для варіанта розміщення ВЕУ в безкрановому цеху шасі обладнано підйомником для металевої форми з виробом.

Електроустаткування забезпечує роботу машини в режимах ручного і напівавтоматичного керування.

Продуктивність ВЕУ по фібробетону,  $\text{м}^3/\text{с}$  – до  $1,4 \cdot 10^{-3}$ .

Габаритні розміри ВЕУ, м:

висота – 4,6;

довжина – 8,1;

ширина – 3,4;

Ширина колії – 2,9 м.

ВЕУ працює в складі технологічної лінії по виробництву будівельних виробів із дрібнозернистого бетону, армованого мінеральними волокнами, розміщеної на території заводу.

Технологічна лінія складається з вузла приготування розчину, контейнерів для розчину і мінерального волокна, парку металевих форм, вантажопідіймального устаткування і, власне, пересувної віброекструзійної установки.

Приготування розчину здійснюється на існуючому розчинобетонному вузлі. Готовий розчин у кубелі доставляється до виробничого корпусу в зону дії баштового крана і подається в дозатор-живильник розчину ВЕУ.

Мінеральне волокно (грубе базальтове) перевантажується з контейнера у відповідний дозатор-живильник ВЕУ. Підготовлена форма 8 (рис.1.1) баштовим краном встановлюється на шляху руху установки. ВЕУ піднімає форму, транспортує в цех і встановлює на віброплощадку.

Після закінчення циклу формування ВЕУ знімає форму з виробом з вібромайданчика і транспортує її з цеху. Потім баштовим краном форма з виробом подається на тепловолоту обробку в пропарювальну камеру.



На установці можна формувати незамкнуті профілі розміром до  $0,6 \times 1,5 \times 0,3$  м.

Віброекструзійна технологія дозволяє:

- виготовляти полегшені порівняно з залізобетонними аналогами будівельні вироби з повною чи частковою заміною металевої арматури фібрами;

- орієнтувати фібри вздовж осі формування та у такий спосіб підвищити ефективність їх використання;

- здійснити ефективне змішання компонентів суміші;

- виключити грудкування чи руйнування фібр при змішуванні і формуванні;

- підвищити максимальну кількість ефективно використовуваних фібр у виробах, відповідно, у 6 і 2 рази порівняно з традиційним формуванням і спеціально розробленим і застосовуваним за кордоном методом розпилення-усмоктування;

- підвищити щільність кінцевого продукту;

- переробляти композиції з низьким водоцементним відношенням;

- використовувати будь-який тип фібрової арматури, у тому числі і відходи виробництва;

- здійснити беззупинний процес виробництва.

Технологія і обладнання віброекструзійного виготовлення фібробетонних виробів, які були використані в базовій установці, захищені авторськими свідоцтвами СРСР №№ 644621, 1217672.

## **2. РЕОЛОГІЯ БЕТОННИХ І ФІБРОБЕТОННИХ СУМІШЕЙ**

При практичному визначенні реологічних властивостей бетонних (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 облегшується математичний опис плинину, можливе введення таких макроскопічних параметрів, як тиск і температура.

У розділі розглядається реологія свіжеприготованих сумішей.

### **2.1. Способи й устаткування для визначення реологічних властивостей бетонних і фібробетонних сумішей**

Г.Х.Таттерсел запропонував наступну класифікацію термінів, що використовуються для опису реологічних властивостей бетонної суміші: якісна, кількісна емпірична і кількісна фізична характеристики. Якісні характеристики (рухливість, ущільнюваність, стабільність, перекачуваність і т. ін.) використовуються тільки для опису якісного стану суміші без кількісних оцінок. Кількісні емпіричні характеристики (осад конуса, коефіцієнт ущільнення, час по приладу Вебе, показник розпливу і т. ін.) застосовуються як кількісні оцінки для безпосередніх цілей виробництва. Якісні фізичні характеристики (в'язкість, плинність, границя плинності, консистенція) використовуються тільки у відповідності зі стандартними реологічними визначеннями.

Для визначення кількісних емпіричних реологічних характеристик у Європі використовуються близько 30 різних приладів, причому деякі з них лише в окремих країнах чи окремими фірмами чи лабораторіями.

Найбільш прийнятними для фібробетону є методи Вебе і Скрамтаєва, причому в більшості випадків першому методу необхідно віддати перевагу.

Спосіб, запропонований Б.Г.Скрамтаєвим передбачає установку у форму 0,2 x 0,2 x 0,2 м стандартного конуса (використовуваного при визначенні осаду конуса), наповненого досліджуваною сумішшю. Після зняття конуса бетон піддається вібрації доти, поки поверхня суміші не стане горизонтальною. Тривалість вібрування в секундах приймається за міру твердості.

Прилад Вебе (Vebe), розроблений В.Банером, відрізняється від попереднього лише тим, що використовується не кубічна, а циліндрична форма.

Недоліками приладів такого типу є їхня нечутливість до розшарування бетонної суміші і труднощі оцінки з їхньою допомогою бетонів, що вимагають незначного чи тривалого вібрування .

Для рішення прикладних задач необхідне знання кількісних фізичних характеристик, які визначаються за допомогою віскозиметрів.

За принципом дії і конструкцією віскозиметри для бетонних сумішей підрозділяються на ротаційні і капілярні, засновані на принципі простого зсуву в зазорі і на визначенні динаміки чи спливання зануреного сферичного тіла у вимірюваній суміші.

Простотою характеризується метод, заснований на визначенні динаміки спливання (чи занурення) сферичного тіла у дисперсну систему, що вібрує. Використання методу ґрунтується на застосуванні закону Стокса, справедливого тільки для повільного руху частки малого діаметра при ламінарному обтіканні тіла рідиною:

$$F_C = -6\pi\mu_B R_C U_C, \quad (2.1)$$

де  $F_C$  – сила опору руху сферичного тіла, Н;  $\pi = 3,14159$ ;  $\mu_B$  – вібров'язкість системи, Па·с;  $R_C$  – радіус сферичного тіла, м;  $U_C$  – швидкість руху сферичного тіла, м/с.

Рівняння (2.1) справедливо лише для ньютонівських середовищ і тому використання його без доказу ньютонівського поведіння досліджуваних систем при визначених режимах вібрації вносить помилки в кінцевий результат. Спосіб не дозволяє і змінювати швидкість зсуву  $\dot{\gamma}$  в широких межах і не враховує приєднану до сфери масу рідини.

Капілярні віскозиметри засновані на примусовому чи вільному (за рахунок гравітаційних сил) витіканні досліджуваної системи через капіляри різної форми. Для визначення в'язкості необхідно зробити вимір об'ємного витрати матеріалу в каналі віскозиметра при різних перепадах тиску.

При використанні щілинних вібровіскозиметрів можлива поява кінцевого ефекту, що виявляється у відриві суміші за рахунок власної ваги від верхньої поверхні горизонтального щілинного каналу.

Для одержання об'єктивних реологічних характеристик, останнім часом, загальною тенденцією є вишукування можливостей використання для цих цілей віскозиметрів, плин матеріалу в яких моделював би процес переробки. Найбільш надійними і простими приладом для бетонних сумішей, що дозволяють проводити виміру в широкому діапазоні швидкостей зрушення, що зустрічаються в практиці, є капілярні віскозиметри (вібровіскозиметри). Однак, при їх використанні треба враховувати відзначені недоліки, а для фібробетонних сумішей необхідні

більш надійні способи визначення реологічних характеристик, що враховують особливості використовуваного матеріалу .

## **2.2. Реологічні властивості бетонних і фібробетонних сумішей**

У розгляданих системах після затвору цементу водою відбувається утворення коагуляційної структури, міцність якої визначається відстанню між вузлами і товщиною рідкого прошарку. Дрібнозернисті бетонні суміші і цементні розчини характеризуються змінною в'язкістю, що змінюється залежно від діючого напруження зсуву і градієнта швидкостей від найбільшої в'язкості практично незруйнованої структури  $\mu_0$  до найменшої в'язкості гранично зруйнованої структури  $\mu_m$ . Повні реологічні криві плинні цих структурованих систем являють собою S-подібні криві Оствальда. Повільний плин з постійною в'язкістю  $\mu_0$  відбувається при додаванні до матеріалу напруження, що не перевищує границі міцності структури. При дуже повільному плинні структура або зовсім не руйнується, або якщо і руйнується, то встигає знову відновитися за рахунок броунівського руху. При подальшому підвищенні напруження зсуву руйнування структури перевищує її відновлення за рахунок броунівського руху, в'язкість починає падати до найменшої величини  $\mu_m$ , залишаючись далі постійною. В'язкість гранично зруйнованої структури визначається в'язкістю рідкого середовища і порівняно з нею декілька підвищена, через те, що рідина загущена рівномірно розподіленими в ній уламками зруйнованої структури.

В обмеженому діапазоні швидкостей зсуву бетонні суміші і цементно-піщані розчини, які не знаходяться під дією вібрації, апроксимують моделлю Шведова-Бінгама ( $\tau - \tau_0 = \mu \dot{\gamma}$ ), Кассона

$(\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau_0} = \mu\dot{\gamma})$  чи, в окремих випадках, моделлю Ньютона ( $\tau = \mu\dot{\gamma}$ ), де  $\tau$  – напруження зсуву, Па;  $\tau_0$  – граничне напруження зсуву, Па;  $\dot{\gamma}$  – швидкість зсуву, 1/с;  $\mu$  – в'язкість системи, Па·с.

Повна реологічна крива плинності цих систем при вібрації з постійною частотою  $f$  й амплітудою  $a$  є пряма, що виходить з початку координат  $(\tau, \dot{\gamma})$ , тобто бетонні вібруючі і попередньо ущільнені суміші без фібрової арматури подібні ньютонівським рідинам.

Накладення вібраційного поля на структуровану систему приводить до руйнування структурної сітки по менш міцних зв'язках. З підвищенням інтенсивності вібрації руйнується частина агрегатів і вивільняється іммобілізована вода, що приводить до подальшого зниження вібров'язкості системи, що залишається постійною при даних параметрах вібрації.

Для визначення вібров'язкості бетонних сумішей ряд авторів пропонують формули такої структури:

$$\mu_B = \mu_m + \frac{\alpha}{I},$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт тиксотропії,  $I$  – складова рівняння для визначення вібров'язкості.

Значення складової  $I$  прирівнюється прискоренню коливань, швидкості коливань або інтенсивності вигляду  $\varepsilon f^3$ , де відносна деформація елементарного шару суміші  $\varepsilon$  є відношенням різниці амплітуд зміщення границь шару до його товщини. Елементарним вважається шар, у якого зміна динамічних тисків по його товщині не перевищує 10-15%.

Я. Годкін пропонує таку експериментально визначену залежність:

$$\mu^{-1} = \alpha_0 (f - f_0) (a - a_0),$$

де  $a_o$  і  $f_o$  – відповідно, мінімально допустимі амплітуда (м) і частота (Гц), які забезпечують плин бетонних сумішей всіх досліджених автором сумішей в умовах вібрації;  $\alpha_o$  – коефіцієнт тиксотропії.

В якості оцінювання інтенсивності вібрації бетону приймаються прискорення  $af^2$ , потужність вібрації  $a^2f^3$  та інші параметри віброколивань.

А. Афанасьєв вважає, що на вібров'язкість бетонних сумішей суттєво впливають параметри прискорення, частоти і віброшвидкості, з яких домінуючим є прискорення.

Таким чином, існують суперечливі думки про вплив параметрів вібрації на віброреологічні властивості досліджуваних систем з подібними складами.

Відома обмежена кількість праць, де реологічні властивості фібробетонних сумішей визначались у вигляді якісної фізичної характеристики – вібров'язкості. Вимірювання були виконані на приладі типу Вейлера-Ребіндера для деяких складів і параметрів вібрації і показали ньютонівську і бенгамівську поведінку системи [1].

Було встановлено, що фібробетонні суміші при віброекструзії за умови застосування визначених параметрів вібрації являють собою псевдоньютонівські системи [4].

### **3. ТЕОРІЯ ПЛИНУ ФІБРОБЕТОННОЇ СУМІШІ ПРИ ВІБРОЕКСТРУЗІЇ**

Коли бетонна суміш, що знаходиться під впливом вібрації, поводить подібно рідини, найбільш придатними для розрахунку процесів і реологічних характеристик є гідродинамічні теорії.

При вирішенні задач плин у враховується, що, вібруючі бетонні суміші являють собою псевдоньютонівські системи. Крайові умови задач встановлюються з умови нерухомості рідини біля стінок каналу.

Нижче представлені рівняння сталого ламінарного ізотермічного плин у нестисливої ньютонівської рідини в різних каналах.

### Плоска щілина

При плин в плоскій щілині (плоский пуазейлевий плин) шириною  $2h$ , у якій вісь  $Z$  збігається з віссю симетрії потоку, рівняння для розподілу швидкостей приймає вигляд:

$$u_y = -\frac{1}{2\mu} \cdot \frac{dP}{dz} (h^2 - y^2) .$$

### Прямокутний канал

У випадку плин ньютонівської рідини у прямокутному каналі зі сторонами  $W$  і  $H$  у напрямках  $x$  і  $y$  (прямокутні координати  $(x,y,z)$ ) рівняння Нав'є - Стокса було реалізовано двома шляхами.

Використовуючи метод поділу перемінних шляхом введення двох нових функцій формулу для швидкості течії рідини  $u_z$  у напрямку осі  $z$  подано спочатку у вигляді:  $u_z = v(x,y) + \phi(y)$  і визначивши функцію  $\phi(y)$  рівнянням  $\partial^2 \phi / \partial y^2 = 1/\mu \cdot \partial p / \partial z$  [5, 6] була отримана залежність:

$$u_z = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \left[ \frac{y}{2} (y - H) + \frac{4H^2}{\pi^3} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} \cdot \sin\left(\frac{n\pi y}{H}\right) \cdot \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{n\pi\left(x - \frac{W}{2}\right)}{H}\right)}{\operatorname{ch}\left(\frac{n\pi W}{2H}\right)} \right], \quad (3.1)$$



де  $p$  – тиск, Па;  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості, Па·с.

У працях Х. Рауза [7], а також Дж. Хаппеля і Г. Бренера [8] подається вирішення задачі за допомогою введення функції

$\psi = u_z + \frac{1}{4\mu} \cdot \frac{dp}{dz} (x^2 + y^2)$ , що задовольняє двовимірному рівнянню Лапласа

$$\partial^2 \psi / \partial x^2 + \partial^2 \psi / \partial y^2 = 0:$$

$$u_z = \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{dp}{dz} \cdot y \cdot y - H + \sum_{m=1}^{\infty} \sin\left(\frac{m\pi y}{H}\right) \left( A_m \operatorname{ch}\left(\frac{m\pi x}{H}\right) + B_m \operatorname{sh}\left(\frac{m\pi x}{H}\right) \right), \quad (3.2)$$

$$\text{де } A_m = -\frac{2H^2}{\mu m^3 \pi^3} \cdot \frac{dp}{dz} \cos m\pi - 1, \quad B_m = -\frac{A_m \left( \operatorname{ch}\left(\frac{m\pi W}{H}\right) - 1 \right)}{\operatorname{sh}\left(\frac{m\pi W}{H}\right)}.$$

Результати цих рішень відрізняються за формою. Складність отриманих формул призвела до помилок у згаданих працях. Так, у книзі З.Тадмора і К.Гогоса [5] у формулі (3.1) пропущена двійка у знаменнику аргументу гіперболічного косинуса  $\operatorname{ch}\left(\frac{n\pi W}{2H}\right)$ , а у праці Дж. Хаппеля і Г. Бренера [8] пропущена двійка у чисельнику при розрахунку величини  $A_m$  (формула (3.2)).

Крім того, спроба розрахунку по цим формулам показала обмеженість їх застосування. Здавалося, що при наявності обчислювальної техніки не повинно виникати проблем при обчисленні. Але, як з'ясувалося, треба обережно підходити до розрахунків через те, що індекси підсумовування  $n$  і  $m$  у формулах (3.1) і (3.2) не можуть бути необмеженими. Так, чим більше відношення  $W/H$ , тим менші значення індексів підсумовування дозволяють отримувати вірні результати. Наприклад, при визначення максимальної швидкості течії рідини  $u_{z \max}$  (що

має місце всередині прямокутного каналу) при  $H = 0,04$  м,  $W/H = 10$ ,

$$\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} = 1 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}, \quad \pi = 3,14159 \quad \text{за допомогою програми Mathcad}$$

розрахунки здійснюється до  $n = 22$  і  $m = 8$ . Якщо  $m = 9$ , тоді розрахунок за формулою (3.2) дає невірний результат, причому похибка дуже велика і похибка буде завжди виникати, маючи для кожного конкретного випадку свої «критичні» значення індексу  $m$ . Розрахунки на алгоритмічній мові QBASIC виконується тільки до  $n = 4$  і  $m = 2$  включно. При розгляді процесу течії поблизу стінок каналу застосування формул (3.1) і (3.2) ще більш обмежуються.

Таким чином, розрахунок по відомих з літературних джерел формулам без попереднього їх аналізу може призвести до отримання помилкових результатів. Тому і виникла потреба знайти надійну і просту методику розрахунку цього виду течії.

В теорії надійності імовірність безвідмовної роботи системи з основним з'єднанням елементів (коли кожний елемент впливає на надійність системи) розраховується як добуток ймовірностей безвідмовної роботи елементів [9]. Застосуємо такий самий підхід для випадку, що розглядається.

При течії у плоскій щілині (плоска паузейлева течія) шириною  $H$ , в якій вісь  $z$  збігається з віссю симетрії потоку (прямокутні координати  $(x, y, z)$ ), рівняння для розподілу швидкостей набуває вигляду:

$$u_z = -\frac{H^2}{8\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \left[ 1 - \left( \frac{2y}{H} \right)^2 \right]. \quad (3.3)$$

Максимальна швидкість течії між паралельними пластинами буде при  $y = 0$ :  $u_{z(y=0)} = -\frac{H^2}{8\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}$ . Тоді рівняння (3.3) можна записати ще і у такому вигляді:

$$u_z = u_{z(y=0)} \left[ 1 - \left( \frac{2y}{H} \right)^2 \right]. \quad (3.4)$$

З формули (3.4) видно, що вплив стінок на зменшення швидкості течії рідини при віддалині від центру плоского каналу характеризується величиною  $\left[ 1 - \left( \frac{2y}{H} \right)^2 \right]$ .

При застосуванні каналу прямокутного перерізу маємо взаємний вплив вже двох пар плоских поверхонь. Тому, врахуємо цей вплив, як це робиться у теорії надійності і запишемо формулу для швидкості течії рідини  $u_z$  у такому вигляді:

$$u_z = u_{z \max} \left[ 1 - \left( \frac{2x}{W} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( \frac{2y}{H} \right)^2 \right], \quad (3.5)$$

де  $u_{z \max}$  – максимальна швидкість в центрі прямокутного каналу.

Розрахункова схема течії рідини в каналі прямокутного поперечного перерізу подана на рис. 3.1. Для зручності розрахунку початок прямокутних координат  $(x, y, z)$ , на відміну від відомих розглядів, вибрано у центрі прямокутного перерізу каналу.

У формулі (3.5) кожна квадратна дужка характеризує вплив відповідної пари плоских поверхонь каналу прямокутного перерізу.

Використовуючи відомі формули (3.1), (3.2) і запропоновану формулу (3.5), побудуємо графіки розподілу відносних швидкостей  $\frac{u_z}{u_{z \max}}$  на однаковій відстані  $\frac{H}{2}$  від пари плоских поверхонь і по діагоналі каналів:

- 1) квадратного перерізу зі стороною  $H = 0,04$  м (рис. 3.2, 3.3),

2) прямокутного перерізу з відношенням сторін  $W/H = 5$  при  $H = 0,04$  м (рис. 3.4, 3.5).

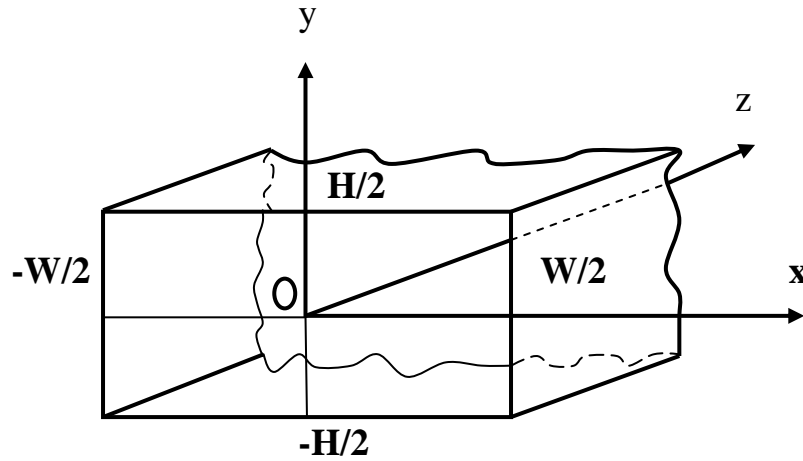


Рис. 3.1. Розрахункова схема течії рідини в каналі прямокутного поперечного перерізу

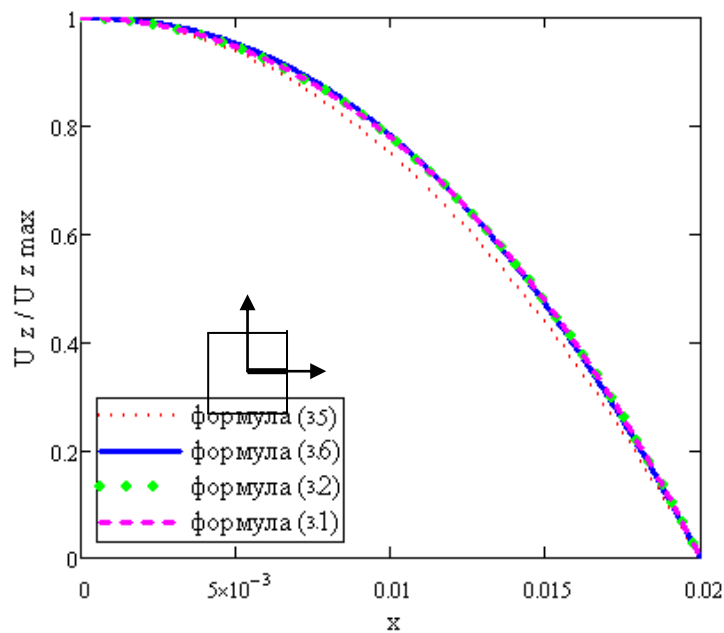


Рис. 3.2. Розподіл відносних швидкостей  $u_z / u_{z \max}$  на однаковій відстані  $H/2$  від пари плоских поверхонь каналу квадратного поперечного перерізу

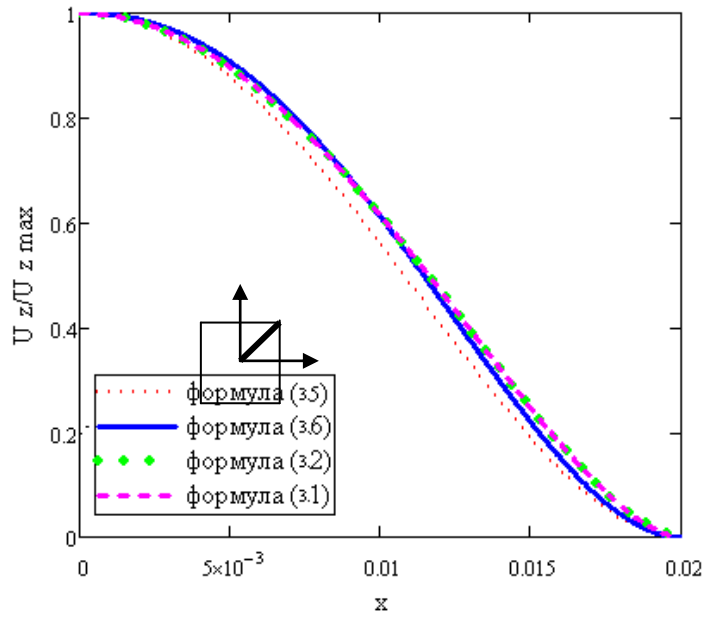


Рис. 3.3. Розподіл відносних швидкостей  $\frac{u_z}{u_{z \max}}$  по діагоналі каналу квадратного поперечного перерізу

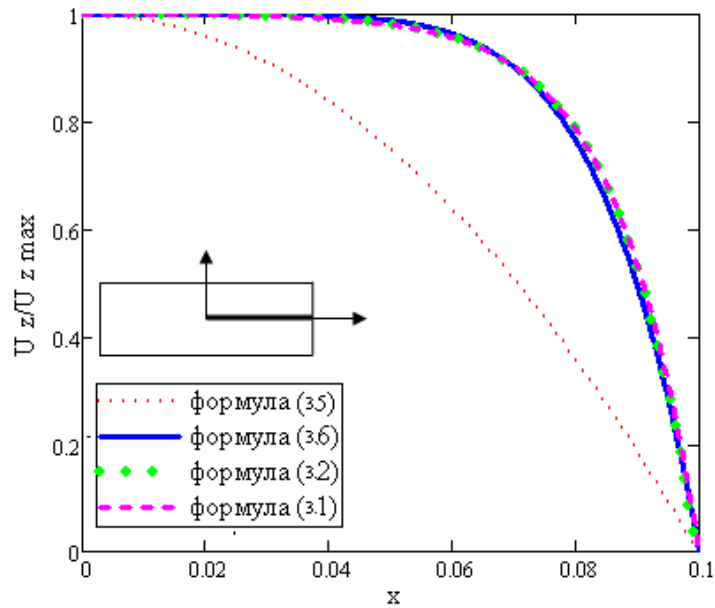


Рис. 3.4. Розподіл відносних швидкостей  $\frac{u_z}{u_{z \max}}$  на однаковій відстані  $\frac{H}{2}$  від пари плоских поверхонь каналу прямокутного перерізу з відношенням сторін  $\frac{W}{H} = 5$

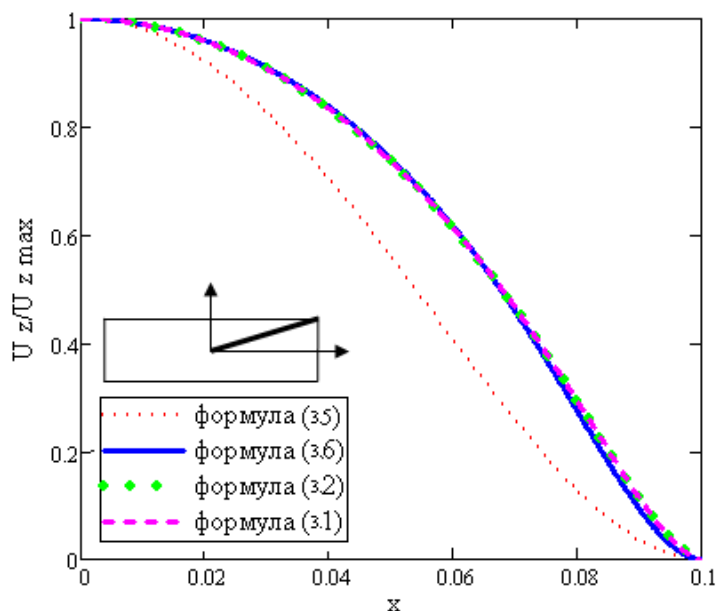


Рис. 3.5. Розподіл відносних швидкостей  $\frac{u_z}{u_{z\max}}$  по діагоналі каналу прямокутного перерізу з відношенням сторін  $\frac{W}{H} = 5$

З рисунків 3.2 – 3.5 видно, що криві, які побудовані за рівнянням (3.5) і відомими аналітичними формулами (3.1), (3.2) близькі за конфігурацією для каналів квадратного поперечного перерізу, але при збільшенні відношення  $\frac{W}{H}$  збільшуються і розбіжності між кривими. Дійсно, так і при розрахунку віброекструзійного мундштука для формування плоского виробу чисельним методом [10] було визначено значне зменшення швидкості течії суміші тільки біля торцевих зон, подібне до результатів, які отримані за допомогою формул (3.1) і (3.2).

Тому було запропоновано вирази  $\left(\frac{2x}{W}\right)$  і  $\left(\frac{2y}{H}\right)$  у формулі (3.5) підносити не до других степенів, а до показників  $i$  і  $j$ , які змінюються залежно від відношення  $\frac{W}{H}$  за графіками (рис. 3.6, 3.7), а саму формулу записати у вигляді:

$$u_z = u_{z \max} \left[ 1 - \left( \frac{2x}{W} \right)^i \right] \left[ 1 - \left( \frac{2y}{H} \right)^j \right] \quad (3.6)$$

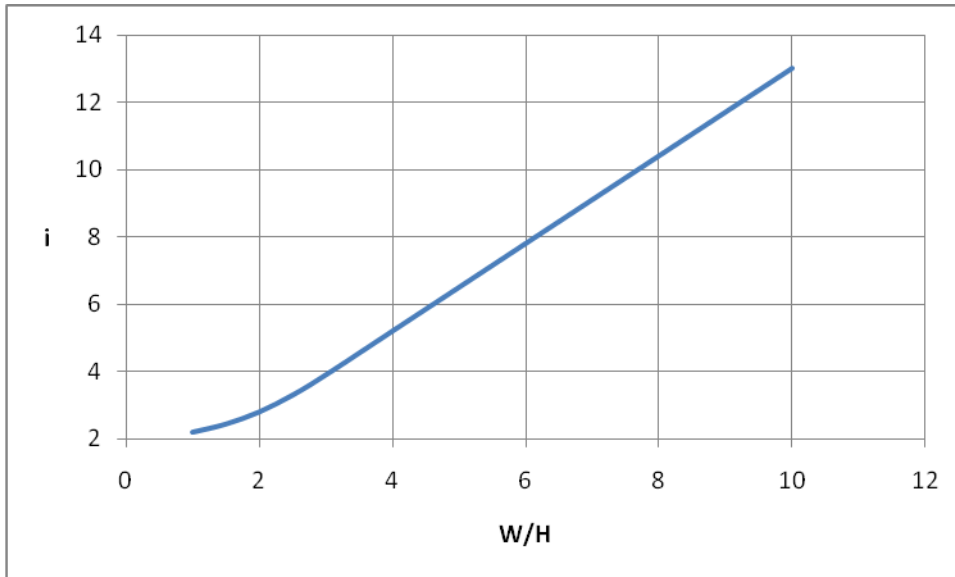


Рис. 3.6. Залежність показника степеня  $i$  від відношення  $W/H$

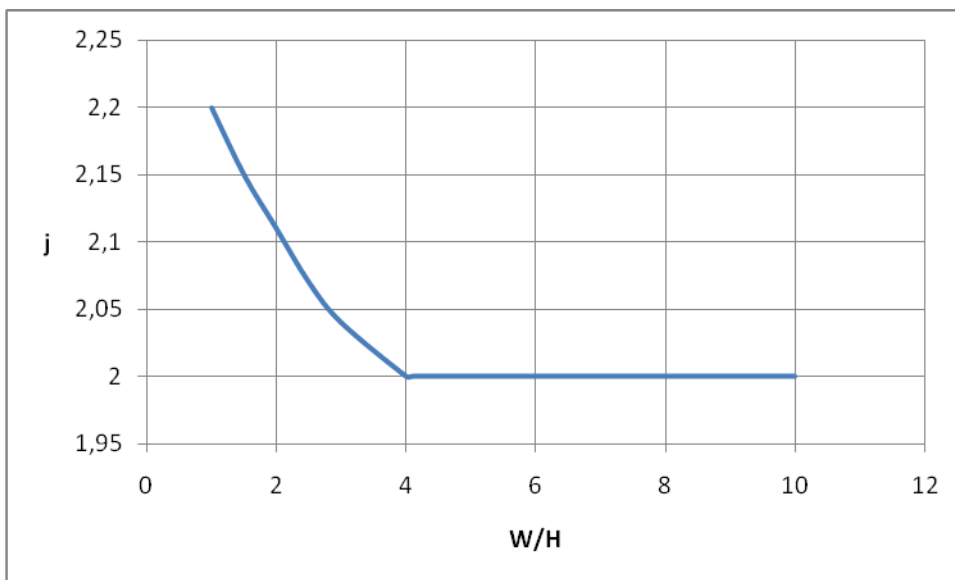


Рис. 3.7. Залежність показника степеня  $j$  від відношення  $W/H$

Показник степеня  $i$  при  $1 \leq W/H \leq 3$  можна розрахувати також за формулою  $i = 0,2457 \left(\frac{W}{H}\right)^2 - 0,1309 \frac{W}{H} + 2,084$  (величина достовірності апроксимації  $R^2 = 1$ ), а при  $W/H \geq 3$   $i = 1,3 \frac{W}{H}$ .

Показник степеня  $j$  при  $1 \leq W/H \leq 4$  розраховується за формулою  $j = 0,0129 \left(\frac{W}{H}\right)^2 - 0,1311 \frac{W}{H} + 2,3185$  (величина достовірності апроксимації  $R^2 = 0,9997$ ), а при  $W/H \geq 4$   $j = 2$ .

Запропонована формула (3.6) дає результат близький до кривої, яка побудована за відомими аналітичними формулами (3.1), (3.2). Величина достовірності апроксимації  $R^2$  (рис. 3.2 – 3.5) знаходиться у діапазоні 0,997-0,999.

Запропонована спрощена формула дозволяє без особливих труднощів виконати розрахунок процесу течії у прямокутному каналі. При цьому виключаються помилки, які можуть виникнути при розрахунку за відомими аналітичними залежностями через їх складність і обмеженість застосування. Так, при побудові графіків на рисунках 3.4 і 3.5 за формулою (3.2) при використанні програми Mathcad правильні результати були отримані коли індекс підсумовування  $m$  не перевищував 2.

Отримана формула зручна для подальшої математичної обробки, що дозволяє виконати, наприклад, розрахунок процесу ламінарного конвективного змішування у прямокутному каналі і т. ін.



Для розрахунку процесу течії за допомогою запропонованої формули необхідно знати величину максимальної швидкості рідини в центрі каналу  $u_{z \max}$ , яку можна визначити наступним чином:

1) для відношення сторін прямокутного каналу  $W/H \geq 5$  можна застосувати просту формулу (3.3), що описує плоску Пуазейлеву течію рідини;

2) за аналітичною формулою (3.1), яка має менші обмеження застосування і не дає похибки порівняно з формулою (3.2);

3) за результатами експериментальних досліджень.

Впровадження запропонованої формули для опису ізотермічної ламінарної усталеної течії нестисливої ньютонівської рідини дозволяє значно спростити розрахунки різноманітних гідродинамічних процесів у прямокутних каналах при низьких значеннях числа Рейнольдса, коли не виникають так звані «повзучі течії». Формула зручна для подальшої математичної обробки, не має обмежень у застосуванні на відміну від відомих залежностей (3.1) і (3.2) [11].

### **Круглий канал постійного поперечного перерізу**

Плин у прямому каналі круглого поперечного перерізу у напрямку осі  $Z$  являє собою вид потоку Хагена-Пуазейля:

$$u(r) = -\frac{1}{4\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} (R^2 - r^2),$$

де  $R$  – внутрішній радіус каналу круглого перерізу, м;  $r$  – поточний радіус круглого каналу, м.

## Круглий кільцевий канал постійного поперечного перерізу

Формули для розрахунку швидкості  $u_z$  і об'ємної витрати  $q$  мають вигляд [12, 13, 14]:

$$u_z = -\frac{1}{4M} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \left[ R_6^2 - R_M^2 \frac{\ln \frac{r}{R_M}}{\ln \frac{R_6}{R_M}} - r^2 - R_M^2 \right],$$

$$q = -\frac{p}{8M} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \left( R_6^2 - R_M^2 \left[ R_6^2 + R_M^2 - \frac{R_6^2 - R_M^2}{\ln \frac{R_6}{R_M}} \right] \right),$$

де  $R_6$  – більший радіус круглого кільцевого каналу, м;  $R_M$  – менший радіус круглого кільцевого каналу, м;  $r$  – поточний радіус круглого кільцевого каналу, м.

## Конічний канал

У випадку ізотермічного плинуньютонівської рідини за рахунок перепаду тиску  $\Delta p$  у конічному каналі довжиною  $L = L_2 - L_1$  (рис. 3.8) формули для розрахунку радіальної швидкості  $u_r$  [8] і витрати  $q$  [5] мають вигляд:

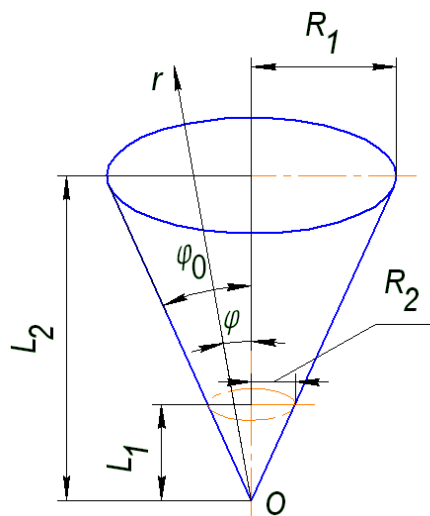


Рис.3.8. Розрахункова схема плинуньютонівської рідини в конічному каналі

$$u_r = \frac{3q}{2\pi r^2} \cdot \frac{\xi^2 - \xi_0^2}{(1 + 2\xi_0)(1 - \xi_0)^2},$$

$$q = \frac{3\pi\Delta p}{8\mu L} \cdot \frac{R_1^3 R_2^3}{R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2},$$

де  $\xi = \cos\varphi$ ,  $\xi_0 = \cos\varphi_0$ ;  $\varphi_0$  – кут нахилу стінки до вертикалі, рад;  $R_1$  і  $R_2$  – внутрішні радіуси, відповідно, на вході у конус і на виході з конусу, м.

Формулу для визначення радіальної швидкості  $u_r$  можна записати у вигляді:

$$u_r = \frac{c \cos^2 \varphi - \cos^2 \varphi_0}{r^2},$$

де  $c = \frac{3q}{2\pi(1 + 2\xi_0)(1 - \xi_0)^2}$ .

#### **4. ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ПЛИНУ ФІБРОБЕТОННОЇ СУМІШІ МІЖ ПЛОСКИМИ НЕРУХОМИМИ СТІНКАМИ, ЩО СХОДЯТЬСЯ**

В процесі віброекструзії за допомогою традиційного обладнання плин суміші здійснюється у плоскому симетричному каналі, який звужується. При цьому фібробетон ущільнюється і не виникає розриву суцільності матеріалу.

Рішення задачі плинку ньютонівської рідини між плоскими нерухомими стінками, що сходяться, дані в роботах Сльозкіна і Шліхтинга [15, 16]. У цьому випадку рівняння Нав'є - Стокса і нерозривності в циліндричних координатах  $(r, \varphi, z)$  приймають вигляд:

$$\begin{cases} \rho u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} = \rho g_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{\mu}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \mu \frac{u_r}{r^2} + \frac{\mu}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \varphi^2}; \\ 0 = \rho g_\varphi - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \frac{2\mu}{r^2} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial \varphi}. \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} = 0. \quad (4.2)$$

Розрахункова сема процесу наведена на рис. 4.1.

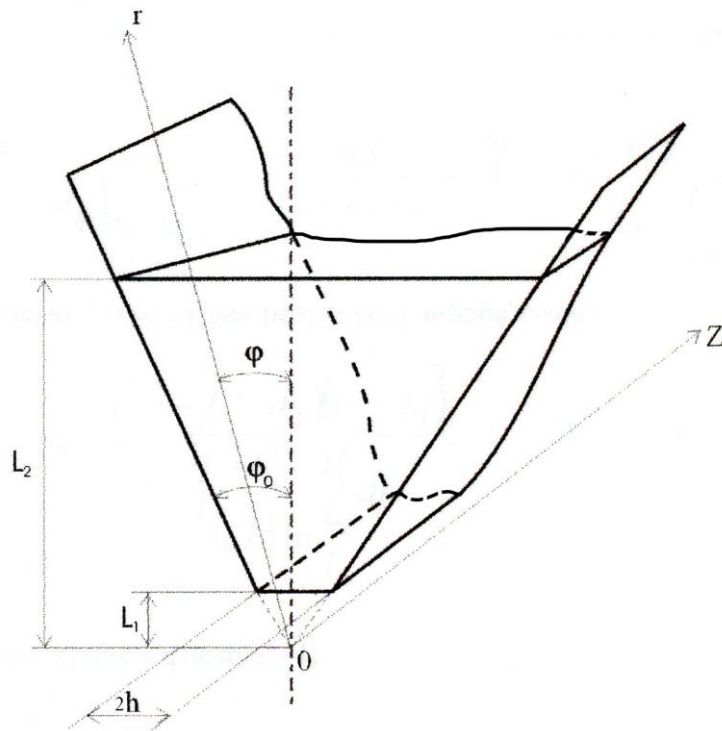


Рис. 4.1. Розрахункова схема плин у фібробетону у каналі бункера віброекструдера

Передбачається, що всі промені, що проходять через початок координат, є лініями плин. Тоді окружна швидкість  $u_\varphi$  усюди дорівнює нулю. Недоліками відомих рішень є те, що при описі плин, що сходиться,

масові сили не враховуються, і потрібне використання емпіричних даних: витрати або радіального градієнта тиску на стінках, оскільки в останньому випадку для спрощення задачі тиск був виключений з рівнянь руху (4.1).

Розглянемо процес плинну фібробетону у каналі бункера віброекструдера як плин між плоскими збіжними нерухомими стінками (поздовжній переріз бункера). В процесі віброекструзії висота шару суміші у бункері підтримується постійною. При цьому будемо використовувати феноменологічний підхід, який приймає фібробетонну суміш, як однорідне ізотропне середовище. Про структуру суміші роблять лише загальні застереження. Орієнтацію фібр на поверхні суміші вважаємо плоскодовільною. Розрахункова схема процесу наведена на рисунку 4.1. Початок координат вибраний у точці перетину ліній, що є продовженнями похилих стінок каналу [1].

Оскільки вібров'язкість базальтобетону при віброекструзії відносно велика, і процес формування характеризується низькими значеннями критерію Рейнольдса, то, очевидно, що сили інерції значно менше сил тертя. Тому інерційними членами рівняння Нав'є-Стокса (4.1) при рішенні поставленої задачі нехтуватимемо. З математичної точки зору відкидання інерційних членів у разі повільної течії цілком допустимо, оскільки при цьому порядок диференціального рівняння не знижується, і тому рішення простішого рівняння дозволяє задовольнити такій же кількості граничних умов, як і рішення повного диференціального рівняння.

Враховуючи, що похідна виразу (4.2) є складовою частиною першого рівняння системи (4.1) і дорівнює нулю, запишемо рівняння руху Нав'є-Стокса в такому вигляді:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial r} - \rho g \cos \varphi + \frac{\mu}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 u_r}{\partial \varphi^2} = 0, \\ -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \rho g \sin \varphi + \frac{2\mu}{r^2} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} = 0. \end{cases} \quad (4.3)$$

Рівняння (4.2) можна записати у вигляді:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_r r}{\partial r} = 0, \quad (4.4)$$

звідки видно, що добуток  $u_r r$  є постійною величиною, не залежною від  $r$ .  
Введемо функцію:

$$v \varphi = u_r r, \quad (4.5)$$

Граничні умови:

$$u_r \Big|_{\varphi=\varphi_0} = 0; \quad (4.6)$$

$$u_r \Big|_{\varphi=-\varphi_0} = 0; \quad (4.7)$$

$$p \Big|_{r=L_2/\cos \varphi} = 0; \quad (4.8)$$

$$p \Big|_{r=L_1/\cos \varphi; \varphi=\varphi_0} = 0, \quad (4.9)$$

де  $\varphi_0$  - кут нахилу стінок бункера до вертикалі;  $L_1$  - відстань від початку координат до вихідного зрізу бункера;  $L_2 - L_1$  - висота стовпа суміші в бункері.

Рівняння (4.3) з урахуванням (4.5) запишемо таким чином:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial r} - \rho g \cos \varphi + \frac{\mu}{r^3} v'' \varphi = 0, \\ -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \rho g \sin \varphi + \frac{2\mu}{r^3} v' \varphi = 0. \end{cases} \quad (4.10)$$

Узявши похідну від першого рівняння системи (4.10) по  $\varphi$  і от другого – по  $r$  і прирівнявши значення для  $\frac{\partial^2 p}{\partial r \partial \varphi}$ , отримаємо звичайне однорідне диференціальне рівняння третього порядку:

$$v'''(\varphi) + 4 \cdot v'(\varphi) = 0 \quad (4.11)$$

Загальний інтеграл цього рівняння:

$$v(\varphi) = c_1 + c_2 \sin 2\varphi + c_3 \cos 2\varphi. \quad (4.12)$$

Визначимо радіальну швидкість  $u_r$  підстановкою (4.12) у (4.5):

$$u_r = \frac{c_1 + c_2 \sin 2\varphi + c_3 \cos 2\varphi}{r} \quad (4.13)$$

Постійні  $c_1$  і  $c_2$  визначимо з (4.13) за граничних умов (4.6), (4.7):

$$c_1 = -c_3 \cos 2\varphi_0, \quad c_2 = 0.$$

Отже, вираз (4.13) можна записати у вигляді:

$$u_r = \frac{c_3 \cos 2\varphi - \cos 2\varphi_0}{r}. \quad (4.14)$$

Після підстановки (4.14) в перше рівняння системи (4.3) і подальшому інтегруванні по  $r$ , отримаємо:

$$p = \frac{2c_3 \mu \cos 2\varphi}{r^2} - rg \rho \cos \varphi + \bar{c}(\varphi). \quad (4.15)$$

$\bar{c}(\varphi)$  визначається з (4.15) за граничної умови (4.8):

$$\bar{c}(\varphi) = \rho g L_2 - \frac{2c_3 \mu \cos 2\varphi \cos^2 \varphi}{L_2^2}.$$

Знаючи значення  $\bar{c}(\varphi)$ , рішення задачі (4.9), (4.15) дає:

$$c_3 = -\frac{\rho g L_1^2 L_2^2}{2\mu \cos 2\varphi_0 \cos^2 \varphi_0 (L_1 + L_2)}.$$

Таким чином, можна записати формули для визначення радіальної швидкості  $u_r$  і об'ємної витрати через одиницю ширини каналу, що звужується  $q_c$ :

$$u_r = \frac{\rho g L_1^2 L_2^2 \cos 2\varphi_0 - \cos 2\varphi}{2\mu r \cos 2\varphi_0 \cos^2 \varphi_0 L_1 + L_2}, \quad (4.16)$$

$$q_c = \frac{\rho g L_1^2 L_2^2 2\varphi_0 \cos 2\varphi_0 - \sin 2\varphi_0}{2\mu \cos 2\varphi_0 \cos^2 \varphi_0 L_1 + L_2}. \quad (4.17)$$

## **5. ПРОЦЕС ЗМІШУВАННЯ КОМПОНЕНТІВ СУМІШІ ПРИ ВІБРОЕКСТРУЗІЇ**

Процес змішування компонентів суміші, при якому закладаються основи майбутньої структури, впливають на фізико-механічні властивості і зовнішній вид виробів, які формуються.

