

УДК 514.18

ВПЛИВ НАХИЛУ ПОВЕРХНІ НА СТІЙКІСТЬ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ У МОНОЛІТНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

Усенко В.Г., д-р техн. наук,
valery_usenko@ukr.net, ORCID: 0000-0002-4937-6442
Національний університет «Полтавська політехніка
імені Юрія Кондратюка» (м. Полтава, Україна)

У статті досліджується актуальна проблема сучасного будівництва – забезпечення рівномірного розподілу бетонної суміші на похилих і криволінійних поверхнях монолітних просторових конструкцій. З огляду на поширення інноваційних архітектурних рішень та використання оболонкових форм у сучасному будівництві, зростає потреба в науковому обґрунтуванні процесів укладання бетонних сумішей на складних основах. Запропоновано аналітичну модель, що дозволяє враховувати вплив нахилу поверхні, граничного напруження зсуву, динамічної в'язкості бетонної суміші та градієнтів швидкості на характер її руху та розподілу. Особливу увагу приділено виявленню критичних зон, у яких імовірні локальні деформації, що можуть негативно впливати на міцність та довговічність бетонного покриття. Зі збільшенням кута нахилу поверхні зростає доля сили тяжіння, яка спрямована вздовж опалубки, що підвищує ризик сповзання бетонної суміші до нижніх зон. Важливим є дотримання балансу між фізичними властивостями суміші (зокрема, в'язкопластичністю) та геометрією поверхні. У роботі описано рівняння руху бетонної суміші на похилій основі, де ключовими параметрами виступають товщина шару, кут нахилу, глибина точки відносно верхньої межі та граничне напруження зсуву. Розв'язання цього рівняння дозволило отримати аналітичний вираз, за яким можна обчислити критичний кут нахилу, за якого бетонна суміш переходить у стан течії. У статті наведено порівняльний аналіз традиційних та інноваційних технологій формування монолітних структур. Показано, що ефективність бетонування залежить не лише від характеристик суміші, а й від точного врахування гравітаційних впливів, параметрів геометрії поверхні та властивостей опалубки. Пневматична технологія демонструє перспективність швидкомонтованих форм для створення геометрично складних бетонних конструкцій. Результати проведеного дослідження створюють наукове підґрунтя для подальших робіт у напрямі моделювання поведінки бетонних сумішей на нестандартних поверхнях, оптимізації технічних рішень під час бетонування складних архітектурних форм, підвищення надійності та довговічності будівель.

Ключові слова: критичні деформації, монолітні просторові покриття, запобігання дефектам.

Постановка проблеми. Будівництво монолітних просторових покриттів із криволінійною геометрією супроводжується проблемами рівномірного розподілу бетонної суміші та забезпечення її стабільності на похилих і викривлених поверхнях. Одним із ключових завдань є виявлення зон, у яких виникають критичні деформації, що можуть впливати на міцність і довговічність конструкцій. Важливість цієї проблеми зумовлена необхідністю розробки методів прогнозування поведінки бетонної суміші під час укладання, що дозволить зменшити ризик локальних дефектів і оптимізувати процес зведення складних архітектурних форм.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження в галузі будівельних технологій активно зосереджуються на використанні пневматичних опалубних систем, інноваційних способах формування бетонних конструкцій та оптимізації процесу зведення оболонкових споруд. Традиційні підходи до бетонування, особливості використання опалубки та загальні принципи будівельного виробництва висвітлено в працях [1–3]. Вони формують базис для подальшого аналізу новітніх технологій у галузі. Окрему увагу дослідники приділяють пневматичним опалубним системам, які демонструють високу ефективність при створенні складних конструкцій [4]. Їх використання дає змогу значно скоротити витрати матеріалів та зменшити трудомісткість процесу. Альтернативною є технологія будівництва льодових куполів [5], яка слугує прикладом експериментального підходу до створення оболонкових структур. Ці дослідження розширюють межі застосування нетрадиційних матеріалів у будівництві. Роботи [6, 7] розглядають застосування пневматичних структур. Дослідження демонструють потенціал біоміметичних конструкцій, що поєднують легкість, міцність та енергоефективність. Наукова праця [8] детально аналізує методики будівництва на основі повітряних опалубних систем, які дозволяють швидко зводити тонкостінні бетонні конструкції. Пневматична технологія, запропонована Dante Bini, використовується для формування куполів у системі Binishells [9].

Інший перспективний метод – пневматичне формування затверділого бетону, який значно знижує матеріальні витрати та спрощує процес зведення оболонкових конструкцій [10, 11].

