

В.Г. Усенко

*Національний університет «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка», Україна*

## ПРОГНОЗУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СТАБІЛЬНОСТІ БЕТОННОЇ СУМІШІ ПРИ УКЛАДАННІ НА ПОХИЛІ КОНСТРУКЦІЇ

Дослідження присвячене аналізу розподілу бетонної суміші на криволінійних поверхнях монолітних просторових покриттів. Визначено фактори, що впливають на рівномірність укладання матеріалу, серед яких граничне напруження зсуву, динамічна в'язкість та швидкість деформації. Встановлено, що критичні зони деформацій формуються у місцях з підвищеним градієнтом швидкості, а стійкість суміші залежить від кута нахилу поверхні. Запропоновано математичні залежності для прогнозування поведінки бетонної суміші в процесі розтікання, що дозволяє контролювати якість покриття. Розроблено рекомендації щодо оптимізації складу суміші та параметрів укладання для запобігання дефектам і підвищення довговічності конструкцій. Отримані результати можуть бути використані в будівельній практиці для вдосконалення технологій зведення монолітних покриттів складної геометрії.

**Ключові слова:** бетонна суміш, криволінійні поверхні, граничне напруження зсуву, градієнт швидкості, кут нахилу.

### Постановка проблеми

У сучасному будівництві монолітні просторові покриття з криволінійною геометрією широко використовуються для створення легких, міцних і ефективних конструкцій. Однак технологія їх зведення стикається з низкою проблем, пов'язаних із рівномірністю розподілу бетонної суміші, її стабільністю на похилих і криволінійних поверхнях, а також виникненням критичних деформацій під час процесу тверднення.

Однією з важливих задач є виявлення зон критичних деформацій, які залежать від параметрів бетонної суміші, кута нахилу поверхні та механічних характеристик матеріалу. Недостатня стабільність суміші або нерівномірне її розтікання може призводити до локальних дефектів, зниження несучої здатності та передчасного руйнування конструкції.

Це дослідження має зв'язок як із фундаментальними науковими задачами, так і з практичними аспектами будівництва. Зокрема, воно спрямоване на: моделювання реологічних властивостей бетонних сумішей на криволінійних поверхнях для передбачення їх поведінки під час укладання. Оптимізація технологічних процесів формування складних бетонних конструкцій дозволить підвищити якість поверхонь і довговічність споруд. Зменшення ризику утворення дефектів можна досягти шляхом аналізу умов, за яких виникають критичні деформації, та розробки методів їхньої компенсації.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукові та технічні публікації, що розглядають будівельні технології, зокрема використання пневматичних опалубних систем, формування бетонних конструкцій та інноваційні методи зведення оболонкових споруд, представлені в наведених джерелах. Праці [1–3] містять огляд традиційних методів бетонування, використання опалубки та загальні аспекти технології будівельного виробництва. Публікація [4] аналізує пневматичні опалубні системи в інженерній практиці та їхню ефективність у створенні складних конструкцій. Джерело [5] присвячене технології будівництва льодових куполів (Sagrada Familia in Ice), що є важливим у дослідженні альтернативних методів формування оболонкових структур. Роботи [6, 7] розглядають ICD/ITKE Research Pavilion, де застосовано пневматичні структури для створення легких, ефективних та біоміметичних оболонок. Монографія [8] досліджує методику будівництва на основі повітряних опалубних систем, яка дозволяє швидко зводити тонкостінні бетонні конструкції. Робота [9] аналізує архітектурний метод Dante Bini, що передбачає використання пневматичної технології для формування бетонних куполів у системі "Binishells". Публікації [10, 11] досліджують пневматичне формування затверділого бетону (PFHC) як сучасний метод створення оболонкових конструкцій із мінімізацією матеріальних витрат та зменшенням трудомісткості.

Ці джерела надають теоретичний і практичний аналіз технологій пневматичного формування, демонструючи їх переваги у зменшенні витрат та підвищенні геометричної точності конструкцій.