Важливою перевагою віброекструзійного змішування є можливість використання низького водоцементного співвідношення системи. Відомо, що надлишкова вода, яка не входить в реакцію з цементом, збільшує пористість бетону, зменшуючи його щільність і міцність. Причому найбільш значно це характерно для фібробетону, ніж для звичайного бетону.

Через те, що з підвищенням в'язкості системи звичайне змішування не забезпечує однорідності, в наш час широке поширення отримав метод віброзмішування. На початковій стадії структуроутворення під дією вібрації система с високою міцністю первинної коагуляційної структури переходить у слабо структуровану або безструктурну, тобто виконується основна умова досягнення максимальної однорідності структурованих дисперсних систем. Ступень руйнування зв'язків структури залежить від



параметрів вібрації і характеризується вібров'язкістю. Віброперемішування, порівняно зі звичайним змішанням, дозволяє вводити в суміш більше фібрової арматури без її грудкування, істотно диспергує структуру цементного каменю, роздрібнюючи кристалики його новотворів. Збільшується кількість центрів кристалізації, прискорюється процес структуроутворення і росту міцності, скорочується тривалість термовологої обробки бетону, поліпшуються його фізико-механічні показники.

У процесі віброекструзії має місце ламінарне конвективне змішання. Цей тип змішання розглянутий при переробці полімерів, де практично відсутні такі основні механізми змішання, як турбулентність і молекулярна дифузія через високу в'язкість системи. Віброекструзійна ламінарна зсувна течія здійснюється під дією гідростатичного тиску маси в результаті тиксотропного зниження в'язкості композиції.

Кількісним критерієм ламінарного змішання є ступінь збільшення площі поверхні поділу між компонентами, що у свою чергу залежить від сумарної деформації і початкової орієнтації поверхні.

Гарне змішання буде досягатися за умови макрооднорідності суміші, що у віброекструзійній технології забезпечується розподілом і змочуванням фібр у тонкому шарі розчину перед змішуванням.

Кількісний опис різниць у деформуванні рідкотекучої фібробетонної суміші в каналі віброекструдера виконаємо за допомогою функцій розподілу деформацій [5].

Для віброекструдера, який розглядається як змішувач безперервної дії, функція розподілу деформацій (ФРД)  $f(\gamma)d\gamma$  визначається як доля об'ємної витрати на виході з віброекструдера з сумарною деформацією зсуву, що знаходиться в інтервалі між  $\gamma$  і  $\gamma + d\gamma$ . Інтегральна ФРД

$F_{\dot{\gamma}} = \int_0^{\dot{\gamma}} f(\dot{\gamma}) d\dot{\gamma}$  являє собою частину об'ємної витрати на виході з віброекструдера, що характеризується деформацією, меншою або такою, що дорівнює  $\dot{\gamma}$ .

Розглянемо процес віброекструзійного змішування у каналі, який звужується (розрахункова схема процесу подана на рис. 4.1).

Швидкість зсуву визначимо з рівняння (4.14):

$$\dot{\gamma}_c = -\frac{2c_3 \sin 2\varphi}{r^2}. \quad (5.1)$$

Долю об'ємної витрати на ділянці між  $\varphi$  і  $d\varphi$  знаходимо за допомогою рівняння (4.17):

$$f(\varphi) d\varphi = \frac{dq_c}{q_c} = \frac{2 \cos 2\varphi - \cos 2\varphi_0}{\sin 2\varphi_0 - 2\varphi_0 \cos 2\varphi_0} d\varphi. \quad (5.2)$$

Середня по довжині каналу, що звужується, швидкість віброекструзії:

$$u_{r,sp} = \frac{1}{L_2 - L_1} \int_{L_1}^{L_2} u_r dr = \frac{c_3 \cos 2\varphi - \cos 2\varphi_0}{L_2 - L_1} \ln \frac{L_2}{L_1}. \quad (5.3)$$

Звідки, час перебування рідини в каналі віброекструдера:

$$t_c = \frac{L_2 - L_1}{c_3 \cos 2\varphi - \cos 2\varphi_0 \ln \frac{L_2}{L_1}}. \quad (5.4)$$

Середню по довжині каналу, що звужується, швидкість зсуву визначимо за допомогою (5.1):

$$\dot{\gamma}_{c,sp} = \frac{1}{L_2 - L_1} \int_{L_1}^{L_2} \dot{\gamma}_c dr = \frac{2c_3 \sin 2\varphi}{L_1 L_2}. \quad (5.5)$$

Використовуючи (5.4) и (5.5) запишемо вираз для середньої по довжині каналу деформації зсуву  $\bar{\dot{\gamma}}_c(\varphi)$  :

$$\bar{\gamma}_c \varphi = \dot{\gamma}_{c,sp} t_c = - \frac{2 \sin 2\varphi L_2 - L_1^2}{L_1 L_2 \cos 2\varphi - \cos 2\varphi_0 \ln \frac{L_2}{L_1}}. \quad (5.6)$$

Середнє значення деформації зсуву в каналі, що звужується  $\bar{\gamma}_c$ :

$$\bar{\gamma}_c = \int_0^{\varphi_0} \bar{\gamma}_c \varphi f \varphi d\varphi = - \frac{2 L_2 - L_1^2 1 - \cos 2\varphi_0}{L_1 L_2 \ln \frac{L_2}{L_1} \sin 2\varphi_0 - 2\varphi_0 \cos 2\varphi_0}. \quad (5.7)$$

Долю об'ємної витрати на ділянці від 0 до  $\varphi$  визначимо, використовуючи вираз (5.2):

$$F \varphi = \int_0^{\varphi} f \varphi d\varphi = \frac{\sin 2\varphi - 2\varphi \cos 2\varphi_0}{\sin 2\varphi_0 - 2\varphi_0 \cos 2\varphi_0}. \quad (5.8)$$

На рисунках 5.1 і 5.2 подані характер розподілу зсувних деформацій в каналі, що звужується ( $\varphi_0 = 30^\circ$ ) і залежність функції розподілу деформацій  $F \gamma_c$ , яка розрахована за допомогою формул (5.6) і (5.8), від  $\bar{\gamma}_c \varphi / \bar{\gamma}_c$ .

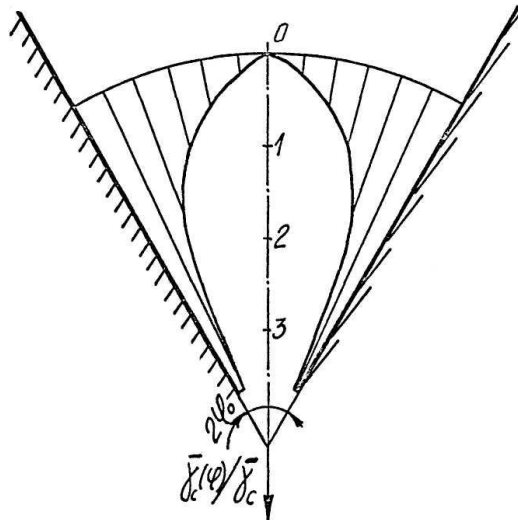


Рис. 5.1. Епюра зсувних деформацій в каналі, що звужується  
(на стінках каналу деформація зсуву, відповідно до виразу (5.6), дорівнює  $\infty$ )

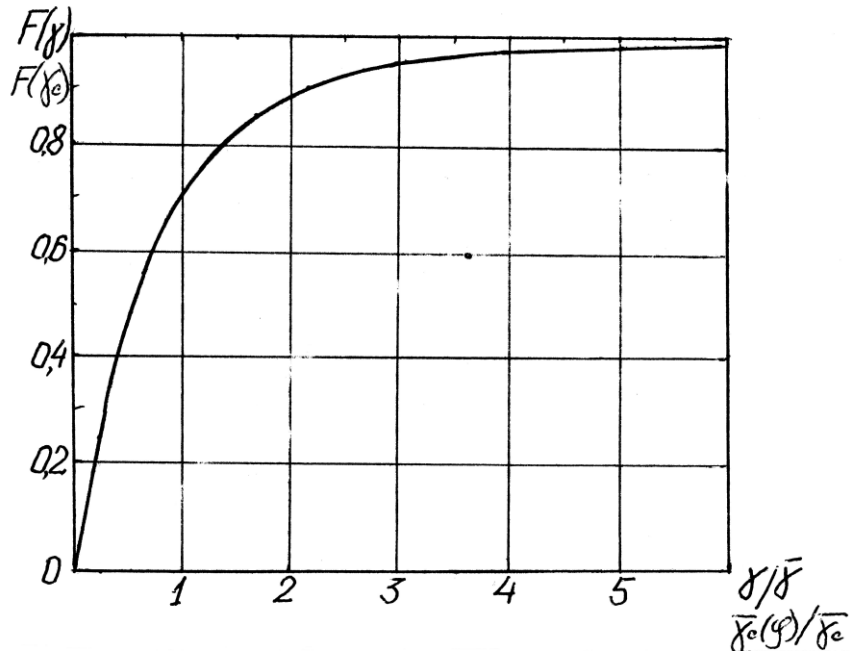


Рис. 5.2. Залежність функції розподілу деформацій від деформації зсуву для плоскощільного каналу і плоского симетричного каналу, який звужується

Середнє значення часу знаходження суміші в каналі:

$$\bar{t}_c = \int_0^{\varphi_0} t_c f(\varphi) d\varphi = - \frac{2 L_2 - L_1^2 \varphi_0}{c_3 \ln \frac{L_2}{L_1} \sin 2\varphi_0 - 2\varphi_0 \cos 2\varphi_0}.$$

(5.9)

За допомогою залежностей (5.4), (5.8), (5.9) побудуємо графік залежності функції розподілу часу перебування  $F(\frac{t_c}{\bar{t}_c})$  від  $\frac{t_c}{\bar{t}_c}$  для  $\varphi_0 = 30^\circ$  (рис.5.3).

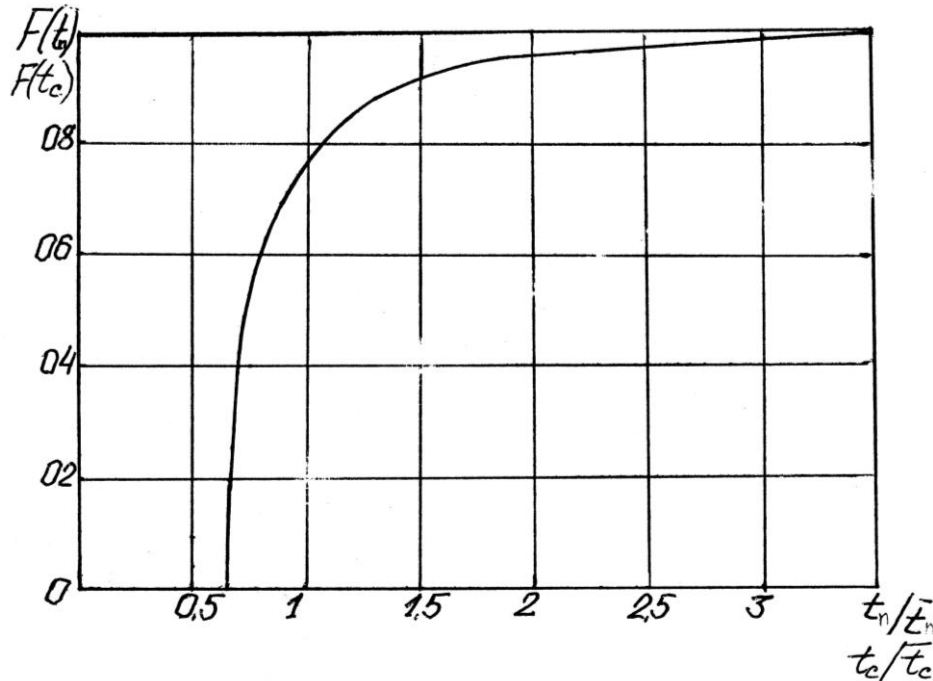


Рис. 5.3. Залежність функції розподілу часу перебування від часу перебування у плоскощільному каналі і плоскому симетричному каналі, який звужується

З наведених графіків видно, що для центральної частини каналу характерним є низький рівень деформації зсуву і відповідно гірше змішування. Причому суміш, що складає тільки близько 0,274 об'ємної витрати, піддається деформації вище середнього рівня. Час перебування суміші, що складає 77% об'ємної витрати, менше середнього по каналу. Однак ця частина матеріалу піддається і найменшому змішуванню.

Недоліком в розглянутому випадку є нерівномірність деформацій зсуву в усьому об'ємі матеріалу. Схоже явище зустрічається в промисловості переробки полімерів, де найбільш часто застосовується ламінарне конвективне змішування. Для усунення цього недоліку компоненти суміші пропускають через змішувальні органи доти, поки не буде досягнуто потрібна якість суміші.

Наведений характер розподілу деформації зсуву в процесі віброекструзійного змішування свідчить о недостатності однократного пропущення маси через віброекструдер для якісного змішування всього об'єму матеріалу (особливо для великої кількості фібрової арматури), що відображається у неповному змочування розчином фібр, які менше за інші знаходяться у змішувачі..

Практично ступінь змішування характеризується швидкістю віброекструзії. Через те, що при віброекструзійному змішуванні не відбувається руйнування фібрової арматури (грубих базальтових волокон), тоді в результаті повторних пропусків матеріалу через віброекструдер настає момент, коли швидкість віброекструзії стабілізується (ріст її припиняється). Це свідчить про повне змочування фібр розчином.

При проектуванні дослідно-промислової установки віброекструзії Жулянського заводу ЗБВ і К розмір і кількість віброекструдерів, що змішують, визначалися фізичним моделюванням процесу змішування з урахуванням складів базальтофібробетонів. На установці використовуються 2 віброекструдери, що змішують, а також віброекструдер, де формується виріб, що дозволяє перерозподілити матеріал по перерізу каналу і забезпечити необхідну якість виробів. Для використовуваних базальтофібробетонних складів змішування вважається задовільним, якщо сумарна деформація зсуву  $\sum \bar{\gamma}_c \geq 26$  [1] при загальній кількості віброекструдерів не менше трьох.

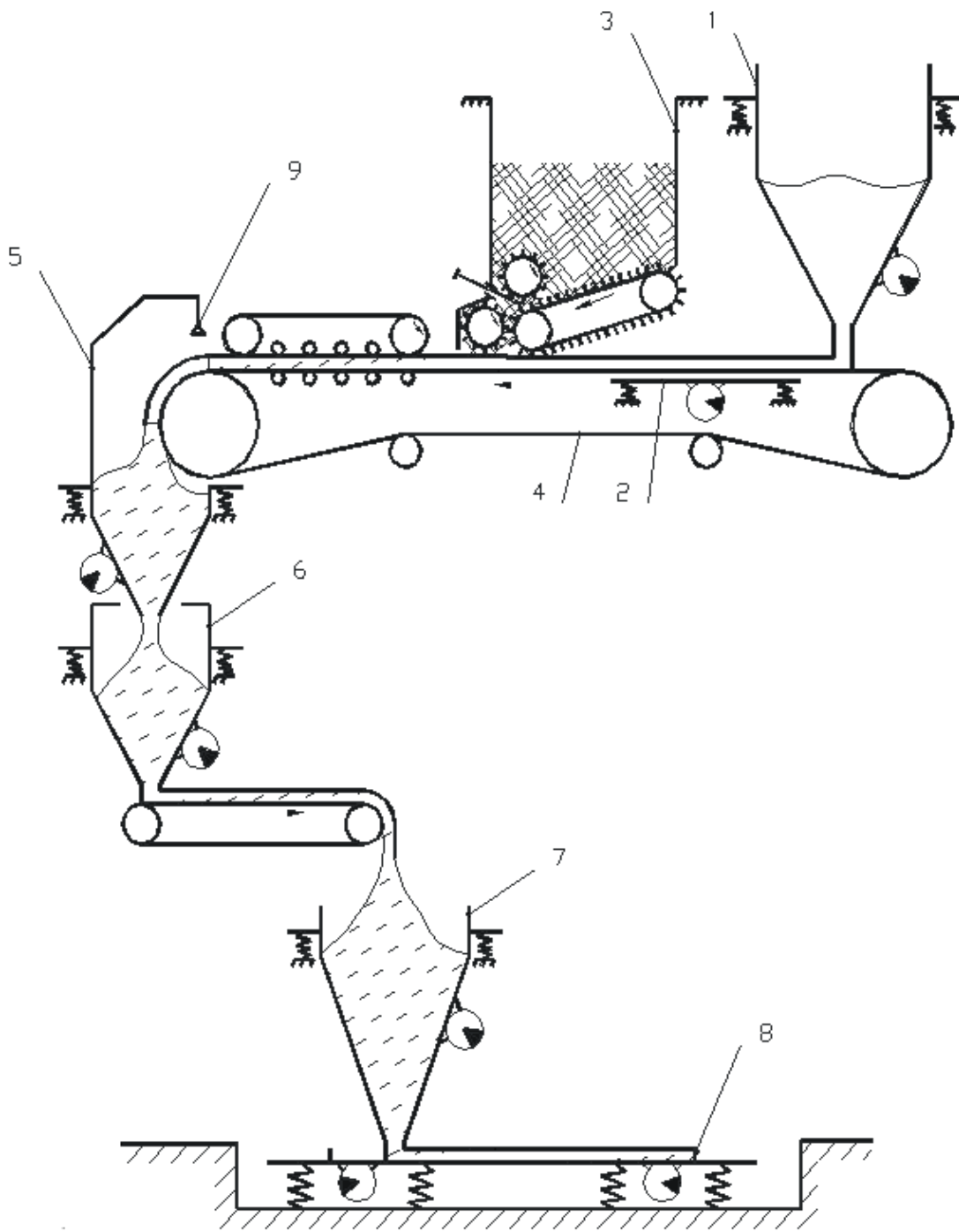
## 6. УДОСКОНАЛЕННЯ ВІБРОЕКСТРУЗІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Для підвищення міцності фібробетонних виробів і швидкості віброекструзії було запропоновано шар розчину з зануреними у нього фібрами перед віброекструзією перевертати і піддавати вібрації. В результаті в'язкість розчину знижується і він просочується крізь фібри і змочує останні. Вібров'язкість фібробетонної суміші падає, відповідно підвищуються швидкість віброекструзії і границя міцності виробів при вигині (табл. 6.1) [17].

Таблиця 6.1. Показники віброекструзійних способів формування базальтофібробетонних виробів

Характеристика	Показники способів	
	традиційна технологія [3]	технологія, яка пропонується [17]
Швидкість віброекструзії, м/с	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$8,3 \cdot 10^{-3}$
Границя міцності зразків при вигині, МПа	12,3	14,8

Для підвищення продуктивності способу частку необхідної води подають через форсунку 9 (рис. 6.1) перед віброекструзією на не змочену поверхню занурених у шар розчину фібр [18].



1 – дозатор-живильник цементного розчину; 2 – вібростол; 3 – дозатор-живильник фібр; 4 – конвеєр; 5, 6 – віброекструдери, що змішують; 7 – формуючий віброекструдер; 8 – форма; 9 – відцентрова форсунка  
 Рис. 6.1. Установа віброекструзії з додатковим зрошенням фібр водою



Додаткове зрошення водою сухої поверхні фібр сприяє інтенсифікації ламінарного конвективного змішування компонентів суміші при віброекструзії за рахунок покращення адгезії фібр з розчином. Швидкість віброекструзії і міцність фібробетонних виробів збільшуються (табл. 6.2).

Таблиця 6.2. Показники віброекструзійних способів формування базальтофібробетонних виробів

Характеристика	Показники способів	
	традиційна технологія [3]	технологія, яка пропонується [18]
Швидкість віброекструзії, м/с	$4,6 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$
Границя міцності зразків при вигині, МПа	12,3	12,6

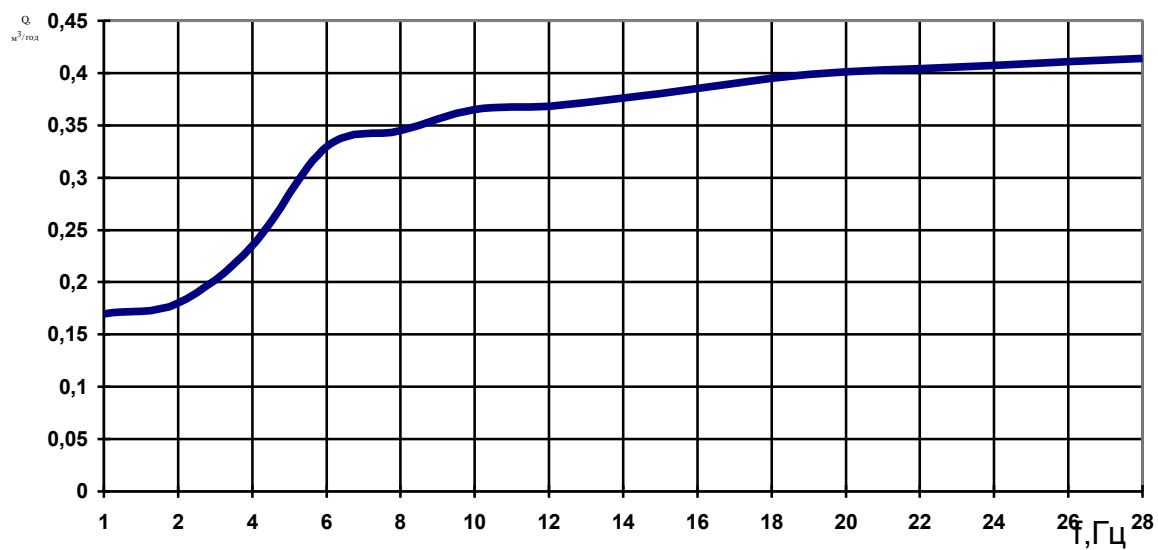
Повне змочування цементно-піщаним розчином фібр перед віброекструзією забезпечує більш рівномірний розподіл фібр у розчині, краще змішування в процесі віброекструзії, а отже і вищу якість виробів, які формуються [19]. Поставлена задача вирішується тим, що частку необхідного розчину подають перед віброекструзією на суху поверхню фібр, які занурені у шар розчину.

Підвищений динамічний вплив на суміш забезпечує віброударна технологія, що застосовується при традиційному формуванні у віброформі бетонних і залізобетонних виробів. Процес ущільнення при цьому проходить більш інтенсивно порівнянно з високочастотними технологіями,

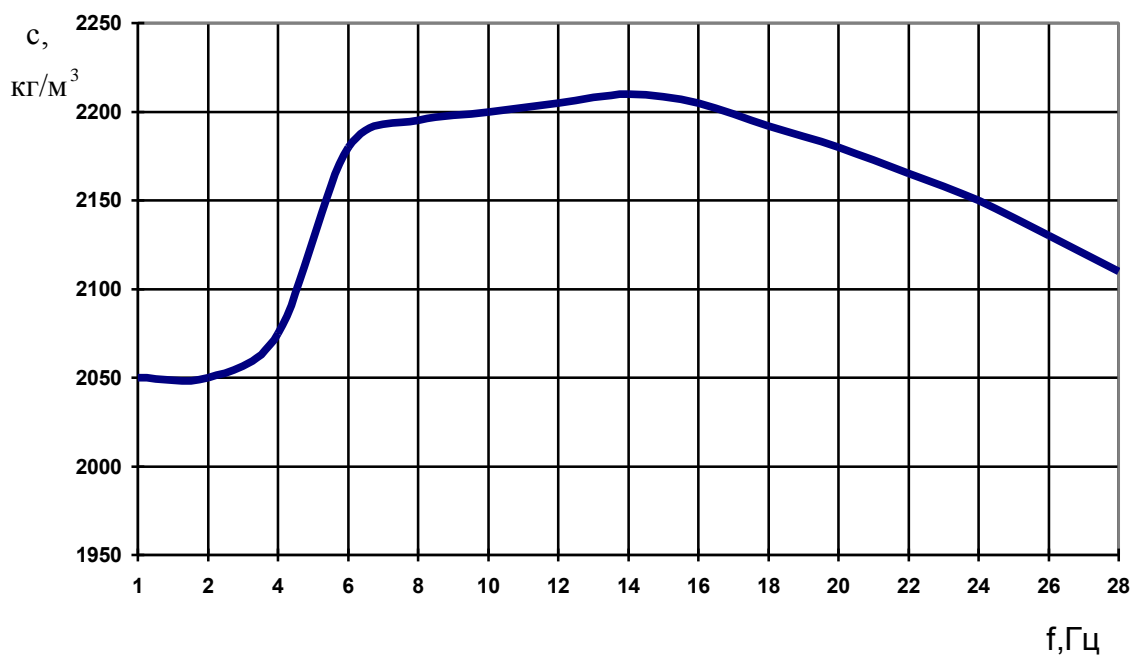
що дає можливість ущільнювати вельми жорсткі піщані суміші з низьким вмістом води і отримувати високі марки бетону при порівняно низьких витратах цементу.

При підвищенні частоти  $f$  і амплітуди  $a$  удару, який додатково накладається на бункер віброекструдера, було відзначено зростання продуктивності і густини маси, яка екструдується. Очевидно у цьому випадку вдалося створити і підтримати ізотропне рівномірне зруйнування структури у всьому об'ємі дисперсної системи. Також при такій схемі реалізації процесу віброекструзії вектор швидкості від ударних дій прикладений у напрямку вектора дотичних напружень від цих коливань, що спричиняє підвищенню продуктивності [20].

Нижні границі частоти і амплітуди ударних дій були обрані експериментально з умов початку збільшення продуктивності і густини маси, яка екструдується порівняно з безударною віброекструзією. При амплітуді ударних коливань вище верхньої границі у 5 мм настає відрив маси від стінок віброекструдера і порушується процес екструзії. Верхня границя частоти ударного імпульсу складає 20 Гц, тому що при подальшому збільшенні частоти зростання продуктивності стає незначним, а густина маси, яка екструдується, знижується (див. рисунок 6.2). Такий спосіб формування, при якому на фібробетонну суміш додатково накладають ударні дії з частотою 8 – 20 Гц і амплітудою 2 – 4 мм захищений патентом України [21].



а



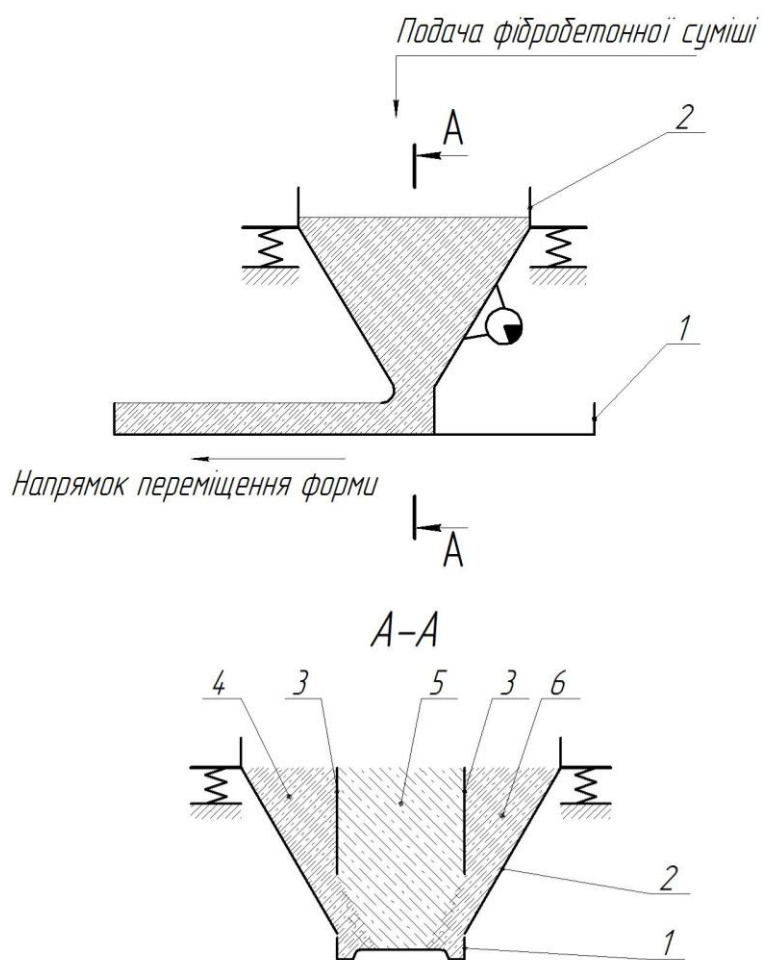
б

Рис. 6.2. Залежність продуктивності  $Q$  (а) і густини  $\rho$  (б) від частоти ударного імпульсу  $f$

Рівномірне живлення компонентів суміші досягається підтриманням постійних рівнів цементно-піщаного розчину і фібр у відповідних

дозаторах-живильниках [22]. Це сприяє поліпшенню якості одержуваних виробів.

Для одержання виробу з регульованими фізико-механічними властивостями різних його ділянок готують щонайменше одну додаткову формувальну суміш іншого складу порівняно зі складом основної формувальної суміші, при цьому формування фібробетонного виробу здійснюють щонайменше з двох потоків основної й додаткової формувальних сумішей (рис. 6.3).



1 – форма, 2 – віброекструдер, 3 – перегородки, 4-6 – секції

Рис. 6.3. Віброекструзія фібробетону з різними фізико-механічними властивостями в різних ділянках виробів

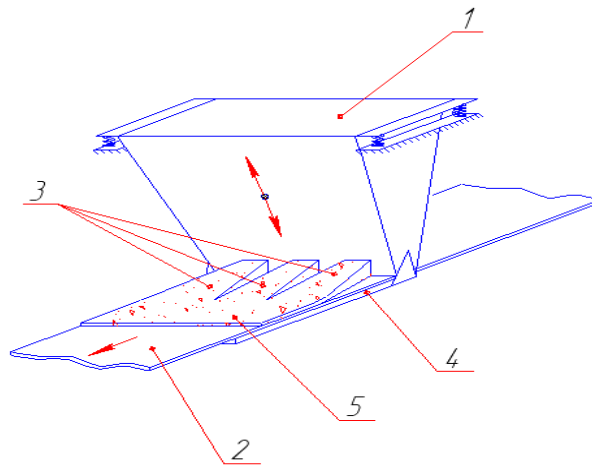
Реалізація запропонованого способу дає змогу в одному виробі одержати ділянки з різними (до того ж регульованими) фізико-механічними властивостями. При цьому внаслідок особливостей віброекструзійного формування на межі різних ділянок утворюватимуться перехідні області з усередненими властивостями, що унеможлиблює виникнення концентрацій напружень у цих місцях і забезпечує потрібні характеристики матеріалу в різних місцях одержуваного виробу. Пропонований спосіб поліпшує якість і розширює номенклатуру формованих виробів [23].

## **7. РОЗРОБКА НОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ДОЗАТОРІВ-ЖИВИЛЬНИКІВ РОЗЧИНУ**

Недоліком вузла отримання тонкого шару розчину на дослідно-промисловій установці віброекструзії є висока металоємність і значні витрати потужності для забезпечення роботи вібростола. Тому було запропоновано встановити у нижній частині дозатора-живильника горизонтальної плити, по поверхні якої проходить стрічка транспортера і де джгути розчину розтікаються по всій ширині стрічки за рахунок вібрації дозатора-живильника. При цьому утворюється рівномірний тонкий шар розчину. Це дозволяє виключити з процесу вібростіл і таким чином зменшити металоємність і потужність пристрою [24].

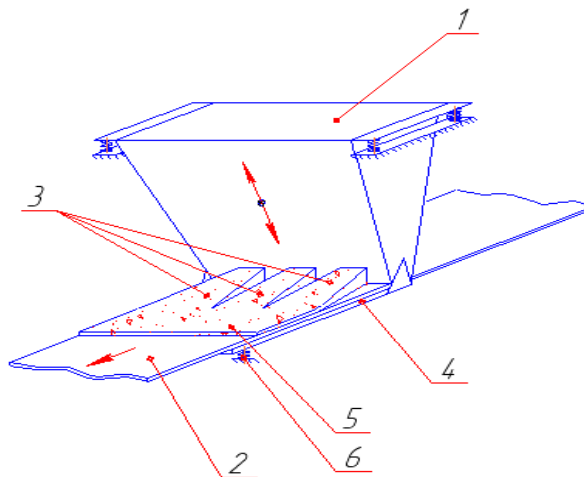
Для збільшення амплітуди коливань частини плити, з якої сходять транспортерна стрічка, було запропоновано цю частину плити виконувати без жорсткого зв'язку з дозатором-живильником розчину [25]. В результаті інтенсивність процесу розтікання розчину по всій ширині стрічки збільшується. Це дозволяє зменшити час отримання тонкого шару розчину і, відповідно, збільшити швидкість транспортерної стрічки, тобто

продуктивність дозатора-живильника (рис. 7.1). Спорядження вільної частини плити пристроєм для змінювання кроку витків пружин забезпечує можливість регулювання амплітуди коливань, а отже і інтенсивності вібрації горизонтальної плити (рис. 7.2).



1-дозатор-живильник розчину; 2-транспортна стрічка; 3-джгути розчину;  
4-горизонтальна плита; 5-тонкий шар розчину.

Рисунок 7.1. Пристрій для отримання тонкого шару цементно-піщаного розчину з вільним краєм горизонтальної плити



1-дозатор-живильник розчину; 2-транспортна стрічка; 3-джгути розчину;  
4-горизонтальна плита; 5-тонкий шар розчину; 6-пружины.

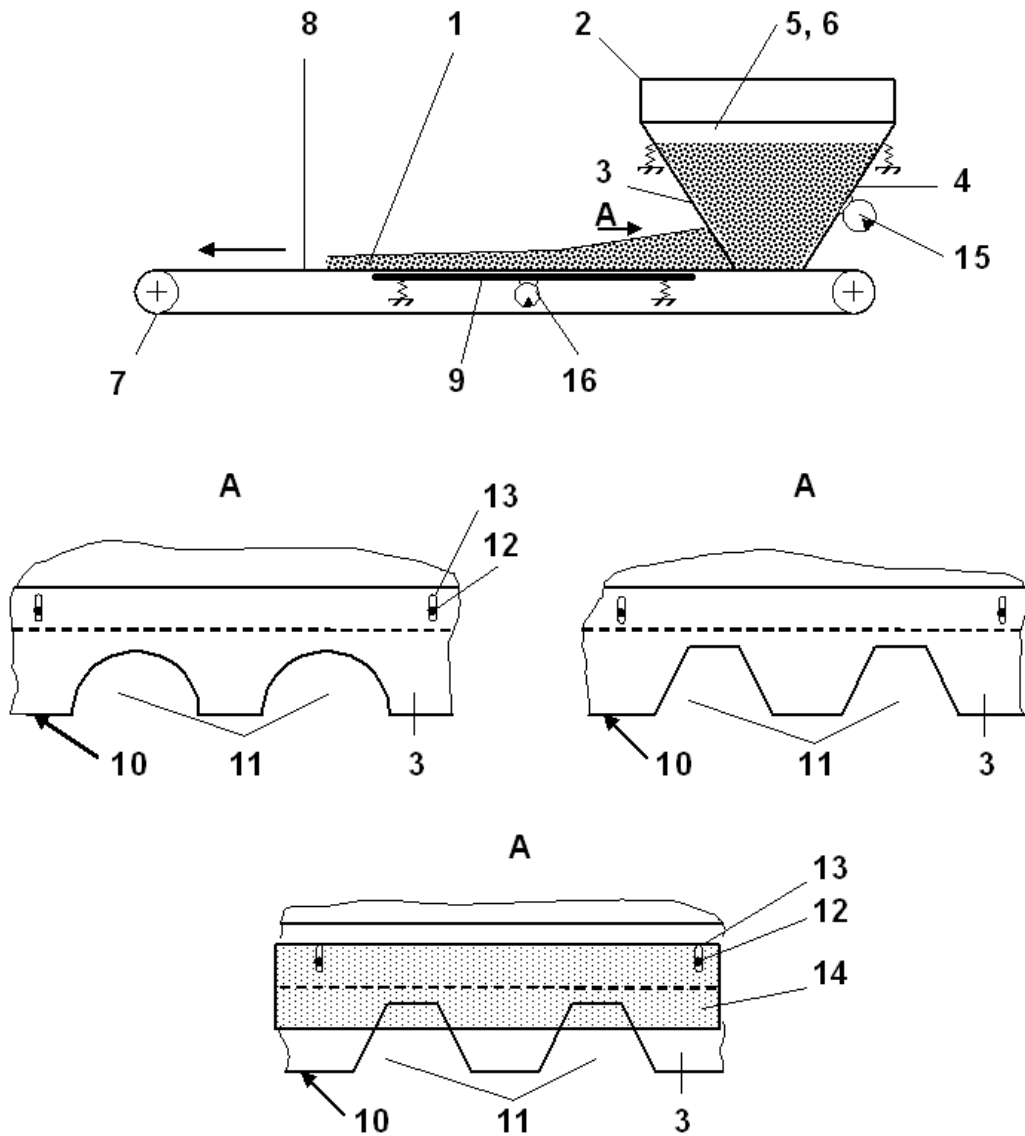
Рисунок 7.2. Пристрій для отримання тонкого шару цементно-піщаного розчину з регульованою амплітудою коливань вільного краю горизонтальної плити

З метою унеможливлення налипання розчину на зовнішню поверхню передньої стінки бункера дозатора-живильника, а отже – гарантування стабільності форми «джгутів» розчину, що виходять з бункера на стрічковий транспортер, і в решті-решт – одержання продукції високої якості було запропоновано на нижній крайці передньої стінки бункера виконати вирізи, що рівномірно розташовані по її довжині та звужуються догори [26]. У найприйнятніших прикладах виконання пристрою кожний виріз виконано у вигляді півкруга або рівнобедреної трапеції, а також передня стінка бункера споряджена заслінкою, змонтованою з можливістю перекриття вирізів.

Виконання нижньої крайки передньої стінки знімною [27] дозволяє змінювати розміри і форму вирізів (рис. 7.3).

Якщо над вирізами у передній стінці бункера жорстко закріпити розріджувач джгутів розчину у вигляді гребінки, тоді за рахунок додаткового вібраційного впливу з боку розріджувача процес отримання тонкого шару розчину інтенсифікується. Це дозволяє виключити з процесу утворення тонкого шару розчину вібростіл і таким чином зменшити металоємність і потужність пристрою [28].

Жорстке закріплення розріджувача джгутів розчину 8 до заслінки 5 забезпечує постійний вібраційний вплив від розріджувача 8 на верхню частину джгутів розчину 3 при змінюванні їх висоти регулюванням положення заслінки 5 у вертикальному напрямку (рис. 7.4). Використання наведеного удосконалення попередньої конструкції дозволяє підтримувати сталий процес розтікання розчину по всій ширині транспортерної стрічки при будь-якому режимі роботи дозатора-живильника [29].



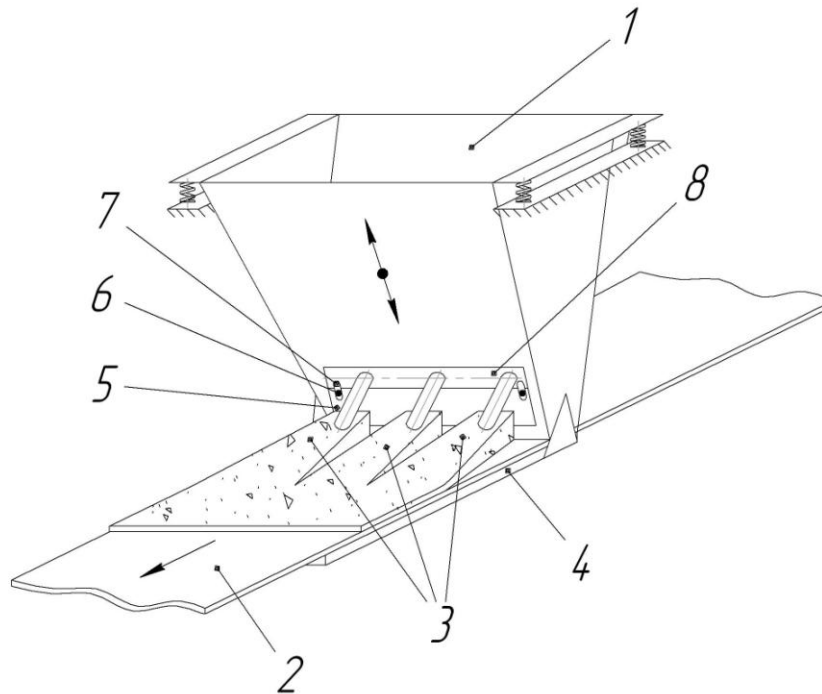
1 – шар розчину; 2 – бункер; 3-6 – похилі плоскі стінки; 7 – транспортер; 8 – верхня вітка транспортера; 9 – вібростіл; 10 – нижня крайка передньої стінки; 11 – вирізи; 12 – гвинт; 13 – проріз; 14 – заслінка; 15, 16 – збудники коливань

Рисунок 7.3. Дозатор-живильник розчину

Можливість переміщення розріджувача джгутів розчину по висоті відносно заслінки, у свою чергу, забезпечує занурення розріджувача



джгутів розчину на потрібну глибину у джгути розчину і, відповідно, необхідний вібраційний вплив від розріджувача джгутів розчину на джгути розчину при змінюванні положення заслінки у вертикальному напрямку [30].



1-дозатор-живильник; 2-транспортна стрічка; 3-джгути розчину;  
4-горизонтальна плита; 5-заслонка; 6-болти; 7-повздовжні вертикальні  
овальні отвори; 8-розріджувач

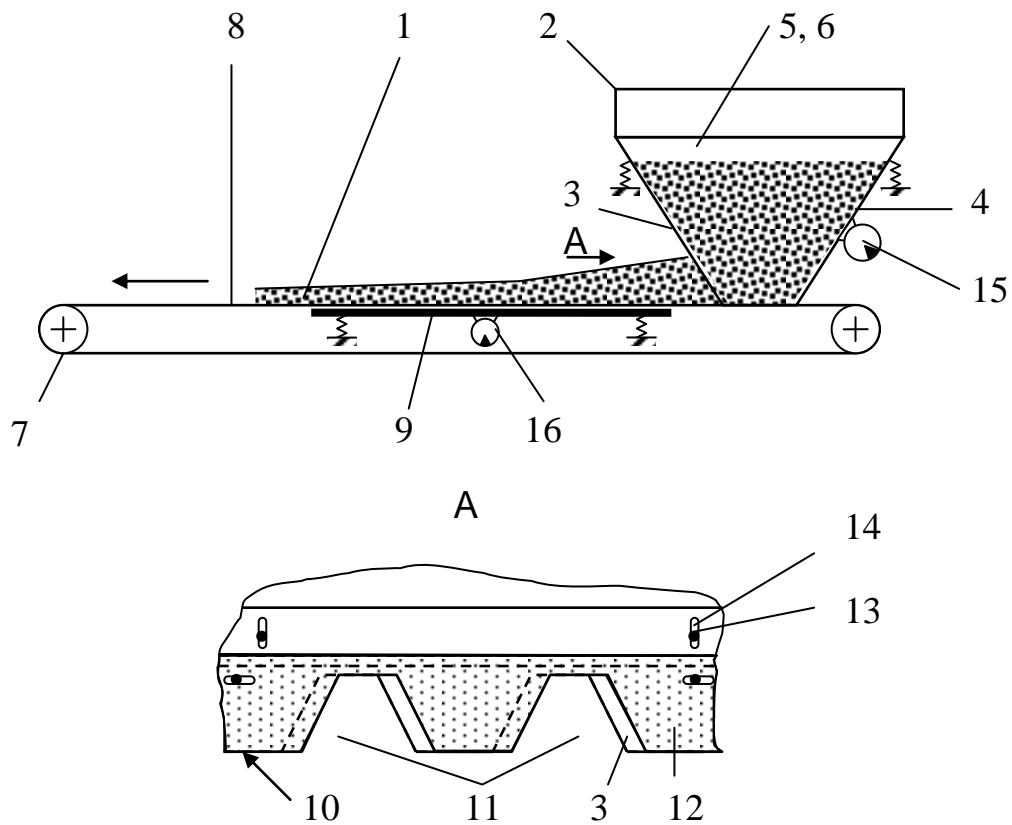
Рисунок 7.4. Пристрій для отримання шару цементно-піщаного розчину

Вдосконаленням пристрою для одержання шару цементно-піщаного розчину є нове конструктивне виконання нижньої крайки передньої стінки бункера, яке дає можливість змінювати розміри і форму вирізів на крайці передньої стінки бункера по їх ширині залежно від властивостей і параметрів перероблюваних розчинів та одержуваної продукції, що

суттєво розширює номенклатуру перероблюваних сумішей та одержуваної продукції [31]. Конструкція дозатора-живильника зображена на рисунку 7.5.