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є розробка математичної моделі руху бетонної суміші на похилих і криволінійних поверхнях, визначення критичних умов переходу матеріалу у стан течії, аналіз розподілу дотичних напружень і градієнтів швидкості для виявлення зон можливих деформацій.

Основна частина. Фізичні властивості бетонної суміші, зокрема її пластичність і здатність до деформації на складних поверхнях, відіграють важливу роль у будівництві. Особливо це актуально при зведенні купольних і аркових споруд, де треба враховувати процес тверднення матеріалу. Бетонна суміш, під впливом сили тяжіння, схильна до нерівномірних деформацій, що може призводити до відхилень від

проектних розмірів. Ступінь цих деформацій залежить від геометричних характеристик оболонки, зокрема від кута нахилу дотичних площин до опалубки. У ділянках з більшим кутом нахилу можуть виникати значні зсувні деформації, тоді як у менш нахилених зонах їх прояв буде мінімальним. Кут нахилу нормалі α до поверхні в деякій точці безпосередньо впливає на величину сили зсуву F_{zc} , яка є складовою сили ваги бетонної суміші. Зі збільшенням кута нахилу зростає частка сили тяжіння, що діє вздовж поверхні, що може спричинити переміщення матеріалу.

Процес розтікання в'язкопластичних матеріалів описується виразом:

$$\rho g(h-y) \sin \alpha = \frac{\mu dv_x}{d_y \cos \beta} + \tau_0, \quad (1)$$

де h – товщина шару бетонної суміші, y – глибина всередині шару бетонної суміші, яка відраховується від верхньої поверхні шару вниз ($y = 0$ на верхній межі шару, $y = h$ на нижній межі шару), ρg – визначає силу тяжіння на одиницю об'єму бетонної суміші, яка сприяє її розтіканню на похилій або криволінійній поверхні, α – кут нахилу поверхні, на яку наноситься бетонна суміш, відносно горизонтальної площини, τ_0 – граничне напруження зсуву (границя текучості), яке потрібно подолати, щоб матеріал почав рухатися, μ – опір потоку через внутрішнє тертя між частинками суміші, $\cos \beta$ – враховує орієнтацію градієнта швидкості зсуву dv_x/dy відносно лінії потоку.

Коли гравітація стає більшою за опір в'язкості та межі текучості, матеріал починає рухатись:

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

де v_x – швидкість руху бетонної суміші вздовж осі Ox , ρ – густина бетонної суміші, g – прискорення вільного падіння, α – кут нахилу поверхні, μ – динамічний коефіцієнт в'язкості суміші, h – загальна висота шару матеріалу, y – глибина розглянутої точки відносно верхньої поверхні, τ_0 – граничне напруження зсуву (границя текучості), β – напрямок нормалі до ліній потоку.

Перенесемо коефіцієнти так, щоб залишився член із α :

$$\frac{v_x \mu}{\cos \beta} + \tau_0 y \cos \alpha = \frac{\rho g}{2} y \sin 2\alpha \left(h - \frac{y}{2} \right). \quad (3)$$

Ізолюємо $\sin 2\alpha$:

$$\sin 2\alpha = \frac{2\mu}{\rho g y (h - y/2)} \left(\frac{v_x \mu}{\cos \beta} + \tau_0 y \cos \alpha \right). \quad (4)$$

Застосуємо операцію оберненого синуса:

$$\alpha = \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{2\mu}{\rho g y (h - y/2)} \left(\frac{v_x \mu}{\cos \beta} + \tau_0 y \cos \alpha \right) \right). \quad (5)$$

Розподіл бетонної суміші на криволінійних поверхнях значною мірою визначається її реологічними характеристиками, зокрема граничним напруженням зсуву, в'язкопластичною поведінкою та динамічною в'язкістю. Критичні деформації виникають у зонах із підвищеним градієнтом швидкості, де дотичні напруження наближаються до граничного значення τ_0 , що може призводити до локальних порушень рівномірності покриття. Кут нахилу поверхні є одним із важливих факторів, що впливає на стабільність бетонної суміші, проте його дія посилюється або послаблюється залежно від товщини шару та швидкості деформації матеріалу.

Висновок. Вираз (5) дозволяє розраховувати кут нахилу поверхні α залежно від параметрів бетонної суміші, її швидкості v_x та реологічних характеристик. На практиці ця закономірність допомагає регулювати процес укладання бетонної суміші на нахилених поверхнях, запобігаючи її сповзанню або утворенню нерівномірного шару. Для монолітних просторових покриттів із криволінійною геометрією можливо визначити зони, в яких виникають критичні деформації, пов'язані зі значеннями кутів нахилу поверхні. Аналіз відповідних зон дозволяє прогнозувати поведінку конструкції під навантаженням, оптимізувати розташування армування та коригувати технологію укладання бетонної суміші, щоб уникнути утворення дефектів або надмірного накопичення напружень.

