

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОРКРЕТ-БЕТОНУ

*А. Мазурак, к.т.н., О. Мазурак, к.т.н., С. Терлига, к.т.н., М. Юхим, магістр
Львівський національний аграрний університет
Я. Балабух, директор
Львівський науково-технічний центр ДерждорНДІ*

Ключові слова: швидкість частин струменя торкрет-суміші, відстань до поверхні нанесення, тиск повітря, діаметр вихідного отвору сопла, діаметр шланга торкрет-пристрою.

На основі теоретико-експериментальних досліджень і методів математичного планування експерименту пропонуються залежності, що поєднують кінцеву швидкість торкрет-суміші з основними параметрами технології виконання, а також пропозиції оптимізації технологічних параметрів.

Постановка проблеми. Значні темпи прогресу сучасних технологій на сьогодні не викликають сумніву. Будівництво з цього погляду також не відстає, шукаючи нових технологічних методів для полегшення зусиль, що витрачаються людиною для виконання потрібного завдання. Саме такою технологією є торкретування, доцільність та ефективність якого підтверджена вітчизняною і особливо закордонною практикою будівництва. Ця технологія, яка не є новою, зараз привернула увагу в цивільному і промисловому будівництві завдяки своїй простоті й достатньо високій ефективності [1-4].

У 60-х роках ХХ ст. метод торкретування отримав повне «громадянство»: мав уже велику енергоозброєність, був нагромаджений досвід експлуатації і з'явилась достатня кількість повідомлень про технологію і практику його застосування.

Розвиток технології торкретування був можливим завдяки впровадженню в організаціях Мінмонтажспецбуду УРСР і Мінсільбуду УРСР при спорудженні об'єктів водоканалізаційних очисних споруд (прямокутні й радіальні відстійники, резервуари для води тощо).

Прикладом високоякісного виконання торкрет-робіт можуть слугувати такі будівлі: трисекційний аеротенк і радіальні відстійники на очисних спорудах цукрового заводу в Теофіполі Хмельницької області (ССМУ Житомирспецфондаментбуд комбінату Укрпромспецбуд), резервуари чистої води місткістю від 3000 до 10000 м³ у Конотопі й Глухові Сумської області, збірно-монолітні опускні колодязі насосних станцій у Городянці, Ірпіні та Боярці Київської області й на Льодовому стадіоні в Києві, побудовані організаціями комбінату Київпромбуд і Київміськбуд у 1974–1977 рр. та ін. об'єкти.

У 2008 р. технологію мокрого торкретування використано під час зведення підпірної стіни на вул. Глибочицькій в м. Києві [4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теорії і практиці методу торкрет-бетону (набризк-бетону) присвячені праці вітчизняних і закордонних учених, в яких уперше розглянуто питання твердіння, застосування поверхнево-активних речовин, регулювання товщини шару, впливу речовин вихідних матеріалів на міцність торкрет-бетону [1; 3; 5].

Низку лабораторних і польових експериментів виконав Д.С. Ростовцев, встановивши залежність кількості відскоку від швидкості виходу струменя. Учені Ленінградського політехнічного інституту під керівництвом професора С. І. Дружиніна досліджували залежність міцності торкрет-бетону від складу розчину.

У 30-х роках ХХ ст. закордонні винахідники починають розробку домішок до бетону, які дозволяють прискорити процеси схоплення і твердіння цементного каменю. Ведуться також роботи щодо збільшення зчеплення шару торкрет-бетону з бетонною поверхнею, досліджуються процеси регулювання реологічних властивостей, вклад суміші.

Проте рівень цих досліджень, з огляду фізико-хімічних процесів, був невисокий і не давав уявлення про закономірності формування структури торкрет-бетону.