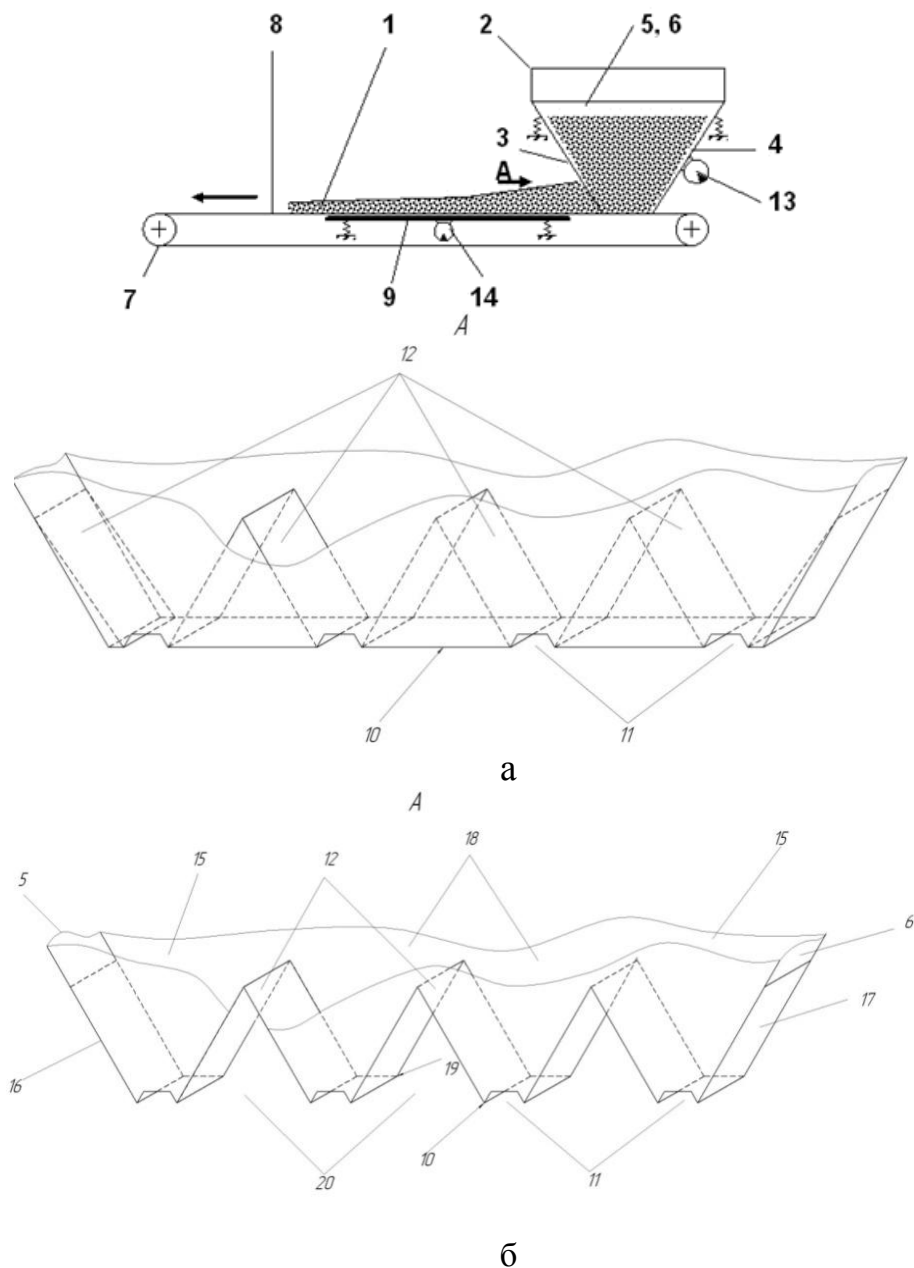
Пристрій працює в такий спосіб. У верхню частину бункера 2 завантажують компоненти цементно-піщаного розчину і вмикають збудник коливань 15, після чого внаслідок коливань, які передаються від нього до стінок 3–6 бункера 2 бетонна суміш у бункері розріджується і у вигляді «джгутів» витікає крізь вирізи 11 передньої стінки 3 бункера 2 на верхню вітку 8 стрічкового транспортера 7. Під дією збудника коливань 16 вібростола 9 «джгуди» розтікаються в поперечному напрямі, з'єднуються один з одним і утворюють на стрічковому транспортері 7 рівнотовщинний і суцільний тонкий шар цементно-піщаного розчину.

Для вдосконалення формування тонкого шару розчину була запропонована конструкція дозатора-живильника, в нижній частині бункера якого до внутрішнього боку нижньої крайки передньої стінки жорстко закріплені направляючі вставки [32]. Це забезпечує отримання джгутів розчину зі стабільними формою і якістю. Для зменшення металоємності конструкції такого пристрою необхідно крайні збіжні ізолювані канали з одного боку утворювати нижніми частинами бічних стінок бункера, нахилених під тим же кутом, що і направляючі вставки, а у нижніх крайках передньої і задньої стінок бункера виконувати вирізи в місцях, що не контактують з розчином [33].



1 - шар цементно-піщаного розчину; 2 – бункер; 3 – 6 - похилі плоскі стінк; 7 - стрічковий транспортер ; 8 - верхня вітка транспортера;  
 9 - «джгути» розчину; 10 - нижня крайка; 11 – вирізи; 12 – пластина;  
 13 – болти; 14 - поздовжні вертикальні отвори; 15,16 – збудник коливань.

Рисунок 7.5. Дозатор-живильник розчину



1 – шар цементно-піщаного розчину; 2 – бункер;

3-6 – плоскі похилі стінки; 7 – стрічковий транспортер;

8 – верхня вітка транспортера; 9 – вібростіл; 10 – нижня крайка бункера;

11 – вирізи; 12 – направляючі вставки; 13, 14 – збуджувачі коливань; 15 – крайні збіжні ізолювані канали; 16, 17 – нижні частини бічних стінок бункера; 18 – збіжні ізолювані канали; 19 – нижня крайка задньої стінки бункера; 20 – вирізи.

Рисунок 7.6. Пристрій для отримання шару цементно-піщаного розчину за патентами [32] (а) і [33] (б)

Подача цементно-піщаного розчину на транспортер здійснюється через квадратні у поперечному перерізі збіжні канали. Аналітичних формул для опису плин у таких каналах не існує.

Тому необхідно було описати процес плин у при вібрації цементно-піщаного розчину у квадратному збіжному каналі.

При розгляді процесу використовувався феноменологічний підхід, який приймав розчин, як однорідне ізотропне середовище, про структуру якого робилися лише загальні застереження. Цементно-піщаний розчин, що знаходиться під впливом вібрації, поводить себе подібно рідині, через те найбільш придатними для розрахунку процесу є гідродинамічні теорії. Враховувалось, що в умовах вібраційного поля, яке створюється стандартними вібраторами, розчин являє собою псевдоньютонівську систему [4]. Плин здійснювався під дією гідростатичного тиску маси в результаті тиксотропного зменшення в'язкості розчину.

Вважалось, що в процесі роботи висота шару суміші у каналах дозатора-живильника підтримується постійною.

Відома формула (4.16) для, що описує течію ньютонівської рідини між плоскими збіжними симетричними пластинами у циліндричній системі координат  $(r, \varphi, z)$ .

Максимальна швидкість буде в центральній частині такого каналу при  $\varphi_0 = 0$ :

$$u_{rmax} = \frac{\rho g L_1^2 L_2^2 \cos 2\varphi_0 - 1}{2\mu_B r \cos 2\varphi_0 \cos^2 \varphi_0 L_1 + L_2}.$$

Тоді формулу (4.16) можна записати у вигляді:

$$u_r = \frac{u_{rmax} \cos 2\varphi_0 - \cos 2\varphi}{\cos 2\varphi_0 - 1}.$$

Для опису процесу плин у збіжному каналі квадратного поперечного перерізу скористаємось «методом впливу» [11]. Розрахункова схема течії рідини подана на рис. 7.7. Для зручності розрахунку початок сферичної системи координат  $(r, \theta, \phi)$  вибрано у точці, де сходяться похилі стінки каналу.

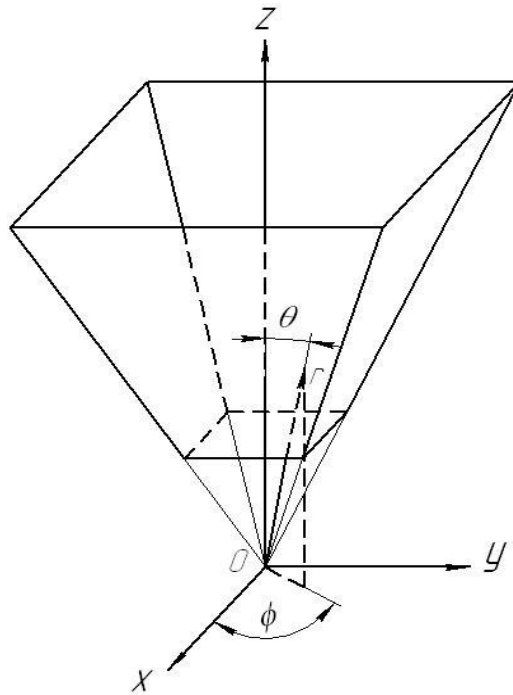


Рис.7.7. Розрахункова схема процесу плин у збіжному каналі прямокутного поперечного перерізу

З останньої формули видно, що вплив стінок на зменшення швидкості течії рідини при віддалині від центру збіжного каналу характеризується величиною  $\frac{\cos 2\phi_0 - \cos 2\phi}{\cos 2\phi_0 - 1}$ .

При застосуванні замкнутого збіжного каналу з квадратним поперечним перерізом маємо взаємний вплив вже двох пар плоских поверхонь. З урахуванням цього впливу швидкість течії рідини  $u_r$  приймає вигляд:

$$u_r = \frac{u_{rmax} \cos 2\varphi_0 - \cos 2\varphi_1 \cos 2\varphi_0 - \cos 2\varphi_2}{\cos 2\varphi_0 - 1^2}, \quad (7.1)$$

де  $\varphi_1, \varphi_2$ — кути нахилу до вертикалі проєкцій поточного радіуса  $r$  на площини  $uoz$  і  $xoz$ , відповідно, град.

Поточні кути  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$  визначають із залежностей:

$$\varphi_1 = \arctg \operatorname{tg} \theta \sin \varphi, \quad \varphi_2 = \arctg \operatorname{tg} \theta \cos \varphi$$

Запропонована формула дозволяє без особливих труднощів виконати розрахунок процесу плин у ньютонівської рідини у квадратному збіжному каналі. Отримана формула зручна для подальшої математичної обробки, що дозволяє виконати, наприклад, розрахунок процесу ламінарного конвективного змішування у каналі і т. ін.

Для розрахунку процесу течії за допомогою запропонованої формули необхідно знати величину максимальної швидкості рідини в центрі каналу  $u_{rmax}$ , яку можна оцінити за формулою (3.1) з урахуванням ступеня впливу замкнутості каналу або визначити за результатами експериментальних досліджень.

Наведена методика дозволяє значно спростити розрахунки різноманітних гідродинамічних процесів у квадратних збіжних каналах при низьких значеннях числа Рейнольдса, коли не виникають так звані «повзучі течії». Формула зручна для подальшої математичної обробки [34].

Розрахунок плин розчину в такому каналі можна також виконувати за рівняннями, отриманими за допомогою формули, що описує плин ньютонівської рідини у прямокутному каналі постійного поперечного перерізу.

Вище наведена формула (3.1) описує плин ньютонівської рідини у прямокутному каналі постійного поперечного перерізу зі сторонами  $W$  і  $H$  у напрямках  $x$  і  $y$  (прямокутні координати  $(x, y, z)$ ).

Застосовуючи рівняння (3.1) можна знайти витрату ньютонівської рідини у прямокутному каналі:

$$Q = \int_0^H \int_0^W u_z dx dy = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \left[ -\frac{WH^3}{12} + \frac{16H^4}{\pi^5} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \cdot th\left(\frac{n\pi W}{2H}\right) \right],$$

звідки

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\mu Q}{-\frac{WH^3}{12} + \frac{16H^4}{\pi^5} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \cdot th\left(\frac{n\pi W}{2H}\right)}.$$

Розрахункова схема процесу плинущого розчину в каналі дозатора-живильника наведена на рисунку 7.8:

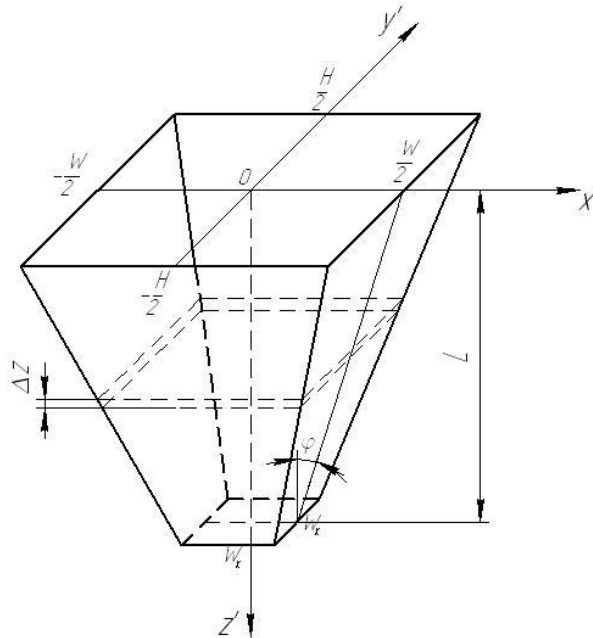


Рисунок 7.8. Розрахункова схема процесу плинущого розчину у пірамідальному каналі

Для зручності розрахунку початок прямокутних координат  $(x', y', z')$ , на відміну від розглянутого вище випадку, вибрано у центрі основи зрізаної піраміди. Для розрахунку швидкості  $u_z$  у пірамідальному каналі за



допомогою формули (2.5) позначимо  $x' = x - W/2$ ,  $y' = y - W/2$ . Тоді в системі координат  $x', y', z'$  розподіл швидкості  $u_z$  у поточному квадратному поперечному перерізі пірамідального каналу можна записати у вигляді:

$$u_z = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \left[ \frac{y'^2 - \frac{H^2}{4}}{2} + \frac{4H^2}{\pi^3} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^3} \cdot \sin \left( \frac{n\pi \left( y' + \frac{H}{2} \right)}{H} \right) \cdot \frac{ch \left( \frac{n\pi x'}{H} \right)}{ch \left( \frac{n\pi W}{2H} \right)} \right] \quad (7.2)$$

У формулі (7.2)  $W = H$  – поточні сторони основи пірамідального каналу.

Приймаємо, що в елементарному об'ємі висотою  $\Delta z$  ( $0 \leq z \leq L$ ),  $\frac{\partial p}{\partial z}$  є сталою і обчислюється за формулою (2.6), а  $L$  є висотою стовпа суміші в каналі.

Сторони елементарного квадратного перерізу обчислюються через поточні значення координати  $z_i = z_{i-1} + \Delta z$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) за формулою  $W = H = 2(z_i - z_{i-1}) \tan \varphi + W_k$ , де  $W_k$  – сторона меншої основи пірамідального каналу, м;  $\varphi$  – кут нахилу висоти каналу до бічної грані, град.

Розрахунок за формулою (7.2) з урахуванням наведених припущень дозволяє оцінити процес плинущу цементно-піщаного розчину у збіжному пірамідального каналі дозатора-живильника віброекструзійної установки. Для визначення характеру зміни складової швидкості плинущу  $u_z$  по перерізу каналу дозатора-живильника було розроблена програма розрахунку на ПЕОМ [35].

Використовуючи рівняння (7.1) були отримані залежності, зображені на рисунку 7.9.

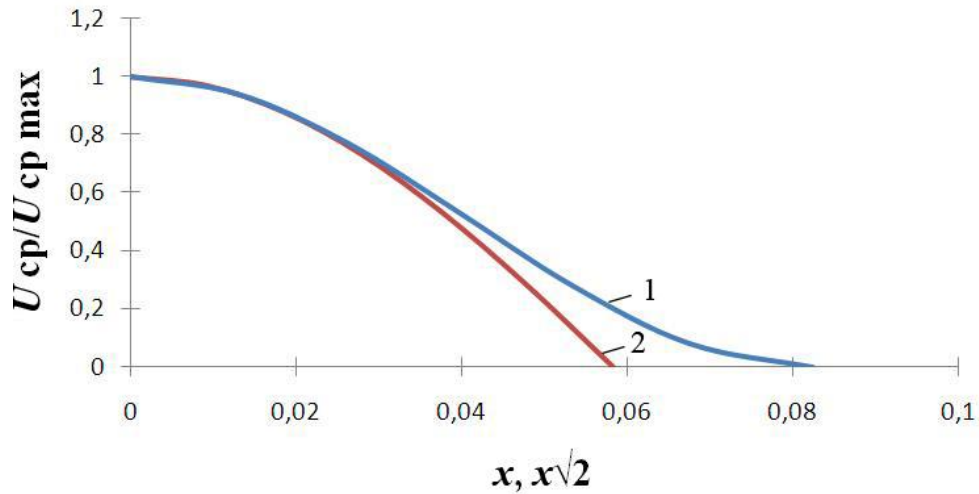


Рисунок 7.9. Розподіл відносних швидкостей на однаковій відстані від пари плоских поверхонь (1) і по діагоналі (2) пірамідального каналу квадратного поперечного перерізу за першим методом розрахунку

Результати розрахунку за рівнянням (7.2) зображено на рисунку 7.10.

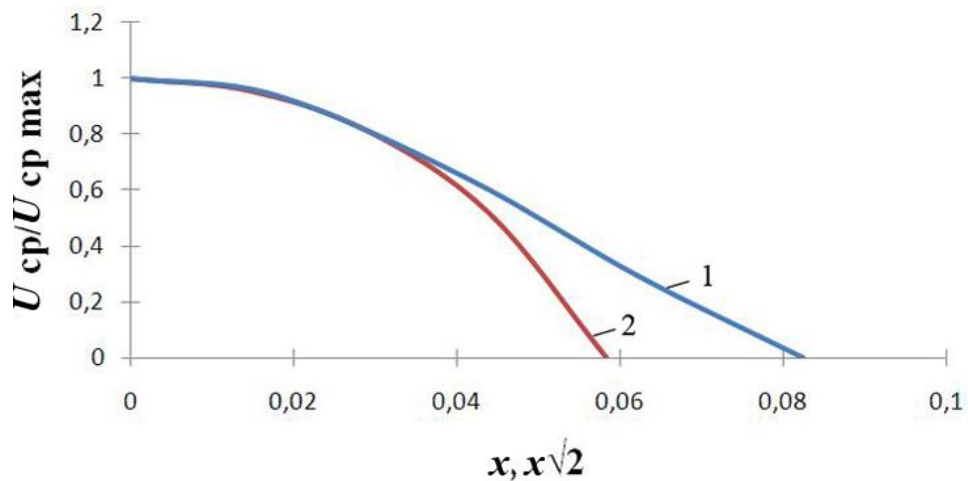
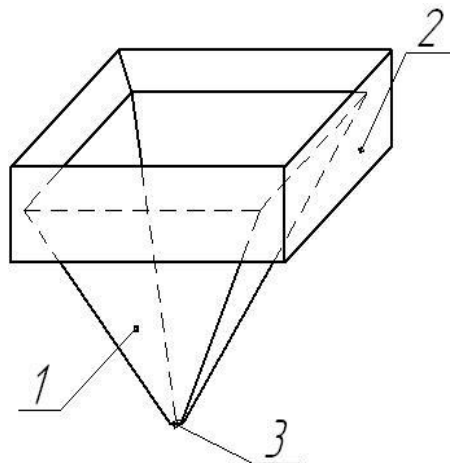


Рисунок 7.10. Розподіл відносних швидкостей на однаковій відстані від пари плоских поверхонь (1) і по діагоналі (2) пірамідального каналу квадратного поперечного перерізу за другим методом розрахунку

Порівняльний аналіз розрахунку відносних швидкостей за запропонованими методами дає схожий результат з похибкою 8,73% та 6,658% відповідно на однаковій відстані від пари плоских поверхонь і по діагоналі пірамідального каналу квадратного поперечного перерізу.

Для перевірки адекватності запропонованих методів розрахунку процесу, що відбувається в каналах дозатора-живильника розчину, були виконані експериментальні дослідження.

Експериментальна установка (рисунок 7.11) представляє собою прозорий пірамідальний канал 1, який має вихідний отвір 2 і карман 3. Карман 3 забезпечує безвихрову подачу рідини та допомагає підтримати її на постійному рівні.



1 – пірамідальний канал; 2 – карман; 3 – вихідний отвір

Рисунок 7.11. Схема експериментальної установки

Метою досліджень було визначення швидкості плинущої експериментальної рідини в каналі бункера дозатора-живильника розчину залежно від поточного кута нахилу  $\varphi$ . Кут нахилу  $\varphi$  змінювався від 0 до 30°.

За результатами проведених експериментальних досліджень було побудовано графічні залежності зміни швидкості руху цементно-піщаного розчину (рисунки 7.12 та 7.13) від зміни кута нахилу.

Експериментальні значення нанесені на теоретичні криві, побудовані за результатами аналітичних розрахунків.

З рисунків видно, що експериментальні значення лежать близько до теоретичних кривих, а подекуди – і на самій кривій, що підтверджує адекватність виведених математичних моделей [36]. Відносна похибка при цьому складає 4,79%, 12,39% та 5,15%, 9,21% – відповідно для двох випадків розрахунку.

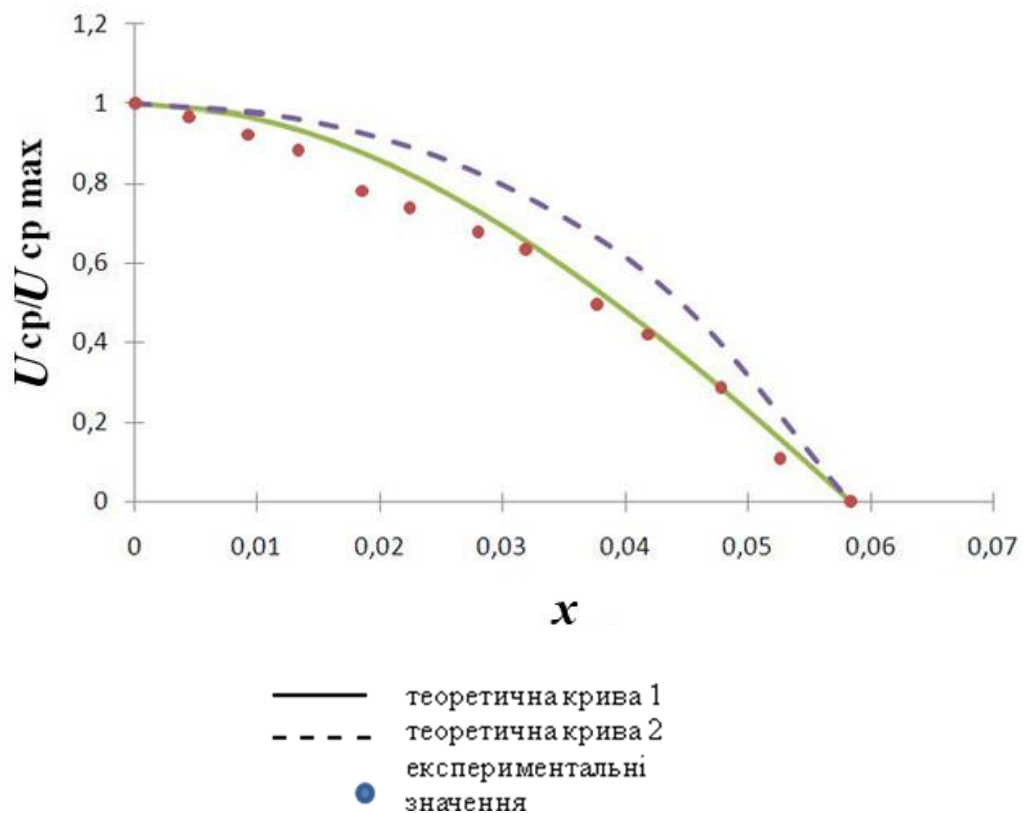


Рисунок 7.12. Розподіл відносних швидкостей на однаковій відстані від пари плоских поверхонь пірамідального каналу квадратного поперечного перерізу

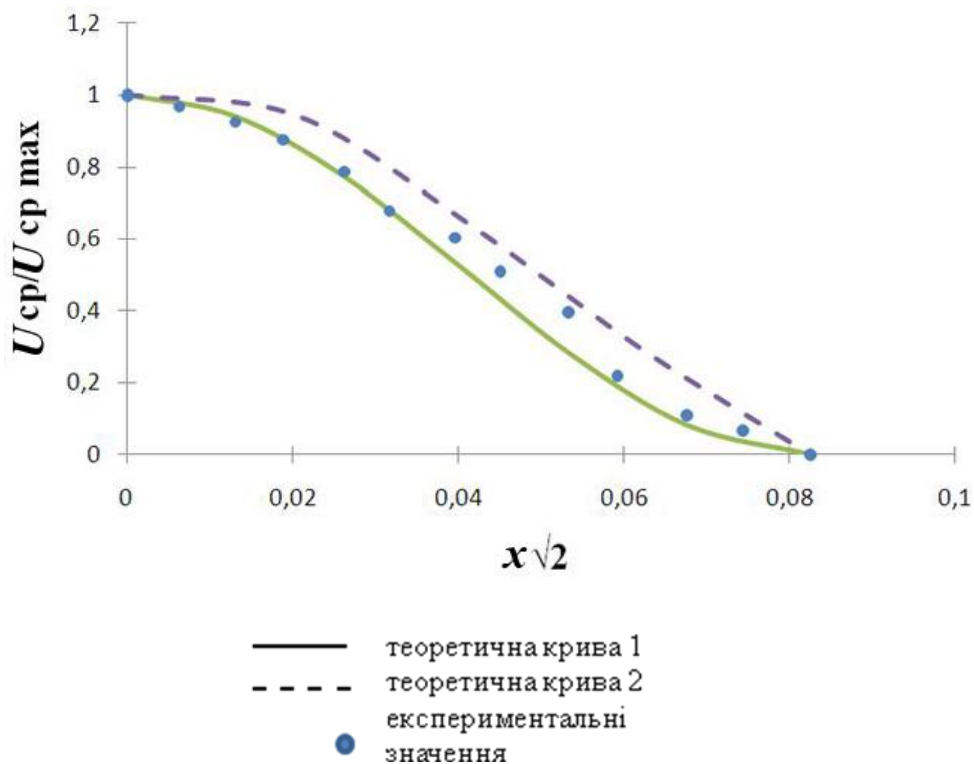
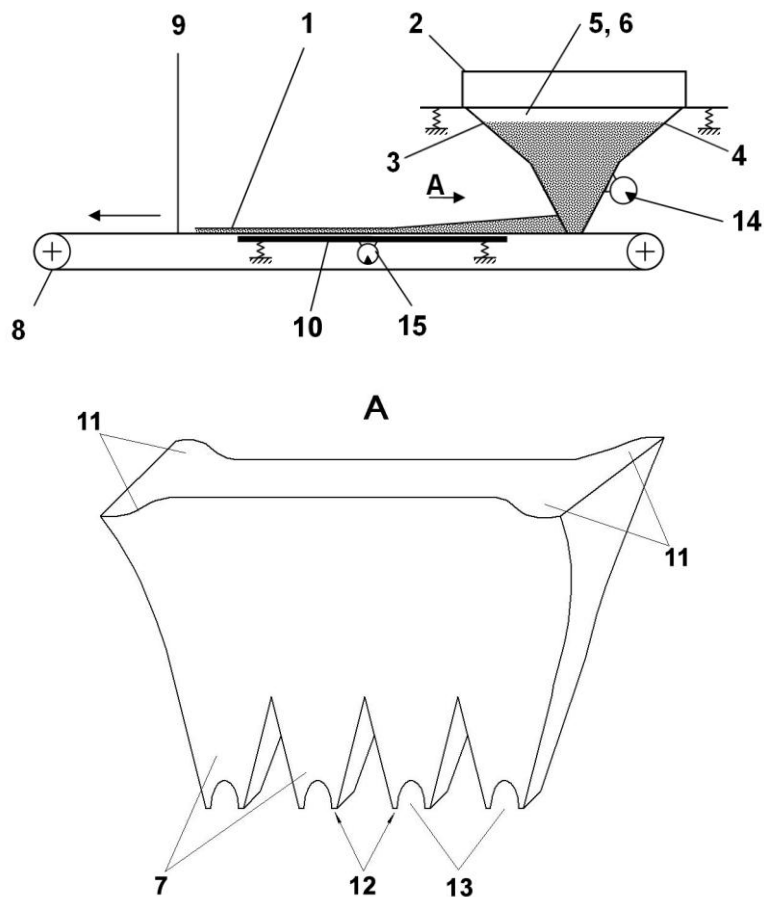


Рисунок 7.13 – Розподіл відносних швидкостей по діагоналі пірамідального каналу квадратного поперечного перерізу

Подальшим удосконаленням дозатора-живильника розчину є виконання напрямних каналів у вигляді зрізаних конусів [37]. В результаті цього отримується необхідний результат при зменшенні металоємності конструкції.

Наведені дозатори-живильники мають понижено витрату розчину у торцевих зонах бункера, що призводить до нерівномірного живлення направляючих каналів і, в результаті цього – до погіршення якості формованого шару цементно-піщаного розчину. Виконання торцевих зон бункера з розширеннями живого перерізу, які плавно збільшуються у напрямку торців і вгору (рис. 7.14), дозволяє вирівняти витрати розчину по довжині живого перерізу бункера. Це у свою чергу забезпечує рівномірне

живлення направляючих каналів і отримання якісного тонкого розчинного шару, що сприяє одержанню продукції високої якості [38].



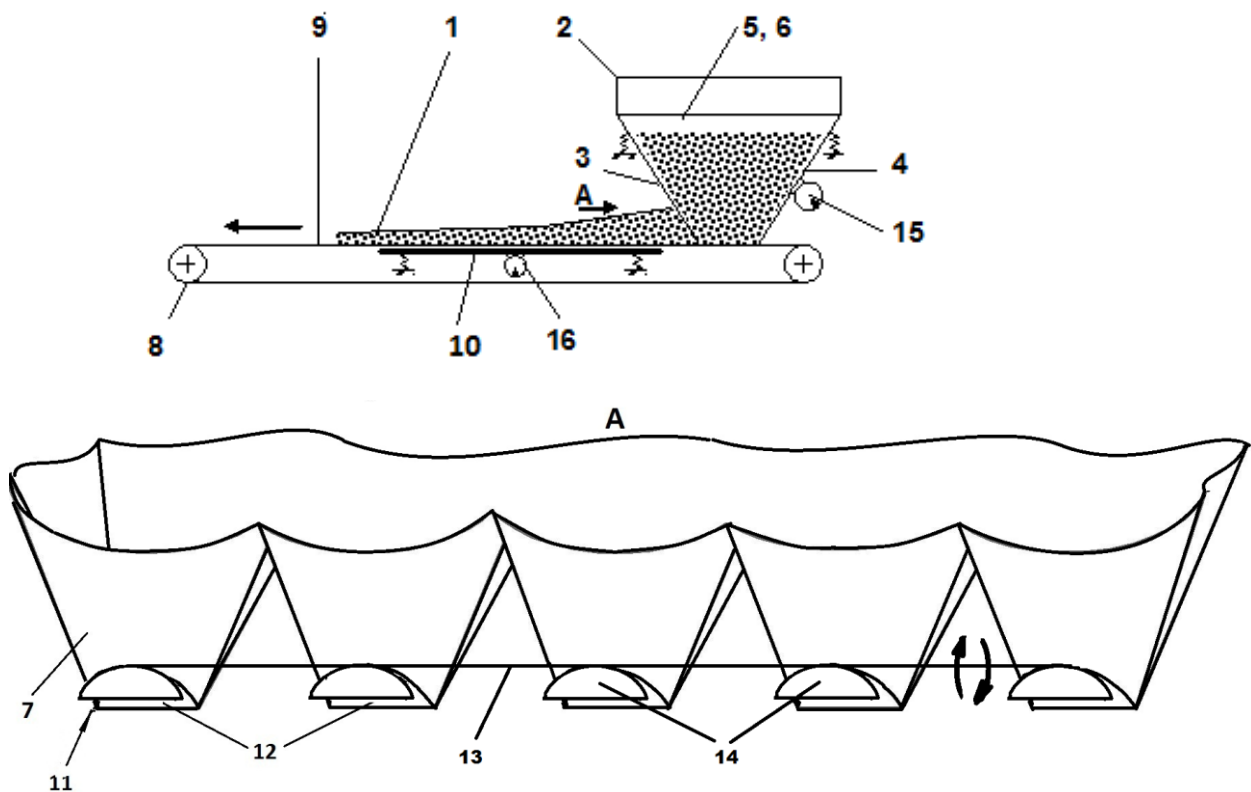
1 – шар цементно-піщаного розчину, 2 – бункер, 3-6 – похилі стінки бункера, 7 – напрямний канал, 8 – стрічковий транспортер, 9 – верхня вітка стрічкового транспортера, 10 – вібростіл, 11 – розширення; 12 – нижня крайка, 13 – виріз, 14, 15 – вібратори

Рис. 7.14. Дозатор-живильник цементно-піщаного розчину

Недоліками відомих пристроїв є відносно тривалий час формування тонкого шару цементно-піщаного розчину при проходженні вітки стрічкового транспортера по вібростолу через початкову нерівномірність розтікання «джгутів» розчину на стрічковому транспортері і неможливість

регулювання витрати цементно-піщаного розчину у широких межах через незмінний «живий переріз» вирізів на нижніх крайках каналів.

З метою вдосконалення конструкції дозатора-живильника цементно-піщаного розчину було запропоновано вихідний переріз напрямних каналів і вирізи 12 на нижніх крайках 11 напрямних каналів 7 виконати у вигляді півкіл, а над вирізами 12 напрямних каналів 7 на осі 13 жорстко закріпити заслінки 14, які змонтовані з можливістю перекриття вирізів 12 при повороті осі 13 (рис. 7.14).



1 – шар цементно-піщаного розчину, 2 – бункер, 3-6 – похилі стінки бункера, 7 – напрямний канал, 8 – стрічковий транспортер, 9 – верхня вітка стрічкового транспортера, 10 – вібростіл, 11 – нижня крайка, 12 – виріз, 13 – вісь, 14 – заслінка, 15, 16 – вібратори

Рис. 7.14. Дозатор-живильник цементно-піщаного розчину

Нове конструктивне виконання покращує процес формування тонкого шару цементно-піщаного розчину, зменшує час, який необхідний для цього і дозволяє здійснити плавне регулювання витрати цементно-піщаного розчину [39-41].

Запропоновані конструкції дозаторів-живильників мають канали, які поступово звужуються у напрямку виходу зі зміною поперечного перерізу з круглого до півкруглого.

Цементно-піщаний розчин, що знаходиться під впливом вібрації, поводить себе подібно рідині, через те найбільш придатними для розрахунку процесу є гідродинамічні теорії. Враховується, що в умовах вібраційного поля, яке створюється стандартними вібраторами, розчин являє собою псевдоньютонівську систему. Плин здійснюється під дією гідростатичного тиску маси в результаті тиксотропного зменшення в'язкості розчину.

Вважається, що в процесі роботи висота шару суміші у каналах дозатора-живильника підтримується постійною.

Для випадку наведеної форми каналу задача плину розчину була вирішена методом блочної ітерації із застосуванням прогонки по рядку. При розгляді процесу ламінарного плину за відсутністю дифузії, який здійснюється у дозаторі-живильнику, використовувався феноменологічний підхід, за яким цементно-піщаний розчин приймався як однорідне ізотропне середовище, а про структуру розчину робилися тільки загальні застереження. На рисунку 7.15, як приклад, подана розрахункова схема середньої зони каналу, де поперечний переріз має вигляд зрізаного кола.



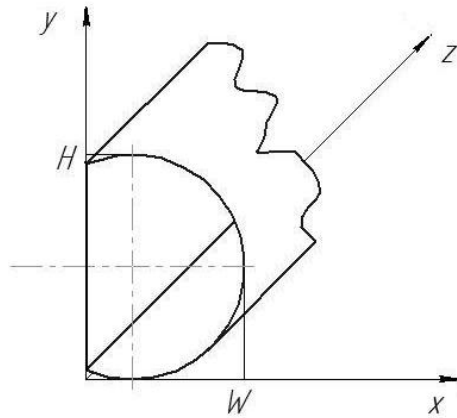


Рисунок 7.15 – Розрахункова схема процесу в каналі з поперечним перерізом у вигляді зрізаного кола (H і W – габаритні розміри живого перерізу каналу)

У разі ламінарного ізотермічного плинку нестисливої ньютонівської рідини в каналі з поперечним перерізом у вигляді зрізаного кола рівняння Нав'є-Стокса приймає наступний вигляд:

$$\Delta u_z = \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (7.3)$$

Для області з контуром криволінійної форми  $\Gamma$ :

$$u_z(x, y)|_{\Gamma} = 0. \quad (7.4)$$

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

Розв'язання задачі (7.3) і (7.4) проводили методом скінченних різниць. З цією метою вводили рівномірну за кожним напрямком різницеву сітку:

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

де  $h$  і  $l$  – кроки сітки в координатах  $x$  і  $y$ .

На сітці щ задачі (7.3), (7.4) були поставлені у відповідність різницеві рівняння, апроксимуючи похідні скінченно-різницевиими співвідношеннями. В результаті отримали:

$$\left[ (u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}) / h^2 \right] + \left[ (u_{i,j-1} - 2u_{i,j} + u_{i,j+1}) / l^2 \right] = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (7.5)$$

$$u_{i,j} \Big|_{\Gamma} = 0. \quad (7.6)$$

У разі застосування області довільної форми, яка задовольняє умові, що лінії сітки, паралельні осі  $y$ , можуть перетинати границі  $\Gamma$  тільки в двох точках, систему алгебраїчних рівнянь (7.5), (7.6) вирішували методом блочної ітерації із застосуванням прогонки по рядку.

Розрахунок швидкості, який базується на використанні зазначеного методу і врахуванні наведених припущень, дає можливість оцінити процес плин у розчину в каналі дозатора-живильника з поперечним перерізом у вигляді зрізаного кола.

Для визначення характеру зміни складової швидкості плин у поперізу каналу дозатора-живильника була розроблена програма розрахунку на ПЕОМ. В її основу покладено метод сітки, що включає в себе наближений розв'язок еліптичного рівняння. Розміри каналу, які були використані в розрахунку, становлять:  $H=0,05$  м,  $W=0,035$  м [42 – 44].

Результати виконання розрахунку наведені на рисунку 7.16, де  $u_{\max}$  – максимальна швидкість плин у ньютонівської рідини в каналі, м/с.

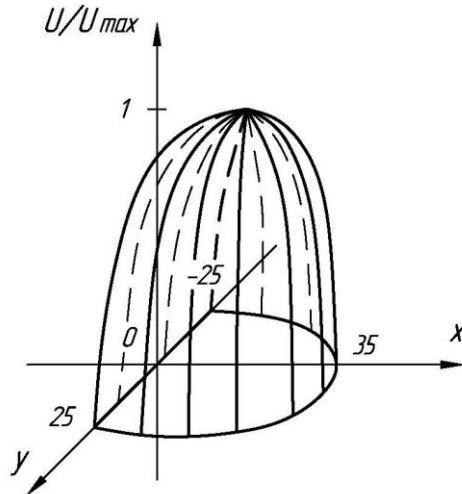
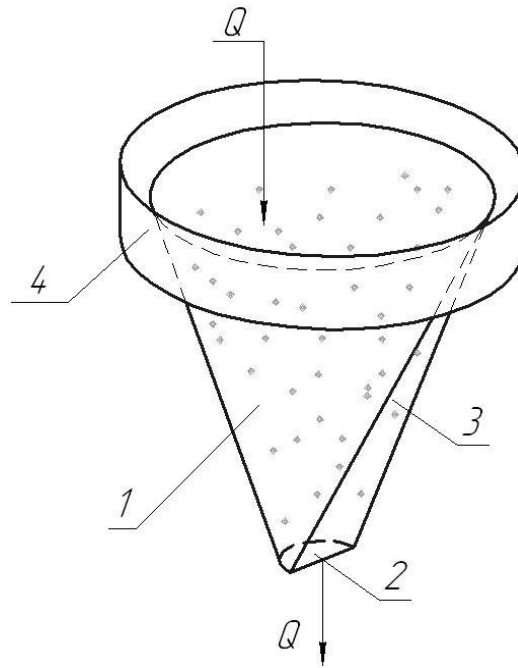


Рисунок 7.16. Розподіл відносних швидкостей  $u/u_{\max}$  в каналі дозатора-живильника

Для підтвердження теорії плинущого цементно-бетонного розчину була виготовлена експериментальна установка. Конусний канал 1 має вихідний отвір 2 і приварений трикутник 3. Карман 4 забезпечує безвихрову подачу рідини та допомагає підтримати її на постійному рівні (рис. 7.17).

Основними положеннями фізичної моделі процесу є такі:

- 1) бетонна суміш під впливом вібрації, поводить себе подібно рідині, через те розрахунок процесів проводять за гідродинамічними теоріями;
- 2) плин суміші у каналах бункера розглядаємо, як послідовний плин у каналі зі змінним поперечним перерізом, що починається з кола і закінчується півколом;
- 3) використовуємо феноменологічний підхід, який приймає фібробетонну суміш, як однорідне ізотропне середовище;
- 4) вібруючі бетонні суміші при вібрації являють собою псевдоньютонівські системи;
- 5) плин розчину здійснюється під дією тиску маси в результаті зменшення в'язкості композиції.



1 – конусний канал; 2 – вихідний отвір; 3 – трикутник; 4 - карман.  
 Рисунок 7.17. Експериментальний канал зі змінною конфігурацією поперечного перерізу

Виходячи з вищесказаного, для достовірності дослідних значень експериментальна рідина має бути ньютонівською. Процес був змодельований на воді, температура якої дорівнювала  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Після встановлення сталого рівня рідини у експериментальному каналі –  $0,165\text{ м}$  – через канал через кожні  $5^{\circ}$  (рисунок 7.18) подавалися краплини гелю. Спостереження за краплиною дозволили візуально підтвердити теорію плинності фібробетонної суміші, А саме те, що рух є прямолінійним вздовж променя, який виходить з початку координат і змінюється по перерізу каналу зі зміною кута  $\varphi$ .

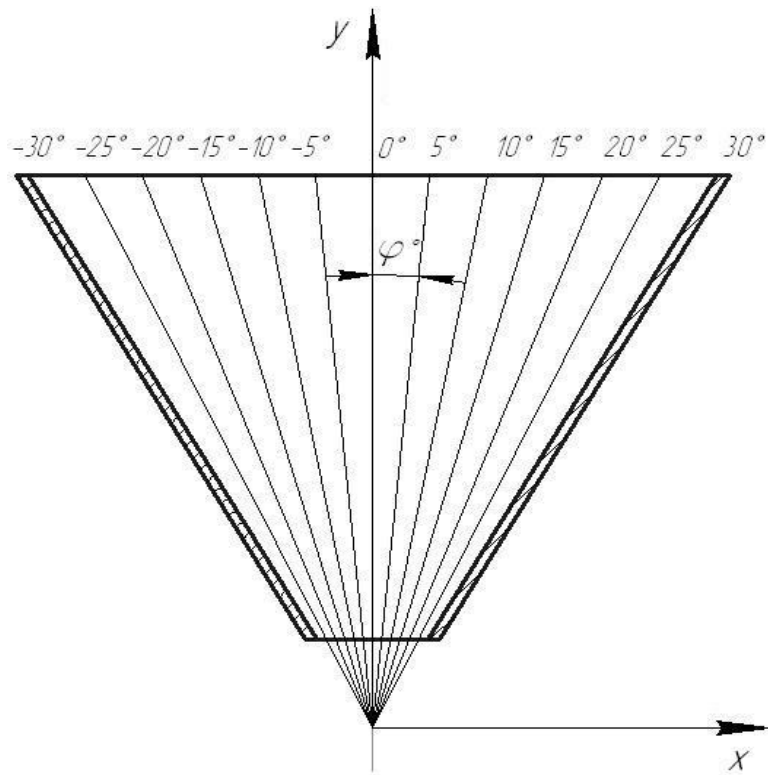


Рисунок 7.18. Схема поділу експериментального каналу на кути

Метою досліджень було визначення швидкості плинущої експериментальної рідини в каналі бункера залежно від поточного кута  $\varphi$  між напрямком руху і вертикаллю.

Перевірено адекватність розробленої математичної моделі результатам експерименту. Відносна похибка при цьому склала не більше 6,4%.

## 8. УДОСКОНАЛЕННЯ ДОЗАТОРА-ЖИВИЛЬНИКА ФІБРОВОЇ АРМАТУРИ

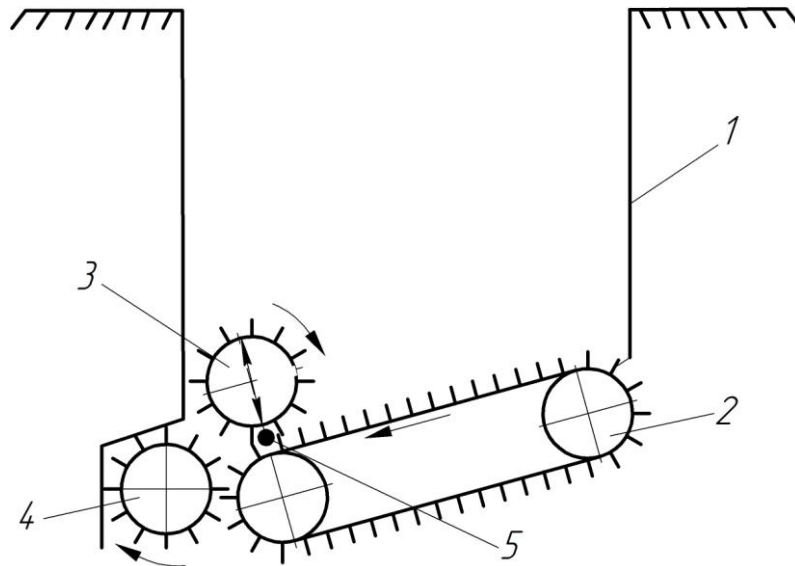
Наявність шибера у традиційному дозатору-живильнику дисперсної арматури призводить до руйнування фібр, які скупчуються між голчастим барабаном і шибером. В результаті міцність виробів зменшується.

Тому було запропоновано голчастий барабан встановити з можливістю його переміщення відносно похилого транспортера і фіксації в заданому положенні [45, 46]. Це забезпечує однакову об'ємну витрату фібр і зменшення їх руйнування за рахунок регулювання продуктивності змінюванням відстані голчастого барабана до похилого транспортера. При цьому зменшуються руйнуючі навантаження на фібри, зберігається їх довжина і, відповідно, властивості, як дисперсної арматури. В результаті покращується якість виробів.