### Мета дослідження

Метою дослідження є розробка методики оцінки та прогнозування розподілу бетонної суміші на криволінійних поверхнях монолітних просторових покриттів з урахуванням реологічних властивостей матеріалу, граничних напружень зсуву та геометричних параметрів конструкцій. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити задачі:

- розглянути математичну модель розподілу та руху бетонної суміші по похилих криволінійних поверхнях з урахуванням граничного напруження зсуву, в'язкості та геометрії шару;
- дослідити вплив кута нахилу, фізико-механічних властивостей суміші та геометричних параметрів поверхні на стабільність бетону;
- розробити теоретичні рекомендації щодо складу бетонної суміші та параметрів її укладання для зменшення ризику утворення дефектів.

### Виклад основного матеріалу

Вивчення фізичних властивостей бетонної суміші, зокрема її здатності деформуватися на нерівних або вигнутих поверхнях важливо у будівництві, наприклад, при зведенні аркових або купольних конструкцій, де необхідно враховувати поведінку матеріалу під час його тверднення.

Використання литих будівельних сумішей вимагає застосування подвійної опалубки, оскільки такі суміші мають високу текучість [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Це дозволяє їм легко заповнювати форму без додаткового ущільнення, але водночас створює складнощі у збереженні точної геометрії та запобіганні втратам матеріалу. Подвійна опалубка забезпечує необхідну міцність форми та дозволяє контролювати процес укладання бетону [**Ошибка! Источник ссылки не найден., Ошибка! Источник ссылки не найден.**]. Литі суміші часто застосовують для складних конструкцій, таких як арки, тонкостінні елементи або криволінійні форми. Додатковий шар опалубки дозволяє рівномірно розподілити матеріал без утворення порожот і дефектів.

Подвійна опалубка забезпечує точність форми, запобігає втратам матеріалу і сприяє рівномірному розподілу суміші. Однак її застосування суттєво збільшує витрати, що потрібно враховувати під час проектування та вибору будівельної технології.

Є можливість використання односторонньої опалубки для литих будівельних сумішей, але існують потенційні ризики. При застосуванні

жорстких бетонних сумішей ця технологія можлива, проте сила тяжіння може спричинити деформацію оболонки, що призведе до невідповідності її форми проектним вимогам. Розподіл деформацій у різних зонах оболонки є нерівномірним, що зумовлено варіацією кута нахилу дотичних площин до поверхні опалубки. Величина зміщень і геометричні відхилення залежать від локальної орієнтації форми, оскільки сила тяжіння та в'язкопружні властивості матеріалу спричиняють нерівномірне осідання суміші під час тверднення.

У будівельній практиці застосовуються спеціальні технологічні підходи [1-3], що мінімізують критичні зсувні деформації, які можуть призвести до втрати геометричної точності конструкції. Ці методи базуються на визначенні допустимих меж деформацій та контролі зон перевищення граничних значень, що дозволяє своєчасно коригувати процеси бетонування та тверднення матеріалу. Бетонна суміш під дією сили тяжіння може деформуватися, що призводить до відхилень від проектних розмірів і форм. Ці деформації можуть бути нерівномірними по всій поверхні оболонки, а їх величина та розподіл залежать від локальних геометричних характеристик конструкції. Зокрема, один із ключових факторів, що впливають на характер деформацій, – це кут нахилу дотичних площин до поверхні опалубки. У місцях, де цей кут більший, можливі більші зсувні деформації, тоді як у зонах з меншим нахилом деформації можуть бути менш вираженими. В різних точках оболонки сила тяжіння діє під різними кутами, що змінює навантаження на бетонну суміш і її поведінку у процесі тверднення.

При виборі технології зведення оболонкових конструкцій із використанням жорстких бетонних сумішей необхідно враховувати особливості поведінки матеріалу під дією власної ваги, а також підбирати відповідні методи укладання та ущільнення суміші для мінімізації небажаних геометричних відхилень.