Подальшому розвитку теорії і практики торкрет-бетону слугував доробок радянських учених Н.А. Агризова, Е.Б. Кузякіної, А.П. Шепилова та ін. У дослідженнях задіяні сучасні положення

теоретичної механіки, хімії цементів і теорії пружності. Особливий інтерес становить робота Н.А. Агризкова, який спрощеною моделлю описав процеси відскоку залежно від складу розчину, вплив якостей вихідних матеріалів і різних домішок на міцнісні характеристики торкрет-бетону [5; 6].

На цьому етапі розвитку теоретичні та практичні дослідження охоплювали велику кількість технологічних параметрів процесу, проте вони не поєднували разом засоби, матеріали, технології та експлуатаційні властивості вкладеного бетону.

Значним внеском у розвиток теорії торкрет-бетону є роботи А.П. Шепилова, який уперше розглянув процес формування струменя торкрету як багатофазову систему, а також розробив фізико-математичну модель процесу формування структури торкрет-бетону. Недоліком прийнятої моделі можна вважати те, що автор використав аналогію формування структури торкрет-бетону як зіткнення пружних шарів недеформованими тілами. У праці не розглядається ступінь наближення такої моделі до реального процесу. Автор встановив закономірності для багатьох композиційних систем, а також розглянув вплив кількості заповнювача на якість створюваної поверхні.

Свої роботи питанням теорії і практики торкрет-бетону присвятили В.М. Мостков, І.І. Воллер, Е.Б. Кузякіна, М.А. Лев, Б.Г. Грязнов, С.А. Атманських, Л.М. Голіцинський, М.Г. Ложенко, І.Р. Райгородський, В.І. Шаврін, А.К. Карасев, В.В. Кузін та ін. [3; 5].

У цих працях досить досліджені технологічні параметри торкрету, його фізико-механічні характеристики, виділені раціональні області застосування в будівництві.

На думку більшості авторів, на міцнісні властивості торкрет-бетону і кількість втрат матеріалу у вигляді відскоку значно впливають такі технологічні чинники, як водоцементне відношення, відстань від сопла до поверхні, яка бетонується, і кут його нахилу, швидкість виходу струменя. Однак численні значення згаданих чинників мають значні межі і встановлені з низкою обмежень. Це можна пояснити тим, що дослідження проводили на різноманітному обладнанні й матеріалах.

На сьогодні, незважаючи на підвищення якості бетону за рахунок широкого застосування поверхнево-активних і комплексних добавок, проблема запобігання і відновлення поверхонь, а також підсилення залізобетонних конструкцій є однією з актуальних.

Постановка завдання. Дослідження з торкрет-бетону, виконані ученими в різні періоди часу, охоплювали широкий спектр питань стосовно технології та його властивостей. Однак отримані дані в деяких випадках мають суперечливий характер, оскільки виготовлення зразків та оцінку фізико-механічних показників торкрет-бетону виконували не за однією методикою й технологією, а використовували індивідуальні вирішення і підходи. На сьогодні, у зв'язку з появою великої кількості ефективного модернізованого обладнання різних виробників, назріла потреба якісно і кількісно впливати на технологічні та експлуатаційні властивості торкрет-бетону, проектувати й забезпечувати параметри міцності, щільності, морозостійкості тощо.

З цією метою були проведені теоретико-експериментальні дослідження впливу технологічних чинників на процес виконання торкрет-бетонних робіт. Проведені дослідження систематизувались і базувались на методі математичного планування експерименту.

Виклад основного матеріалу. Для отримання максимальної міцності торкрет-бетону за мінімального відскоку необхідно, щоб кінцеві швидкості частин суміші в момент зустрічі їх з поверхнею, яку бетонуємо, мали визначені значення, які залежали б від водо-цементного відношення.

На швидкість частин впливають такі чинники, як діаметр вихідного отвору сопла, розмір частини, відстань до поверхні, яку бетонуємо, тощо.