У верхню частину бункера 1 завантажують фібри, які похилим транспортером 2 з голчастою стрічкою подаються в напрямку роздавального вікна 5. Роздавальне вікно 5 забезпечує необхідну витрату фібрової арматури за рахунок змінення величини зазору між нижньою частиною похилого транспортера 2 і голчастим барабаном 3. Змінення зазору здійснюється переміщення голчастого барабана 3. На виході з дозатора-живильника встановлено розпушуючий голчастий барабан 4, який обертається з більшою швидкістю, ніж голчастий барабан 3 і призначений для розбивання можливих скупчень фібр. Виходячи з дозатора-живильника фібри подаються на змішування з розчином, цементом або іншими будівельними сумішами (рис. 7.19).

Пропонована конструкція забезпечує безперервну рівномірну подачу фібр без їх руйнування, за рахунок чого покращується якість будівельних

виробів.



1 – бункер, 2 – транспортер, 3 – голчастий барабан, 4 – розпушуючий голчастий барабан, 5 – роздавальне вікно

Рисунок 8.1. Схема дозатора-живильника фібр

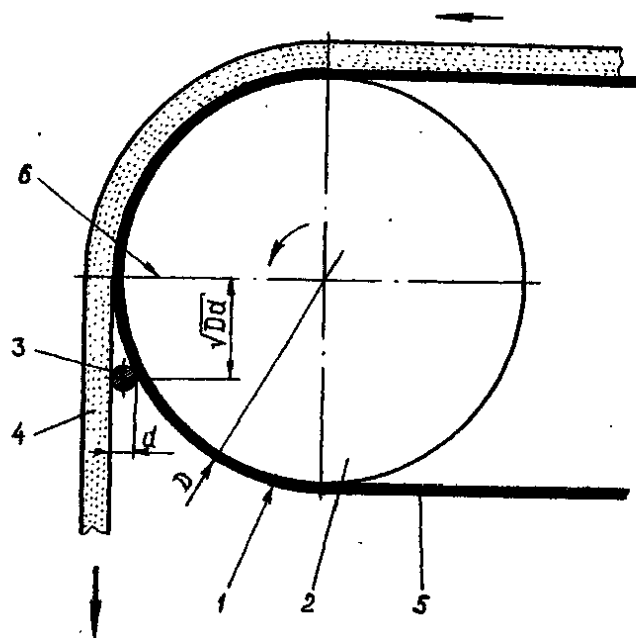
## 9. ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІШУВАННЯ ФІБРОБЕТОННОЇ СУМІШІ

### 9.1. Подача фібробетонної суміші на перемішування

Шар розчину разом з зануреними в нього фібрами подається на перемішування з конвеєра 4 в віброекструдер 5 (рис. 6.1). Для відокремлення від поверхні конвеєра пастоподібного шару краще застосовувати віддільник у вигляді струни [47] замість плоского ножа.

Пристрій для відділення фібророзчинного шару від циліндричної поверхні діаметром  $D$  за допомогою струни діаметром  $d$  поданий на рисунку 9,1.

При встановленні віддільника 3 на відстань  $\sqrt{Dd}$  нижче горизонтальної площини 6 виключається згинання сформованого шару 4, а отже і утворення дефектів на його поверхні та одержання продукції високої якості. Використання замість ножів віддільника фібророзчинного шару у вигляді струни, зорієнтованою певним чином відносно циліндричної поверхні, значно зменшує площу контакту сформованого шару з віддільником, покращує умови відділення шару розчину і зменшує енергоємність процесу. При цьому швидкість віброекструзії й міцність сформованих фібробетонних виробів підвищились, відповідно, у 1,40 і 1,17 рази.



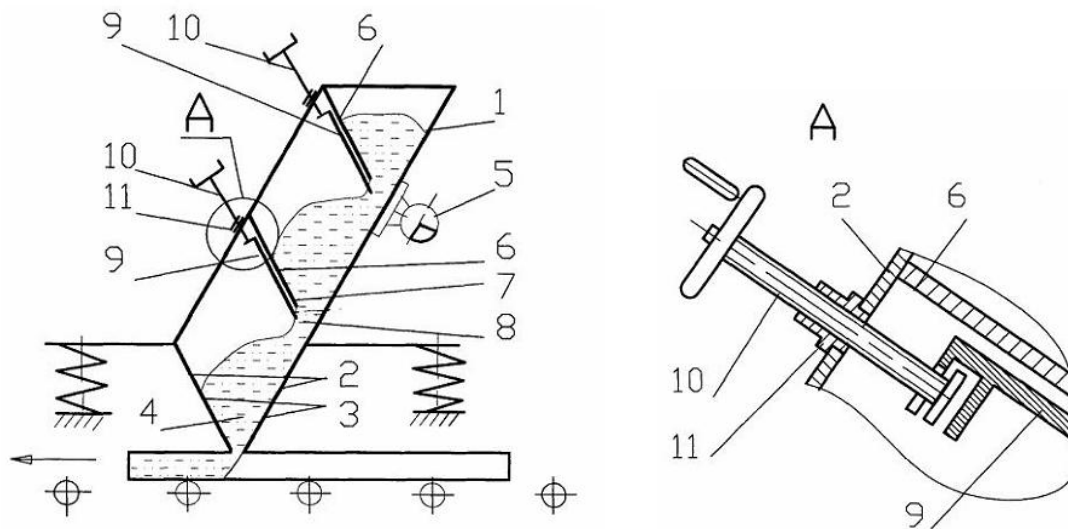
1 – циліндрична поверхня, 2 – циліндричний валок, 3 – віддільник (струна),  
4 – фібророзчинний шар, 5 – стрічка транспортера, 6 – горизонтальна  
площина

Рисунок 9.1. Схема дозатора-живильника фібр



## 9.2. Удосконалення обладнання для перемішування

Ефективне перемішування компонентів фібробетонної суміші забезпечується за рахунок застосування пристрою з декількома відсіками, які утворюються похилими перегородками та стінкою бункера віброекструдера [48]. В цьому випадку суміш у кожному відсіку заново перерозподіляється, внаслідок чого піддається більш рівномірній дії зсувних деформацій. У разі регулювання розмірів роздавальних вікон відсіків (рис. 9.2) можна змінювати величину деформації зсуву, якій піддається оброблювана суміш [49].

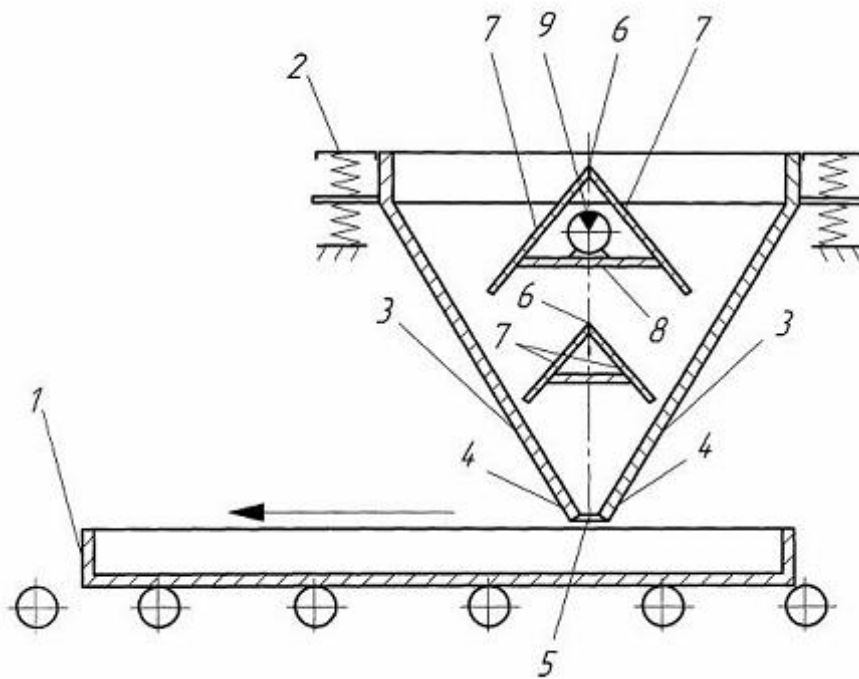


1 – бункер, 2 – похила стінка, 3 – нижня ділянка похилої стінки, 4 – роздавальне вікно, 5 – збудник коливань, 6 – похила перегородка, 7 – нижня крайка похилої перегородки, 8 – роздавальне вікно, 9 – додаткова перегородка, 10 – нарізна тяга, 11 – гайка

Рисунок 9.2. Віброекструдер, що змішує

Порівняно з наведеними пристроями вдосконалений віброекструдер [50] споряджено додатковими перегородками з крізними вікнами, які розташовані симетрично основним. За рахунок наявності двох паралельних

змішувальних ділянок в цьому пристрої забезпечується більша продуктивність. А спорядження однієї з пар похилих перегородок в її нижній частині горизонтальною перегородкою, на якій кріпиться збудник коливань (рис. 9.3), забезпечує рівномірність коливань кожної похилої перегородки, а отже і рівномірність властивостей одержуваної суміші по всьому її об'єму [51].

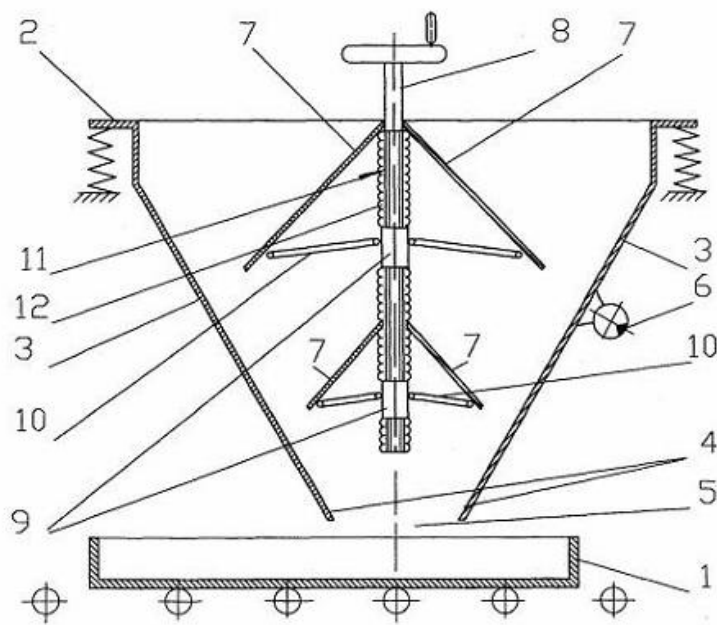


1 – форма, 2 – бункер, 3 – похила стінка, 4 – нижня ділянка похилої стінки,  
 5 – роздавальне вікно, 6 – пара з'єднаних між собою вершинами похилих  
 перегородок, 7 – похила перегородка, 8 – горизонтальна перегородка. 9 –  
 збудник коливань

Рисунок 9.3. Віброекструдер, що змішує

Для регулювання розмірів отворів, утворених похилими перегородками та стінкою бункера, кожного з відсіків бункера, а отже і величину деформації зсуву, якій піддається оброблювана суміш, похилі

перегородки з'єднують між собою шарнірно, а крізь вершини похилих перегородок пропускають нарізний вертикальний вал, споряджений гайками, кількість яких відповідає кількості пар похилих перегородок (рис. 9.4). У найприйнятнішому прикладі виконання віброекструдера відкриті ділянки нарізного вертикального вала розміщені всередині гофрованих шлангів [52].

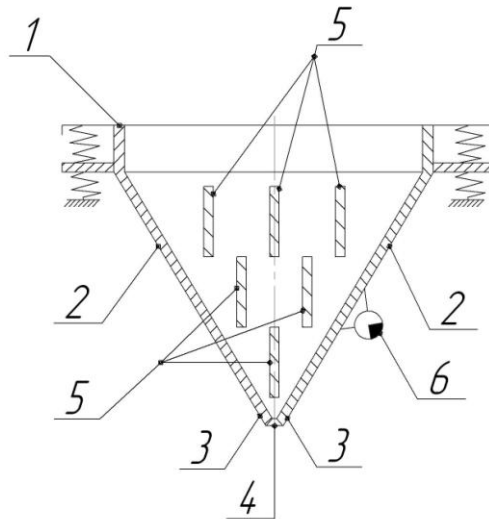


1 – форма, 2 – бункер, 3 – похила стінка, 4 – нижня ділянка похилої стінки, 5 – роздавальне вікно, 6 – збудник коливань, 7 – похила перегородка, 8 – нарізний вертикальний вал, 9 – гайка, 10 – тяга, 11 – відкриті ділянки нарізного вертикального вала, 12 – гофрований шланг

Рисунок 9.4. Віброекструдер, що змішує

Запропонована конструкція віброекструдера з перегородками всередині у вигляді вертикальних пластин, причому кількість пластин у рядах зменшується по ходу плинусуміші, а самі пластини у рядах розташовані у шаховому порядку (рис. 9.5). Таке конструктивне виконання забезпечує рівномірність зсувних деформацій, а отже і рівномірність

змішання суміші по перерізу бункера віброекструдера і, відповідно, властивостей одержуваної бетонної суміші по всьому її об'єму [53].

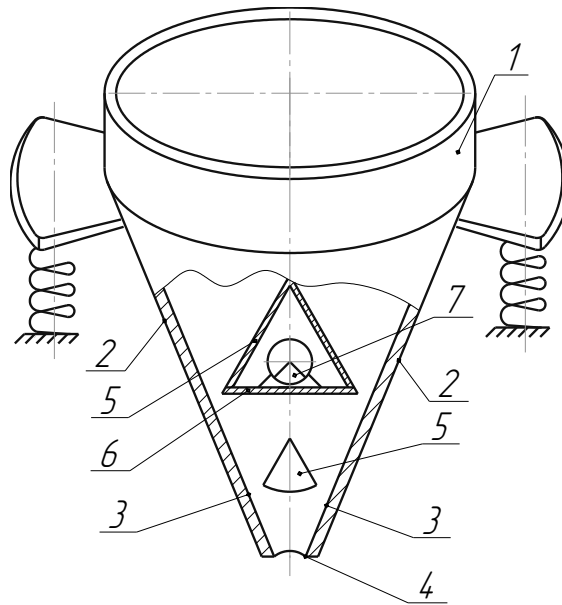


1 – бункер, 2 – похила плоска стінка, 3 – нижня ділянка похилої плоскої стінки, 4 – роздавальне вікно, 5 – вертикальна пластина, 6 – збудник коливань

Рисунок 9.5. Віброекструдер для змішання та формування фібробетонних виробів

Каскадний віброекструдер [54] з конічним каналом, на відміну від відомих віброекструдерів з плоскими каналами, забезпечує необхідні сумарні зсувні деформації і при цьому характеризуються меншою площею стінок, а сам апарат, відповідно, меншою металоємністю всієї конструкції (рис. 9.6).

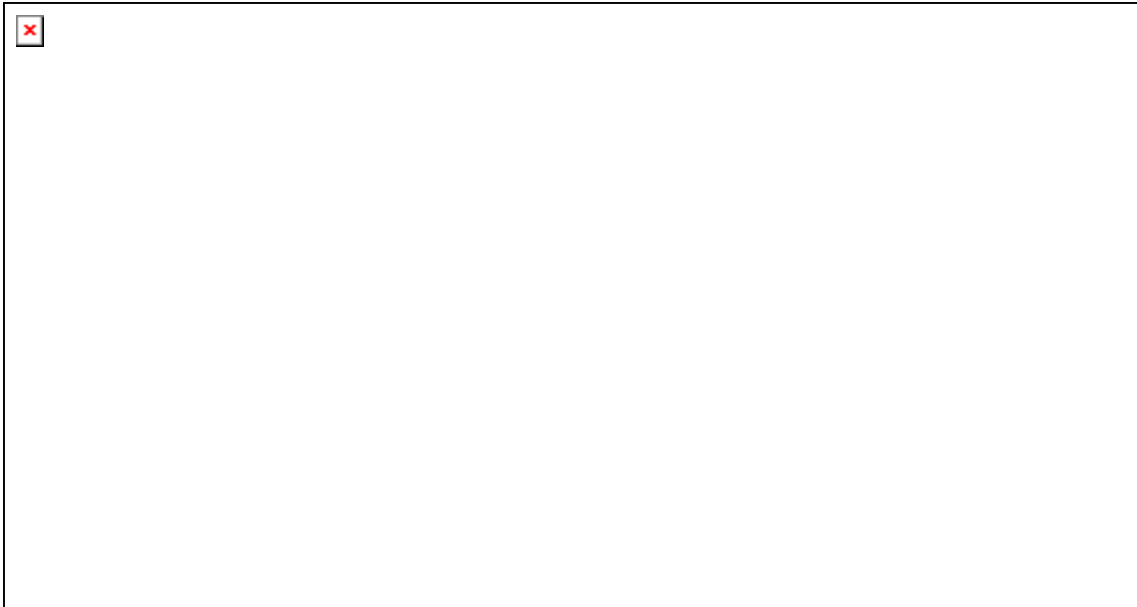
Удосконалена конструкція віброекструдера [55] забезпечує можливість регулювати розмір кільцевих отворів, утворених конусами та стінкою бункера, а отже і величину деформації зсуву, якій піддається оброблювана суміш.



1 – бункер, 2 – похилі стінки, 3 – нижні ділянки похилих стінок, 4 – роздавальне вікно, 5 – направляючі пристрої, 6 – горизонтальна перегородка, 7 – збудник коливань

Рисунок 9.6. Віброекструдер для змішування бетонних сумішей

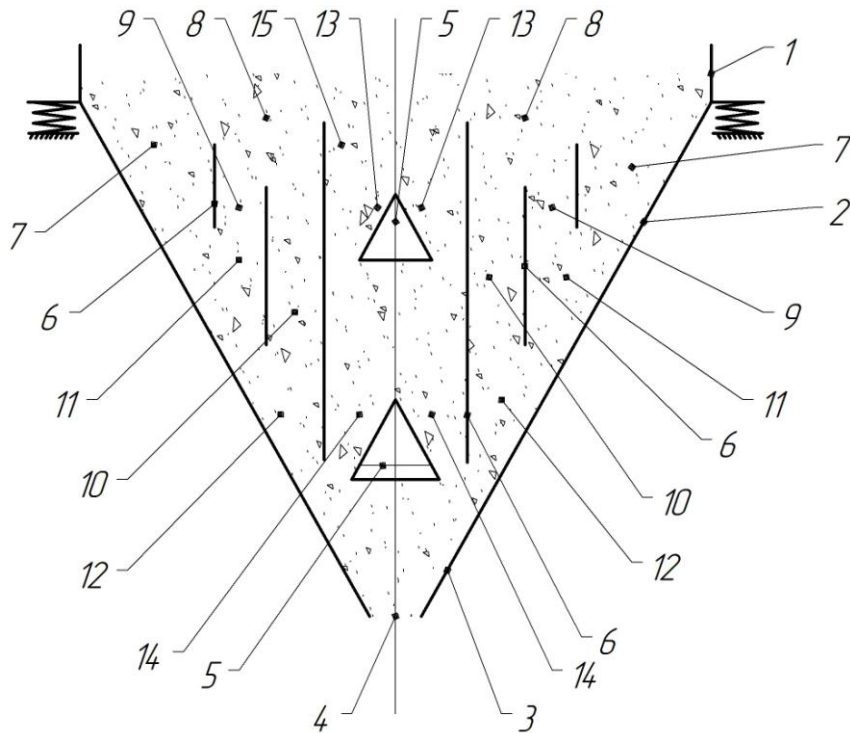
Для рівномірної подачі суміші по ширині формуючого віброекструдера, а отже і вирівнювання величини деформації зсуву, якій надалі піддається оброблювана суміш, нижня частина бункера віброекструдера виконується у вигляді розташованих в ряд щонайменше двох перевернутих зрізаних конусів, направляючі пристрої закріплюються всередині цих перевернутих зрізаних конусів, а роздавальне вікно являє собою ряд отворів (рис. 9.7). У найприйнятнішому прикладі виконання пристрою над направляючими пристроями встановлюється у шаховому порядку щонайменше ще один ряд направляючих пристроїв [56].



1 – бункер, 2 – перевернутий зрізаний конус, 3 – нижні ділянки перевернутого зрізаного конуса, 4 – роздавальне вікно, 5 – направляючий пристрій

Рисунок 9.7. Віброекструдер для змішування фібробетонних сумішей

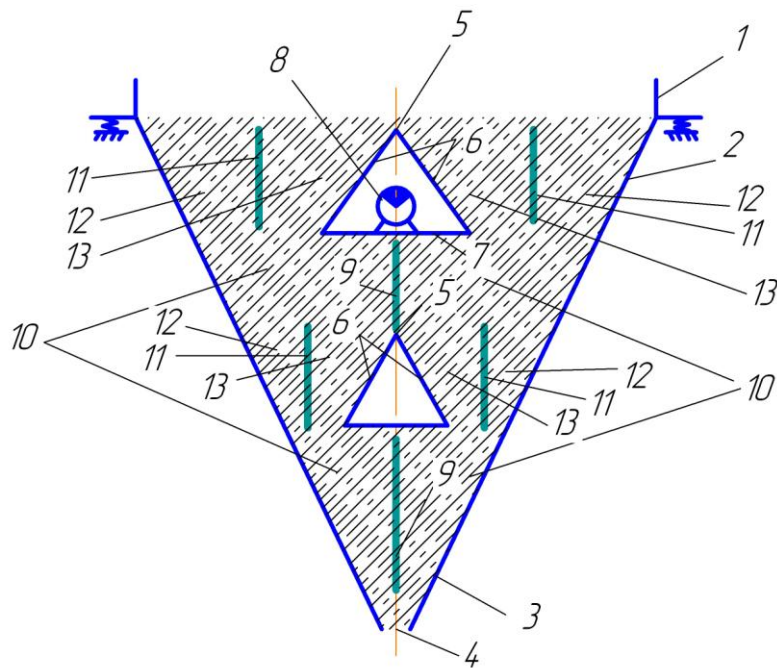
Вирівнювання величини деформації зсуву, якій піддається оброблювана суміш у живому перерізі бункера віброекструдера, можна досягти встановленням навкруги направляючих пристроїв перемішуючі пристрої у вигляді концентрично розташованих труб (рис. 9.8) з можливістю їх переміщення по висоті і фіксації на стінках бункера в заданому положенні [57].



1 – бункер, 2 – стінка бункера, 3 – нижня ділянка стінки бункера, 4 – роздавальне вікно, 5 – направляючий пристрій, 6 – перемішуючий пристрій, 7-14 – кільцеві канали, 15 – круглий канал

Рисунок 9.8. Віброекструдер для змішування фібробетонних сумішей

Рівномірне змішування фібробетонної суміші за рахунок вирівнювання деформацій зсуву у всьому об'ємі оброблюваної суміші при її проходженні каналів бункера віброекструдера забезпечується також за рахунок встановлення всередині бункера під кожною парою похилих перегородок і з обох їх боків вертикальних перегородок [58].



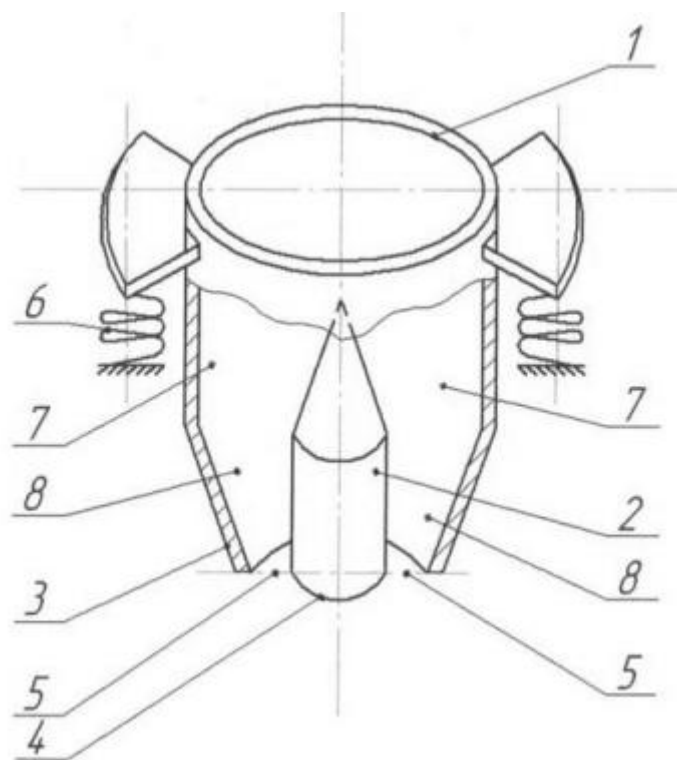
1 – бункер, 2 – похила плоска стінка, 3 – нижня ділянка похилої плоскої стінки, 4 – роздавальне вікно, 5 – пара з'єднаних між собою вершинами похилих перегородок, 6 – похила перегородка, 7 – горизонтальна перегородка, 8 – збудник коливань, 9 – вертикальна перегородка, 10 – плоский несиметричний канал, 11 – вертикальна перегородка, 12-13 – плоскі несиметричні канали

Рисунок 9.9. Віброекструдер для змішування фібробетонних сумішей

Рівномірну якість змішування у всьому об'ємі суміші забезпечує віброекструдер, корпус якого складається з циліндричної обичайки і конічного днища, направляючий пристрій має верхню конічну і нижню циліндричну частини і встановлюється таким чином, що між ним і внутрішньою поверхнею корпуса утворюються послідовно два кільцеві несиметричні канали. Ці канали мають одну похилу і одну вертикальну стінки, а роздавальне вікно утворюється нижніми ділянками корпуса і



направляючого пристрою (рис. 9.10). Виконання віброекструдера із зазначеними відмітними ознаками дозволяє здійснювати процес ламінарного конвективного змішування у несиметричних кільцевих каналах, а отже і забезпечує найкращу якість змішування у всьому об'ємі суміші, за рахунок чого покращується її однорідність і якість виробів. Крім того, у запропонованому віброекструдері при наявності тільки одного направляючого пристрою утворюються два різних кільцевих канали [59].



1 – корпус, 2 – направляючий пристрій, 3 – нижня ділянка корпуса, 4 – нижня ділянка направляючого пристрою, 5 – кільцеве роздавальне вікно, 6 – пружні зв'язки, 7-8 – кільцеві несиметричні канали

Рисунок 9.10. Віброекструдер для змішування фібробетонних сумішей

## 10. ОРІЄНТУВАННЯ ФІБР В ПРОЦЕСІ ВІБРОЕКСТРУЗІЇ

### 10.1. Розрахунок ступеня орієнтації дисперсної арматури при плинні фібробетону між плоскими паралельними нерухомими стінками

Розрахункова схема подана на рисунку 10.1.

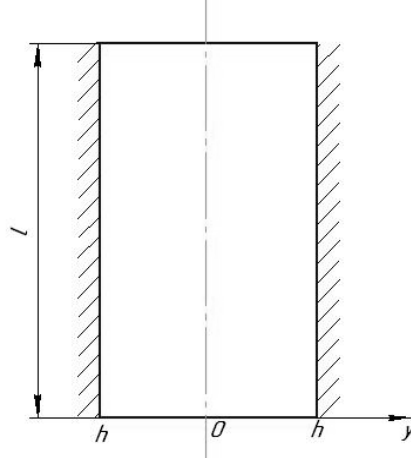


Рис.10.1. Розрахункова схема процесу плинину між плоскими паралельними нерухомими стінками

При усталеному ламінарному ізотермічному плинні нестисливої ньютонівської рідини у плоскій щілині шириною  $2h$ , що складається з паралельних пластин (плоскому пуазейлевому плинні) рівняння для розподілу швидкостей має вигляд:

$$U(y) = U \left[ 1 - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right], \quad (10.1)$$

де  $U$  – швидкість на осі каналу (або максимальне значення швидкості у плоскій щілині), м/с.

З рівняння (10.1) знаходимо швидкість зсуву:

$$\dot{\gamma} = -\frac{2Uy}{h^2} \quad (10.2)$$

Час перебування фібробетонної суміші на ділянці довжиною  $l$ :

$$t = \frac{l}{U(y)} = \frac{l}{U \left[ 1 - \left( \frac{y}{h} \right)^2 \right]} \quad (10.3)$$

Використовуючи рівняння (10.2) і (10.3) отримаємо величину деформації зсуву:

$$\gamma = \dot{\gamma}t = \frac{2yl}{h^2 - y^2} \quad (10.4)$$

Кут нахилу фібр  $\alpha$  відносно осі плинину в результаті проходження сумішшю ділянки довжиною  $l$  можна визначити наступним чином:

$$\alpha = \text{arctg}|\gamma| = \text{arctg} \left| \frac{2yl}{h^2 - y^2} \right| \quad (10.5)$$

Розглянемо приклад плинину фібробетонної суміші у плоскій щілині шириною  $2h = 0,04$  м і довжиною  $l = 0,2$  м. Кут нахилу фібр  $\alpha$  відносно осі плинину розрахуємо за допомогою формули (10.5). Результати розрахунків наведені на рисунках 10.2 і 10.3 [60].

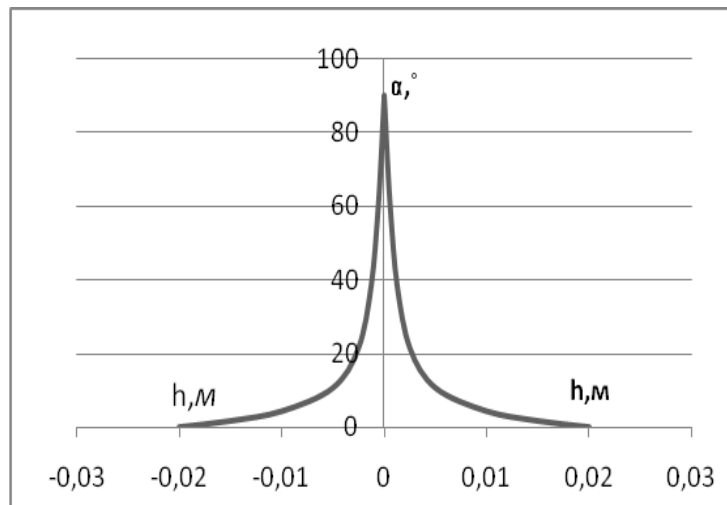


Рис.10.2. Орієнтація фібр по ширині плоскої щілини

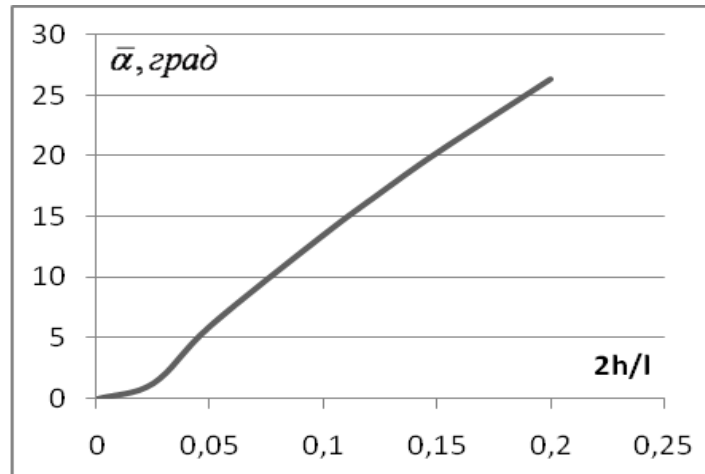


Рис.10.3. Середнє значення кута нахилу фібр  $\bar{\alpha}$  залежно від відносної ширини плоскої щілини

## 10.2. Розрахунок орієнтування фібр у симетричному плоскому каналі, який звужується

Використовуючи формулу (5.6) можна знайти кут нахилу фібр  $\beta$  відносно осі  $r$  в результаті проходження сумішшю каналу, що звужується [61]:

$$\beta = \text{arcctg} \left[ \bar{\gamma}_c \varphi \right] = \text{arcctg} \left| \frac{2 \sin 2\varphi \ L_2 - L_1^2}{L_1 L_2 \cos 2\varphi - \cos 2\varphi_0 \ln \frac{L_2}{L_1}} \right| \quad (10.6)$$

Результати розрахунку за формулою (10.6) подано на графіку (рис.10.4):

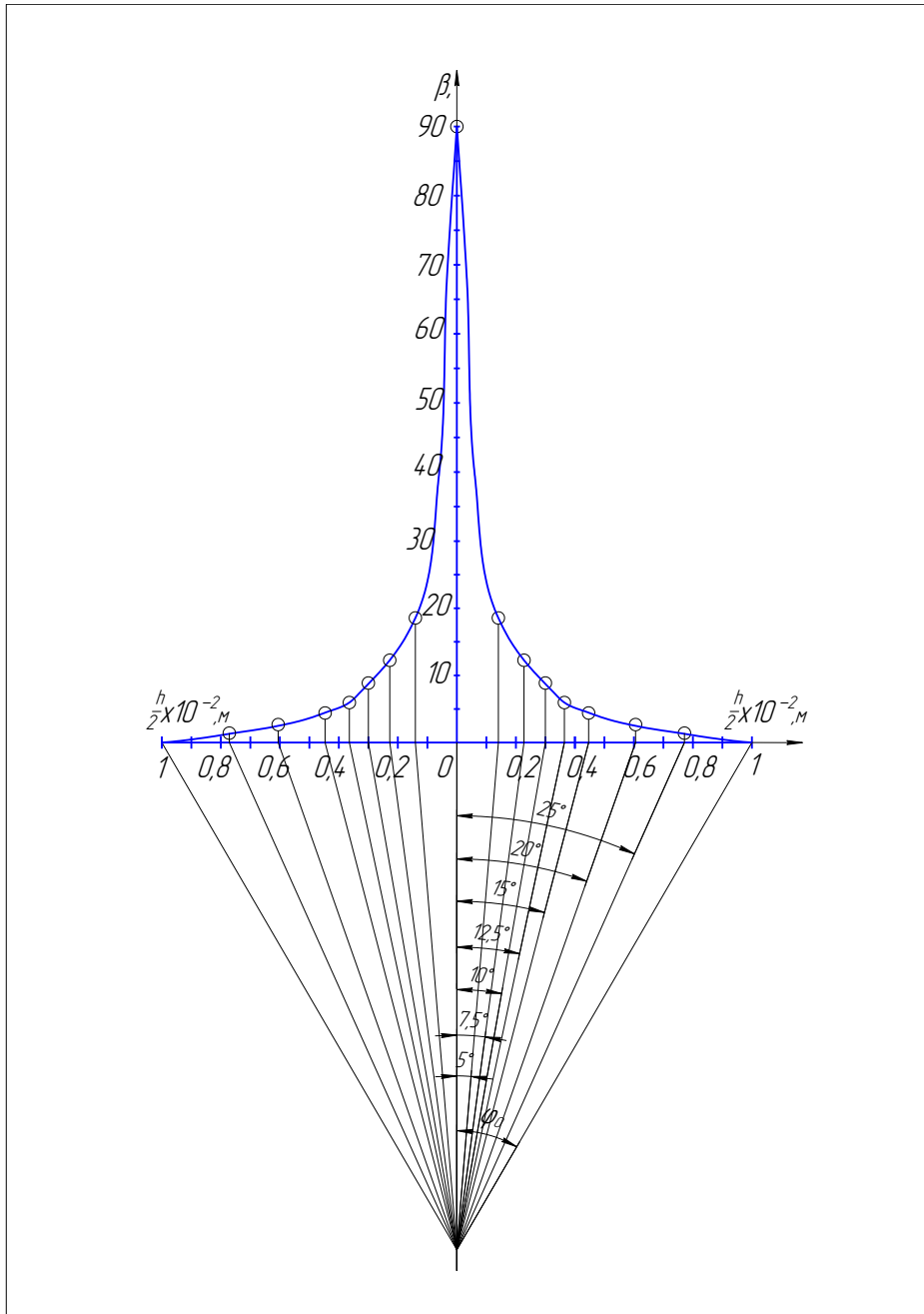


Рис. 10.4. Орієнтація фібр відносно радіусів плинн течії в симетричному каналі

Кут нахилу фібр по товщині виробу  $\alpha$  відносно осі формування:

$$\alpha = \beta - \varphi$$

Орієнтація фібр відносно напрямку формування в симетричному каналі наведена на рисунку 10.5 при  $0 \leq \varphi_0 \leq 30^\circ$ ,  $0 \leq \beta \leq 90^\circ$ .

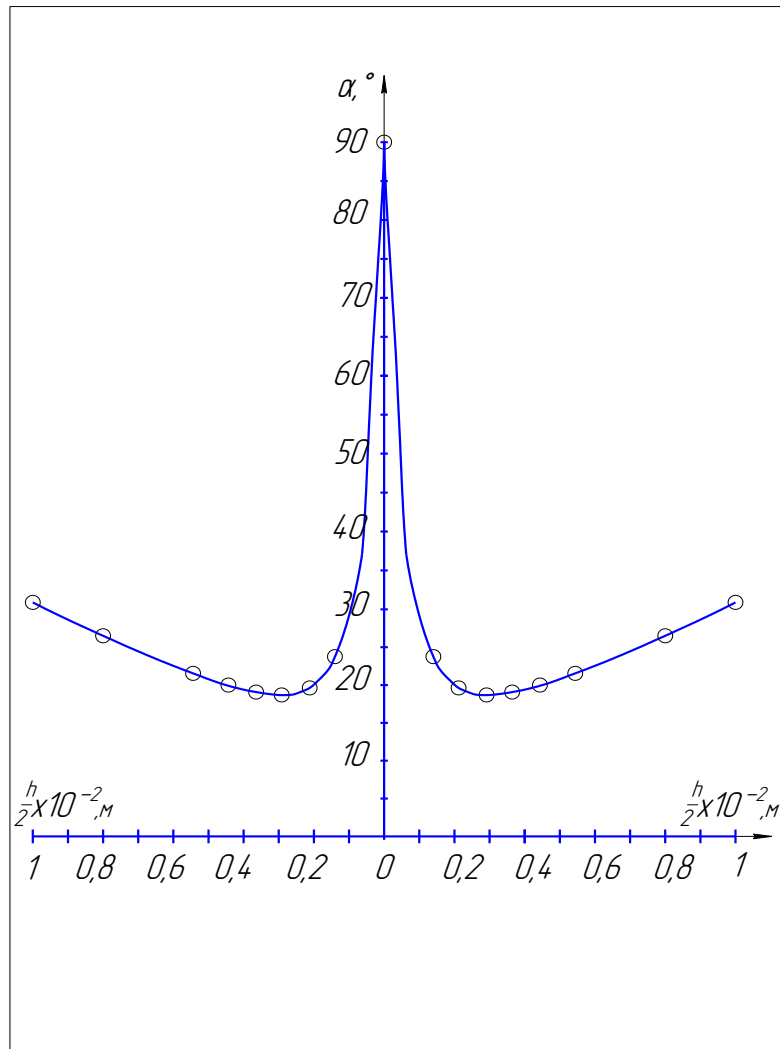


Рис. 10.5. Орієнтація фібр відносно напрямку формування в симетричному каналі

Як бачимо, орієнтація фібр найгірша в центрі каналу, а біля стінок виробу кут нахилу фібри відносно вертикальної прямої дорівнює куту нахилу стінок бункера віброекструдера.

Розглянемо приклад формування плоскої фібробетонної плити товщиною 0,03 м і шириною 0,4 м, якщо висота шару суміші в бункері віброекструдера дорівнює 0,19 м а кут нахилу стінок бункера до вертикалі  $\varphi_0 = 30^\circ$ . Тоді при розгляді орієнтування фібр по ширині виробу  $L_1 = 0,4 / 2 \operatorname{ctg} 30^\circ$ , а  $L_2 = L_1 + 0,19$  м. Кут нахилу фібр  $\beta$ , що утворюється внаслідок віброекструзії суміші в цьому перерізі, розрахуємо за допомогою формули (10.6).

Таким же чином можна оцінити і орієнтацію фібр уздовж ширини плити.

Результати розрахунків наведені на рисунках 10.6 і 10.7.

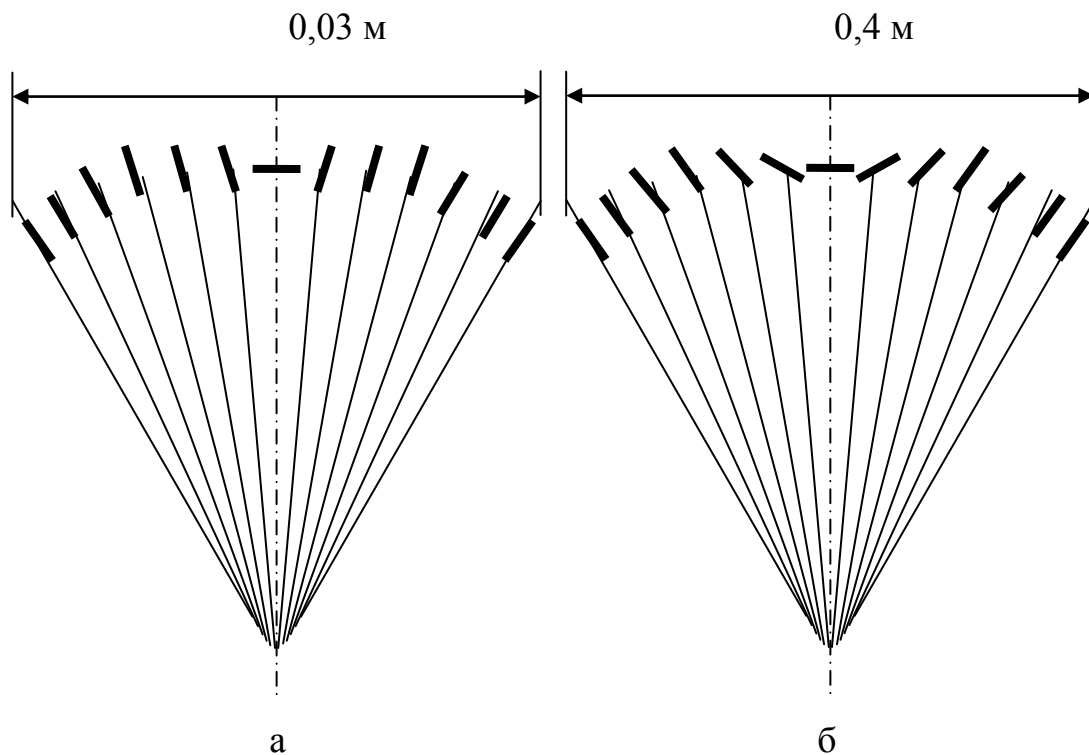


Рис. 10.6. Розташування фібр в екструдаті на виході каналу, що звужується по товщині (а) і уздовж ширини (б)

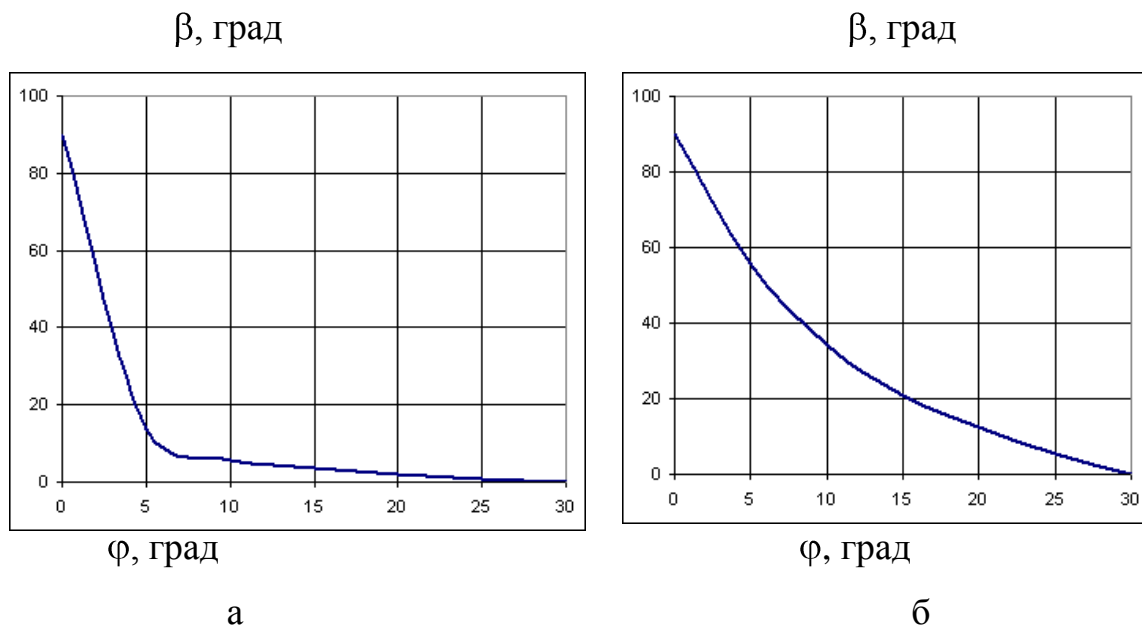
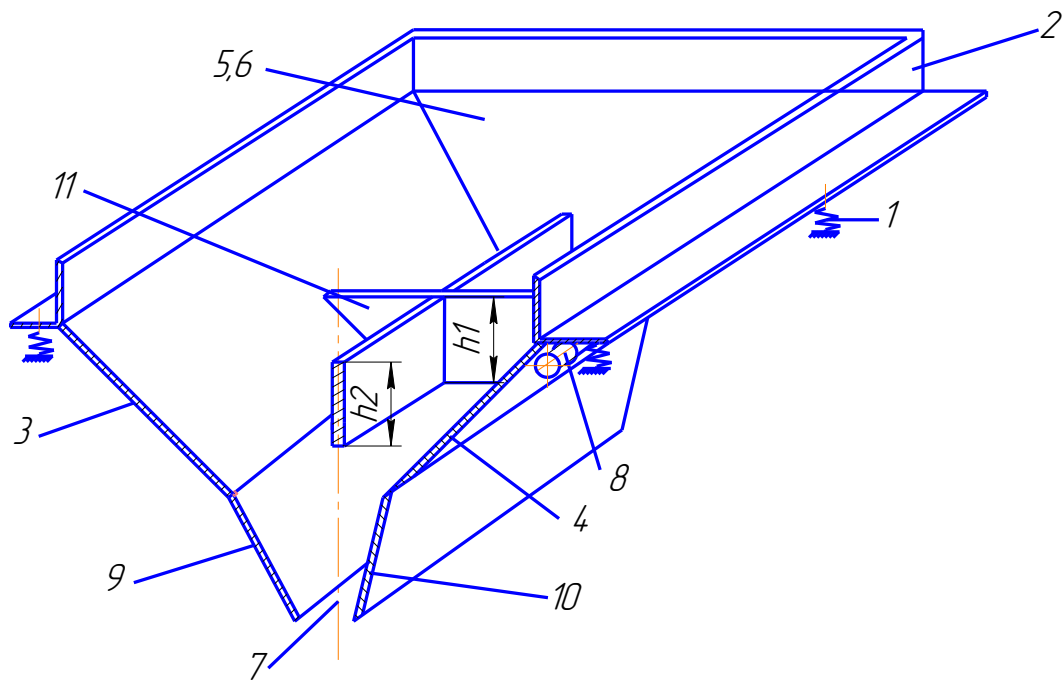


Рис. 10.7. Орієнтація фібр у плоскому екструдаті на виході каналу, що звужується по товщині (а) і уздовж ширини (б)

### 10.3. Забезпечення необхідної орієнтації дисперсної арматури при віброекструзії

Для вирівнювання ступеню поздовжньої орієнтації фібр у всьому виробі запропоновано похилі стінки бункера віброекструдера виконувати ламаними зі зменшенням кута нахилу відносно вертикалі у нижній частині, при цьому цей кут не може дорівнювати нулю для хоч би однієї найширшої стінки, а у середній частині бункера жорстко закріплюється внутрішня хрестоподібна вставка (рис. 10.8). У найприйнятніших прикладах виконання пристрою перегин різних стінок бункера у нижній частині виконується на різній висоті, а висота плоских вертикальних пластин, з яких складається хрестоподібна вставка, різна [62].