Зсувні деформації у бетонних оболонкових конструкціях можуть перевищувати допустимі межі. Основними факторами, що впливають на величину цих деформацій є реологічні характеристики бетону, що визначають його поведінку у пластичному стані та здатність до розтікання й самоущільнення. Форма конструкції, у якій складні або криволінійні поверхні можуть спричинити нерівномірний розподіл напружень та її товщина впливають на рівномірність розподілу напружень і стійкість до деформацій.

Ефект стабілізації бетонної суміші арматурою та перешкода її руху на похилих поверхнях під дією сили тяжіння досягається завдяки кільком фізичним силам (табл. 1).

Завдяки в'язкості цементного розчину та капілярним силам між частинками бетон певний час зберігає форму, що разом з арматурою забезпечує його стабільність на похилих поверхнях.

Таблиця 1

Фактори стабілізації бетонної суміші арматурою	
Фактор стабілізації	Механізм дії
Адгезія між бетоном і арматурою	Зчеплення бетонної суміші з рифленою поверхнею арматури, що зменшує її рухливість
Сили тертя між бетоном і арматурою	Тертя між бетоном і арматурою протидіє зсуву суміші на похилій поверхні
Анкерні сили	Фіксація арматурних стержнів у бетоні, що обмежує його переміщення
Опір зсуву заповнювача	Частинки заповнювача зачіпаються між собою, створюючи додатковий опір зміщенню
Геометрія армування	Вертикальні та поперечні стержні арматури утворюють бар'єри, які перешкоджають руху суміші
Когезія та капілярні сили бетону	Взаємодія частинок цементного гелю забезпечує тимчасову стабільність і зменшує текучість бетону

Значення кута нахилу нормалі  $\alpha$  до поверхні в певній точці визначає величину сили зсуву  $F_{zc}$ , яка є складовою сили власної ваги бетонної суміші. Чим більший кут нахилу, тим більша частина сили тяжіння спрямована вздовж поверхні, що може спричинити зміщення матеріалу. Сила зсуву  $F_{zc}$  є важливим фактором, оскільки вона впливає на стабільність бетонної маси під час укладання. Якщо зсувна складова сили ваги перевищує сили, що утримують бетонну суміш на місці, можливе її сповзання або нерівномірний розподіл.

Реологічні характеристики бетонної суміші, такі як в'язкість, пластичність і здатність до ущільнення, визначають її стійкість до зсувних деформацій. Висока в'язкість і достатня внутрішня когезія зменшують ризик сповзання навіть на похилих поверхнях.

Напрямок і величина деформацій залежать не лише від сили зсуву  $F_{zc}$ , а й від взаємодії частинок бетонної суміші між собою та з поверхнею опалубки. Це пояснює необхідність точного підбору складу бетонної суміші та застосування армування, яке забезпечує стабільність конструкції під дією власної ваги.

Умова переміщення частинки бетонної суміші по поверхні в разі відсутності вібрації визначається балансом сил, що діють на частинку. Основними

силами є сила тяжіння, сила нормальної реакції поверхні та сила тертя. Частинка почне рухатися, якщо зсувна складова сили тяжіння перевищить силу тертя:

$$F_{zc} > F_m, \quad (1)$$

де:  $F_{zc} = P \sin \alpha$  – зсувна складова сили тяжіння,  
 $F_m = \mu N = \mu P \cos \alpha$  – сила тертя спокою,  
 $P$  – сила тяжіння частинки,  
 $\alpha$  – кут нахилу поверхні,  
 $\mu$  – коефіцієнт тертя між бетонною сумішшю та поверхнею,  
 $N = P \cos \alpha$  – нормальна реакція поверхні.