Розглядаючи рух окремої частини в потоці і застосовуючи теорему про зміну кількості руху, можна записати:

$$M_i V_i \frac{dV_i}{dx} = \frac{1}{2} (U - V_i)^2 \rho C_i K_{\phi} f_{imio} + \sum_{j=1}^{i-1} \frac{1}{2} (V_j - V_i)^2 \zeta_j C_{ij} K_{\phi} f_{imim} \quad (1)$$

де X – текуча координата перерізу, яка відраховується від осі потоку;

U, ρ – місцева швидкість і щільність повітря;

M_i, V_i – маса і швидкість частини i -ї фракції;

V_j, ζ_j – швидкість і щільність потоку частин j -ї фракції ($j = 1, 2, \dots, i = 1$);

$C_i, C_{i,j}$ – коефіцієнти лобового опору шару діаметром, що дорівнює розміру частин i -ї фракції у разі обтікання потоком повітря і потоком частин j -ї фракції;

K_ϕ – поправний коефіцієнт, який враховує форму частин;

f_{imid} – площа міделевого перерізу частини.

При цьому розглядається рух уздовж осі потоку і приймається, що маса складається з q фракцій ($i=1,2,\dots, q$). Для виключення сил тяжіння можна прийняти напрям потоку горизонтальним, так що проекція сил тяжіння на вісь потоку дорівнюватиме нулю.

Перша складова правої частини рівняння (1) – це дія потоку повітря на частинку, друга складова – дія потоку менших частин аерозавису.

Розглядаючи рух частин у трубопроводі, можна виразити їх швидкість у частках від місцевої швидкості повітря:

$$V_i = B_i U; \quad V_j = B_j U,$$

де $B_{i(j)} < 1$ – постійні на короткому шляху труби.

Дослідами Д.М. Голіцинського встановлено, що тиск у матеріальному шланзі змінюється лінійно по його довжині. Відповідно, якщо вважати процес ізотермічним, можна використати такі співвідношення [6]:

$$\begin{aligned} P &= P_n + \varphi_1 X; \\ \rho &= \rho_n + \varphi_2 X; \\ U &= U_n + \varphi_3 X, \end{aligned} \quad (2)$$

де P – тиск повітря в розглядуваному перерізі шланга;

P_n, ρ_n, U_n – тиск, щільність і швидкість повітря в перерізі, який відповідає вибраному початку координат;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – коефіцієнти пропорційності (величини, які не залежать від X).

Для визначення швидкостей частинок у вільному потоці потрібно знати, як змінюється щільність потоку частинок у поперечному перерізі факела. Ця залежність встановлена за формою поперечного перерізу одинарної смуги торкрет-бетону, яка утворюється за рівномірного лінійного переміщення сопла відносно бетонованої поверхні, на основі експериментальних даних.

На рис. 1 видно, що висота профілю поперечного перерізу смуги в точці e пропорційна площі, що обмежена кривою зміни щільності потоку частинок у поперечному перерізі факела вздовж хорди AB , що проходить через ту саму точку паралельно до напрямку переміщення сопла, тобто:

$$h(y) = \int_A^B \zeta_c(z) dz. \quad (3)$$

Визначити щільність потоку частинок у точці e поперечного перерізу вільного потоку (рис. 5) можна з формули

$$\zeta_{c.e} = \frac{\zeta_{c.e}}{\zeta_{c.max}} = h_e \frac{y_{max} - y_e}{\sqrt{y_{max}^2 - y_e^2}} - h_{e+1} \frac{y_{max} - y_{e+1}}{\sqrt{y_{max}^2 - y_{e+1}^2}}, \quad (4)$$

де y_{max} – радіус потоку;

h_{e+1} і h_e – висота профілю поперечного перерізу смуги торкрет-бетону на відстані y_e

і y_{e+1} від середини основи;

$\zeta_{c.e}$ – щільність потоку суміші на відстані y_e від осі потоку.