1 – пружні опори, 2 – бункер, 3-6 – похилі стінки, 7 – формуючий мундштук, 8 – збудник коливань, 9, 10 – нижні частини стінок

Рис. 10.8. Віброкструдер для формування фібробетонних виробів

Наведений віброкструдер дозволяє спочатку фібробетонній суміші добре ущільнитися, а потім, при плинні суміші у нижній частині бункера, збільшити ступінь орієнтування фібр уздовж осі формування по краях виробу, що формується. При цьому кут нахилу у нижній частині бункера не може дорівнювати нулю для хоч би однієї найширшої стінки для виключення розривів суцільності плинущої фібробетонної суміші. Жорстке закріплення у середній частині внутрішньої хрестоподібної вставки, де зсувні деформації суміші мінімальні, дозволяє значно збільшити деформації зсуву, а відповідно і орієнтацію фібр у центральній частині виробу, що формується. Все це сприяє збільшенню і вирівнюванню поздовжньої орієнтації фібр по перерізу виробу і, відповідно, покращенню його якості.

Виконання перегину різних стінок бункера у нижній частині на різній висоті, а також хрестоподібної вставки з різними висотами вертикальних пластин забезпечує можливість отримання виробів з необхідним ступенем орієнтації фібр, а отже і необхідної якості.

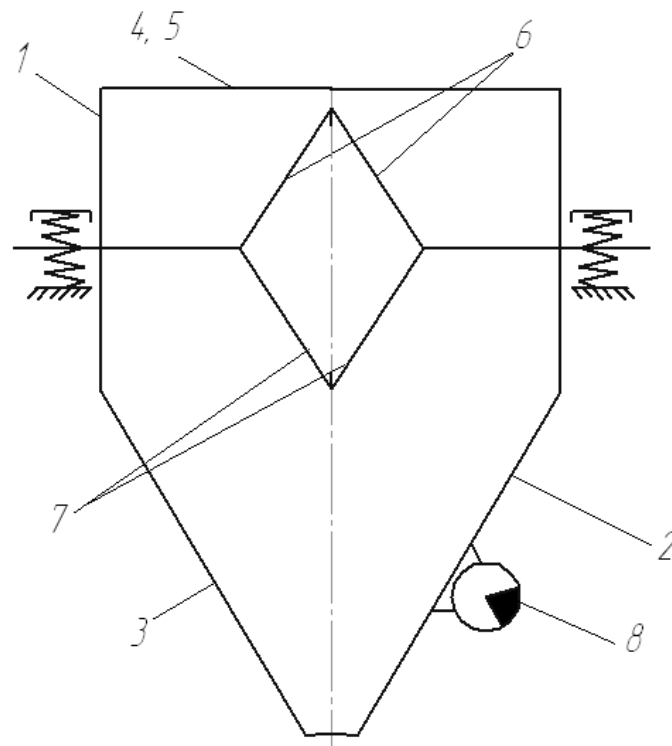
Запропонована удосконалена конструкція формуючого віброекструдера, яка забезпечує більшу рівномірність зсувних деформацій і, відповідно, рівномірність властивостей одержуваної суміші у всьому об'ємі [63].

Традиційний віброекструдер забезпечує можливість більшої орієнтації фібр біля похилих стінок віброекструдера при зменшенні кута нахилу стінок до вертикалі, але при цьому зменшується ущільнення фібробетону в процесі віброекструзії. Це у свою чергу негативно впливає на міцність виробів. Поздовжня орієнтація в центральній частині віброекструдера залишається найменшою.

Виконання у верхній частині бункера двох з'єднаних дзеркально між собою пар похилих перегородок утворюють в зоні живлення два збіжних канали, а у робочій зоні – два розбіжні канали. Це дозволяє здійснити більш рівномірне живлення віброекструдера фібробетонною сумішшю, а при плинні суміші у розбіжних каналах – збільшити ступінь остаточного орієнтування фібр уздовж осі формування в центральній частині виробу. При наявності розбіжних каналів суміш подається у центральну частину бункера, де зсувні деформації суміші мінімальні (а, отже і подальше орієнтування фібр – найменше), вже зі значною орієнтацією фібр. Все це сприяє збільшенню і вирівнюванню поздовжньої орієнтації фібр по перерізу виробу і, відповідно, його якості.

Закріплення збудника коливань всередині між двох пар похилих дзеркальних перегородок забезпечує рівномірне передавання вібрації по

обидва боки від збудника коливань безпосередньо дзеркальним похилим перегородкам і стінкам бункера. Це забезпечує рівномірність властивостей одержуваної фібробетонної суміші по всьому її об'єму, що сприяє одержанню продукції високої якості.



1– бункер, 2-5 – стінки, 6-7 – пари дзеркальних похилих перегородок,  
8 – збудник коливань

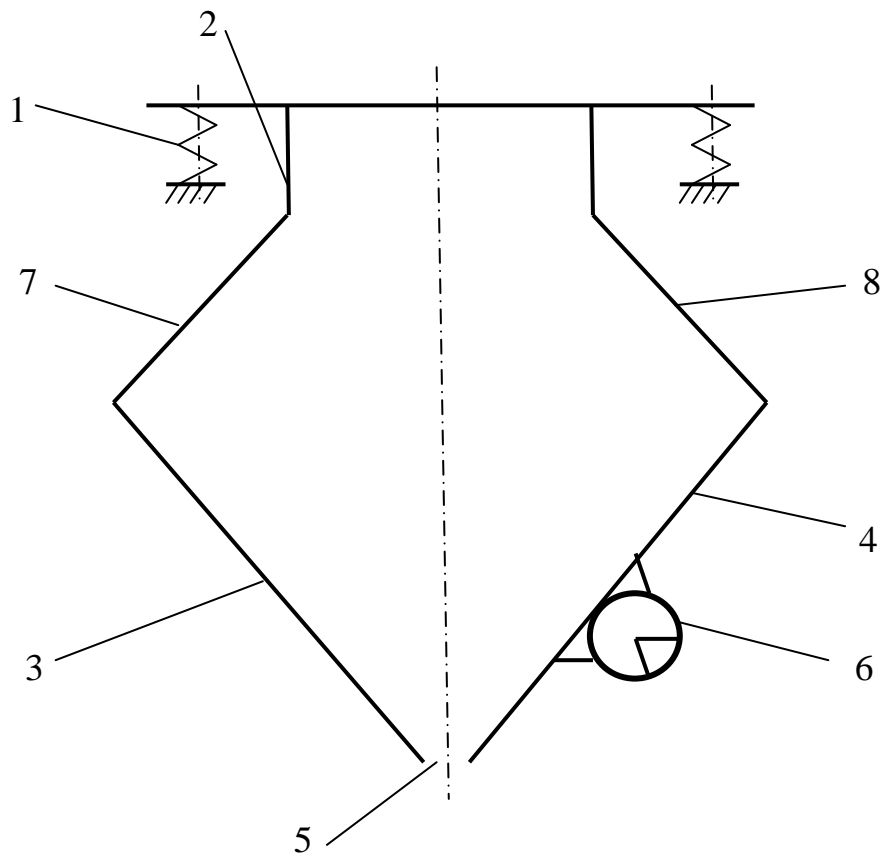
Рис. 10.9. Схема віброекструдера для формування плоских виробів

Застосування спеціально розробленого віброекструдера для формування плоских фібробетонних виробів товщиною 40 мм на базовій дослідно-промисловій установці дозволить приблизно на третину покращити поздовжню орієнтацію фібр у виробі.

Для отримання переважно поперечної орієнтації фібр у всьому виробі, а отже – забезпечення виготовлення виробів іншого призначення, ніж можна було отримати раніше, була запропонована спеціальна

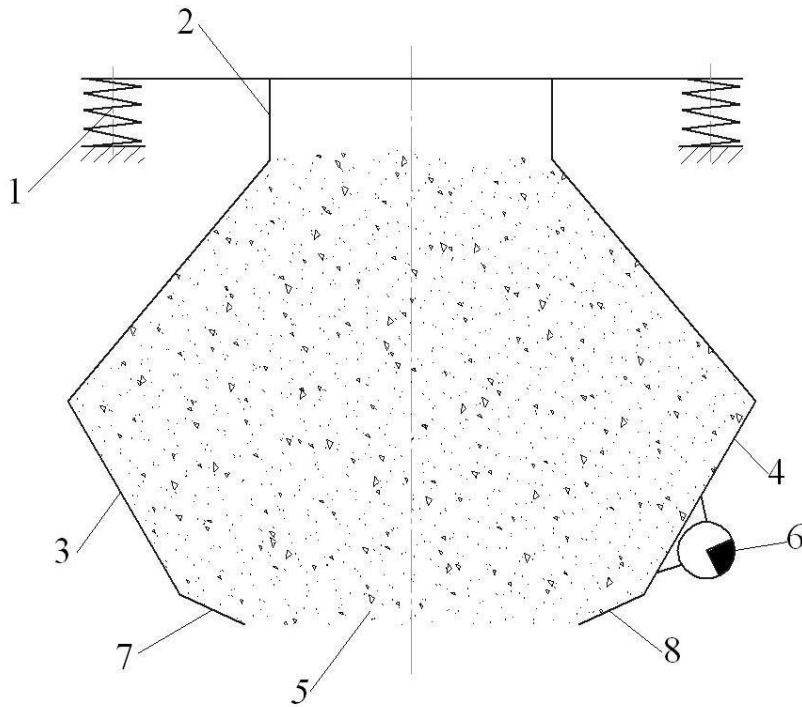
конструкція бункера віброекструдера [64]. Для цього похилі стінки бункера виконані ламаними з нахилом стінок у верхній частині у протилежний бік щодо вертикалі порівняно з нижньою частиною (рис. 10.10). При русі в каналі, що розширюється, за рахунок зсувних деформацій у периферійних зонах бункера, фібри приймають спочатку положення, близьке до вертикального, а потім, при плинні суміші у нижній частині бункера (в каналі, що звужується) повертаються до положення, яке близьке до горизонтального. У центральній частині бункера зсувні деформації і, відповідно, орієнтування фібр мінімальне. Все це сприяє переважній поперечній орієнтації фібр по перерізу всього виробу.

Інше конструктивне виконання нижньої частини стінок бункера збільшує поперечну орієнтацію фібр у периферійних зонах бункера, а отже – забезпечує виготовлення виробів з більш орієнтованими фібрами у поперечному напрямку, ніж можна було отримати раніше [65]. Для цього похилі стінки бункера у нижній частині виконують ламаними зі збільшенням кута нахилу відносно вертикалі на ділянці формуючого мундштука (рис. 10.11). За рахунок максимальних зсувних деформацій, які виникають при плинні суміші у периферійних зонах бункера, фібри приймають положення, близьке до нахилу стінок. Тобто, на периферійних ділянках у виробі фібри більше орієнтуються у поперечному напрямку, ніж це було у попередніх пристроях.



1 – пружні опори, 2 – бункер, 3-4 – похилі стінки, 5 – мундштук, 6 – збудник коливань, 7-8 – верхні частини стінок

Рис. 10.10. Схема віброекструдера для формування фібробетонних виробів



1– пружні опори, 2 – бункер, 3-4 – похилі стінки, 5 – мундштук, 6 – збудник коливань, 7-8 – крайні частини стінок

Рис. 10.11. Схема віброекструдера для формування фібробетонних виробів

#### **10.4. Розрахунок ступеня орієнтування фібр у віброекструдері, який забезпечує переважно поперечне розташування дисперсної арматури у виробках**

При розгляді процесу плин у використовується феноменологічний підхід, який приймає фібробетонну суміш, як однорідне ізотропне середовище, а про структуру суміші робляться лише загальні застереження. Враховується, що вібруючі фібробетонні суміші при віброекструзії являють собою псевдоньютонівські системи.

Для спрощення вирішення задачі процес плин суміші в каналах бункера віброекструдера (рис. 10.11) розглядається, як плин між плоскими

розбіжними нерухомими стінками у верхній частині бункера (перша зона) і збіжними нерухомими стінками у другій і третій зонах (рис. 10.12).

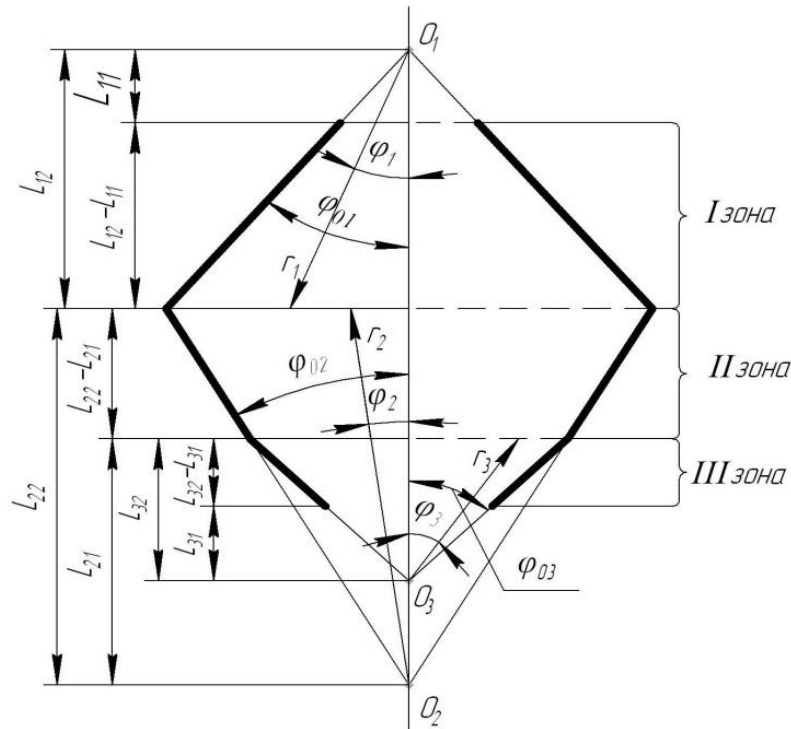


Рис.10.12. Розрахункова схема процесу плинущі суміші у каналах бункера віброекструдера

Для розрахунку була вибрана циліндрична система координат  $(r, \phi, z)$ . Початки координат для кожної зони вибрані у точках перетину ліній, що є продовженнями похилих стінок каналів. Передбачається, що всі промені, які проходять через початок координат, є лініями плинущі, а висота шару суміші у бункері при віброекструзії підтримується постійною.

Вважається, що на вході у бункер фібри розташовані горизонтально. Тоді кут нахилу фібр  $\beta_i$  відносно осі  $r_i$  для  $i$  каналу визначається за отриманою раніше формулою (10.6) [66]:

$$\beta_i = \text{arcctg} \frac{2 \sin 2\varphi_i L_{2i} - L_{1i}^2}{L_{1i} L_{2i} \cos 2\varphi_i - \cos 2\varphi_{0i} \ln \frac{L_{2i}}{L_{1i}}},$$

де  $\varphi_{0i}$  - кут нахилу похилої стінки до вертикалі, град.;  $L_{1i}$  - відстань від початку координат до вхідного зрізу каналу, м;  $L_{2i} - L_{1i}$  - висота стовпа суміші в каналі, м.

Після проходження сумішню першої зони можливі такі випадки кута нахилу фібр  $\beta_1$  відносно осі  $r_1$ : 1) орієнтування фібр не буде здійснюватися по осі каналу коли  $\varphi_1 = 0^\circ$  (кут повороту фібри від горизонтального положення  $\gamma_1 = 0^\circ$ ). При цьому  $\beta_1 = 90^\circ$ ;

2)  $\beta_1 > \varphi_1$  (рис. 10.13а), тоді  $\gamma_1$  розраховується за формулою:  
 $\gamma_1 = 90^\circ - \beta_1 - \varphi_1$  ;

3)  $\beta_1 = \varphi_1$ , тоді  $\gamma_1 = 90^\circ$  ;

4)  $\beta_1 < \varphi_1$  (рис. 10.13б), тоді  $\gamma_1 = 90^\circ + \varphi_1 - \beta_1$  ;

5)  $\beta_1 = 0^\circ$ , тоді  $\gamma_1 = 90^\circ + \varphi_1$ .

У всіх розглянутих випадках наведені залежності зводяться до загальної формули:  $\gamma_1 = 90^\circ - \beta_1 + \varphi_1$ .

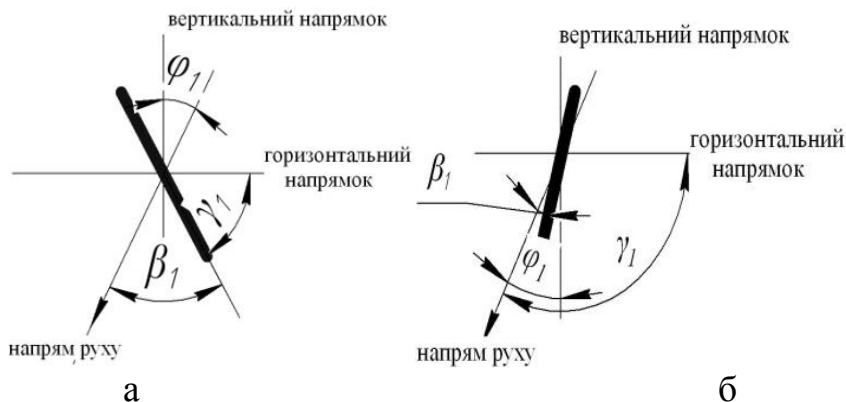


Рис. 10.13. Можливе положення фібр після проходження першої зони у випадках, якщо  $\beta_1 > \varphi_1$  (а) і  $\beta_1 < \varphi_1$  (б)



Під час проходження другої зони розворот фібр припиняється при збігу орієнтації фібри з напрямком руху суміші. При цьому кут розвороту фібр залежить від їх положення на початку другої зони:

- 1) якщо  $\gamma_2 < 90^\circ - \varphi_2$  (рис. 10.14а), тоді фібра може ще обернутися на кут  $\leq 90^\circ - \varphi_2 - \gamma_2$ ;
- 2) якщо  $\gamma_2 = 90^\circ - \varphi_2$ , тоді фібра у другій зоні вже не повертається;
- 3) якщо  $\gamma_2 > 90^\circ - \varphi_2$  (рис. 10.14б), тоді фібра може ще обернутися на кут  $\leq 180^\circ - \gamma_2 + 90^\circ - \varphi_2$ .

Під час проходження третьої зони розворот фібр здійснюється таким же чином, як і у другій зоні.

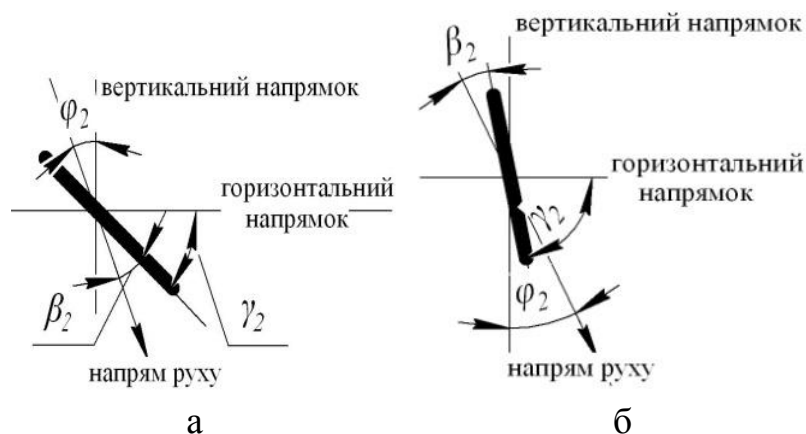


Рис. 10.14. Можливе положення фібр на початку другої зони у випадках, якщо  $\gamma_2 < 90^\circ - \varphi_2$  (а) і  $\gamma_2 > 90^\circ - \varphi_2$  (б)

Запропонована конструкція віброекструдера дозволяє, на відміну від традиційних, здійснити переважно поперечну орієнтацію дисперсної арматури. Ступінь поперечного орієнтування фібр необхідно задавати окремо для різних виробів залежно від їх призначення, а зміна ступеня

орієнтування здійснюється зміною геометрії каналів бункера віброекструдера.

За наведеною вище методикою була розроблена програма розрахунку, яка дозволяє спостерігати на екрані монітора розворот фібр при плинні суміші в віброекструдері залежно від геометрії його каналів. Для випадку формування плоского виробу товщиною 40 мм і шириною 460 мм був спроектований віброекструдер, який забезпечує орієнтацію фібр у виробі близьку до поперечної (середній по ширині виробу кут відхилення від поперечного положення складає близько  $16,4^\circ$ ) [67]. Розташування фібр всередині і на виході з бункера спроектованого віброекструдера подано на рисунку 10.5.

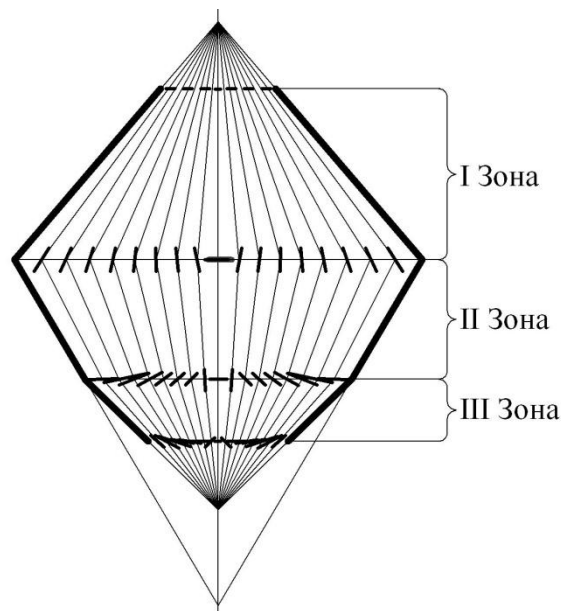


Рис. 10.5. Розташування фібр в процесі формування плоского виробу у спроектованому віброекструдері

Конструкція віброекструдера, що забезпечує переважно поперечну орієнтації фібр в процесі формування, може бути застосована для широкого діапазону фіробетонних виробів. Регулювання ступеня орієнтування дисперсної арматури у виробках здійснюється зміною геометрії каналів бункера віброекструдера.

Наведені аналітичні залежності дають можливість кількісного опису відмінностей у розташуванні дисперсної арматури у суміші в процесі віброекструзії і остаточного орієнтування фібр у виробках.

## **11. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВІБРОЕКСТРУЗІЇ ФІРОБЕТОНУ ДЛЯ НЕСИМЕТРИЧНОГО КАНАЛУ, ЯКИЙ ЗВУЖУЄТЬСЯ**

### **11.1. Процес плин у фіробетону в несиметричному каналі**

При віброекструзійному формуванні фіробетонних виробів плин суміші у каналі бункера віброекструдера в окремих випадках (див. попередні розділи) можна розглядати, як плин між двома плоскими збіжними нерухомими стінками, одна з яких вертикальна. Тому виникла необхідність математичного опису такого процесу для можливості розрахунку продуктивності, ступеня змішання суміші і орієнтації фібр. Для розгляду процесу плин суміші використовуємо циліндричну система координат  $(r, \varphi, z)$ . Розрахункова схема процесу наведена на рисунку 11.1. Початок координат вибраний у точці перетину ліній, що є продовженнями похилої і вертикальної стінок каналу [68-73].

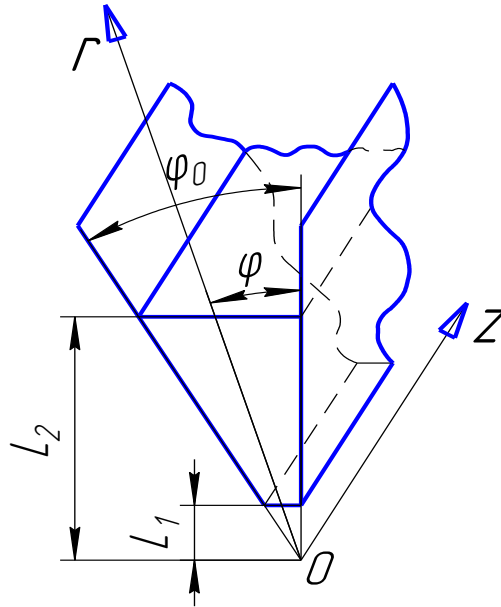


Рис. 11.1. Розрахункова схема процесу плинину фібробетону у несиметричному каналі бункера віброекструдера, який звужується

На рисунку  $L_1$  – відстань від початку координат до вихідного зрізу бункера віброекструдера, м;  $L_2 - L_1$  – висота стовпа суміші в бункері, м;  $\varphi_0$  – кут нахилу стінок бункера до вертикалі, рад ( $\varphi_0 < \pi / 4$ ).

Передбачається, що всі промені, що проходять через початок координат, є лініями струму. Тоді окружна швидкість  $U_\varphi$  усюди дорівнює нулю. Запишемо рівняння Нав'є-Стокса і нерозривності:

$$\begin{cases} \rho U_r \frac{\partial U_r}{\partial r} = \rho g_r - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \frac{\partial^2 U_r}{\partial r^2} + \frac{\mu}{r} \cdot \frac{\partial U_r}{\partial r} - \mu \frac{U_r}{r^2} + \frac{\mu}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 U_r}{\partial \varphi^2}; \\ 0 = \rho g_\varphi - \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \frac{2\mu}{r^2} \cdot \frac{\partial U_r}{\partial \varphi}; \end{cases} \quad (11.1)$$

$$\frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{U_r}{r} = 0, \quad (11.2)$$

де  $U_r$  – радіальна швидкість, м/с;  $P$  – тиск, МПа;  $\rho$  – густина оброблюваної суміші, кг/м<sup>3</sup>;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – прискорення сили тяжіння;  $\mu_B$  – вібров'язкість суміші, Па·с.

Через те, що вібров'язкість фібробетону при віброекструзії відносно велика, а сам процес характеризується низькими значеннями критерія Рейнольдса, очевидно, що сили інерції значно менше сил тертя. Тому інерційними членами рівняння Нав'є-Стокса (11.1) при вирішенні задачі будемо нехтувати. З математичної точки зору відкидання інерційних членів у разі повільного плину цілком допустимо, оскільки при цьому порядок диференціального рівняння не знижується, і тому рішення простішого рівняння дозволяє задовольнити такій же кількості граничних умов, як і рішення повного диференціального рівняння.

Враховуючи, що похідна виразу (11.2) є складовою частиною першого рівняння системи (11.1) і дорівнює нулю, запишемо рівняння руху Нав'є-Стокса у наступному вигляді:

$$\begin{cases} -\frac{\partial P}{\partial r} - \rho g \cos \varphi + \frac{\mu_B}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 U_r}{\partial \varphi^2} = 0, \\ -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \rho g \sin \varphi + \frac{2\mu_B}{r^2} \cdot \frac{\partial U_r}{\partial \varphi} = 0. \end{cases} \quad (11.3)$$

Рівняння (11.2) можна записати у вигляді:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial U_r r}{\partial r} = 0, \quad (11.4)$$

звідки видно, що добуток  $U_r r$  є постійною величиною, не залежною від  $r$ .

Введемо функцію:

$$v_\varphi = U_r r. \quad (11.5)$$

Граничні умови:

$$U_r \Big|_{\varphi=\varphi_0} = 0; \quad (11.6)$$

$$U_r \Big|_{\varphi=0} = 0; \quad (11.7)$$

$$P \Big|_{r=L_2/\cos\varphi} = 0; \quad (11.8)$$

$$P \Big|_{r=L_1/\cos\varphi; \varphi=\varphi_0} = 0. \quad (11.9)$$

Рівняння (11.3) з урахуванням (11.5) запишемо таким чином:

$$\begin{cases} -\frac{\partial P}{\partial r} - \rho g \cos\varphi + \frac{\mu_B}{r^3} v'' \Big|_{\varphi} = 0, \\ -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial P}{\partial \varphi} + \rho g \sin\varphi + \frac{2\mu_B}{r^3} v' \Big|_{\varphi} = 0. \end{cases} \quad (11.10)$$

Узявши похідну від першого рівняння системи (11.10) по  $\varphi$  и от другого – по  $r$  і прирівнявши значення для  $\frac{\partial^2 P}{\partial r \partial \varphi}$ , отримаємо звичайне однорідне диференціальне рівняння третього порядку:

$$v''' \Big|_{\varphi} + 4 \cdot v' \Big|_{\varphi} = 0 \quad (11.11)$$

Загальний інтеграл цього рівняння:

$$v \Big|_{\varphi} = c_1 + c_2 \sin 2\varphi + c_3 \cos 2\varphi. \quad (11.12)$$

Визначимо радіальну швидкість  $U_r$  підстановкою (11.12) у (11.5):

$$U_r = \frac{c_1 + c_2 \sin 2\varphi + c_3 \cos 2\varphi}{r} \quad (11.13)$$

Постійні  $c_1$  і  $c_2$  визначимо з (11.13) за граничних умов (11.6), (11.7):

$$c_1 = -c_3, \quad c_2 = c_3 \operatorname{tg} \varphi_0.$$

Отже, вираз (11.13) можна записати у вигляді:

$$U_r = \frac{c_3 \operatorname{tg} \varphi_0 \sin 2\varphi + \cos 2\varphi - 1}{r}. \quad (11.14)$$

Після підстановки (11.14) в перше рівняння системи (11.3) і подальшому інтегруванні по  $r$ , отримаємо:

$$P = \frac{2c_3\mu_B \left( g\varphi_0 \sin 2\varphi + \cos 2\varphi \right)}{r^2} - rg\rho \cos\varphi + \bar{c}(\varphi) \quad (11.15)$$

$\bar{c}(\varphi)$  визначається з (11.15) за граничної умови (11.8):

$$\bar{c}(\varphi) = \rho g L_2 - \frac{2c_3\mu_B \left( g\varphi_0 \sin 2\varphi + \cos 2\varphi \right) \cos^2 \varphi}{L_2^2}.$$

Знаючи значення  $\bar{c}(\varphi)$ , рішення задачі (11.9), (11.15) дає:

$$c_3 = - \frac{\rho g L_1^2 L_2^2}{2\mu_B \cos^2 \varphi_0 (L_1 + L_2)}$$

Таким чином, можна записати формули для визначення радіальної швидкості  $U_r$  (11.16) і об'ємної витрати через одиницю ширини каналу, що звужується  $q_c$  (11.17):

$$U_r = - \frac{\rho g L_1^2 L_2^2 \left( g\varphi_0 \sin 2\varphi + \cos 2\varphi - 1 \right)}{2\mu_B r \cos^2 \varphi_0 (L_1 + L_2)}, \quad (11.16)$$

$$q_c = - \frac{\rho g L_1^2 L_2^2 \left( g\varphi_0 - \varphi_0 \right)}{2\mu_B \cos^2 \varphi_0 (L_1 + L_2)}. \quad (11.17)$$

## 11.2. Розрахунок процесу змішання фібробетонної суміші у плоскому збіжному несиметричному каналі при віброекструзії

В процесі віброекструзії має місце ламінарне конвективне змішання. Кількісним критерієм ламінарного змішання є ступінь збільшення площі поверхні розділу між компонентами, яка у свою чергу залежить від сумарної деформації і початкової орієнтації поверхні.

Швидкість зсуву  $\dot{\gamma}$  можна визначимо з виразу (11.16):

$$\dot{\gamma} = \frac{2c_3}{r^2} \left( g\varphi_0 \cos 2\varphi - \sin 2\varphi \right). \quad (11.18)$$

Частку об'ємної витрати на ділянці між  $\varphi$  и  $d\varphi$  знаходимо, використовуючи (11.17):

$$f(\varphi) d\varphi = \frac{dq}{q} = \frac{g\varphi_0 \sin 2\varphi + \cos 2\varphi - 1}{g\varphi_0 - \varphi_0} d\varphi. \quad (11.19)$$

Середня швидкість віброекструзії по довжині каналу, що звужується,:

$$U_{r,cp} = \frac{1}{L_2 - L_1} \int_{L_1/\cos\varphi}^{L_2/\cos\varphi} U_r dr = \frac{c_3 (g\varphi_0 \sin 2\varphi + \cos 2\varphi - 1) \cos\varphi}{L_2 - L_1} \ln \frac{L_2}{L_1} \quad (11.20)$$

Час перебування суміші у бункері віброекструдера, визначимо за допомогою виразу (11.20):

$$t = \frac{L_2 - L_1}{U_{r,cp} \cos\varphi} = \frac{L_2 - L_1^2}{c_3 \operatorname{tg}\varphi_0 \sin 2\varphi + \cos 2\varphi - 1 \cos^2\varphi \cdot \ln \frac{L_2}{L_1}} \quad (11.21)$$

Середню швидкість зсуву по довжині каналу, що звужується, визначимо з допомогою (11.18):

$$\dot{\gamma}_{cp} = \frac{1}{L_2 - L_1} \int_{L_1/\cos\varphi}^{L_2/\cos\varphi} \dot{\gamma} dr = \frac{2c_3 (g\varphi_0 \cos 2\varphi - \sin 2\varphi) \cos^2\varphi}{L_1 L_2}. \quad (11.22)$$

Використовуючи (11.21) і (11.22) запишемо вираз для середньої по довжині каналу деформації зсуву  $\bar{\gamma}(\varphi)$ :

$$\bar{\gamma}(\varphi) = \dot{\gamma}_{cp} t = \frac{2 (g\varphi_0 \cos 2\varphi - \sin 2\varphi) (L_2 - L_1)}{L_1 L_2 (g\varphi_0 \sin 2\varphi + \cos 2\varphi - 1) \ln \frac{L_2}{L_1}}. \quad (11.23)$$

Звідки нескладно визначити, що  $\bar{\gamma}(\varphi) = 0$ , якщо  $\varphi = 0,5\varphi_0$ .

Тому середнє значення деформації зсуву у каналі, що звужується  $\bar{\gamma}$  на ділянці  $0 \leq \varphi \leq 0,5\varphi_0$ :

$$\bar{\gamma} = \int_0^{0,5\varphi_0} \bar{\gamma}(\varphi) f(\varphi) d\varphi = \frac{(L_2 - L_1) (-\cos\varphi_0)}{L_1 L_2 \ln \frac{L_2}{L_1} (g\varphi_0 - \varphi_0) \cos\varphi_0}, \quad (11.24)$$

на ділянці  $0,5\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0$ :



$$\bar{\gamma} = \int_{0,5\varphi_0}^{\varphi_0} \bar{\gamma}(\varphi) f(\varphi) d\varphi = \frac{(L_2 - L_1) \cos \varphi_0 - 1}{L_1 L_2 \ln \frac{L_2}{L_1} (\cos \varphi_0 - \varphi_0) \cos \varphi_0}.$$

Частку об'ємної витрати на ділянці від 0 до  $\varphi$  знаходимо, використовуючи вираз (11.19):

$$F(\varphi) = \int_0^{\varphi} f(\varphi) d\varphi = \frac{\operatorname{tg} \varphi_0 (-\cos 2\varphi + \sin 2\varphi - 2\varphi)}{2 (\cos \varphi_0 - \varphi_0)}. \quad (11.25)$$

Середнє значення часу перебування суміші у каналі бункера віброекструдера:

$$\bar{t} = \int_0^{\varphi_0} t f(\varphi) d\varphi = \frac{(L_2 - L_1) \operatorname{tg} \varphi_0}{c_3 \ln \frac{L_2}{L_1} (\cos \varphi_0 - \varphi_0)}. \quad (11.26)$$

Кількісний опис відмінностей у деформуванні суміші при віброекструзії для визначеного каналу можна здійснити також за допомогою функції розподілу деформацій, використовуючи формули (11.23), (11.24), (11.25). Залежність функції розподілу часу перебування суміші від  $t/\bar{t}$  розраховується за допомогою формул (11.21), (11.25), (11.26).

На рисунку 11.2 представлений графік відносних зсувних деформацій  $\bar{\gamma}(\varphi)/\bar{\gamma}$  у несиметричному каналі, що звужується ( $\varphi_0 = 30^\circ$ ), який побудований за допомогою формул (11.23), (11.24).

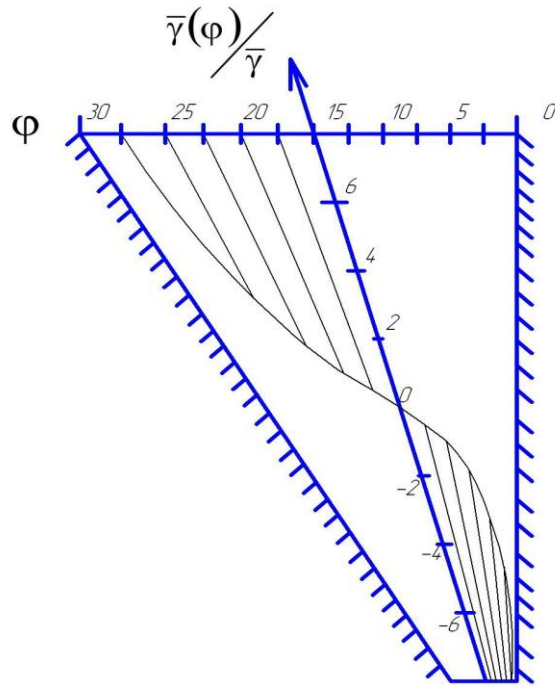


Рис. 11.2. Розподіл деформацій зсуву у несиметричному збіжному каналі (при  $\varphi = 0$  і  $\varphi = \varphi_0$  деформації зсуву відповідно до виразу (11.23) дорівнюють нескінченності)

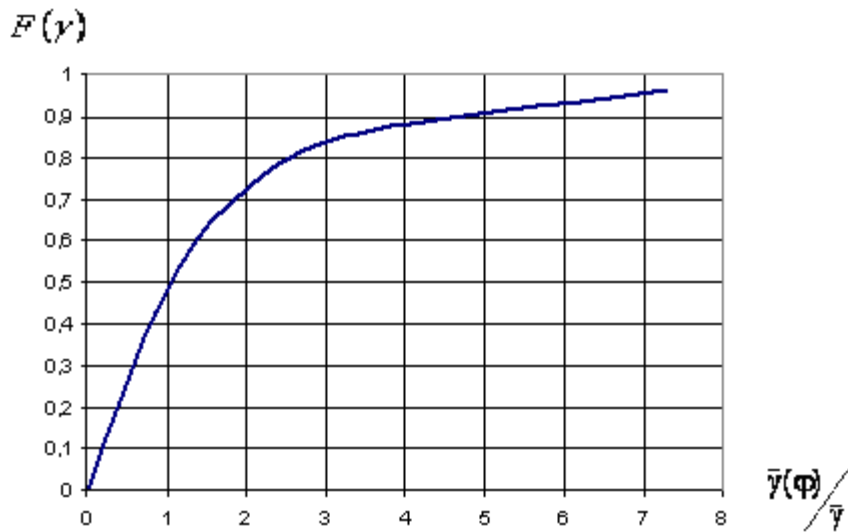


Рис.11.3. Залежність функції розподілу деформацій  $F(\gamma)$  від  $\bar{\gamma}(\varphi)/\bar{\gamma}$

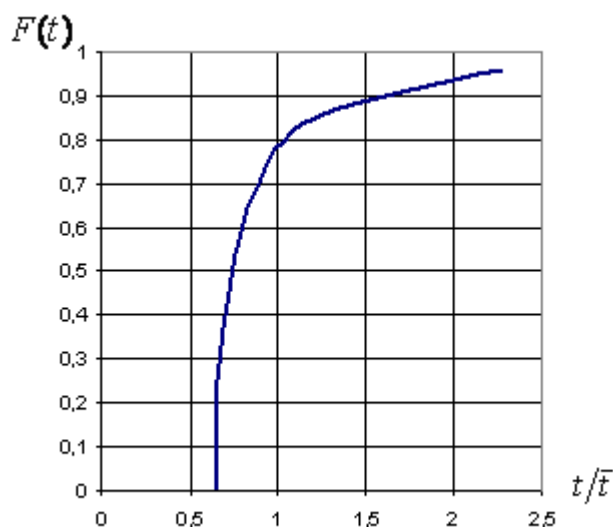


Рис.11.4. Залежність функції розподілу часу перебування суміші  $F(t)$  від  $t/\bar{t}$

Недоліком процесу змішання у несиметричному каналі, що звужується, як і у разі симетричної течії, є нерівномірність деформацій зсуву у всьому об'ємі матеріалу (рис. 11.2).

У симетричному збіжному каналі суміш, яка складає лише 0,274 об'ємної витрати, піддається деформації вище середнього рівня, а час перебування суміші, що складає 77 % об'ємної витрати, менше середнього у каналі. Тоді, як ці самі показники для несиметричного каналу (з похилою і вертикальною стінками) при такому же куті  $\varphi_0 = 30^\circ$  складають, відповідно, 0,483 і 78 % (див. рис. 11.3, 11.4). Таким чином, процес змішання компонентів суміші у несиметричному каналі бункера віброекструдера стає більш рівномірним, в той час, як розташування кривої функції розподілу часу перебування лишилося практично незмінним.

Розрахунок необхідної сумарної деформації зсуву для забезпечення якісного змішання залежить від компонентів суміші, а також від матеріалу і питомої поверхні фібр. Для якісного змішування усього об'єму матеріалу (особливо для сильно наповнених фібрами складів) недостатнім є використання одного каналу, що виражається у неповному змочуванні розчином фібр, які знаходяться 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 декілька каналів настає момент, коли швидкість віброекструзії стабілізується (ріст її припиняється). Це свідчить про повне змочування фібр розчином.

### 11.3. Орієнтування фібр у плоскому збіжному несиметричному каналі при віброекструзії

Кут нахилу фібр  $\beta$  відносно осі  $r$  в результаті проходження сумішшю каналу на ділянці  $0 \leq \varphi \leq 0,5\varphi_0$  можна визначити наступним чином [72, 73]:

$$\beta = \text{arcctg}[\gamma \phi] = \text{arcctg} \frac{L_2 - L_1^2 (1 - \cos \phi_0)}{L_1 L_2 \ln \frac{L_2}{L_1} \text{tg} \phi_0 - \phi_0 \cos \phi_0} \quad (11.27)$$

Кут нахилу фібр  $\beta$  відносно осі  $r$  в результаті проходження сумішшю каналу на ділянці  $0,5\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0$ :

$$\beta = \text{arcctg}[\gamma \phi] = \text{arcctg} \frac{L_2 - L_1^2 \cos \phi_0 - 1}{L_1 L_2 \ln \frac{L_2}{L_1} \text{tg} \phi_0 - \phi_0 \cos \phi_0} \quad (11.28)$$

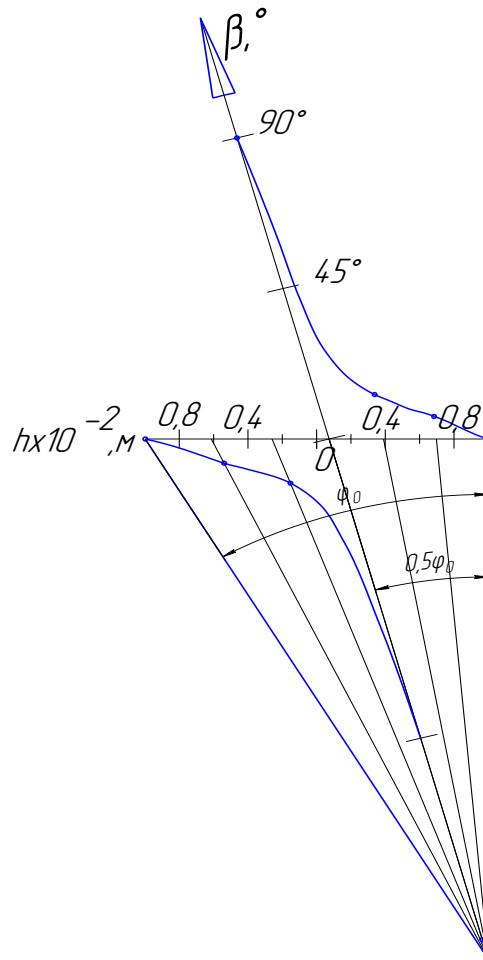


Рисунок 11.5. Орієнтація фібр відносно радіусів плинун течії у несиметричному каналі

Кут нахилу фібр по товщині виробу  $\alpha$  відносно осі формування:

$$\alpha = \beta - \varphi \quad (11.29)$$

Запропоновані аналітичні залежності дозволяють оцінити вплив геометрії каналів віброекструдерів на ефективність дисперсного армування при віброекструзії фібробетону.