Умова початку руху частинки по поверхні:

$$\mu \cos \alpha < \sin \alpha \text{ або } \tan \alpha > \mu. \quad (2)$$

Частинка почне рухатися вниз, якщо кут нахилу поверхні перевищить кут природного укосу бетонної суміші, що визначається коефіцієнтом тертя. Якщо кут нахилу менший, сили тертя утримуватимуть матеріал на місці, і переміщення не відбудеться. Кут природного укосу – це максимальний кут нахилу поверхні, при якому бетонна суміш залишається нерухомою, не сповзаючи під дією власної ваги [12]. Він залежить від фізико-механічних властивостей суміші, зокрема: вмісту водоцементного відношення, зернового складу та форми заповнювача, в'язкості та когезійних властивостей, величини внутрішнього тертя між частинками. Кут природного укосу  $\theta_{ук}$  визначається за допомогою коефіцієнта тертя  $\mu$  між сумішшю та поверхнею опалубки:

$$\theta_{ук} = \arctan(\mu), \quad (3)$$

де:  $\mu$  – коефіцієнт тертя бетонної суміші об поверхню,  
 $\theta_{ук}$  – кут, при якому бетонна суміш починає сповзати.

Для звичайної бетонної суміші кут природного укосу зазвичай становить 20–35°, залежно від консистенції та складу. Для сухіших та густіших сумішей цей кут буде вищим (до 40°), а для рідшого бетону – нижчим.

Бетонна суміш має властивості неньютонівської рідини. Її в'язкість змінюється залежно від швидкості деформації. У нерухомому стані бетонна суміш може поводитися як пластичне тіло, що утримує свою форму, але під дією зовнішніх сил вона починає текти подібно до в'язкої рідини [12]. Лінійно-в'язкопластична модель описує поведінку таких

матеріалів з урахуванням залежності напружень від швидкості деформації.

У верхній частині суміш поводить як стрижнева течія, спостерігається відносно стабільний центральний потік, оточений рідинною оболонкою через різницю в швидкостях руху різних шарів бетонної маси.

Нижче цієї межі відбувається в'язкопластична течія, де дотичні напруження зсуву перевищують граничне значення  $\tau_0$ . У цій зоні швидкість змінюється по перерізу, що характерно для рідин із нелінійною в'язкістю. Гранична умова  $\tau = \tau_0$  визначає межу між зонами стрижневого та в'язкопластичного плинину. Механізм стрижневої течії в'язкопластичних матеріалів наступний [12]. У початковому стані ці матеріали мають просторову структуру, яка забезпечує їм жорсткість. До певного рівня навантаження вони можуть зберігати форму та протидіяти зовнішнім силам. Рух матеріалу починається, коли дотичні напруження перевищують граничне значення  $\tau_0$  – границі плинності. Якщо напруження менше цього значення, матеріал поводить як твердий та не змінює форму. Для забезпечення рівномірного руху суміші необхідно, щоб дотичні напруження були достатніми для подолання внутрішнього опору матеріалу.

Коли дотичні напруження перевищують граничне значення  $\tau_0$ , структура матеріалу повністю руйнується, і він починає текти подібно до рідини. Це явище відоме як перехід у пластичний стан. У зонах, де напруження менше за  $\tau_0$ , матеріал зберігає структуровану фазу, поводячись як тверде тіло. Такі ділянки називають квазитвердими, оскільки вони залишаються нерухомими, поки напруження не перевищать критичний поріг.

Дотичні напруження, що виникають у матеріалі в області в'язкої течії ( $\tau > \tau_0$ ), описуються рівнянням [12]:

$$\tau = \rho g(h - y) \sin \alpha, \quad (4)$$

де:

$\tau$  – дотичне напруження у матеріалі,

$\rho$  – густина матеріалу,

$g$  – прискорення вільного падіння,

$h$  – загальна висота шару матеріалу,

$y$  – глибина розглянутої точки відносно верхньої поверхні шару,

$\alpha$  – кут нахилу поверхні.

Дотичне напруження у матеріалі змінюється залежно від глибини. На поверхні ( $y = h$ ) напруження дорівнює нулю, а з глибиною воно зростає, досягаючи максимального значення на нижній межі шару ( $y = 0$ ). У нижніх шарах матеріалу напруження найбільші, що може викликати зсувні деформації. Якщо напруження перевищує граничне значення  $\tau_0$ , матеріал переходить у течію, тобто починає рухатись як в'язка рідина.