Формула (4) створена на припущенні, що в заданій точці факела значення відскоку прямо пропорційне щільності потоку частинок і кривій зміни щільності потоку в поперечному перерізі факела, якщо однакові максимальні й мінімальні ординати мають однаковий характер, незалежно від того напрямку, який розглядаємо.

Шептицький у дослідях встановив залежність ширини основи одинарної смуги шприц-бетону від відстані між соплом і поверхнею, що бетонується, а також від швидкості переміщення сопла. На

основі аналізу цих даних прийнято, що основна маса бетонної суміші рухається в середині конуса, твірна якого нахилена до осі під кутом 8° [6].

За швидкості потоку повітря 100 м/с із сопла діаметром 35 мм розрахункові значення $V_{i,c}$ — для частинок розмірами 0,25 мм і 1,0 мм на відстані 1,1 м від зрізу сопла дорівнюють відповідно 32,8 і 31,6 м/с.

Відношення максимальної та мінімальної швидкостей частинок заданої фракції в перерізі,

який розглядаємо, $F_i = \frac{V_{i,\max}}{V_{i,\min}}$.

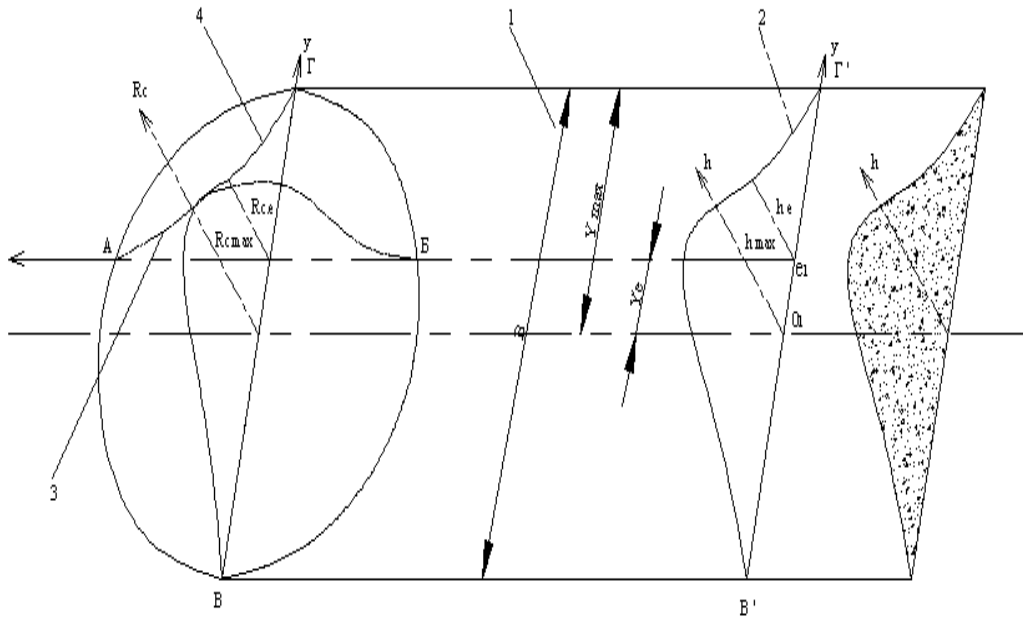


Рис. 4. Схема утворення однієї смуги торкрет-бетону: 1 – смуга торкрет-бетону; 2 – профіль поперечного перерізу смуги $h = f(y)$; 3 – крива зміни щільності потоку суміші вздовж хорди А-Б, $\zeta_c = \varphi(z)$; 4 – теж вздовж діаметра В-Г, $\zeta_c = \psi(y)$.

За мінімальну швидкість прийнята швидкість частинок, які летять під кутом 8° до осі потоку. Очевидно, чим менше значення F_i , тим одноріднішим є торкрет-бетон, оскільки при цьому різниця його ущільнення в центрі й на краях факела стає меншою.

Швидкісний напір повітря в потоці в місці вкладання торкрет-бетону не повинен перевищувати задане значення, інакше спостерігатиметься видування частинок і розрихлення нанесеного шару.