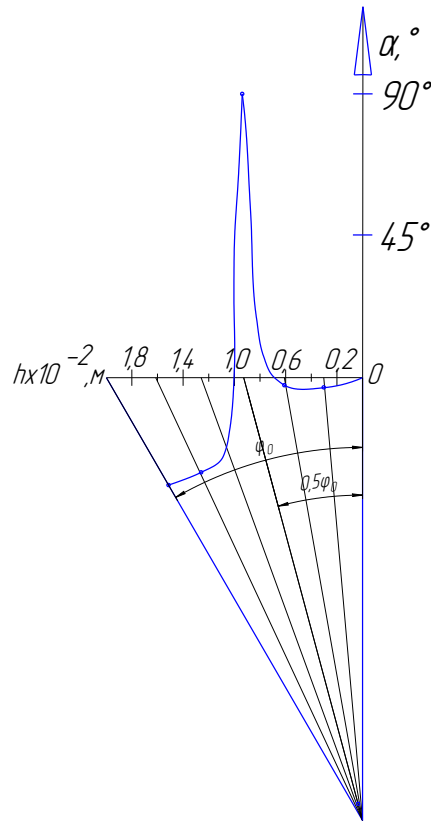


Рисунок 11.6. Орієнтація фібр відносно напрямку формування у несиметричному каналі

## 12. ПРОЦЕС ПЛИНУ ФІБРОБЕТОННОЇ СУМІШІ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ ВІБРОЕКСТРУДЕРАХ

У випадку багатоканального віброекструдера розглядається останній вертикальний канал, який є визначальним при розрахунку продуктивності. Для опису процесу була вибрана циліндрична система координат  $(r, \varphi, z)$ . Початок координат вибрано у точці перетину ліній, що є продовженнями похилих стінок каналу (рис. 12.1) [74]. Передбачається, що всі промені, які проходять через початок координат, є лініями плинку, а висота шару суміші

у бункері віброекструдера підтримується постійною. Тоді окружна швидкість  $u_\phi$  усюди дорівнює нулю.

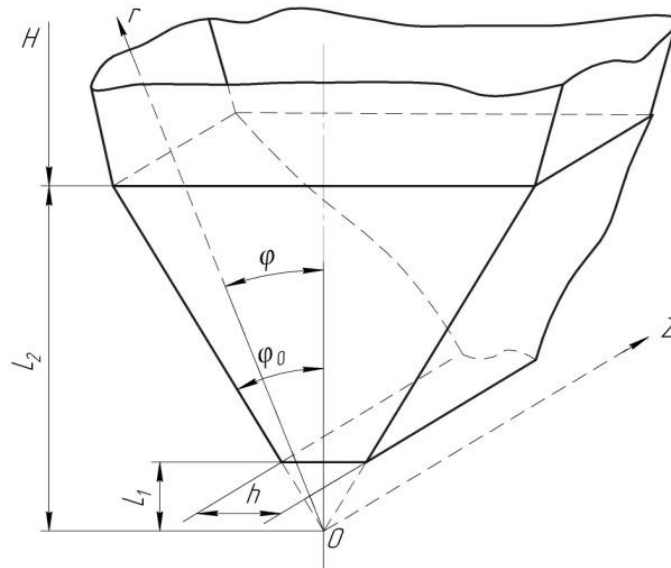


Рис. 12.1. Розрахункова схема процесу плинусуміші у каналі

Рівняння Нав'є - Стокса і нерозривності приймають вигляд:

$$\begin{cases} \rho u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} = \rho g_r - \frac{\partial p}{\partial r} + \mu_e \frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{\mu_e}{r} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial r} - \mu_e \frac{u_r}{r^2} + \frac{\mu_e}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 u_r}{\partial \phi^2}; \\ 0 = \rho g_\phi - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \phi} + \frac{2\mu_e}{r^2} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial \phi}. \end{cases} \quad (12.1)$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} = 0. \quad (12.2)$$

Оскільки вібров'язкість базальтобетону при віброекструзії відносно велика, і процес формування характеризується низькими значеннями критерію Рейнольдса, то, очевидно, що сили інерції значно менше сил тертя. Тому інерційними членами рівняння Нав'є-Стокса (12.1) при рішенні поставленої задачі нехтуватимемо. З математичної точки зору відкидання інерційних членів у разі повільної течії цілком допустимо, оскільки при цьому порядок диференціального рівняння не знижується, і

тому рішення простішого рівняння дозволяє задовольнити такій же кількості граничних умов, як і рішення повного диференціального рівняння.

Враховуючи, що похідна виразу (12.2) є складовою частиною першого рівняння системи (12.1) і дорівнює нулю, запишемо рівняння руху Нав'є-Стокса в такому вигляді:

$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial r} - \rho g \cos \varphi + \frac{\mu_e}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 u_r}{\partial \varphi^2} = 0, \\ -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \rho g \sin \varphi + \frac{2\mu_e}{r^2} \cdot \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} = 0. \end{cases} \quad (12.3)$$

Рівняння (12.2) можна записати таким чином:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_r r}{\partial r} = 0,$$

звідки видно, що добуток  $u_r r$  є постійною величиною, яка не залежить від  $r$ .

Введемо функцію:

$$v \varphi = u_r r, \quad (12.4)$$

На відміну від попередніх вирішень задач плинину між плоскими нерухомими стінками, що сходяться, у нашому випадку при складанні граничних умов необхідно враховувати гідростатичний тиск суміші на вході в останній канал:

$$u_r \Big|_{\varphi=\varphi_0} = 0; \quad (12.5)$$

$$u_r \Big|_{\varphi=-\varphi_0} = 0; \quad (12.6)$$

$$p \Big|_{r=L_2 / \cos \varphi} = \rho g H; \quad (12.7)$$

$$p \Big|_{r=L_1 / \cos \varphi; \varphi=\varphi_0} = 0, \quad (12.8)$$

де  $H$  – загальна висота стовпа суміші у каналах, які розташовані вище.

Рівняння (12.3) з урахуванням (12.4) запишемо таким чином:



$$\begin{cases} -\frac{\partial p}{\partial r} - \rho g \cos \varphi + \frac{\mu_g}{r^3} v'' \varphi = 0, \\ -\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \rho g \sin \varphi + \frac{2\mu_g}{r^3} v' \varphi = 0. \end{cases} \quad (12.9)$$

Узявши похідну від першого рівняння системи (12.9) по  $\varphi$  и от другого – по  $r$  і прирівнявши значення для  $\frac{\partial^2 p}{\partial r \cdot \partial \varphi}$ , отримаємо звичайне однорідне диференціальне рівняння третього порядку:

$$v''' \varphi + 4v' \varphi = 0$$

Загальний інтеграл цього рівняння:

$$v \varphi = c_1 + c_2 \sin 2\varphi + c_3 \cos 2\varphi. \quad (12.10)$$

Визначимо радіальну швидкість  $u_r$  підстановкою (12.10) у (12.4):

$$u_r = \frac{c_1 + c_2 \sin 2\varphi + c_3 \cos 2\varphi}{r} \quad (12.11)$$

Постійні  $c_1$  і  $c_2$  визначимо з (12.11) за граничних умов (12.5),(12.6):

$$c_1 = -c_3 \cos 2\varphi_0, \quad c_2 = 0.$$

Отже, вираз (12.11) можна записати у вигляді:

$$u_r = \frac{c_3 \cos 2\varphi - \cos 2\varphi_0}{r}. \quad (12.12)$$

Після підстановки (12.12) в перше рівняння системи (12.3) і подальшому інтегруванні по  $r$ , отримаємо:

$$p = \frac{2c_3\mu_g \cos 2\varphi}{r^2} - rg\rho \cos \varphi + \bar{c} \varphi. \quad (12.13)$$

$\bar{c} \varphi$  визначається з (12.13) за граничної умови (12.7):

$$\bar{c} \varphi = \rho g (L_2 + H) - \frac{2c_3\mu_g \cos 2\varphi \cos^2 \varphi}{L_2^2}.$$

Знаючи значення  $\bar{c} \varphi$ , рішення задачі (12.8),(12.13) дає:

$$c_3 = -\frac{\rho g L_1^2 L_2^2 (H + L_2 - L_1)}{2\mu_g \cos 2\varphi_0 \cos^2 \varphi_0 (L_2^2 - L_1^2)}.$$

Таким чином, можна записати формули для визначення радіальної швидкості  $u_r$  і об'ємної витрати через одиницю ширини плоского каналу, що звужується  $q$ :

$$u_r = \frac{\rho g L_1^2 L_2^2}{2\mu_e r \cos 2\varphi_0 \cos^2 \varphi_0} \frac{H + L_2 - L_1}{L_2^2 - L_1^2} \frac{\cos 2\varphi_0 - \cos 2\varphi}{L_2^2 - L_1^2},$$

$$q = \frac{\rho g L_1^2 L_2^2}{2\mu_e \cos 2\varphi_0 \cos^2 \varphi_0} \frac{H + L_2 - L_1}{L_2^2 - L_1^2} \frac{2\varphi_0 \cos 2\varphi_0 - \sin 2\varphi_0}{L_2^2 - L_1^2}.$$

Запропоновані формули дозволяють розрахувати продуктивність багатоканальних віброекструдерів для змішування компонентів суміші і формування плоских фібробетонних виробів.

Значення деформації зсуву, функції розподілу деформацій і функції розподілу часу перебування розраховуються за запропонованими раніше формулами, тому, що ці величини залежать тільки від геометрії каналу.

### **13. УДОСКОНАЛЕННЯ ВІБРОЕКСТРУЗІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ПРЯМОКУТНИХ У ПОПЕРЕЧНОМУ ПЕРЕРІЗІ ВИРОБІВ**

#### **13.1. Розрахунок перерізу формуючого мундштука віброекструдера для формування плити**

При віброекструзійному формуванні базальтофібробетонних плоских виробів за допомогою прямокутного в поперечному перерізі формуючого мундштука можливий розрив матеріалу по краях екструдера через зниження швидкості плинущої маси в торцях каналу.

Процеси плинущої рідини у прямокутних формуючих голівках при екструзії вивчалися багатьма дослідниками. У промисловості переробки полімерних матеріалів виготовляють, наприклад листи товщиною до  $10^{-3}$  м

і шириною 1...2 м і плівки товщиною до  $5 \cdot 10^{-4}$  м. Запропоновані методи розрахунку голівок [5], де визначаються розміри вхідного колектора для забезпечення однакового градієнту тиску по ширині щілинної формуючої голівки, але не враховується гальмуючий ефект бічних стінок голівки. В результаті, на виробництві доводиться обрізати дефектні краї плівки для повторної переробки.

З метою вирівнювання профілю швидкостей витікання полімерного виробу на виході з формуючого каналу встановлюють опір, що регулюється, на його вході, який в центрі збільшує, а на периферії зменшує гідравлічний опір [75]. Практично це здійснюється, наприклад, за допомогою розміщення перед входом у формуючі канали одинарних або подвійних філь'єр, діаметр отворів яких збільшується до периферії з урахуванням об'ємної витрати. В цьому випадку зменшується швидкість течії матеріалу за рахунок збільшення гідравлічного отвору, а при використанні фібробетону можливі порушення процесу екструзії через забивання філь'єр.

Тому, однакову витрату матеріалу на одиницю довжини поперечного перерізу віброекструзійного мундштука було запропоновано досягати за рахунок збільшення ширини щілини в торцевих ділянках мундштука [10, 76]. У цьому випадку, краї плоского виробу, що виготовляється, будуть здобувати свої остаточні розміри при затіканні матеріалу в віброформу, яка переміщується відносно віброекструдера.

Для визначення ступеня впливу торцевих зон віброекструзійного мундштука розглядався випадок ламінарного ізотермічного плинку нестисливої ньютонівської рідини в прямокутному каналі. Вирішення рівняння Нав'є – Стокса за формулою (3.1) і чисельним методом за допомогою ЕОМ рішення, показало, що помітне зменшення витрати

матеріалу спостерігається в областях, віддалених на відстані  $2H$  від його торців (рис. 13.1).

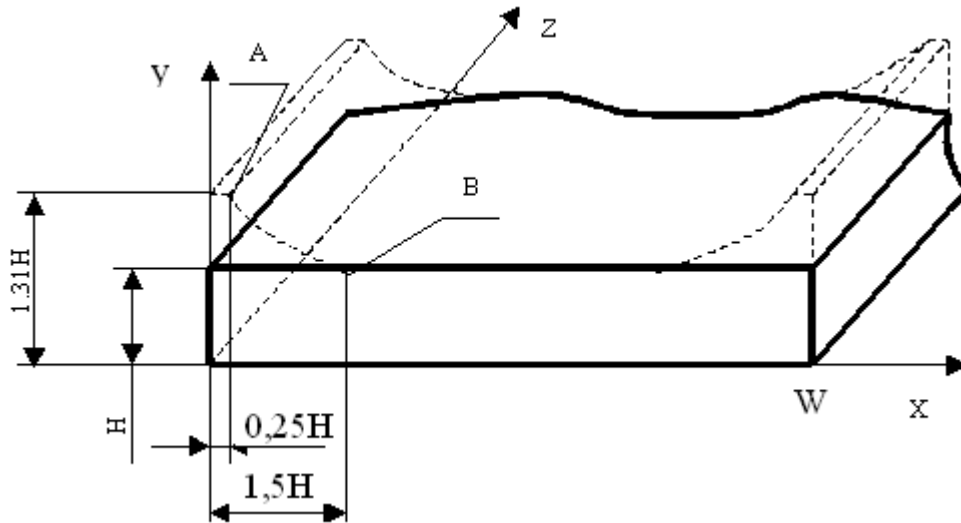


Рис. 13.1. Розрахункова схема до визначення поперечного перерізу віброекструзійного мундштука для формування плоского виробу

Розрахунок конфігурації поперечного перерізу віброекструзійного мундштука було виконано чисельним методом.

Граничні умови для прямокутної області

$$0 \leq x \leq W; 0 \leq y \leq H : u_z(0, y) = 0; u_z(W, y) = 0; u_z(x, 0) = 0; u_z(x, H) = 0.$$

Крайова задача була вирішена методом кінцевих різниць. За допомогою ЕОМ була знайдена серединна зона каналу, де не виявляється вплив торцевих ділянок на об'ємну витрату. Швидкості у серединній зоні були використані як граничні умови у живому перерізі мундштука, що дозволило виконати розрахунок безпосередньо тільки торцевих розширень і тим самим досягти більшої точності [10]. Було визначено, що для вибору оптимального геометричного профілю границі досить ділянку АВ (рис.13.1) описати параболічною залежністю:

$$x = 1,5H - x_A \left( \frac{y - y_A}{H - y_A} \right)^2 + x_A. \quad (13.1)$$

Збільшення ширини живого перерізу мундштука варто робити на відстані  $X_B=1,5H$ , а абсцису вершини параболи знаходити за формулою  $X_A=0,25H$ .

Тоді, для визначення геометричного профілю поперечного перерізу торцевих зон формуючого мундштука рівняння (13.1) можна записати у виді (13.2), що найбільш зручно при проведенні розрахункових робіт.

$$y = 1,31H \text{ при } x \leq 0,25H \quad (13.2)$$

$$y = 1,31H - 0,31H \sqrt{\frac{x - 0,25H}{1,25H}} \text{ при } 1,5H \geq x \geq 0,25H$$

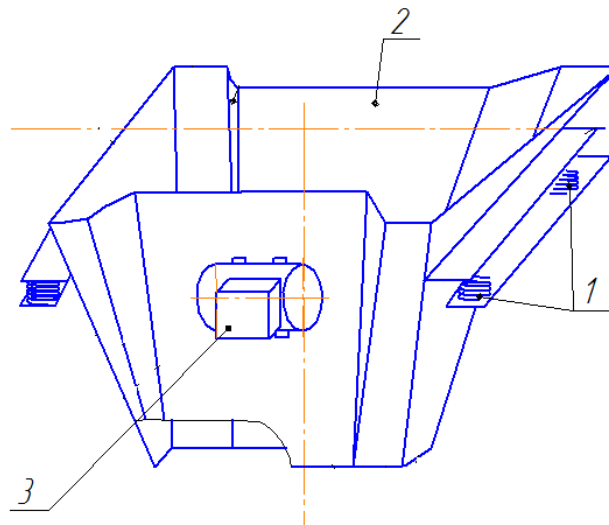
Сукупність координат  $(x, y)$  являють собою контур формуючого мундштука.

### **13.2. Віброекструдери з прямокутним роздавальним вікном**

Наведений в розділі 13.1 віброекструдер не забезпечує однорідність фібробетонної суміші по ширині плоского виробу через те, що його крайові ділянки отримують свою остаточну конфігурацію після процесу віброекструзії при затіканні у вібруючу форму. Це негативно впливає на якість виробів, які формуються з цієї суміші.

Аналіз попередніх досліджень [77] показує, що продуктивність у плоских збіжних каналах збільшується з ростом кута нахилу похилої стінки каналу до вертикалі. Ця закономірність була використана при розробці нової конструкції формуючого віброекструдера. Був запропонований віброекструдер, що містить змонтований на пружних

опорах 1 бункер 2 з похилими плоскими стінками, які своїми нижніми ділянками утворюють прямокутне роздавальне вікно і закріплений на бункері збудник коливань 3 (рис. 13.2). Новим при цьому є те, що кут нахилу похилих стінок бункера до вертикалі в торцевих ділянках роздавального вікна має найбільше значення [78].



1 – пружні опори, 2 – бункер, 3 – збудник коливань

Рис. 13.2. Віброекструдер для формування плоских виробів

Пропонована конструкція забезпечує підтримання однакової об'ємної витрати суміші по довжині поперечного перерізу роздавального вікна і формування плоских фібробетонних виробів повністю у віброекструдері, за рахунок чого покращується однорідність фібробетонної суміші і якість виробів.

Для вирішення задачі плинучості в каналі була використана прямокутна система координат з напрямком руху вздовж осі z.

Вважається, що фібробетонна суміш у вібраційному полі являє собою псевдо ньютонівську систему. У випадку ламінарного ізотермічного

плину нестисливої ньютонівської рідини у наведеному каналі рівняння Нав'є-Стокса приймає наступний вигляд:

$$\Delta u_z = \frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z},$$

Для області з контуром криволінійної форми  $\Gamma$ :

$$u_z(x, y)|_{\Gamma} = 0,$$

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

Розв'язання задачі проведено методом скінчених різниць. З цією метою була введена рівномірна по кожному напрямку різницева сітка:

$$\bar{\omega} = \bar{x} = \bar{x} - 1 \bar{h}; y_i = \bar{y} - 1 \bar{l}; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k,$$

де  $h$  і  $l$  кроки сітки по координатам  $x$  і  $y$ .

На сітці  $\bar{\omega}$  наведеній задачі поставлені у відповідність різницеві рівняння, які апроксимують похідні скінчено-різницеvими співвідношеннями. В індексних позначеннях отримали:

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

$$U_{i,j}|_{\Gamma} = 0.$$

У випадку області довільної форми накладена умова, що лінії сітки, які паралельні осі  $y$ , можуть перетинати границю  $\Gamma$  тільки у двох точках. Система алгебраїчних рівнянь була розв'язана методом блочної ітерації із застосуванням прогонки по рядку [79].

В результаті було визначено, як змінюється геометрія каналу формуючого віброекструдера по довжині (див., наприклад, рис. 13.3).





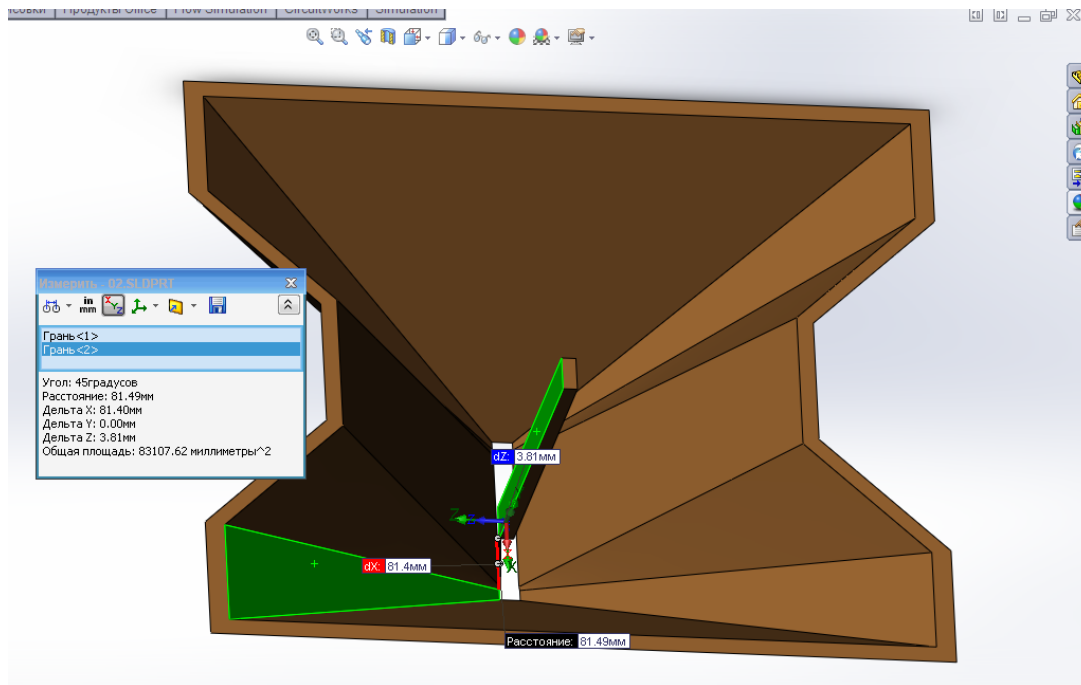


Рисунок 13.4. Результаты розрахунку за допомогою програми Solid Works

Для перевірки адекватності наведеної математичної моделі процесу формування фібробетонних виробів за допомогою запропонованого віброекструдера було проведено ряд експериментальних дослідів, які підтвердили теорію плинності фібробетонної суміші.

Експериментальна установка подана на рисунку 13.5.

Основними положеннями фізичної моделі процесу віброекструзії є:

1. Використовується феноменологічний підхід, який приймає фібробетонну суміш, як однорідне ізотропне середовище.

2. Фібробетонна суміш, що знаходиться під впливом вібрації, поводить себе подібно рідині, через те найбільш придатними для розрахунку процесів і реологічних характеристик є гідродинамічні теорії.

3. Вібруючі фібробетонні суміші при параметрах вібрації, які створюються стандартними вібраторами, являють собою

псевдоньютонівські системи.

4. Віброекструзійний ламінарний зсувний плин здійснюється під дією гідростатичного тиску маси в результаті тискотропного зменшення в'язкості композиції.

Виходячи з вище сказаного, для достовірності дослідних значень експериментальна рідина має бути ньютонівською. Процес змодельований на воді, температура якої 5 °С.

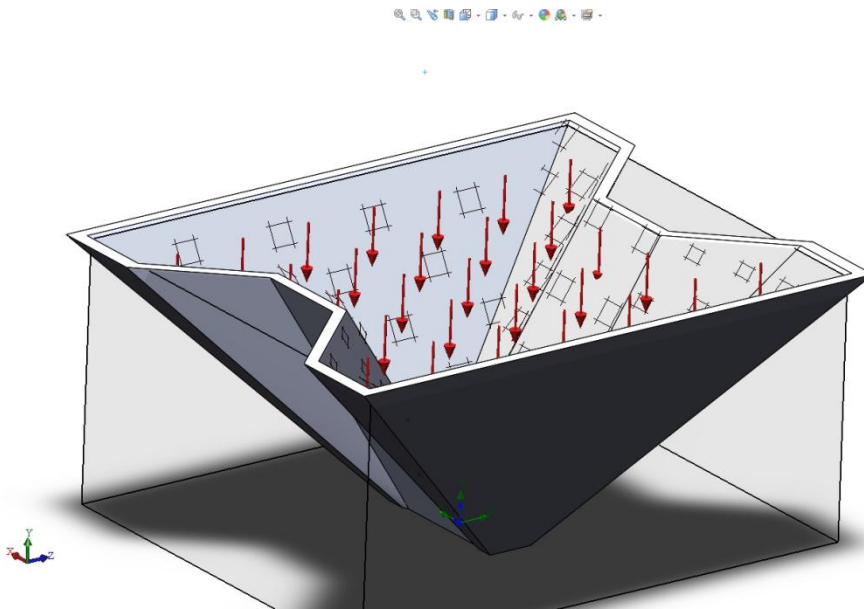


Рис. 13.5. Схема експериментальної установки

Проводилося два види експериментів:

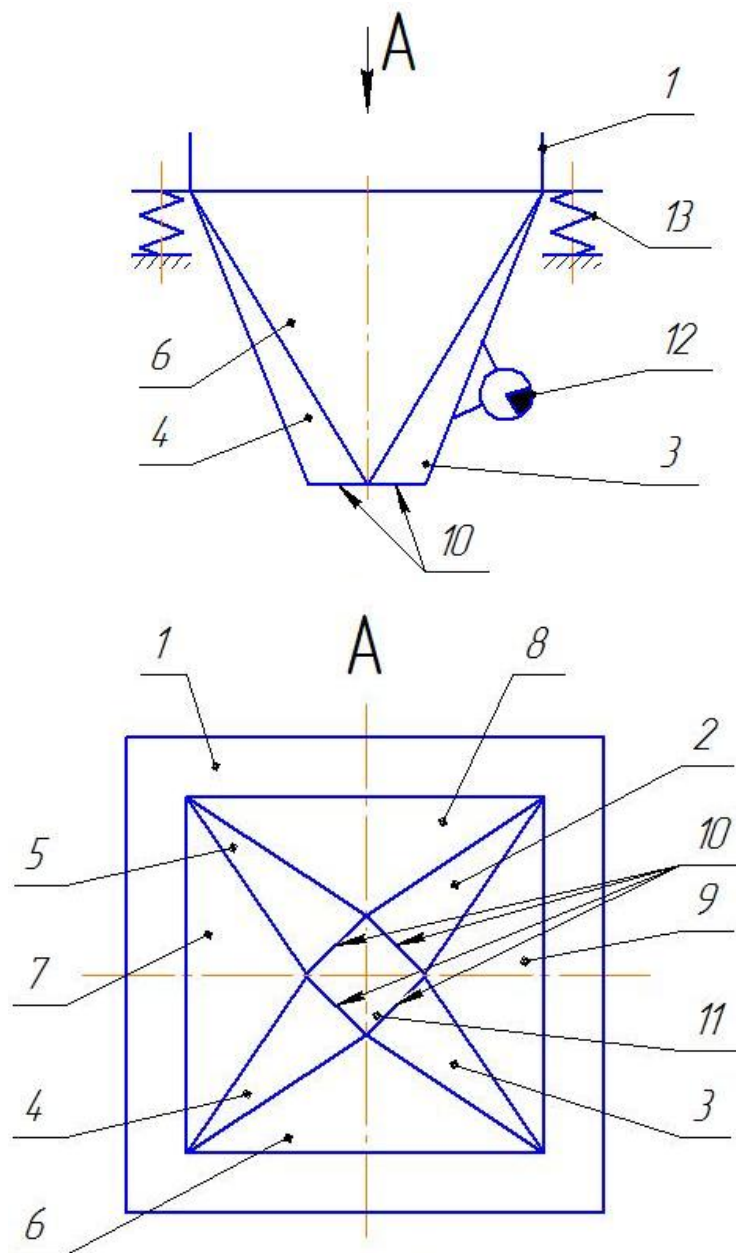
1. Забір продуктивності на одиницю площі торцевої та центральної зон запропонованого каналу віброекструдера (різниця склала 1,2%);
2. Вимірювання швидкості плин у будь – якій точці каналу віброекструдера.

Середньоквадратичне відхилення практичних вимірювань від теоретичних склало 1,054 %.

Для підвищення швидкості плинущ суміші у кутових зонах і, відповідно, покращення якості виробів за рахунок зменшення різниці в об'ємній витраті суміші різних ділянок роздавального вікна запропоновано бункер віброекструдера виконувати з 8 похилими стінками, чотири з яких розширюються донизу, де утворюють своїми крайками роздавальне вікно, а інші чотири трикутні стінки розташовуються поміж першими стінками і звужуються донизу до кутів прямокутного роздавального вікна (рис. 13.6).

Підвищення об'ємної витрати суміші у кутових ділянках роздавального вікна здійснюється внаслідок зменшення в цих місцях опору плинущ суміші, що обумовлене збільшенням кута між похилими стінками у живому перерізі бункера при збільшенні кількості цих стінок. В результаті цього покращується однорідність фібробетонної суміші і якість виробів, а бункер віброекструдера стає більш доступним для очищення [80].

В результаті використання запропонованого вище методу розрахунку можна визначити розподіл швидкостей у будь-якому поперечному перерізі каналу бункера віброекструдера. Приклад результатів розрахунку в одному з перерізів каналу удосконаленого апарата подано на рис. 13.7.



1 – бункер, 2-5 – похилі плоскі стінки, які розширюються донизу, 6-9 – похилі плоскі стінки, які звужуються донизу, 10 – нижня крайка стінок, 11 – прямокутне роздавальне вікно, 12 – збудник коливань, 13 – пружні опори

Рис. 13.6. Віброекструдер для формування прямокутних у поперечному перерізі фібробетонних виробів

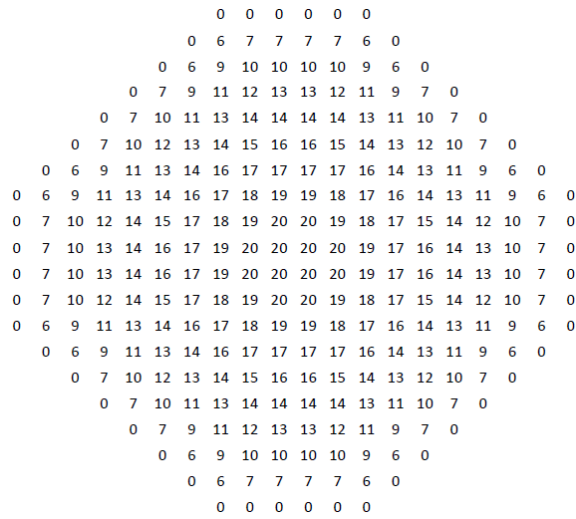


Рис. 13.7. Результати моделювання плинущі фібробетонної суміші в програмному середовищі QBasic (цифрами позначені відносні швидкості плинущі)

На рисунку 13.8 подано графіки відносних швидкостей на діагоналях роздавальных вікон пірамідального каналу квадратного поперечного перерізу [35, 36] і каналу бункера запропонованого віброекструдера. Початок координат вибрано у центрі перерізу роздавального вікна.

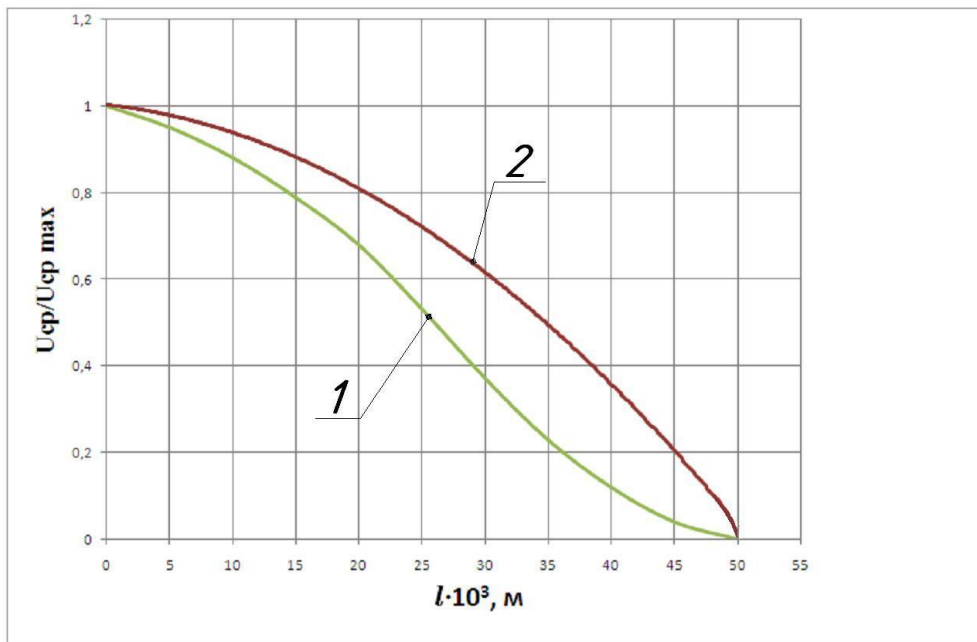


Рис. 13.8. Розподіл відносних швидкостей на діагоналях роздавальних вікон пірамідального каналу квадратного поперечного перерізу (1) і каналу бункера віброекструдера, що пропонується (2)

З наведених графіків видно, що витрата суміші в кутах роздавального вікна буде вище у разі застосування запропонованого віброекструдера для виготовлення фібробетонних виноградних стовпчиків. Нове конструктивне рішення забезпечує покращення якості виробів, а збільшення об'єму бункера при той же висоті, у свою чергу, призводить до росту продуктивності віброекструдера.

Подальше підвищення швидкості плинину суміші у кутових зонах і, відповідно, покращення якості виробів за рахунок зменшення різниці в об'ємній витраті суміші різних ділянок роздавального вікна можна досягти за рахунок виконання трикутних стінок бункера віброекструдера, які звужуються донизу, опуклими [81].

## 14. ВІБРОЕКСТРУЗІЯ ФІБРОБЕТОННИХ ВИРОБІВ СКЛАДНОГО ПРОФІЛЮ

### 14.1. Вібоекструзійне формування фібробетонних швелерних виробів

За необхідну умову при розрахунку перерізу формуючого мундштука вібоекструдера для виготовлення фібробетонних профільних виробів типу “швелер” приймалось забезпечення однакової витрати матеріалу при вібоекструзії на одиницю площі поперечного перерізу формуючого мундштука у торцевих і серединній ділянках. В цьому випадку полиці лотка будуть набувати своїх остаточних розмірів при затіканні матеріалу у віброформу, що переміщується відносно вібоекструдера, а стінка лотка формується безпосередньо в вібоекструдері.

Для розгляду процесу скористаємося прямокутною системою координат  $(x, y, z)$ .

При ламінарній ізотермічній течії ньютонівської рідини в напрямку  $z$  рівняння Нав'є-Стокса приймає вигляд

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z},$$

де  $u_z$  – швидкість вібоекструзії, м/с;  $\mu$  – вібров'язкість матеріалу, Па·с;  $P$  – тиск, Па.

У випадку області  $G$  з контуром криволінійної форми  $\Gamma$ :

$$u_z \Big|_{\Gamma} = 0.$$

Надалі приймаємо  $u_z = u$ ,  $\frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} = -f$ , тоді

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -f; \quad (14.1)$$

$$u_\Gamma = 0.$$

Для розв'язку поставленої крайової задачі застосовуємо чисельний метод розв'язку першої крайової задачі для рівняння Пуассона в області з контуром  $\Gamma$ , складеним із прямих, паралельних осям координат. В області  $G$  введемо різницеву сітку  $w$ . Одержимо систему лінійних алгебраїчних рівнянь, порядок якої рівний числу внутрішніх вузлів сіткової області  $w$ . Цю систему будемо розв'язувати методом блочної ітерації.

Перепишемо рівняння (14.1) у вигляді:

$$u_{i+1,j}^{k+1} - 2(1+\delta)u_{i,j}^{k+1} + u_{i-1,j}^{k+1} = g_{i,j}^k, \quad (14.2)$$

де  $g_{i,j}^k = -\left[ h^2 f_{i,j}^k + \delta(u_{i,j+1}^k + u_{i,j-1}^k) \right]$ ;  $k$  – номер ітерації;  $\delta = \frac{h^2}{l^2}$ .

Якщо у всіх вузлах сіткової області задамося початковим наближенням до розв'язку (в якості початкового наближення можна вибрати нуль), то права частина рівняння (14.2) буде відомою, і на кожному  $j$ -тому рядку, розв'язуючи рівняння (14.2), відбувається уточнення попереднього наближення до розв'язку.

Рівняння (14.2) на кожному внутрішньому рядку  $j$  ( $j=1,2,\dots,N_2-1$ ) сіткової області  $w$  може бути розв'язане методом прогонки [79]. Таким чином замість початкового наближення у всіх внутрішніх вузлах сіткової області одержимо перше наближення до розв'язку. Повторюємо ці кроки до тих пір, поки не буде виконана умова закінчення ітерацій

$$\max_{i,j} |u_{i,j}^{k+1} - u_{i,j}^k| < \varepsilon,$$

де  $k$  – номер ітерації;  $\varepsilon$  – точність, з якою хочемо отримати розв'язок.



Обчислювальна схема цього методу реалізована на алгоритмічній мові високого рівня Quick-BASIC. Задаючи будь-які лінійні розміри профілю  $a$ ,  $c$  і  $x$ , а також кут  $j$  (див. рис. 14.1) ми отримаємо шукану товщину полиці  $b$ . При цьому буде забезпечуватися однакова витрата матеріалу при віброекструзії на одиницю площі поперечного перерізу формуючого мундштука у торцевих і середній ділянках.

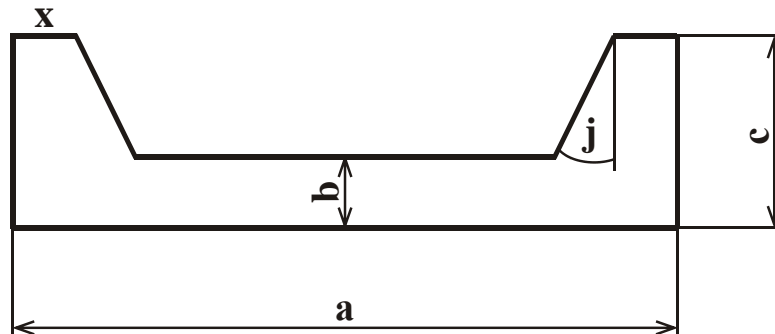


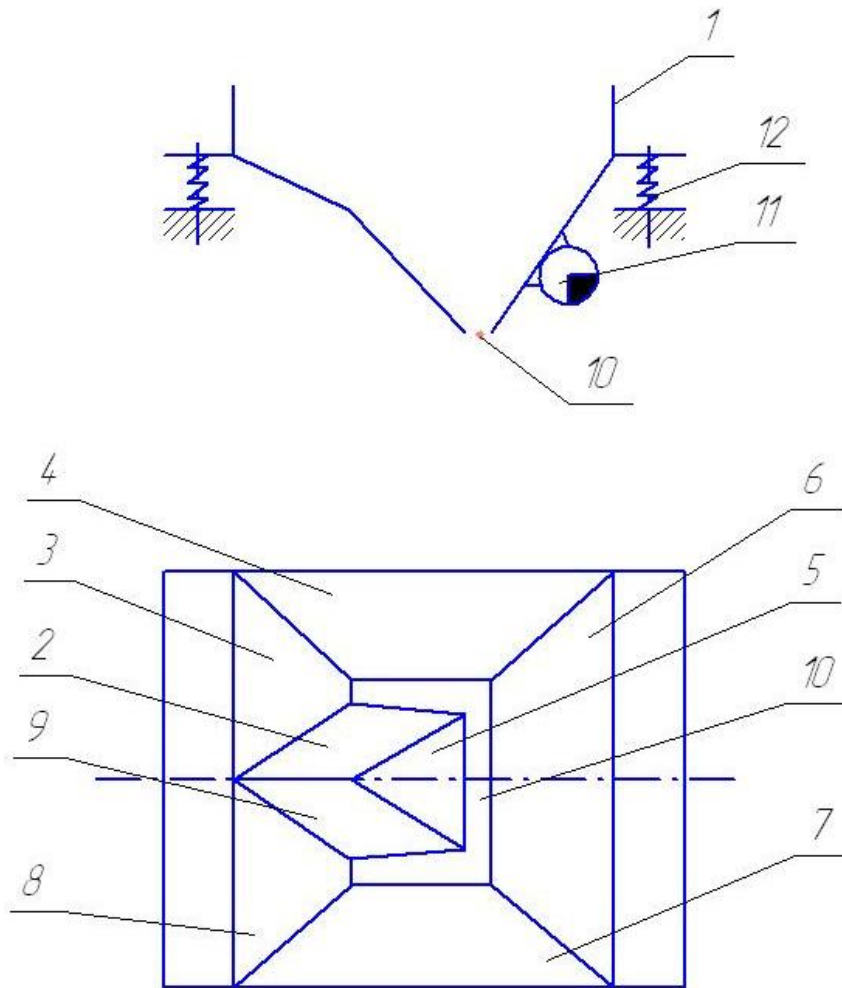
Рис. 14.1. Профіль плити

Зазначений віброекструдер не забезпечує однорідність фібробетонної суміші у всьому виробі через те, що полки лотока, на відміну від стінки, отримують свою остаточну конфігурацію тільки при затіканні фібробетонної суміші у віброуючу форму. Це негативно впливає на якість виробів, які формуються з цієї суміші.

Було запропоновано виконувати плоскі стінки бункера, між якими здійснюється формування полок і стінки лотока, з різним нахилом, а швелероподібне роздавальне вікно – відповідно до розмірів поперечного перерізу лотока [82].

Нахил стінки повинен забезпечити однакову об'ємну витрату суміші на одиницю площі поперечного перерізу розглянутого лотока на ділянках формування полок і стінки і визначається розрахунком з умови підвищення продуктивності між стінками при збільшенні їх кута нахилу

до вертикалі. Формування фібробетонних лотоків в цьому випадку буде здійснюватися переважно у віброекструдері через виконання швелероподібного роздавального вікна з розмірами, що відповідають розмірам поперечного перерізу лотоків. В результаті покращується однорідність фібробетонної суміші і якість виробів.



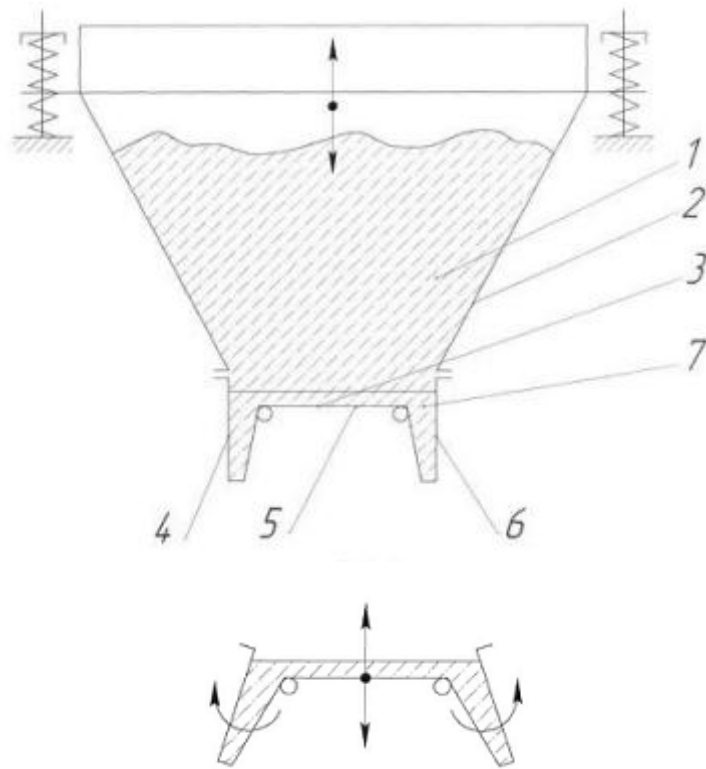
1 – бункер; 2-9 – похилі плоскі стінки; 10 – швелероподібне роздавальне вікно; 11 – збудник коливань; 12 – пружні зв'язки

Рис. 14.2. Віброекструдер для формування фібробетонних лотоків

## **14.2. Вібоекструзія фібробетонних лотоків у горизонтально розташовану форму, виконану з шарнірно з'єднаних секцій**

Можна здійснювати формування фібробетонних лотоків вібоекструзією фібробетонної суміші у горизонтально розташовану форму, яка виконана з шарнірно з'єднаних секцій піддону і стінок з закрилками з подальшою фіксацією закрилок на поверхні фібробетонної суміші і поворотом вниз крайніх секцій піддону на заданий кут при вібрації [83]. Але при повороті вниз крайніх секцій піддону на кут близький до 90 градусів (при виготовленні найбільш поширених лотоків) здійснюється значне переформування стінки лотка, вона стоншується, змінюється орієнтація фібрової арматури. Це у свою чергу впливає на міцність композиції і зменшує номенклатуру виробів, які виготовляються.

Було запропоновано удосконалити спосіб формування фібробетонних лотоків шляхом зменшення впливу повороту секцій форми на структуру суміші стінки лотка, що дозволяє зберегти основний напрямок орієнтування фібр, який отримується в процесі вібоекструзії, а отже і підвищити міцність виробів, які формуються [84]. В процесі вібоекструзії суміш отримує конфігурацію лотка з полками, які розташовані під кутом 90 градусів до стінки, лоток укладається у форму полками вниз, а після вібоекструзії здійснюють поворот вгору секцій форми з полками лотка на заданий кут при вібрації (рис. 14.3).



1 – фібробетонна суміш; 2 – віброекструдер; 3 – форма; 4-6 – шарнірно з’єднані секції; 7 – фібробетонний лоток

Рис. 14.3. Спосіб формування фібробетонних лотоків

### 14.3. Віброекструзія фібробетонних плит покриття

Рибисті плити перекриття (рисунок 14.4) використовують в основному для створення покриття промислових будов. При виготовленні ребристих плит використовують металеву арматуру, з якої роблять сітки потрібної форми й розмірів. Сітки укладають у форму, заливають бетоном і формують вироби під впливом вібрації. Такі плити мають великий попит, їх транспортування здійснюється звичайними тягачами с причепами і напівпричепами, що дозволяє швидко доставити їх на місце будування.