Рівняння яке описує рух в'язкопластичних матеріалів у процесі розтікання:

$$F_{ГР} = R_B + \tau_0, \quad (5)$$

де  $F_{ГР} = \rho g(h - y) \sin \alpha$  – сила, що діє внаслідок гравітації та змушує матеріал рухатися вниз по нахиленій площині,

$R_B = \mu / \cos \beta \cdot dv_x / dy$  – в'язкий опір матеріалу, що пропорційний градієнту швидкості у напрямку у (швидкість змінюється з глибиною шару).

$\tau_0$  – граничне напруження зсуву (границя текучості), яке потрібно подолати, щоб матеріал почав рухатися,

$\mu$  – характеризує опір потоку через внутрішнє тертя між частинками суміші,

$v_x$  – швидкість руху суміші в напрямку осі  $Ox$ , тобто вздовж нахиленої поверхні,

$\cos \beta$  – враховує орієнтацію градієнта швидкості зсуву  $dv_x / dy$  відносно лінії потоку.

Якщо гравітаційна сила перевищує опір в'язкості та межу текучості, бетон починає рух. Швидкість течії в'язкопластичної бетонної суміші записується як загальний вираз вздовж осі  $Ox$ , який відповідає реологічній поведінці цього матеріалу:

$$v_x(y) = \frac{\rho g \sin \alpha}{\mu} \left( \frac{(h - y)^2}{2} \right) - \frac{\tau_0}{\mu} (h - y), \quad (6)$$

де:  $v_x(y)$  – швидкість руху бетонної суміші вздовж осі  $Ox$  на висоті  $y$ ,

$\rho$  – густина бетонної суміші,

$g$  – прискорення вільного падіння,

$\alpha$  – кут нахилу поверхні,

$\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості суміші,

$h$  – загальна висота шару матеріалу,

$y$  – глибина розглянутої точки відносно верхньої поверхні,

$\tau_0$  – граничне напруження зсуву (границя текучості).

Перший доданок у (5):

$$\frac{\rho g \sin \alpha}{\mu} \left( \frac{(h - y)^2}{2} \right), \quad (7)$$

описує вплив гравітаційних сил та в'язкості на швидкість потоку. Другий доданок

$$\frac{\tau_0}{\mu} (h - y), \quad (8)$$

враховує вплив граничного напруження зсуву, яке протидіє руху.

Щоб ізолювати  $\sin\alpha$  перенесемо всі члени, які не містять  $\alpha$  в іншу сторону рівняння (5):

$$\frac{\rho g \sin \alpha}{\mu} \cdot \frac{(h-y)^2}{2} = v_x + \frac{\tau_0}{\mu} (h-y), \quad (9)$$

розділимо на множник

$$\frac{\rho g}{\mu} \cdot \frac{(h-y)^2}{2} : \quad (10)$$

$$\sin \alpha = \frac{\mu}{\rho g} \cdot \frac{2}{(h-y)^2} \left( v_x + \frac{\tau_0}{\mu} (h-y) \right) \quad (11)$$

та визначаємо кут  $\alpha$ :

$$\alpha = \arcsin \left( \frac{2\mu}{\rho g (h-y)^2} \left( v_x + \frac{\tau_0}{\mu} (h-y) \right) \right). \quad (12)$$

Отримане рівняння дозволяє визначити критичні кути нахилу поверхні, на яку наноситься шар бетонної суміші. Це визначення базується на реологічних характеристиках бетонної суміші, таких як граничне напруження зсуву  $\tau_0$ , динамічна в'язкість  $\mu$  та геометричні параметри шару: товщина  $h$  і ордината границі між стрижневим і в'язким течіями  $y_0$ . На практиці ця залежність корисна для контролю процесу нанесення бетонної суміші на похилі поверхні, щоб уникнути її стікання або нерівномірного розподілу.