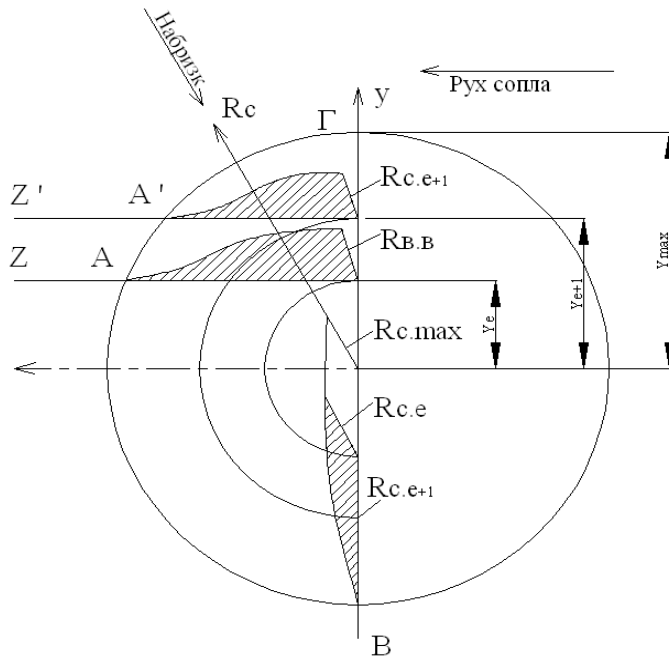


Рис. 2. Схема для визначення щільності потоку частинок у поперечному перерізі вільного потоку (позначення див. рис.1).

Це підтверджується значним збільшенням відскоку і зниженням пружності торкрет-бетону зі зменшенням відстані від сопла до поверхні, яку ми бетонуємо під час експерименту. Зокрема зменшення вказаної відстані з 1,1 до 0,75 м збільшує відскок приблизно в 1,8–1,9 раза і знижує міцність на 10–14%. Осьова швидкість повітря на відстані 1,1 м від вихідного отвору сопла становить 22,6 м/с за діаметра вихідного отвору 35 мм і швидкості повітря 100 м/с.

З метою одержання аналітичних виразів для кінцевих швидкостей частинок використано метод планування повного факторного експерименту. Як незалежні змінні варіювання на двох рівнях прийнято такі фактори:

X_1 – вагова швидкість повітря в трубопроводі, зв’язана однозначною залежністю зі швидкістю потоку повітря за заданого діаметра вихідного перерізу, кг/м²·с;

X_2 – відношення діаметра вихідного перерізу сопла до діаметра матеріального шланга, см;

X_3 – відстань від сопла до поверхні, яку бетонуємо, см.

Наступні обчислення показали, що інші фактори, наприклад концентрація сухої суміші тих меж, в яких вона змінюється за набризку бетону, суттєво не впливають на швидкість частинок у вільному потоці.

Центр планування вибраний так, що перший і третій фактори мають тут значення, які, на нашу думку, є оптимальними для одержання найбільшої міцності торкрет-бетону за мінімального відскоку.

Основний рівень другого фактора прийнятий, виходячи зі здогадок про можливість заклинювання щєбеню у вихідному отворі сопла за значного зменшення його діаметра [6]. Інтервали варіювання факторів охоплюють ті їх значення, які становлять практичне зацікавлення (див. табл.).