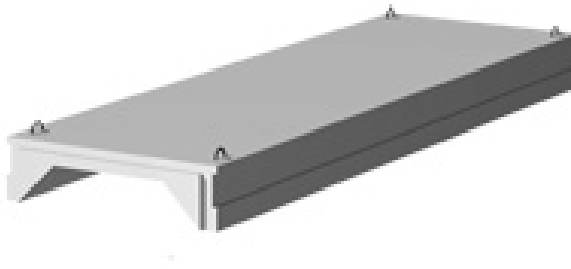


Рис. 14.4. Плита ребриста залізобетонна 2ПГ6-3АтVт

Дисперсне армування бетону базальтовими фібрами дозволяє досягти покращення його основних фізико-механічних характеристик і зменшити масу виробів порівняно з їх залізобетонними аналогами. Властивості базальтофібробетону дозволяють виготовляти з цього матеріалу не тільки кормушки і лотки для видалення гною в фермах для великої рогатої худоби [85], але і плити покриття.

Віброекструзійне виготовлення базальтофібробетонних виробів було відпрацьоване на дослідно-промисловій установці. Встановлена можливість виготовлення таких плит покриття замість аналогічних залізобетонних виробів 2ПГ6-3АтVт і визначені їх розміри (рисунок 14.5). При цьому металева напружена арматура закладається тільки у ребрах плити.

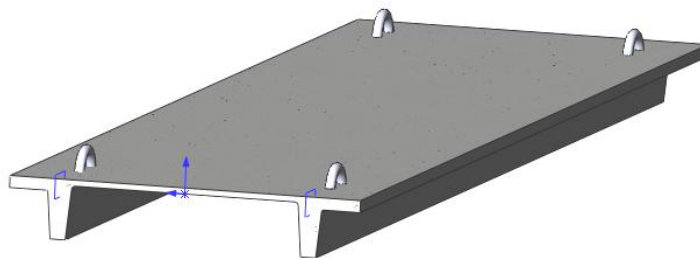


Рис. 14.5. Базальтофібробетонна плита покриття

Характеристики плит покриття наведені у таблиці 14.1.

Таблиця 14.1. Габаритні розміри і маси плит покриття

Найменування	Довжина, мм	Ширина,	Висота,	Маса, т
		мм	мм	
Плита ребриста залізобетонна 2ПГ6-3АтVт	5980	1490	300	1,5
Плита базальтофібро- бетонна	5980	1490	250	1,08

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.

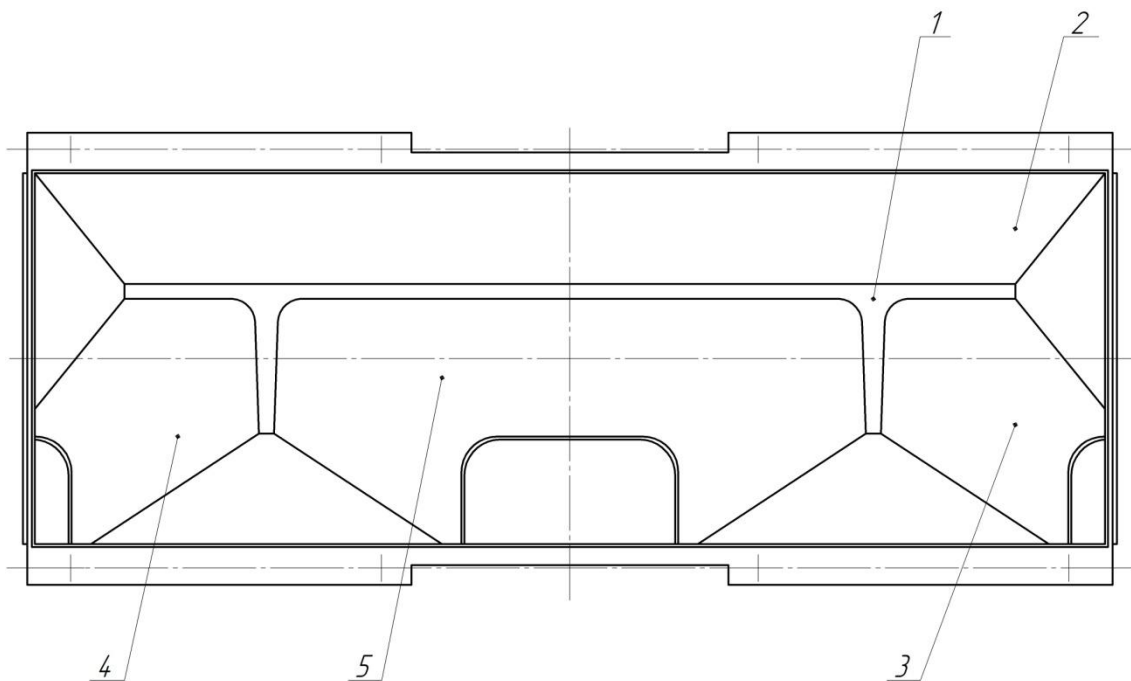
Найпростіші віброекструдери для виготовлення фібробетонних плит покриття містять збіжні канали, які мають складний поперечний переріз. Але, при формуванні плит покриття за допомогою таких віброекструдерів можливий розрив матеріалу в центрі виробу через пониження швидкості плинину суміші в центральній зоні каналу.

У той же час зазначений віброекструдер не забезпечує однорідність фібробетонної суміші по ширині виробу через те, що його центральні ділянки отримують свою остаточну конфігурацію після процесу віброекструзії при затіканні у вібруючу форму. Це негативно впливає на якість виробів, які формуються з цієї суміші.

Тому було запропоновано змінити вихідний отвір формуючого віброекструдера для забезпечення однакової продуктивності торцевої і центральної частин, які приходяться на одиницю площі відповідної частини формованого виробу (рисунок 14.6).

Торцеві ділянки плити отримують свою остаточну конфігурацію після процесу віброекструзії при затіканні у вібруючу форму.

Для забезпечення однорідності фізико-механічних властивостей фібробетонних плит покриття був запропонований формуючий віброекструдер, в якому підвищення якості кінцевого продукту здійснюється за рахунок формування середньої частини виробів повністю у віброекструдері і дотриманні однакової об'ємної витрати суміші по довжині поперечного перерізу роздавального вікна [86].



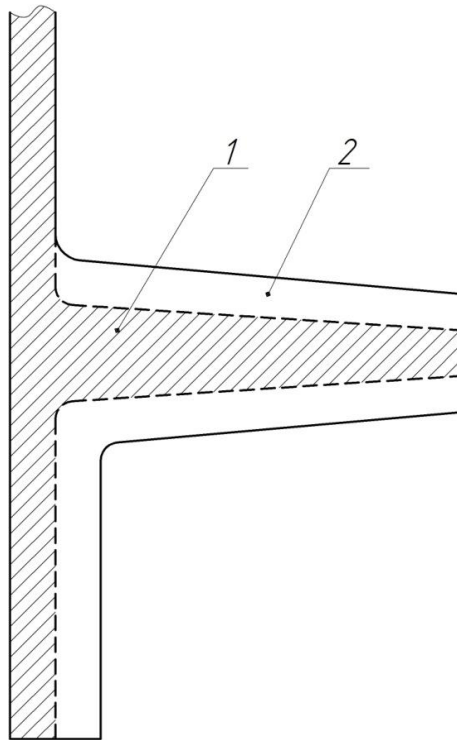
1 – роздавальне вікно; 2 – сталевий бункер; 3, 4 – вставки бокові; 5 – вставка центральна.

Рис. 14.6. Бункер формуючого віброекструдера. Вид зверху

Вирішення задачі плин у каналі бункера віброекструдера виконано за методикою, поданою в розділі 13.2. Було 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 було забезпечити однакову продуктивність різних ділянок роздавального вікна (місце формування робер, торцевих стовщених частин стінки і середньої частини стінки плит), що припадають на одиницю відповідних площ поперечного перерізу виробів, які формуються.

Геометрія каналу віброекструдера була визначена в результаті використання запропонованого методу розрахунку. При цьому вважалось, що фібробетонна суміш у вібраційному полі є псевдоньютонівською системою, а плин – ізотермічний і ламінарний. Розрахунок швидкості, який базується на використанні зазначеного методу і врахуванні наведених припущень, дає можливість оцінити процес плин розчину в каналі віброекструдера, що має довільний поперечний переріз. Для визначення характеру зміни складової швидкості плин по перерізу каналу була розроблена програма розрахунку на ПЕОМ [87]. Результати виконання розрахунку наведені на рисунку 14.7.





1 – переріз роздавального вікна формуючого віброекструдера, який був визначений в результаті математичного розрахунку течії (заштрихована ділянка); 2 – переріз фібробетонної плити покриття

Рис. 14.7. Результати розрахунку живого перерізу роздавального вікна.  
Торцева частина.

Також, задача плин у каналі запропонованого віброекструдера була вирішена за допомогою програми SolidWorks. Результати розрахунку наведено на рисунках 14.8, 14.9.

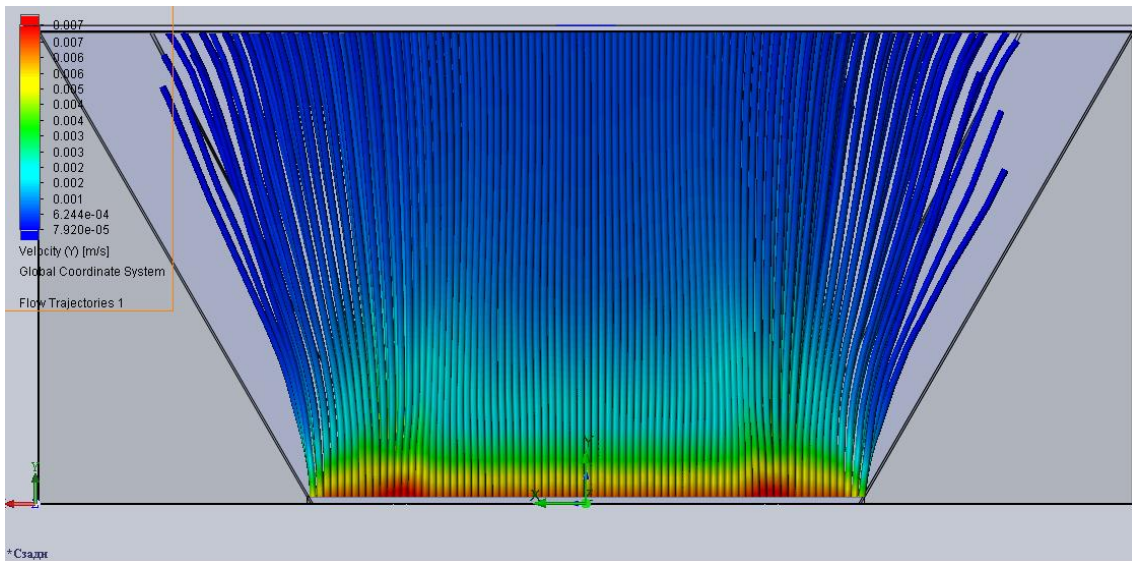


Рис. 14.8. Швидкість плин у поздовжньому перерізі каналу віброекструдера

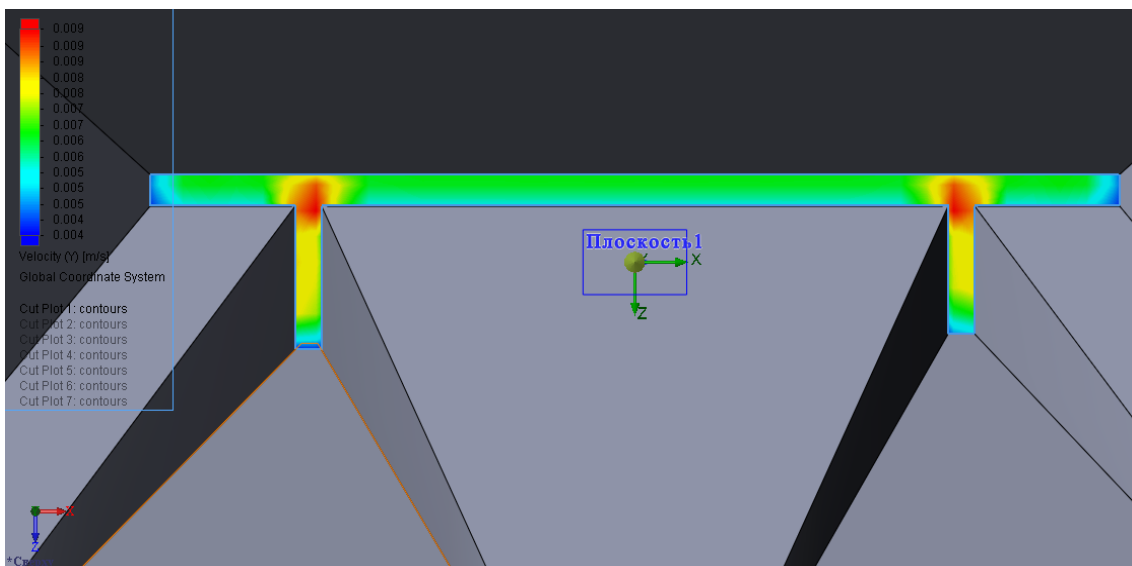


Рис. 14.9. Швидкість плин у поперечному каналі віброекструдера

Отже, при порівнянні методів розрахунку, бачимо, що розрахунок математичної моделі у середовищі QBasic приблизно дорівнює розрахунку за допомогою програми SolidWorks. Проте, за рахунок того, що в програмі SolidWorks можна врахувати більше зовнішніх факторів,

розрахунок є більш точним. Порівняння розрахунку математичної моделі у середовищі QBasic та у програмі SolidWorks подані на рисунку 14.10. Найбільша швидкість плинущ суміші спостерігається у місці приєднання торцевої частини до плоскї частини роздавального вікна, що співпадає з розрахунком математичної моделі у середовищі QBasic. На рисунках 14.11 та 14.12 спостерігаємо швидкості обох теоретичних розрахунків у вигляді графіків.



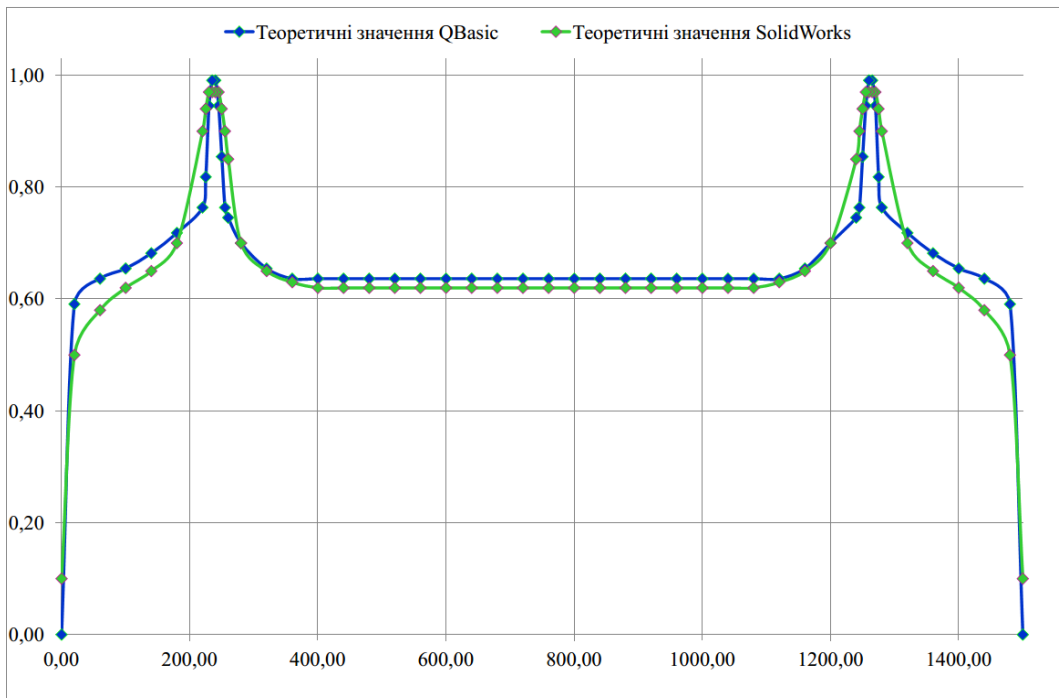


Рис. 14.11. Графік відносних швидкостей у середовищі QBasic та у програмі SolidWorks. Плоска частина роздавального вікна.

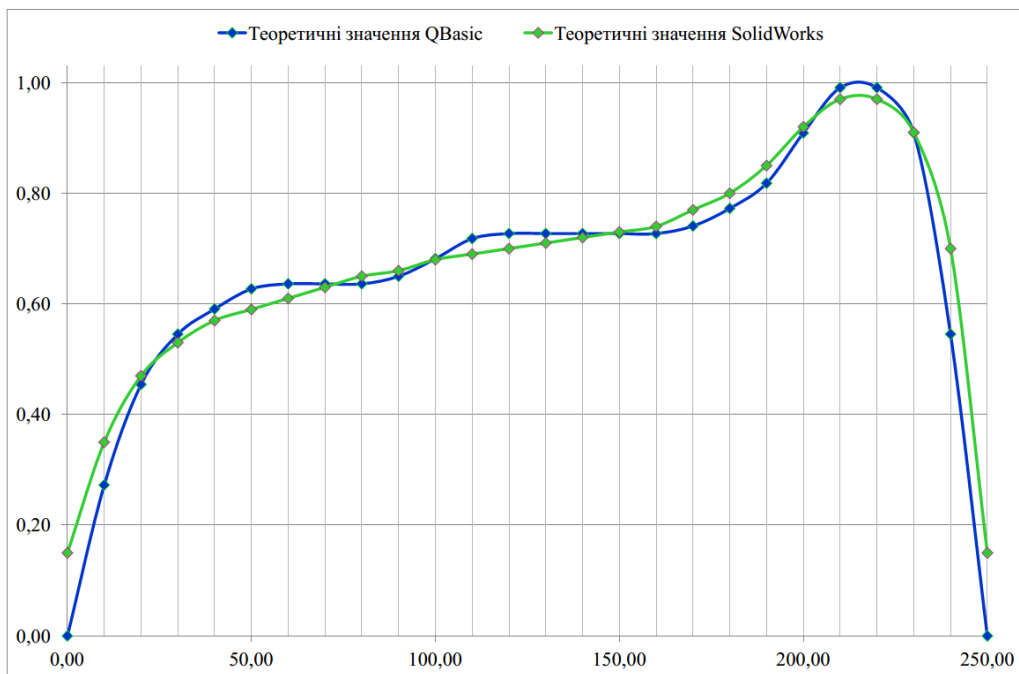


Рис. 14.12. Графік відносних швидкостей у середовищі QBasic та у програмі SolidWorks. Ребро роздавального вікна.

У зв'язку зі складних перерізом профілю роздавального вікна, дослідження були розділені на дві групи: дослідження швидкостей в плоскій частині роздавального вікна (переріз А-А) та дослідження швидкостей в ребрах роздавального вікна (переріз Б-Б). На рисунку 14.13 показано схему перерізів, де велись досліди.

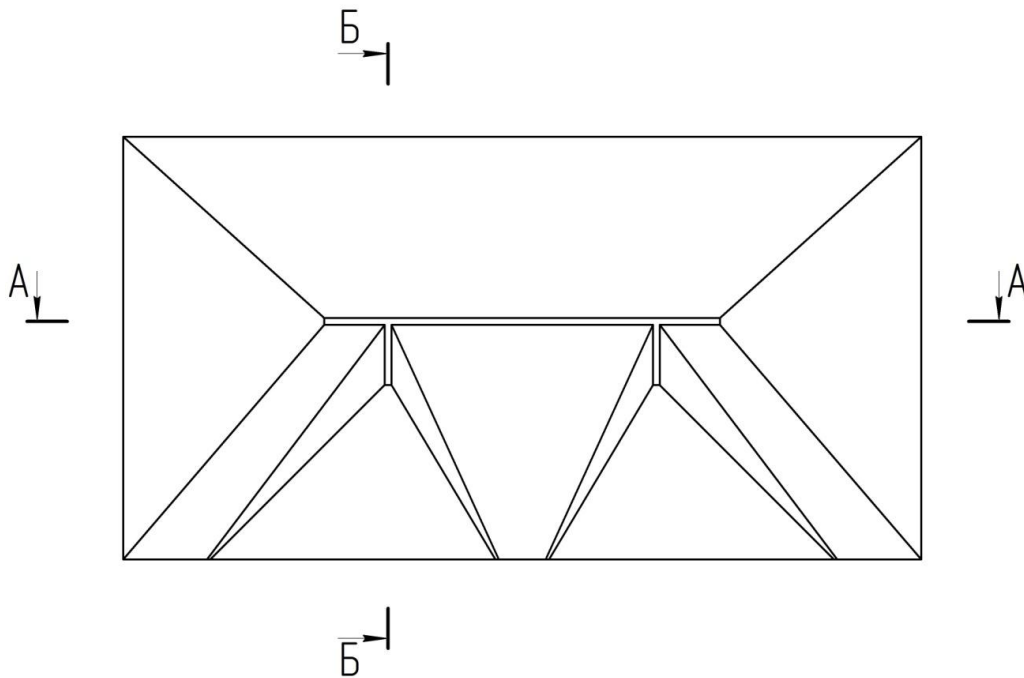


Рис. 14.13. Схема перерізів роздавального вікна бункера віброекструдера, де велись досліди

Продуктивності торцевої і центральної частин, які приходяться на одиницю площі відповідної частини виробу, визначались також і в експериментальних дослідженнях. Середньоквадратичне відхилення практичних вимірювань продуктивності від теоретичних значень склало, відповідно, 1,07% та 1,24%.

## **15. ПРОЦЕСС ФОРМУВАННЯ ФІБРОБЕТОННИХ ТРУБ**

### **15.1. Конструкції віброекструдерів для формування фібробетонних труб**

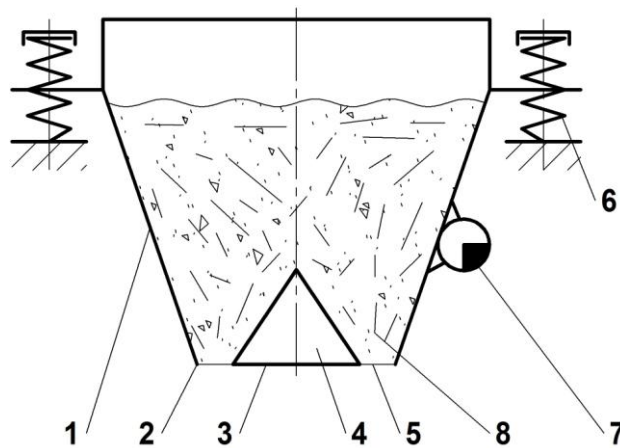
Для віброекструзійного формування фібробетонних труб запропонована конструкція спеціального віброекструдера [88].

Пристрій для формування фібробетонних труб містить бункер 1 у вигляді перевернутого зрізаного конуса, який своїми нижніми крайками 2 разом з нижніми крайками 3 розподільного конуса 4 утворює роздавальне кільцеве вікно 5 (Рисунок 15.1). Розподільний конус 4 жорстко закріплений до бункера 1 таким чином, що нижні крайки 2 бункера 1 і нижні крайки 3 розподільного конуса 4 знаходяться на одному рівні, а переріз роздавального кільцевого вікна 5 відповідає перерізу формованої труби. Сам бункер 1 встановлено на пружні зв'язки 6, а до стінки бункера 1 закріплений збудник коливань 7.

Пристрій працює наступним чином. У верхню частину бункера 1 завантажують бетонну суміш з фібрами і вмикають збудник коливань 7, після чого внаслідок коливань, які передаються від збудника коливань 7 до стінок бункера 1 і розподільного конуса 4, фібробетонна суміш у бункері 1 розріджується і перетікає у кільцевий канал 8, в результаті проходження якого формується труба, сама труба видавлюється крізь роздавальне вікно 5.

Для подальшого транспортування (на тепловологу обробку і т. ін.) сформована труба укладається у форму.

Пропонована конструкція нескладна у виготовленні та експлуатації, більш компактна, має значно меншу металоємність, дозволяє виготовляти якісні фібробетонні труби.



1 – бункер; 2,3 – нижні країки; 4 – розподільний конус; 5 – роздавальне кільцеве вікно; 6 – пружні зв'язки; 7 – збудник коливань; 8 – кільцевий канал

Рис. 15.1. Пристрій для формування фібробетонних труб

Сформовані вироби характеризуються незначною поздовжньою орієнтацією фібр у трубах, тому що біля стінок збіжного кільцевого каналу фібри розташовуються під кутом близьким до кута нахилу стінок каналу.

Вдосконаленням віброекструдера для формування фібробетонних труб є нове конструктивне виконання [89], яке збільшує розвертання фібр у поздовжньому напрямку під час плину у кільцевому каналі віброекструдера, а отже – забезпечує кращу якість труб, ніж можна було отримати раніше. Для цього розподільний пристрій у середній частині і частина бункера, що розташована на одному рівні з середньою частиною розподільного пристрою, виконуються циліндричними. Фібри за рахунок зсувних деформацій, які виникають при плинні суміші в вертикальному кільцевому каналі постійного поперечного перерізу, приймають положення, близьке до нахилу стінок. Тобто, такий пристрій забезпечує переважно поздовжнє орієнтування фібр у трубі, а виготовлені труби

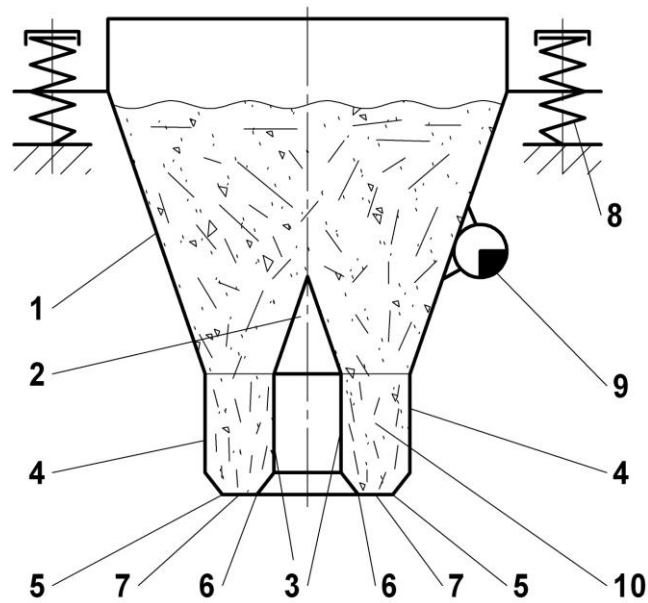


характеризуються більшою міцністю.

Удосконалений віброекструдер для формування фібробетонних труб містить бункер 1, розподільний пристрій 2, який жорстко закріплений всередині бункера 1. Середня частина 3 розподільного пристрою 2 і частина бункера 4, що розташована на одному рівні з середньою частиною 3 розподільного пристрою 2 виконані циліндричними. Нижні крайки 5 бункера 1 знаходяться на одному рівні з нижніми крайками 6 розподільного пристрою 2 і утворюють роздавальне кільцеве вікно 7, переріз якого відповідає перерізу формованої труби. Сам бункер 1 встановлено на пружні зв'язки 8, а до стінки бункера 1 закріплений збудник коливань 9 (рис. 15.2).

Пристрій працює наступним чином. У верхню частину бункера 1 завантажують бетонну суміш з фібрами і вмикають збудник коливань 9, після чого внаслідок коливань, які передаються від збудника коливань 9 до стінок бункера 1 і розподільного пристрою 2, фібробетонна суміш у бункері 1 розріджується і перетікає у кільцевий канал 10, який утворюється внутрішньою поверхнею бункера 1 і розподільним пристроєм 2. В результаті послідовного проходження збіжної, циліндричної і знову збіжної частин кільцевого каналу 10 фібробетонна маса ущільнюється, фібри орієнтуються переважно у поздовжньому напрямку і формується труба. Сама труба видавлюється крізь роздавальне вікно 7.

Для подальшого транспортування (на тепловолоту обробку і т. ін.) сформована труба укладається у форму.



1 – бункер; 2 – розподільний пристрій; 3 – середня частина розподільного пристрою; 4 – циліндрична частина бункера; 5 – нижні крайки бункера; 6 – нижні крайки розподільного пристрою; 7 – роздавальне кільцеве вікно; 8 – пружні зв'язки; 9 – збудник коливань; 10 – кільцевий канал

Рис. 15.2. Віброекструдер для формування фібробетонних труб

## 15.2. Фізична модель процесу віброекструзії

Фізична модель процесу віброекструзії подана на рисунку 15.3.

Основні положення фізичної моделі процесу:

1) Фібробетонна суміш, що знаходиться під впливом вібрації, поводить себе подібно рідини, через те найбільш придатними для розрахунку процесів і реологічних характеристик є гідродинамічні теорії.

2) Плин суміші у каналах бункера віброекструдера розглядаємо, як послідовний плин у конічному і круглому кільцевому каналі, що звужується.

3) Використовуємо феноменологічний підхід, який приймає

фібробетонну суміш, як однорідне ізотропне середовище. Про структуру суміші роблять лише загальні застереження.

4) Вібруючі фібробетонні суміші при параметрах вібрації, які створюються стандартними вібраторами, являють собою псевдоньютонівські системи.

5) Віброекструзійний ламінарний зсувний плин здійснюється під дією гідростатичного тиску маси в результаті тиксотропного зменшення в'язкості композиції.

6) В процесі віброекструзії має місце ламінарне конвективне перемішування.

7) При плинні композиційного матеріалу у каналі бункера віброекструдера здійснюється природна орієнтація фібр за рахунок деформацій зсуву.

8) Виконання перегородки у вигляді конуса виключає утворення окремих змішувально-живильних ділянок, внаслідок чого плин суміші здійснюється суцільним потоком.

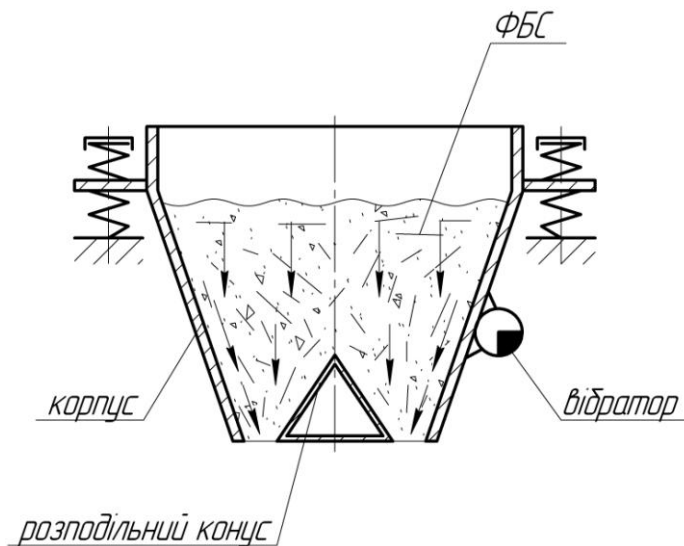


Рис. 15.3. Фізична модель процесу віброекструзії

## 15.3. Математична модель процесу віброекструзії

### 15.3.1. Процес змішування фібробетонної суміші у круглому кільцевому каналі

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

Розрахункова схема процесу подана на рисунок 15.4. Висота стовпа суміші  $l$  у кільцевому вертикальному каналі підтримується постійною.

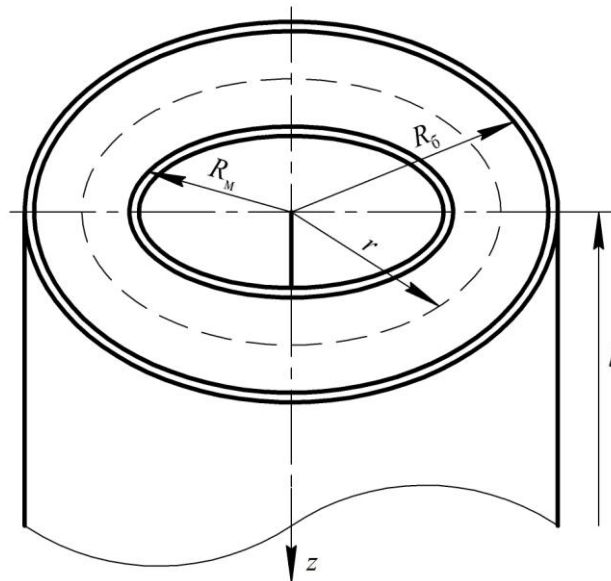


Рисунок 15.4 – Розрахункова схема процесу у круглому кільцевому каналі постійного поперечного перерізу

Розглянемо процес простого змішування в умовах ламінарного плину при відсутності дифузії, який здійснюється у круглому кільцевому

каналі. При розгляді процесу використовується феноменологічний підхід, який приймає фібробетонну суміш, як однорідне ізотропне середовище, а про структуру суміші робляться лише загальні застереження. Враховується, що віброуючі фібробетонні суміші при віброекструзії являють собою псевдоньютонівські системи.

У випадку ізотермічного сталого прямолінійного плину ньютонівської рідини за рахунок перепаду тиску  $\frac{\partial p}{\partial z}$  у круглому кільцевому каналі постійного поперечного перерізу при граничній умові, що швидкість плинину на стінках каналу дорівнює нулю, формули для розрахунку швидкості  $u$  і об'ємної витрати  $q$  [12-14] мають вигляд:

$$u = -\frac{1}{4\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \left[ \left( R_6^2 - R_M^2 \right) \frac{\ln \frac{r}{R_M}}{\ln \frac{R_6}{R_M}} - \left( r^2 - R_M^2 \right) \right], \quad (15.1)$$

$$q = -\frac{p}{8\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \left( R_6^2 - R_M^2 \right) \left( R_6^2 + R_M^2 - \frac{R_6^2 - R_M^2}{\ln \frac{R_6}{R_M}} \right), \quad (15.2)$$

де  $R_6$  – більший радіус круглого кільцевого каналу, м;  $R_M$  – менший радіус круглого кільцевого каналу, м;  $r$  – поточний радіус круглого кільцевого каналу, м;  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості суміші, Па·с.

Швидкість зсуву  $\dot{\gamma}$  визначимо з виразу (15.1):

$$\dot{\gamma} = -\frac{1}{4\mu} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \left( \frac{R_6^2 - R_M^2}{r \ln \frac{R_6}{R_M}} - 2r \right) \quad (15.3)$$

Частку об'ємної витрати на ділянці між  $r$  и  $dr$  знаходимо, використовуючи рівняння (15.1) і (15.2):

$$f \cdot dr = \frac{dq}{q} = \frac{4 \left[ \left( R_0^2 - R_M^2 \right) \frac{\ln \frac{r}{R_M}}{\ln \frac{R_0}{R_M}} - \left( r^2 - R_M^2 \right) \right]}{\left( R_0^2 - R_M^2 \right) \left( R_0^2 + R_M^2 - \frac{R_0^2 - R_M^2}{\ln \frac{R_0}{R_M}} \right)} dr \quad (15.4)$$

Час перебування суміші у круглому кільцевому каналі визначимо за допомогою виразу (15.1):

$$t = \frac{l}{u} = \frac{4\mu l}{\frac{\partial p}{\partial z} \left[ \left( R_0^2 - R_M^2 \right) \frac{\ln \frac{r}{R_M}}{\ln \frac{R_0}{R_M}} - \left( r^2 - R_M^2 \right) \right]} \quad (15.5)$$

Використовуючи рівняння (15.3) і (15.5) запишемо формулу для розрахунку деформації зсуву  $\gamma$ :

$$\gamma = \dot{\gamma} t = \frac{\left( \frac{R_0^2 - R_M^2}{r \ln \frac{R_0}{R_M}} - 2r \right) l}{\left( R_0^2 - R_M^2 \right) \frac{\ln \frac{r}{R_M}}{\ln \frac{R_0}{R_M}} - \left( r^2 - R_M^2 \right)} \quad (15.6)$$

Звідки знаходимо середнє значення деформації зсуву у круглому

кільцевому каналі,  $\bar{\gamma}$

$$\bar{\gamma} = \int_{R_M}^{R_6} \gamma f \left( \frac{r}{R_M} \right) dr = \frac{4l \left[ \frac{R_6^2 - R_M^2}{\ln \frac{R_6}{R_M}} - \frac{2}{3} (R_6^2 + R_6 R_M + R_M^2) \right]}{(R_6 + R_M) \left( R_6^2 + R_M^2 - \frac{R_6^2 - R_M^2}{\ln \frac{R_6}{R_M}} \right)} \quad (15.7)$$

Частку об'ємної витрати на ділянці від  $R_M$  до  $r$  знаходимо, використовуючи вираз (15.4):

$$F \left( \frac{r}{R_M} \right) = \int_{R_M}^r f \left( \frac{r}{R_M} \right) dr = \frac{\frac{R_6^2 - R_M^2}{\ln \frac{R_6}{R_M}} \left[ 2r^2 \ln \frac{r}{R_M} - r^2 - R_M^2 \right] - r^2 - R_M^2}{R_6^2 - R_M^2 \left( R_6^2 + R_M^2 - \frac{R_6^2 - R_M^2}{\ln \frac{R_6}{R_M}} \right)} \quad (15.8)$$

Середнє значення часу перебування суміші у круглому кільцевому каналі :

$$\bar{t} = \int_{R_M}^{R_6} t f \left( \frac{r}{R_M} \right) dr = - \frac{8\mu l}{\frac{\partial p}{\partial z} \left( R_6^2 + R_M^2 - \frac{R_6^2 - R_M^2}{\ln \frac{R_6}{R_M}} \right)} \quad (15.9)$$

На рисунку 15.5 представлений графік відносних зсувних деформацій  $\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}$  у круглому кільцевому каналі ( $R_M = 0,15 \text{ м}$ ,  $R_6 = 0,18 \text{ м}$ ),

який побудований за допомогою формул (15.6), (15.7).

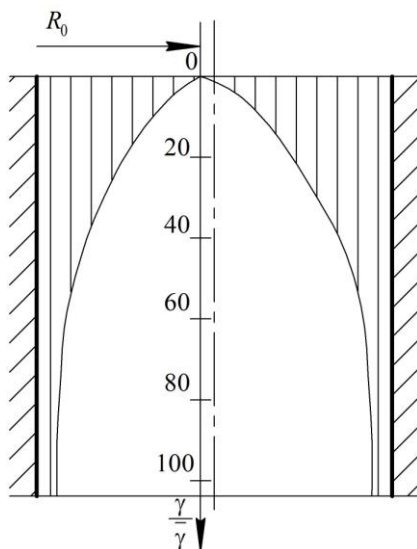


Рис. 15.5. Розподіл деформацій зсуву у круглому кільцевому каналі (при  $r = R_M$  і  $r = R_0$  деформації зсуву відповідно до виразу (15.6) дорівнюють нескінченності)

На ділянці, що відповідає максимальній швидкості плинину (при  $r = R_0$ ), деформація зсуву  $\gamma = 0$ . Аналізуючи формулу (15.1), можна зробити висновок, що у круглому кільцевому каналі максимальна швидкість зміщена від середньої лінії каналу в бік його осі і залежить від значень  $R_M$  і  $R_0$ .

Екстремальне значення функції  $u$  можна розрахувати шляхом її диференціювання і прирівнюючи похідну від швидкості нулю. Для визначення радіуса  $R_0$  вирішимо рівняння  $\frac{du}{dr} = 0$ . В результаті отримаємо:

$$R_0 = \sqrt{\frac{R_0^2 - R_M^2}{2 \ln \frac{R_0}{R_M}}}, \quad (15.10)$$

Кількісний опис відмінностей у деформуванні суміші при



віброекструзії для круглого кільцевого каналу можна здійснити за допомогою функції розподілу деформацій [90]. Для каналу віброекструдера, який розглядається в якості змішувача безперервної дії, функція розподілу деформацій (ФРД)  $f(\gamma)d\gamma$  визначається як частка об'ємної витрати на виході з каналу з сумарною деформацією зсуву в інтервалі між  $\gamma$  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  $\gamma$ .

Залежності функцій розподілу деформацій  $F(\gamma)$  від  $\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}$  на ділянках  $R_m \leq r \leq R_o$  і  $R_o \leq r \leq R_g$  і усередненої  $F(\gamma)$  для всього кільцевого каналу при  $R_m = 0,15 м$ ,  $R_o = 0,18 м$  (рис. 15.6, 15.7) були розраховані за допомогою формул (15.6), (15.7), (15.8), (15.10), а залежності функцій розподілу часу перебування суміші  $F(t)$  від  $t/\bar{t}$  (рис. 15.8, 15.9) – за допомогою формул (15.5), (15.8), (15.9), (15.10). Розгляд розподілу наведених функцій починався з точки  $r = R_o$ , де деформація зсуву дорівнює нулю, а час перебування суміші – мінімальний.

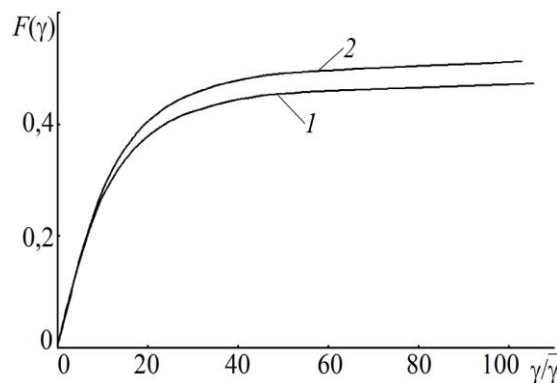


Рис. 15.6. Залежність функції розподілу деформацій  $F(\gamma)$  від  $\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}$  на ділянках  $R_m \leq r \leq R_o$  (1) і  $R_o \leq r \leq R_g$  (2)

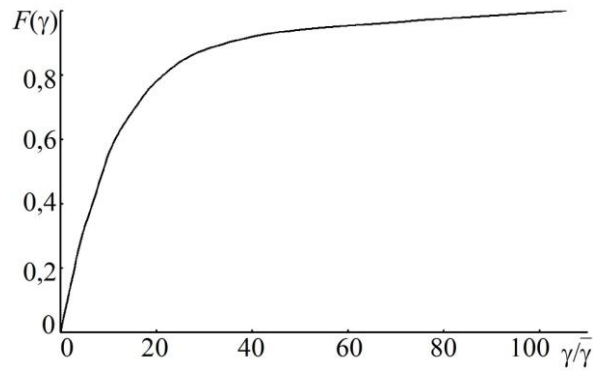


Рис. 15.7. Усереднена залежність функції розподілу деформацій  $F(\gamma)$  від  $\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}$  у кільцевому каналі

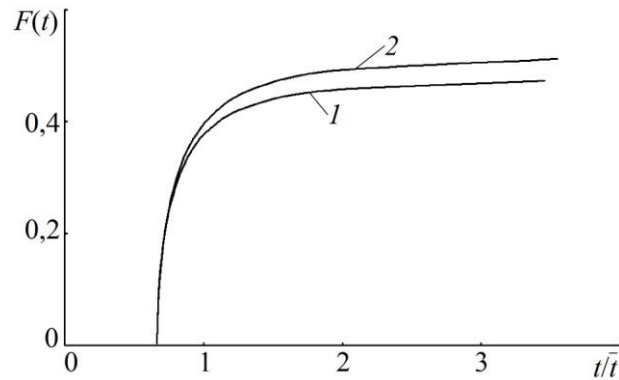


Рис. 15.8. Залежність функції розподілу часу перебування суміші  $F(t)$  від  $t/\bar{t}$  на ділянках  $R_m \leq r \leq R_o$  (1) і  $R_o \leq r \leq R_e$  (2)

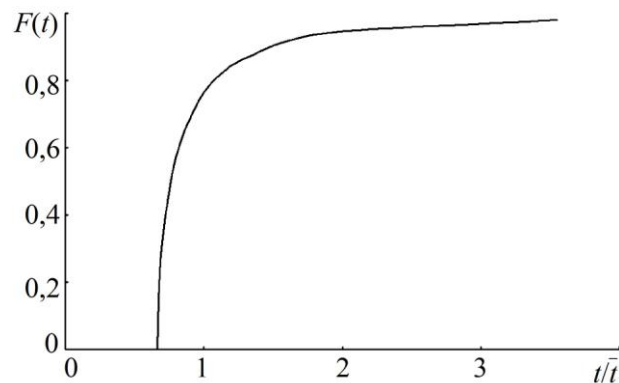


Рис. 15.9. Усереднена залежність функції розподілу часу перебування суміші  $F(t)$  від  $t/\bar{t}$  у кільцевому каналі

Недоліком процесу змішування у круглому кільцевому каналі, як і при течії у будь-яких каналах, є нерівномірність деформацій зсуву у всьому об'ємі матеріалу (рисунок 15.5). Особливістю плинну суміші у 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  $R_m \leq r \leq R_o$  і 0,52 об'ємної витрати на ділянці  $R_o \leq r \leq R_6$ ). Це, у свою чергу, впливає на характер розподілу функцій  $F(\gamma)$  і  $F(t)$  (рисунок 15.6, 15.8). Усереднені криві функцій розподілу деформацій і розподілу часу перебування у круглому кільцевому каналі наведені на рисунках 15.7 і 15.9.

У круглому кільцевому каналі ( $R_m = 0,15\text{ м}$ ,  $R_6 = 0,18\text{ м}$ ) суміш, яка складає 0,95 об'ємної витрати, піддається деформації вище середнього рівня (рисунок 15.7) і цей показник набагато більший порівняно з розглянутими раніше течіями у конічному і круглому каналах та між плоскими паралельними і збіжними пластинами [5, 71, 91-93]. Час перебування суміші у циліндричному каналі, що складає 80 % об'ємної витрати, менше середнього (рисунок 15.9). Ця величина поступається тільки конічному каналу. Таким чином, процес змішування компонентів суміші у круглому кільцевому каналі бункера віброекструдера більш рівномірний порівняно з плоскими, круглими і конічними каналами [94].

Розрахунок необхідної сумарної деформації зсуву для забезпечення якісного змішування залежить від компонентів суміші, а також від матеріалу і питомої поверхні фібр. Для якісного змішування усього об'єму матеріалу (особливо для сильно наповнених фібрами складів) недостатнім є використання одного каналу, що виражається у неповному змочуванні розчином фібр, які знаходяться 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 декілька каналів настає момент, коли швидкість віброекструзії стабілізується (ріст її припиняється). Це свідчить про повне змочування фібр розчином.