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. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016. 411 с.
4. Benjamin Kromoser, Patrick Huber. Pneumatic formwork systems in structural engineering. 2016. (6): 1-13. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4724036>.
5. Pronk A.D.C., Verberne T.H.P., Kern J., Belis J. The calculation and construction of the highest ice dome: the Sagrada Familia in Ice. *Future Visions (International Association for Shell and Spatial Structures) Proceedings*. Amsterdam, The Netherlands: Koninklijk Instituut van Ingenieurs, 2015. С. 1–13. Paper presented at International Society of Flexible Formwork Symposium (ISOFF '15), 17–20 Aug 2015.
6. Doerstelmann M., Knippers J., Koslowski V., Menges A., Prado M., Schieber G., Vasey L. 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. pp. 60–65. DOI: 10.1002/ad.1955.
7. Bini D. Building with Air. London : Butler Tanner and Dennis, 2014. 176 p.
8. 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 (SAHANZ)*, 2015. Vol. 32. C. 488–499.
9. 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. pp. 187–198.
 10. Kromoser B., Kollegger J. Pneumatic forming of hardened concrete—building shells in the 21st century. *Structural Concrete*, 2015. Vol. 16, No. 2. pp. 161–171.
 11. Mehta P.K., Monteiro P.J.M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. New York: McGraw-Hill, 2005. 659 c. ISBN 0071462899.

INFLUENCE OF SURFACE INCLINATION ON THE STABILITY OF CONCRETE MIXTURES IN MONOLITHIC STRUCTURES

Valery Usenko

The article addresses a pressing issue in modern construction — ensuring the uniform distribution of concrete mix on inclined and curved surfaces of monolithic spatial structures. Given the widespread adoption of innovative architectural solutions and the use of shell forms in contemporary construction, there is a growing need for scientific justification of concrete placement processes on complex surfaces. An analytical model is proposed, which takes into account the influence of surface inclination, shear yield stress, dynamic viscosity of the concrete mix, and velocity gradients on the nature of its movement and distribution. Special attention is given to identifying critical zones where local deformations are likely to occur, potentially compromising the strength and durability of the concrete layer. As the inclination angle increases, the gravitational force component along the formwork surface grows, increasing the risk of the mix sliding downwards. Maintaining a balance between the physical properties of the mix (particularly its viscoplasticity) and the surface geometry is crucial. The paper presents the equation of motion for concrete mix on an inclined base, with key parameters including layer thickness, inclination angle, depth of a point relative to the top edge, and the shear yield stress. Solving this equation yielded an analytical expression for calculating the critical inclination angle at which the concrete mix transitions into a flowing state. The article provides a comparative analysis of traditional and innovative methods for forming monolithic structures. It is shown that the efficiency of concreting depends not only on the properties of the mix but also on the precise consideration of gravitational effects, surface geometry parameters, and formwork characteristics. Pneumatic technology demonstrates promising potential for rapid assembly of geometrically complex concrete structures. The results of this study lay the scientific foundation for future work in modeling the behavior of concrete mixes on non-standard surfaces, optimizing technical solutions during the concreting of complex architectural forms, and enhancing the reliability and longevity of buildings.

Keywords: critical deformations, monolithic spatial coatings, defect prevention.

References

1. Yarmolenko, M. H. (2005). *Technology of construction production*. Kyiv: Vyshcha Shkola. [in Ukrainian]
2. Chernenko, V. K. (2002). *Technology of construction production*. Kyiv: Vyshcha Shkola. [in Ukrainian]
3. Yakymenko, O. V. (2016). *Technology of construction production: navch. posibnyk*. Kharkiv: KhNUMG im. O. M. Beketova. [in Ukrainian]
4. Benjamin Kromoser, Patrick Huber. (2016). Pneumatic formwork systems in structural engineering. (6). Pp.1-13. DOI: 10.1155/2016/4724036 [in English]
5. Pronk, A. (2015). 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. 1-13. [in English]
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. DOI: 10.1002/ad.1955. [in English]
7. Bini, D. (2014). *Building with air*. London, UK: Butler Tanner and Dennis. [in English]
8. 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. [in English]
9. 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. [in English]
10. Kromoser, B., & Kollegger, J. (2015). Pneumatic forming of hardened concrete—Building shells in the 21st century. *Structural Concrete*, 16(2), 161–171. [in English]
11. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2005). *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill. ISBN 0071462899. [in English]