Для криволінійних поверхонь монолітних просторових покриттів можливо визначити ділянки, де досягається критичне значення деформацій, що залежать від конкретних кутів нахилу. Це дозволяє заздалегідь ідентифікувати області з підвищеною схильністю до втрати геометричної стабільності, що є ключовим для оптимізації технології армування та укладання бетонної суміші.

## Висновки

Критичні зони деформацій залежать не лише від кута нахилу поверхні, а й від реологічних властивостей суміші, зокрема її граничного напруження зсуву та в'язкопластичних характеристик. Визначено математичні залежності, що дозволяють прогнозувати рух бетонної суміші з урахуванням градієнтів швидкості та впливу гравітаційних сил. Досліджено вплив параметрів укладання на рівномірність розподілу суміші та запропоновано технологічні підходи для мінімізації ризиків утворення дефектів. Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації процесів формування монолітних покриттів складної

геометрії, підвищення їх довговічності та зменшення матеріальних витрат.

## Література

1. Ярмоленко М. Г. *Технологія будівельного виробництва*. Київ : Вища школа, 2005. 342 с.
2. Черненко В. К. *Технологія будівельного виробництва*. Київ : Вища школа, 2002.
3. Якименко О. В. *Технологія будівельного виробництва : навч. посібник / О. В. Якименко ; Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова*. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. 411 с.
4. Lienhard J., Schleicher S., Knippers J. *Pneumatic formwork systems in structural engineering*. 2016. URL: [https://www.researchgate.net/publication/306104378\\_Pneumatic\\_Formwork\\_Systems\\_in\\_Structural\\_Engineering](https://www.researchgate.net/publication/306104378_Pneumatic_Formwork_Systems_in_Structural_Engineering).
5. Pronk A. *The calculation and construction of the highest ice dome—the Sagrada Familia in Ice // Proceedings of the International Society of Flexible Formwork Symposium (ISOFF'15), Amsterdam, Netherlands, August 2015*.
6. Doerstelmann M., Knippers J., Koslowski V. et al. *ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15: Fibre placement on a pneumatic body based on a water spider web // Architectural Design*. 2015. Vol. 85, No. 5. P. 60–65.
7. Doerstelmann M., Knippers J., Koslowski V. *ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15—Fibre placement on a pneumatic body based on a water spider web // Architectural Design*. 2015. Vol. 85, No. 5. P. 60–65. URL: <http://www.monolithic.org/topics/domes>.
8. Bini D. *Building with Air*. London, UK : Butler Tanner and Dennis, 2014.
9. Pugnale A., Bologna A. *Dante Bini's "New architectural formulae": construction, collapse and demolition of binishells in Australia 1974–2015 // Proceedings of the Society of Architectural Historians Australia and New Zealand*. 2015. Vol. 32. P. 488–499.
10. Kromoser B., Kollegger J. *Application areas for pneumatic forming of hardened concrete // Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*. 2015. Vol. 56, No. 3. P. 187–198.
11. Kromoser B., Kollegger J. *Pneumatic forming of hardened concrete—building shells in the 21st century // Structural Concrete*. 2015. Vol. 16, No. 2. P. 161–171.
12. Mehta P. K., Monteiro P. J. M. *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill, 2014.

## References

1. Yarmolenko, M. H. (2005). *Tekhnolohiia budivelnoho vyrobnytstva* [Technology of construction production]. Kyiv: Vyshcha Shkola.
2. Chernenko, V. K. (2002). *Tekhnolohiia budivelnoho vyrobnytstva* [Technology of construction production]. Kyiv: Vyshcha Shkola.
3. Yakymenko, O. V. (2016). *Tekhnolohiia budivelnoho vyrobnytstva* [Technology of construction production]. Kharkiv: KhNUMG im. O. M. Beketova.
4. Lienhard, J., Schleicher, S., & Knippers, J. (2016). *Pneumatic formwork systems in structural engineering*.

Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/306104378\\_Pneumatic\\_Formwork\\_Systems\\_in\\_Structural\\_Engineering](https://www.researchgate.net/publication/306104378_Pneumatic_Formwork_Systems_in_Structural_Engineering)

5. Pronk, A. (2015, August). The calculation and construction of the highest ice dome—the Sagrada Familia in Ice. *Proceedings of the International Society of Flexible Formwork Symposium (ISOFF'15)*, Amsterdam, Netherlands.

6. Doerstelmann, M., Knippers, J., Koslowski, V., et al. (2015). ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15: Fibre placement on a pneumatic body based on a water spider web. *Architectural Design*, 85(5), 60–65.

7. Doerstelmann, M., Knippers, J., & Koslowski, V. (2015). ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15—Fibre placement on a pneumatic body based on a water spider web. *Architectural Design*, 85(5), 60–65. Retrieved from <http://www.monolithic.org/topics/domes>

8. Bini, D. (2014). *Building with air*. London, UK: Butler Tanner and Dennis.

9. Pugnale, A., & Bologna, A. (2015). Dante Bini's "New architectural formulae": Construction, collapse and demolition of binishells in Australia 1974–2015. *Proceedings of the Society of Architectural Historians Australia and New Zealand*, 32, 488–499.

10. Kromoser, B., & Kollegger, J. (2015). Application areas for pneumatic forming of hardened concrete. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 56(3), 187–198.

11. Kromoser, B., & Kollegger, J. (2015). Pneumatic forming of hardened concrete—Building shells in the 21st century. *Structural Concrete*, 16(2), 161–171.

12. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill.

**Автор:** УСЕНКО Валерій Григорович, доктор технічних наук, професор, професор кафедри будівництва та цивільної інженерії Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
USENKO Valerii  
Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Construction and Civil Engineering  
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»  
E-mail – [valery\\_usenko@ukr.net](mailto:valery_usenko@ukr.net)  
ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4937-6442>

## MODELING THE FACTORS OF CONCRETE MIXTURE DEFORMATION ON AN INCLINED SURFACE

V. Usenko

National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Ukraine

*The study focuses on the behavior of concrete mixtures on curved surfaces of monolithic spatial coatings. The research explores the factors influencing the stability and uniformity of material distribution, particularly the relationship between gravitational forces, shear stress limits, and the rheological properties of the mixture. A mathematical model has been developed to describe the movement of the concrete mixture under various inclination angles, accounting for viscosity, yield stress, and structural integrity.*

*The results demonstrate that critical deformation zones arise in areas with significant velocity gradients, where local instability leads to non-uniform layer formation. It has been established that the inclination angle plays a decisive role in maintaining material stability, but its influence is modulated by the thickness of the applied layer and the shear stress within the mixture. The study identifies the threshold conditions at which the mixture transitions from a quasi-solid state to a flow-like behavior, which is crucial for ensuring the quality of monolithic coatings.*

*The study presents a framework for optimizing concrete composition and application techniques to mitigate defects such as uneven surface distribution, excessive sagging, or material displacement during setting. By refining these parameters, it is possible to improve the consistency of layer formation and enhance the structural durability of the final construction.*

*The proposed methodology allows for precise control over the material's movement, enabling adjustments to the mixture's composition, the processing techniques, and the surface preparation strategies. This contributes to an overall enhancement in construction efficiency, reducing material waste while ensuring the long-term stability and durability of the finished structures.*

*The findings of this study are applicable in the field of advanced concrete technology, particularly in the design and construction of spatial structures, where maintaining uniform coverage and structural cohesion is paramount. The research outcomes provide engineers and construction professionals with essential insights into optimizing concrete mixture behavior for challenging geometries, minimizing the risk of defects, and ensuring the structural integrity of monolithic surfaces over time.*

**Keywords:** concrete mix, curved surfaces, ultimate shear stress, velocity gradient, angle of inclination