Кут нахилу фібр  $\alpha$  відносно осі плин у результаті проходження сумішшю ділянки довжиною  $l$  можна визначити з формули (15.6):

$$\alpha = \operatorname{arccctg} |\gamma| = \operatorname{arccctg} \left| \frac{\left( \frac{R_o^2 - R_m^2}{r \ln \frac{R_o}{R_m}} - 2r \right) l}{\left( R_o^2 - R_m^2 \right) \frac{\ln \frac{r}{R_m}}{\ln \frac{R_o}{R_m}} - \left( R_o^2 - R_m^2 \right)} \right|$$

На ділянці, що відповідає максимальній швидкості плин у (при  $r = R_o$ ), деформація зсуву  $\gamma = 0$  і фібри не розвертаються (кут нахилу фібр відносно осі плин  $\alpha = 90^\circ$ ). Це дало можливість казати о несиметричному поздовжньому орієнтуванні дисперсної арматури по товщині фібробетонної труби [95].

### 15.3.2. Процес плин у фібробетонної суміші у круглому кільцевому каналі, що звужується

Розрахункова схема процесу у круглому кільцевому каналі, що звужується, подана на рис. 15.10. Висота стовпа суміші  $L$  у вертикальному каналі підтримується постійною.

Застосовуючи рівняння (15.2), знаходимо

$$\frac{\partial p}{\partial z} = - \frac{8MQ}{p \left( R_0^2 - R_M^2 \right) \left( R_0^2 + R_M^2 - \frac{R_0^2 - R_M^2}{\ln \frac{R_0}{R_M}} \right)} \quad (15.11)$$

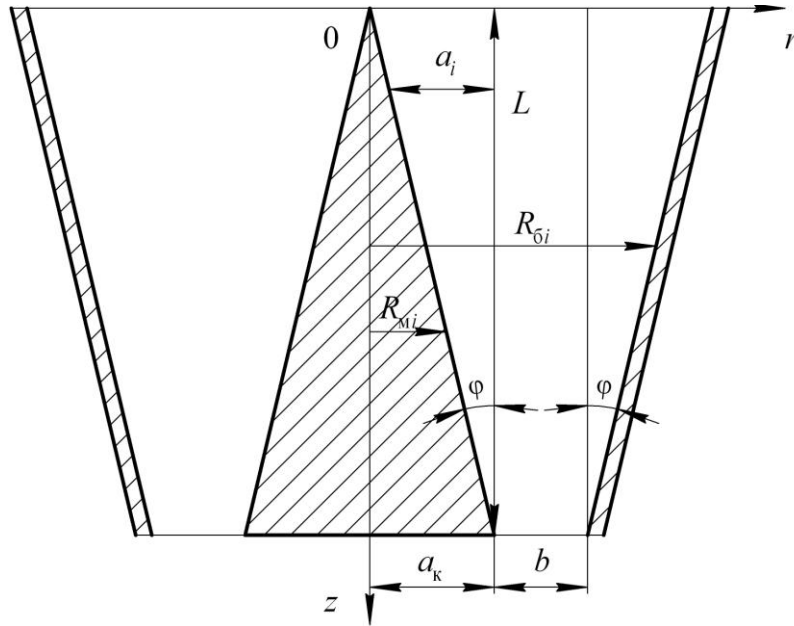


Рис. 15.10. Розрахункова схема процесу у круглому кільцевому каналі, що звужується (поздовжній переріз каналу)

Приймаємо, що в елементарному об'ємі висотою  $dz$  ( $0 \leq z \leq L$ ) значення  $\frac{\partial p}{\partial z}$  є сталою величиною і обчислюється за формулою (15.11), а поточні радіуси кільцевого перерізу  $R_{0i}$ ,  $R_{Mi}$  обчислюються за допомогою поточних значень координат  $z_i = z_{i-1} + dz$  ( $i = 1, 2, \dots$ ) за формулами

$$R_{Mi} = a_k - a_i,$$

$$R_{0i} = a_i + b + a_k,$$

де  $a_i = (L - z_i) \operatorname{tg} \varphi$ ;  $L = a_k \operatorname{ctg} \varphi$ ;  $a_k, b$  – задані кінцеві розміри круглого

кільцевого каналу, що звужується,  $m$ ,  $\varphi$  – кут нахилу твірної каналу до вертикалі, град.

Розрахунок швидкості, який базується на використанні формули (15.1) і урахуванні наведених припущень дозволяє оцінити процес плинину суміші у збіжному кільцевому каналі віброекструдера при формуванні фібробетонних труб [96]. Для визначення характеру зміни складової швидкості плинину  $u_i$ , деформацій зсуву по перерізу каналу віброекструдера та орієнтування фібр у суміші було розроблена програма розрахунку на ПЕОМ. Результати виконання розрахунку наведені на рисунках 15.11 – 15.15.

На рисунку 15.11 позначені:  $u_{max}$  – максимальна швидкість плинину ньютонівської рідини на виході з каналу, м/с

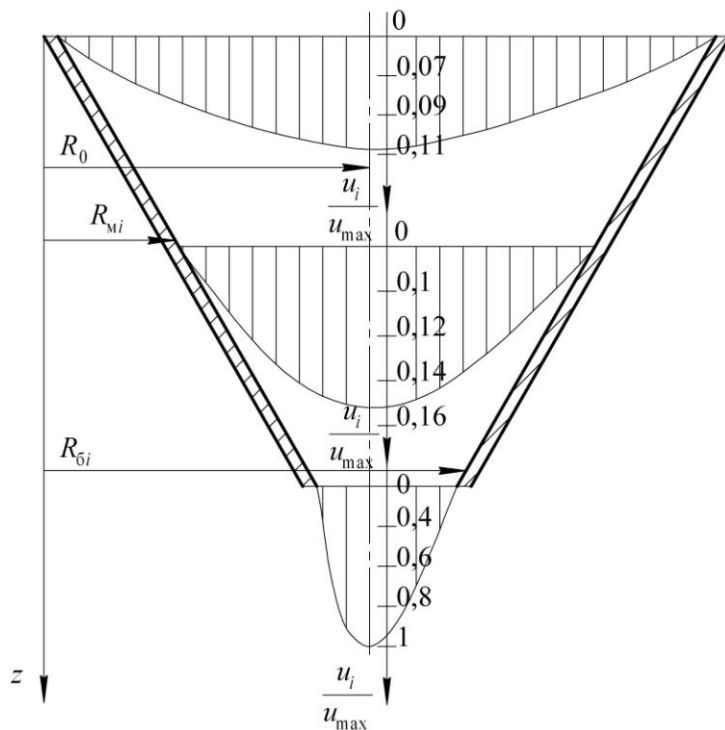


Рис. 15.11. Розподіл відносних швидкостей  $\frac{u_i}{u_{max}}$  на початку, всередині і на виході із збіжного кільцевого каналу

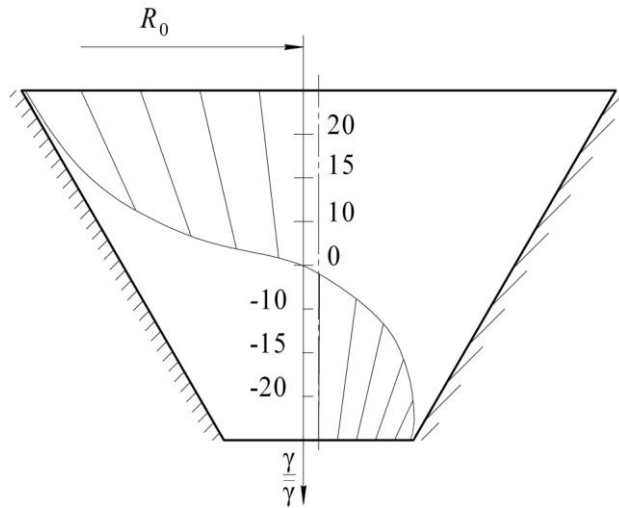


Рис. 15.12. Розподіл відносних зсувних деформацій  $\gamma/\bar{\gamma}$  у круглому кільцевому каналі, що звужується

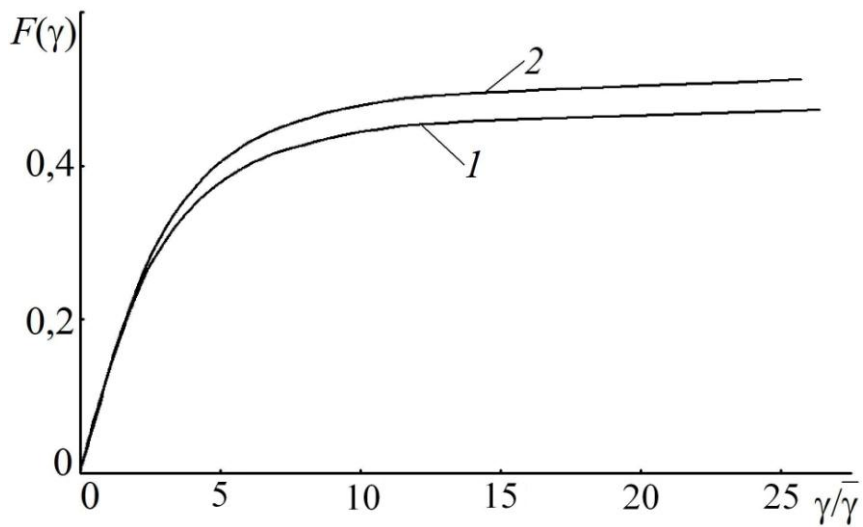


Рис. 15.13. Залежність функції розподілу деформації  $F(\gamma)$  від відносної деформації  $\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}$  на ділянках  $R_m \leq r \leq R_0$  (1) і  $R_0 \leq r \leq R_6$  (2)

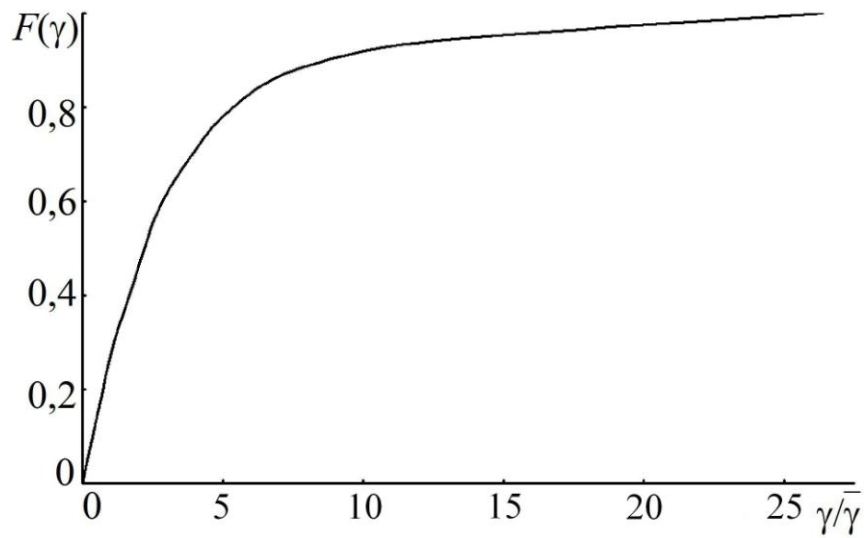


Рис. 15.14. Усреднена залежність функції розподілу деформацій  $F(\gamma)$  від відносної деформації  $\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}$

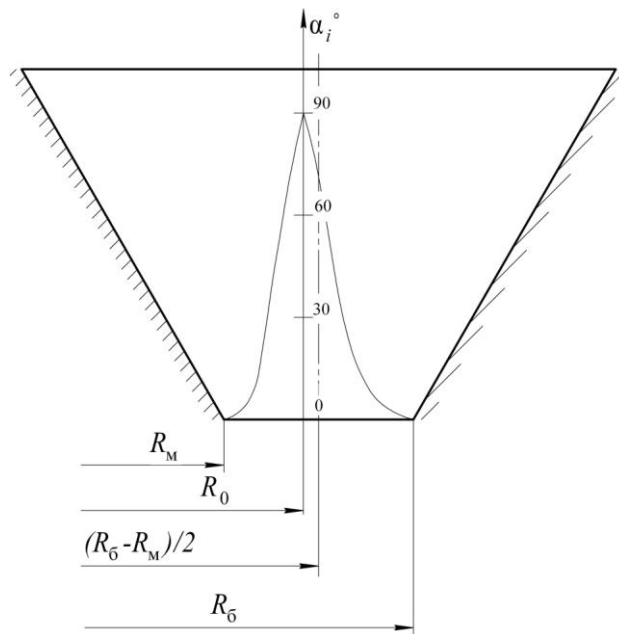


Рис. 15.15. Кут нахилу фібр до напрямку плинущ суміші б у круглому кільцевому каналі, що звужується



Розподіл відносних швидкостей, деформації зсуву та орієнтування фібр у суміші було отримано у каналі висотою  $L = 0,5$  м з кутом нахилу твірної каналу до вертикалі  $\varphi = 30^\circ$  і радіусами на виході  $R_{\text{вн}} = 0,18$  м,  $R_{\text{вн}} = 0,15$  м.

На ділянці, що відповідає максимальній швидкості плинину (при  $r=R_0$ ), деформація зсуву  $\gamma = 0$ , а на стінках каналу –  $\gamma = \infty$ .

Впровадження запропонованого методу розрахунку ізотермічної ламінарної усталеної течії нестисливої ньютонівської рідини дозволяє оцінити різноманітні гідродинамічні процеси у кільцевих збіжних каналах при низьких значеннях числа Рейнольдса, коли не виникають так звані «повзучі течії». Це якраз відбувається при плинні фібробетонної суміші в каналах віброекструдера при виготовленні круглих труб.

#### **15.4. Експериментальні дослідження процесу віброекструзії**

Для підтвердження теорії плинину фібробетонної суміші був змодельований процес віброекструзії фібробетонних труб. Експериментальна установка являє собою прозорий конічний канал, всередині якого встановлений розподільний конус. Ширина вихідної щілини  $0,2 \cdot 10^{-3}$  м. Карман у верхній частині забезпечує безвихрову подачу рідини та допомагає підтримати її на постійному рівні  $0,13$  м (рис. 15.16).

Процес змодельований на воді, яка являє собою ньютонівську рідину при температурі  $5^\circ\text{C}$ .

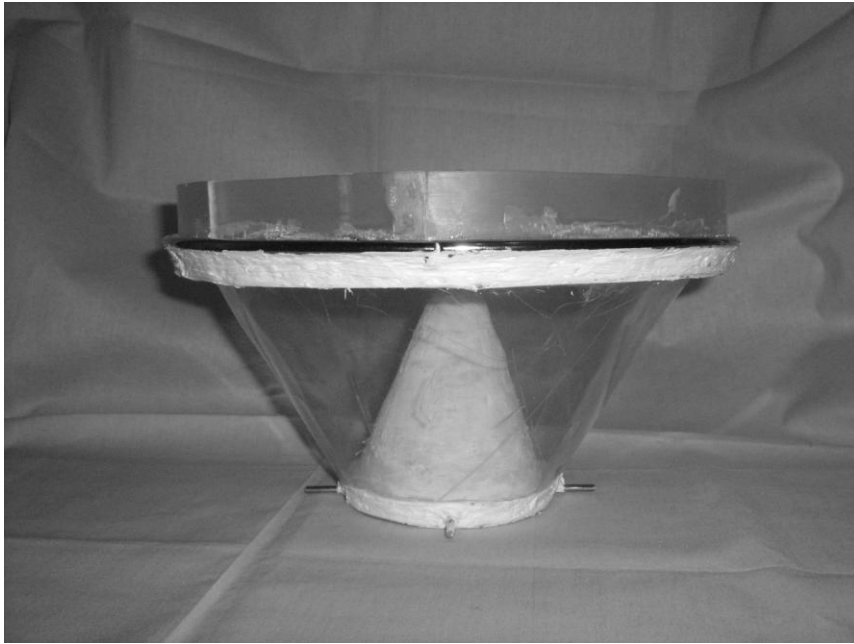


Рис. 15.16. Експериментальна установка

Після встановлення сталого рівня рідини (0,13 м) до центральної частини каналу через кожні  $6^\circ$  подавалися краплини гелю. Прозорі стінки установки дозволили візуально наглядати за переміщенням краплин гелю. Було підтверджено, що рух є прямолінійним вздовж променів за рисунком 15.12, швидкість якого змінюється по перерізу каналу зі зміною кута  $\varphi$ .

Метою досліджень було визначення швидкості плинину експериментальної рідини в каналі бункера віброекструдера залежно від поточного кута нахилу  $\varphi$  між напрямком руху і вертикаллю.

За результатами проведених експериментальних досліджень було побудовано графічні залежності зміни швидкості руху рідини (рисунок 15.17) від зміни кута  $\varphi$  та зміни часу перебування (рисунок 15.18) рідини від зміни кута  $\varphi$ .

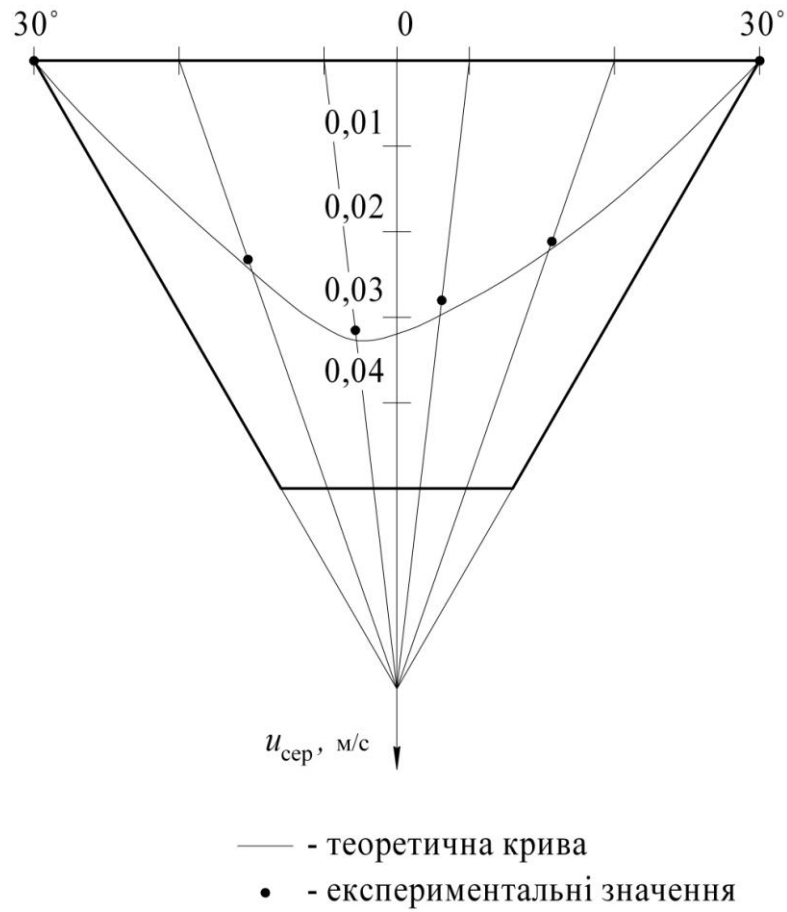


Рис. 15.17. Графік швидкості руху дослідної рідини в каналі бункера формуючого віброекструдера

Проведені досліді підтвердили теорію плинну фібробетонної суміші у круглому кільцевому каналі, що звужується. Відносна похибка при цьому складала 3 – 7%.

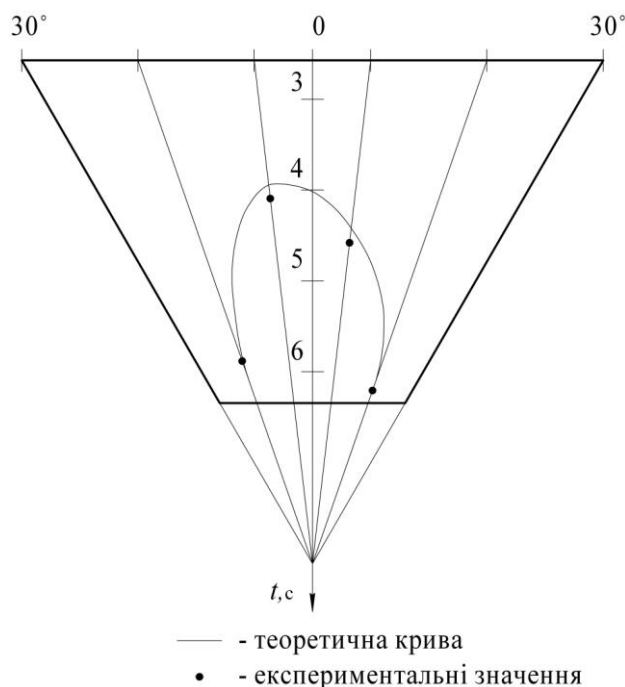


Рисунок 15.18 – Графік часу перебування рідини в каналі бункера формуючого віброекструдера

### Список посилань

1. *Андреев И. А.* Процесс виброекструзии базальтобетона: дис. на соиск. учён. степ. канд. техн. наук : спец. 05.17.08 «Процессы и аппараты химической технологии». – К.: 1987. – 174 с.
2. Влияние материала фибры на эксплуатационные свойства бетонов // Будівельний журнал. – 2012. – № 7-8 (82-83). С. 61-62.
3. *Андреев И.* Формування фібробетону / *И.Андреев, П.Магазій, В.Трач, Л.Дрожжин* // Сільське будівництво. – 1986. № 2 – С. 19.
4. *Андреев И.А.* Вискозиметр для виброекструдированного фибробетона / *И.А.Андреев, П.Н.Магазій.* // Хим. машиностроение: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1987.– Вып. 45.– С. 95-99.

5. *Тадмор З.* Теоретические основы переработки полимеров / З.Тадмор, К.Гогос. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
6. *Мак-Келви Д.М.* Переработка полимеров. – М.: Химия, 1965. – 444 с.
7. *Рауз Х.* Механика жидкости. – М.: Стройиздат, 1967. – 390 с.
8. *Хаппель Дж.* Гидродинамика при малых числах Рейнольдса / Дж.Хаппель, Г.Бренер. – М.: Мир, 1976. – 632 с.
9. *Острейковский В.А.* Теория надежности. – М.: Высш. шк., 2003. – 463 с.
10. *Андреев И.А.* Расчет сечения формующего мундштука виброэкструдера для изготовления плоского изделия / И.А.Андреев, Л.Г.Воронин, Л.Я.Лесняк и др. // Хим. машиностроение: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1987.– Вып. 45.– С. 17-20.
11. *Андреев І.А.* Отримання спрощеної формули для опису ламінарної течії ньютонівської рідини в прямокутному каналі за допомогою «методу впливу» / І.А. Андреев // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2010. – №1. – С. 88-92.
12. *Слезкин Н.А.* Динамика вязкой несжимаемой жидкости: учебник для государственных университетов / Н.А.Слезкин. – М.: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1955. – 519 с.
13. *Микаэли В.* Экструзионные головки для пластмасс и резины: Конструкции и технические расчеты / В. Микаэли – СПб.: Профессия, 2007. – 472 с.
14. *Бернхардт Э.* Переработка термопластичных материалов / Э. Бернхардт – М.: Госхимиздат, 1962. – 747 с.
15. *Слезкин Н.А.* Динамика вязкой несжимаемой жидкости / Н.А. Слезкин – М.: Гостеориздат, 1955. – 520 с.

16. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг – М.: Наука, 1974. – 712 с.

17. Пат. 1425091 СССР, МПК<sup>4</sup> В28В 1/52. Способ формования фибробетонных изделий / И. А. Андреев, Ю. Е. Лукач, П.Н. Магазий, В.Ю. Трач (СССР); заявитель и патентообладатель Киев. политехнич. ин-т. — № 4217144/31-33; заявл. 31.03.87 ; опубл. 23.09.88, Бюл. № 35.

18. Пат. 35167 А Україна, МПК<sup>6</sup> В28В 1/52. Спосіб формування фібробетонних виробів / І. А. Андреев, П. М. Магазій, К.В. Прокоф'єв; заявник і патентовласник Київ. політехніч. ін-т. — № 99034805; заявл. 25.08.99; опубл. 15.03.01, Бюл. № 2.

19. Пат. 63450 U Україна, МПК (2006.01) В28В 1/52. Спосіб формування фібробетонних виробів / І. А. Андреев, Г. В. Демченко; заявник і патентовласник вони ж. — № u201102871; заявл. 11.03.11; опубл. 10.10.11, Бюл. № 19.

20. *Андреев І. А.* Вібродарна екструзія фібробетону / І.А.Андреев, О.І.Царенко // Хімічна промисловість України. – 2001. № 2 – С. 46-48.

21. Пат. 24421 А Україна, МПК<sup>6</sup> В28В 1/52. Спосіб формування дисперсноармованих фібрами бетонних виробів / І. А. Андреев, Ю.Ю.Лукач, О.І.Царенко; заявник і патентовласник Київ. політехніч. ін-т. — № 97041873; заявл. 19.04.97; опубл. 30.10.98, Бюл. № 5.

22. Пат. 63645 U Україна, МПК (2006.01) В28В 1/52. Спосіб формування фібробетонних виробів / І. А. Андреев, Г. В. Демченко, І.О. Мікульонок; заявник і патентовласник вони ж. — № u201105418; заявл. 27.04.11; опубл. 10.10.11, Бюл. № 19.

23. Пат. 93498 U Україна, МПК (2014.01) В28В 1/52 (2006.01), В28В 5/00, В28В 13/00. Спосіб формування фібробетонних виробів /

І. А. Андреев, І. О. Мікульонок, Д. Ю. Шмельова; заявник і патентовласник вони ж. — № u201401999; заявл. 27.02.14; опубл. 10.10.14, Бюл. № 19.

24. Пат. 26868 U Україна, МПК (2006) В28В 13/00. Пристрій для отримання тонкого шару цементно-піщаного розчину / І. А. Андреев, Т. В. Дубровська; заявник і патентовласник Націон. техн. ун-т України «Київ. політехніч. ін-т». — № u200705659; заявл. 22.05.07; опубл. 10.10.07, Бюл. № 16.

25. Пат. 31229 U Україна, МПК (2006) В28В 13/00. Пристрій для отримання шару цементно-піщаного розчину / І. А. Андреев, Т. В. Пивовар; заявник і патентовласник Націон. техн. ун-т України «Київ. політехніч. ін-т». — № u200714707; заявл. 25.12.07; опубл. 25.03.08, Бюл. № 6.

26. Пат. 31537 U Україна, МПК (2006) В28В 13/00. Пристрій для отримання шару цементно-піщаного розчину / І. А. Андреев, І. О. Мікульонок, Т. В. Пивовар; заявник і патентовласник Націон. техн. ун-т України «Київ. політехніч. ін-т». — № u200714322; заявл. 19.12.07; опубл. 10.04.08, Бюл. № 7.

27. Пат. 43319 U Україна, МПК (2009) В28В 13/00. Пристрій для отримання шару цементно-піщаного розчину / І. А. Андреев, О. М. Бондар, І. О. Мікульонок; заявник і патентовласник Націон. техн. ун-т України «Київ. політехніч. ін-т». — № u200902776; заявл. 25.03.09; опубл. 10.08.09, Бюл. № 15.

28. Пат. 40268 U Україна, МПК (2009) В28В 13/00. Пристрій для отримання шару цементно-піщаного розчину / І. А. Андреев, О. М. Бондар; заявник і патентовласник Націон. техн. ун-т України «Київ. політехніч. ін-т». — № u200813840; заявл. 02.12.08; опубл. 25.03.09, Бюл. № 6.

29. Пат. 47167 U Україна, МПК (2009) В28В 13/00. Пристрій для отримання шару цементно-піщаного розчину / І. А. Андреев, О. М. Бондар;

заявник і патентовласник Націон. техн. ун-т України «Київ. політехніч. ін-т». — № u200905459; заявл. 29.05.09; опубл. 25.01.10, Бюл. № 2.

30. Пат. 55010 U Україна, МПК (2009) В28В 13/00. Пристрій для отримання шару цементно-піщаного розчину / І.А. Андреев, Ю.Ю. Ксензова, І.О. Мікульонок; заявник і патентовласник вони ж. — № u201006839 заявл. 02.06.10; опубл. 25.11.10, Бюл. № 22.

31. Пат. 49072 U Україна, МПК (2009) В28В 13/00. Пристрій для отримання шару цементно-піщаного розчину / І.А. Андреев, Ю.Ю. Ксензова, І.О. Мікульонок; заявник і патентовласник вони ж. — № u200912202 заявл. 27.11.09; опубл. 12.04.10, Бюл. № 7.

32. Пат. 49251 U Україна МПК (2009) В28В 13/00. Пристрій для одержання шару цементно-піщаного розчину / Андреев І.А., Смірнова К.О.; заявник і патентовласник вони ж. — № u200910716 ; заявл. 23.10.09 ; опубл. 26.04.2010, Бюл. № 8.

33. Пат. 54489 U Україна МПК (2009) В28В 13/00. Пристрій для одержання шару цементно-піщаного розчину / Андреев І.А., Смірнова К.О. ; заявник і патентовласник вони ж. — № u200910716 ; заявл. 18.05. 10 ; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 21.

34. *Андреев І. А.* Плин розчину в каналах дозатора-живильника віброекструзійної установки / І.А.Андреев, К.О. Смірнова // Вісник Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, серія „Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження”. – 2010, № 2, С 17-20.

35. *Воронін Л.Г.* Розрахунок плину цементно-піщаного розчину в каналах дозатора-живильника віброекструзійної установки / Л.Г. Воронін, І.А.Андреев, К.О. Смірнова // *Кераміка: наука и жизнь.* – 2011. – №1(11). – С. 49-53.



36. *Андреев І. А.* Фібробетон. Удосконалення процесу отримання тонкого шару цементно-піщаного розчину під час віброекструзії / І.А.Андреев, С.С.Валуйскова // «Хімічна промисловість України». – 2012. – №4 (111). – С. 27-29.

37. Пат. 59438 U Україна МПК (2011.01) B28B 13/00. Пристрій для одержання шару цементно-піщаного розчину / Андреев І.А., Демченко Г.О.; заявник і патентовласник вони ж. —№ u201014692; заявл. 07.12.10 ; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9.

38. Пат. 60832 U Україна МПК (2011.01) B28B 13/00. Пристрій для одержання шару цементно-піщаного розчину / Андреев І.А., Смірнова К.О.; заявник і патентовласник вони ж. —№ u201015735; заявл. 27.12.10 ; опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.

39. Пат. 69438 U Україна МПК (2012.01) B28B 13/00. Пристрій для одержання шару цементно-піщаного розчину / Андреев І.А., Валуйскова С.С. ; заявник і патентовласник вони ж. —№ u201112885 ; заявл. 02.11.11 ; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.

40. Пат. 72311 U Україна МПК (2012.01) B28B 13/00. Пристрій для одержання шару цементно-піщаного розчину / Андреев І.А., Валуйскова С.С.; заявник і патентовласник вони ж. —№ u201202153 ; заявл. 24.02.12 ; опубл. 10.08.2012, Бюл. № 15.

41. *Андреев І. А.* Удосконалення дозатора-живильника цементно-піщаного розчину / І.А. Андреев, С.С.Валуйскова // Тези доповідей II міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених „Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”, НТУУ „КПІ”, ІХФ. – К.: 2012.– С. 44-45.

42. *Воронін Л.Г.* Процес плинущого цементно-піщаного розчину в каналі з поперечним перерізом у вигляді зрізаного кола / Л.Г. Воронін, І.А.

Андреев, С.С.Валуйскова // Хімічна промисловість України. – 2012. – №6 (113). – С.12-13.

43. *Воронін Л.Г.* Розгляд процесу плинину цементно-піщаного розчину у дозаторі-живильнику віброекструзійної установки / Л.Г. Воронін, І.А. Андреев, С.С.Валуйскова // Тези доповідей III міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених „Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”, НТУУ „КПІ”, ІХФ. – К.: 2012.– С. 40-41.

44. *Воронін Л.Г.* Процес плинину цементно-піщаного розчину у каналі дозатора-живильника / Л.Г. Воронін, І.А. Андреев, С.С.Валуйскова // Тези доповідей IV міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених „Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання”, НТУУ „КПІ”, ІХФ. – К.: 2013.– С. 39-40.

45. Пат. 96325 U Україна МПК (2006.01) B28C 5/40. Дозатор-живильник фібрової арматури / Андреев І.А., Овсяннікова Є.О.; заявник і патентовласник вони ж. —№ u201409920 ; заявл. 09.09.14 ; опубл. 26.01.2015, Бюл. № 2.

46. *Андреев І. А.* Удосконалення дозатора-живильника фібрової арматури / І.А. Андреев, Є.О.Овсяннікова // Тези доповідей XV всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених „Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів”, НТУУ „КПІ”, ІХФ. – К.: 2014.– С. 104 -105.

47. Пат. 332 U Україна МПК<sup>6</sup> B28B 13/02. Пристрій для відділення сформованого шару пастоподібної речовини від циліндричної поверхні / Андреев І.А., Лукач Ю.Ю., Магазій П.М., Мікульонюк І.О., Савенко К.В.; заявник і патентовласник вони ж. —№ 98105589; заявл. 23.10.1998 ; опубл. 07.06. 1999, Бюл. № 3.

48. А. с. 1458243 СССР, МПК4 В28В 1/52. Виброэкструдер для формования фибробетонных изделий / И. А. Андреев, Ю. Е. Лукач, П.Н. Магазий, В.Ю. Трач (СССР); заявитель Киев. политехнич. ин-т. — № 4217143/31-33; заявл. 31.03.87 ; опубл. 15.10.88, Бюл. № 6.

49. Пат. 26869 U Україна МПК (2006) В28В 13/00. Віброкструдер для подавання бетонних сумішей у форму / Андреев І.А., Голова О.О., Лукач Ю.Ю., Мікульонок І.О.; заявник і патентовласник Націон. техн. ун-т України «Київ. політехніч. ін-т». — № u200705660; заявл. 22.05.2007; опубл. 10.10. 2007, Бюл. № 16.

50. Пат. 1616821 СССР, МПК5 В28В 1/52. Виброэкструдер для укладки бетонных смесей в форму / И. А. Андреев, Л.Г. Ю. Е. Лукач, П.Н. Магазий, В.Ю. Трач (СССР); заявитель и патентообладатель Киев. политехнич. ин-т. — № 4448276/23-33; заявл. 27.06.88 ; опубл. 30.12.90, Бюл. № 48.

51. Пат. 26911 U Україна МПК (2006) В28В 13/00. Віброкструдер для подавання бетонних сумішей у форму / Андреев І.А., Магазий П.М., Мікульонок І.О., Фурманська В.В.; заявник і патентовласник Націон. техн. ун-т України «Київ. політехніч. ін-т». — № u200706051; заявл. 31.05.2007; опубл. 10.10. 2007, Бюл. № 16.

52. Пат. 26912 U Україна МПК (2006) В28В 13/00. Віброкструдер для подавання бетонних сумішей у форму / Андреев І.А., Голова О.О., Лукач Ю.Ю., Мікульонок І.О.; заявник і патентовласник Націон. техн. ун-т України «Київ. політехніч. ін-т». — № u200706052; заявл. 31.05.2007; опубл. 10.10. 2007, Бюл. № 16.

53. Пат. 34957 U Україна МПК (2006) В28В 13/00. Віброкструдер для змішання та формування фібробетонних виробів / Андреев І.А., Безугла Л.О.; заявник і патентовласник Націон. техн. ун-т України «Київ.

політехніч. ін-т». — № u200804645; заявл. 10.04.2008; опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16.

54. Пат. 41539 U Україна МПК (2009) B28B 13/00. Віброкструдер для змішання бетонних сумішей / Андреев І.А., Столінець В.М.; заявник і патентовласник Націон. техн. ун-т України «Київ. політехніч. ін-т». — № u200814993; заявл. 25.12.2008; опубл. 25.05.2009, Бюл. № 10.

55. Пат. 48361 U Україна МПК (2009) B28B 13/00. Віброкструдер для змішання бетонних сумішей / Андреев І.А., Столінець В.М.; заявник і патентовласник вони ж. — № u200910828; заявл. 27.10.2009; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5.

56. Пат. 71125 U Україна МПК (2012.01) B28B 13/00. Віброкструдер для змішання фібробетонних сумішей / Андреев І.А., Ан Г.Ю.; заявник і патентовласник вони ж. — № u201112883; заявл. 02.11.2011; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.

57. Пат. 78681 U Україна МПК (2013.01) B28B 13/00. Віброкструдер для змішання фібробетонних сумішей / Андреев І.А., Ан Г.Ю.; заявник і патентовласник вони ж. — № u201211597; заявл. 08.10.2012; опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6.

58. Пат. 78699 U Україна МПК (2013.01) B28B 13/00. Віброкструдер для змішування фібробетонних сумішей / Андреев І.А., Овсяннікова Е. О.; заявник і патентовласник вони ж. — № u201211597; заявл. 12.10.2012; опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6.

59. Пат. 89958 U Україна МПК (2014.01) B28B 13/00. Віброкструдер для змішування фібробетонних сумішей / Андреев І.А., Олексієвець В. Ф.; заявник і патентовласник вони ж. — № u201312680; заявл. 30.10.2013; опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9.

60. *Андреев І. А.* Орієнтування дисперсної арматури під час плину

фібробетонної суміші в каналах бункера віброекструдера / І.А.Андреев, М.Т.Довжик // Вісник національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, серія „Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження”. – 2009. – №1 (3). – С. 29-32.

61. *Андреев І. А.* Ефективність дисперсного армування при віброекструзії фібробетону / І.А.Андреев, В.В.Фурманська // Вісник національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, серія „Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження”. – 2008. – №1. – С. 19-22.

62. Пат. 32251 U Україна МПК (2006) B28B 13/00. Віброекструдер для формування фібробетонних виробів / Андреев І.А., Фурманська В. В.; заявник і патентовласник вони ж. — № u200714827; заявл. 26.12.2007; опубл. 12.05.2008, Бюл. № 9.

63. Пат. 48360 U Україна МПК (2009) B28B 13/00. Віброекструдер для формування фібробетонних виробів / Андреев І.А., Довжик М.Т.; заявник і патентовласник вони ж. — № u200910827; заявл. 27.10.2009; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5.

64. Пат. 53893 U Україна МПК (2009) B28B 13/00. Віброекструдер для формування фібробетонних виробів / Андреев І.А., Полторацька Н.В.; заявник і патентовласник вони ж. — № u201003550; заявл. 26.03.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.

65. Пат. 60271 U Україна МПК (2006.01) B28B 13/02. Віброекструдер для формування фібробетонних виробів / Андреев І.А., Полторацька Н.В.; заявник і патентовласник вони ж. — № u201015405; заявл. 20.12.2010; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11.

66. *Андреев І. А.* Віброекструзія фібробетонних виробів з поперечним орієнтуванням дисперсної арматури / І.А.Андреев, Н.В.Полторацька //

Керамика: наука и жизнь. – 2010. – №4 (10). – С. 56-63.

67. *Андреев І. А.* Процес плин у фібробетонній суміші в багатоканальних віброекструдерах / І.А.Андреев, Н.В.Полторацька // Керамика: наука и жизнь. – 2011. – №2 (12). – С. 35-41.

68. *Андреев І. А.* Процес змішання фібробетонної суміші у плоскому збіжному несиметричному каналі при віброекструзії / І.А.Андреев, Л.О.Безугла // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2008. – Вип.32. – С. 44-47.

69. *Андреев І. А.* Плин фібробетонної суміші у плоскому збіжному несиметричному каналі при віброекструзії / І.А.Андреев, В.В. Фурманська // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – 2008. – Вип.32. – С. 47-50.

70. *Андреев І. А.* Особливості плин у суміші при віброекструзії / І.А.Андреев, В.В. Фурманська // Вісник національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, серія „Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження”. – 2008. – № 2. – С. 44-47.

71. *Андреев І. А.* Особливості віброекструзійного змішування фібробетону в несиметричному каналі / І.А.Андреев, Л.О.Безугла // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2009. – №2. – С. 61-65.

72. *Андреев І. А.* Орієнтування дисперсної арматури під час плин у фібробетонній суміші в каналах бункера віброекструдера / І.А.Андреев, М.Т.Довжик // Вісник національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, серія „Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження”. – 2009. – №1 (3). – С. 29-32.

73. *Андреев І. А.* Шляхи підвищення ефективності процесу віброекструзії фібробетону / І.А.Андреев, М.Т.Довжик // Керамика: наука и жизнь. – 2010. – №2(8). – С. 57-63.

74. *Андреев И. А.* Процесс плину фибробетонной смеси в многоканальных виброкотруерах / И.А.Андреев, Н.В.Полторацька // *Керамика: наука и жизнь*. – 2011. – №2(12). – С. 35-41.

75. *Глушченко Н.Ф.* Экспериментальные исследования влияния регулируемого сопротивления на профиль скоростей / Н.Ф.Глушченко, А.К.Панов // *Реология, процессы и аппараты химической технологии*. – Волгоград; Волгоградский политехн. ин-т. – 1982. – С. 59-62.

76. А.с. 1395512 СССР, МПК4 В28В 13/02. Устройство для укладки бетонной смеси в форму / И. А. Андреев, Л.Г. Воронин, Л.Я.Лесняк, Ю. Е. Лукач, П.Н. Магазий (СССР) ; заявитель Киев. политехнич. ин-т. — № 4044415/31-33 ; заявл. 29.01.1986 ; опубл. 15.05.1988, Бюл. № 18.

77. *Андреев И. А.* Процесс формирования плоских фибробетонных изделий / И.А.Андреев, Гончарова И. С. // *Керамика. Наука и жизнь*. – 2013. № 2 – С. 43-49.

78. Пат. 78385 Украина, МПК (2013.01) В28В 13/00. Виброкотруер для формирования плоских фибробетонных изделий / Андреев И.А., Гончарова И.С.; заявник і патентовласник вони же. — № u201213501; заявл. 26.11.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.

79. *Демидович Б.П.* Численные методы анализа / Б.П. Демидович, И.А.Марон, Э.З.Шувалова. – М.: Наука, 1967. – 368 с.

80. Пат. 98351 U Украина МПК (2015.01) В28В 13/00. Виброкотруер для формирования прямоугольных у поперечному перерізі фибробетонных изделий / Андреев И.А., Мартиненко Я. М.; заявник і патентовласник вони ж. — № u201412037; заявл. 07.11.2014; опубл. 27.04.2015, Бюл. № 8.

81. Пат. 102667 U Украина МПК (2015.01) В28В 13/00. Виброкотруер для формирования прямоугольных у поперечному перерізі

фібробетонних виробів / Андреев І.А., Мартиненко Я. М.; заявник і патентовласник вони ж. — № u201505039; заявл. 25.05.2015; опубл. 10.11.2015, Бюл. № 21.

82. Пат. 89529 U Україна МПК (2014.01) B28B 13/00. Віброекструдер для формування фібробетонних лотоків / Андреев І.А., Солейко А.О.; заявник і патентовласник вони ж. — № u201313201; заявл. 13.11.2013; опубл. 25.04.2014, Бюл. № 8.

83. А.с. 1660966 СССР, МПК5 B28B 1/52, 3/20. Способ изготовления фибробетонных изделий / И. А. Андреев, Ю. Е. Лукач, П.Н. Магазий (СССР) ; заявитель Киев. политехнич. ин-т. — № 4463904/31-33 ; заявл. 21.07.1988 ; опубл. 07.07.1991, бюл. № 25.

84. Пат. 78990 U Україна МПК (2006.01) B28B 1/52. Спосіб формування фібробетонних лотоків / Андреев І.А., Шмельова Д.Ю.; заявник і патентовласник вони ж. — № u201210684; заявл. 12.09.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7.

85. *Андреев І.А.* Застосування фібробетонних лотоків / І.А.Андреев, Д.Ю.Шмельова // Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: XII всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, (Київ, 15-16 травня 2013 р.): тез. допов. – 2013.– С. 74-75.

86. Пат. 93518 U 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.

87. *Андреев І. А.* Розв'язок задачі течії ньютонівської рідини в каналах довільного поперечного перерізу / І.А.Андреев, Л.Г.Воронін,



А.В.Копиленко, Д.Ю.Шмельова // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2015. – №4. – С.99-102.

88. Пат. 59930 U Україна МПК (2011.01) B28B 13/00. Пристрій для формування фібробетонних труб / Андреев І.А., Комкіна Н.В.; заявник і патентовласник вони ж. — № u201012272; заявл. 18.10.2010; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 11.

89. Пат. 68910 U Україна МПК (2012.01) B28B 13/00. Віброекструдер для формування фібробетонних труб / Андреев І.А., Комкіна Н.В.; заявник і патентовласник вони ж. — № u201113666; заявл. 21.11.2011; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 7.

90. *Lidor G. Theoretical Analysis of Residence Time Distribution Functions and Strain Distribution Functions in Plasticating Screw Extruders / G.Lidor, Z.Tadmor // Polymer Engineering a Science. – 1976. – 16. – p. 450-461.*

91. *Андреев И.А. Процесс смешения при виброекструзии фибробетона / И.А.Андреев, Ю.Е.Лукач, П.Н.Магазий // Хим. машиностроение: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1989.– Вып. 49.– С. 34-37.*

92. *Андреев І.А. Перемішування фібробетонної суміші в каналі бункера віброекструдера. / І.А.Андреев, Л.О.Безугла // Збірка тез доповідей XI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених „Екологія. Людина. Суспільство” (13-18 травня 2008 р., м. Київ, Україна). – К.: 2008. – С. 88-89.*

93. *Андреев І.А. Особенности процесса ламинарного конвективного змішування при віброекструзії фібробетону у кінчному каналі / І.А.Андреев., В.М.Столінець // Керамика: наука и жизнь. – 2009. – №2(4). – С. 4-10.*

94. *Андреев І.А.* Процес ламінарного конвективного змішування фібробетону при віброекструзії в круглому кільцевому каналі / І.А.Андреев., Н.В.Комкіна // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2011. – №6. – С. 84-88.

95. *Андреев І.А.* Орієнтування дисперсної арматури при віброекструзії фібробетону у круглому кільцевому каналі / І.А.Андреев., Н.В.Комкіна // *Кераміка: наука и жизнь.* – 2011. – №3(13). – С. 43-49.

96. *Воронін Л.Г.* Фібробетонні труби. Процес віброекструзійного формування / Л.Г.Воронін, І.А.Андреев., Н.В.Комкіна // *Хімічна промисловість України.* – 2011. – №6 (107). – С. 38-40.