Таблиця

Параметри варіювання факторів

Рівень варіювання	Фактор		
	X_1	X_2	X_3
Верхній рівень (+)	73,5 (125)*	0,8	150
Основний рівень (0)	58,75 (100)	0,8	110
Нижній рівень (-)	44 (75)	0,7	70
Інтервал варіювання	14,75 (25)	0,1	40

* У дужках вказана швидкість повітря на виході зі сопла, м/с, за діаметра вихідного перерізу 35 мм

Як показали експериментальні дослідження, у разі використання крупнозернистих пісків як

заповнювача для торкрет-бетону раціонально використовувати сопла, в яких діаметр вихідного отвору становить не менше ніж 0,9 діаметрів шланга. Це дає змогу, не змінюючи витрат повітря, покращити кінематичну структуру потоку (зменшити різницю між швидкостями осьових і крайніх частинок) і отримати спокійніший вихід суміші за рахунок меншої швидкості витікання повітря.

Враховуючи результати проведених експериментів і виключення статистично неважливих членів представлених залежностей, отримали залежності, за якими можна прогнозувати технологічний процес виконання торкрет-бетонних робіт:

$$V_{1.\hat{a}} = 35,2 + 0,733 x_1 - 38,5 x_2 - 0,039 x_3 - 0,00216 x_1 x_3; \quad (5)$$

$$V_{2.\hat{a}} = 17,3 + 0,563 x_1 - 15,4 x_2 + 0,0108 x_3 - 0,00142 x_1 x_3; \quad (6)$$

$$V_{3.\hat{a}} = 4,80 + 0,502 x_1 + 0,0076 x_3 - 0,000585 x_1 x_3, \quad (7)$$

де X_1 – вагова витрата повітря, кг/м²·с;

X_2 – відношення діаметра вихідного отвору сопла до діаметра шланга;

X_3 – відстань від сопла до поверхні, яку бетонуємо, см.

При цьому значення швидкостей частинок при $X_1 = 0$, $X_2 = -1$, $X_3 = 0$ рівні відповідно

$$V_{1в.кр} = 33,15 \text{ м/с}, \quad V_{2в.кр} = 31,7 \text{ м/с}, \quad V_{3в.кр} = 31,45 \text{ м/с}.$$

Рівняння (5–7) дають змогу, знаючи діаметр вихідного отвору сопла, визначити витрату повітря, необхідного для отримання оптимальної кінцевої швидкості частинок суміші, і за ним здійснювати контроль за технологією нанесення торкрет-бетону.

Висновки. На сьогодні назріла необхідність у зміні стереотипів щодо використання нових прогресивних технологій торкретування, а також розробці та виданні вітчизняних нормативів, які б регламентували проектування і виконання цих робіт з урахуванням науково-дослідних розробок і будівельної практики.

Проведені дослідження дали змогу вивчити технологічний процес виконання, виявити чинники, які на нього впливають, а також проектувати й аналітично розраховувати технологічні параметри виконання залежно від експлуатаційних вимог торкрет-бетону.

На нашу думку, для повнішого вивчення проблеми технологічних і експлуатаційних характеристик торкрет-бетону доцільно глибше дослідити вплив модифікаторів бетону та мікроармування.

Бібліографічний список

1. Ростовцев Л. С. Торкрет-бетонные работы в Щербиновском рудоуправлении Донугля / Л. С. Ростовцев // Инженерный работник.– 1926. – № 10, 11.
2. Дружинин С. И. Торкрет и его свойства / С. И. Дружинин, П. И. Глужге. – М. : Госстройиздат, 1934.
3. Автомобильные дороги // Зарубежный опыт, экспрес-информация. – М., 1980. – № 1.
4. Технология «мокрого» торкретирования // Бетон. –2008. – № 2. – С. 14-16.
5. Разработка технологического процесса ремонта цементобетонных покрытий с использованием экспериментального оборудования по пневмонабрызгу : науч.-техн. отчет. – К. : ГОСДОРНИИ, 1984. – 51 с.
6. Кузякина Е. Б. Крепление горных выработок набрызг-бетоном / Е. Б. Кузякина // Горный журнал. – 1957. – № 3.
7. Структура свободной струи при набрызге бетона. – К. : НИИСП, 1969.

Мазурак А., Мазурак О., Терлига С., Юхим М., Балабух Я.А. Влияние технологических параметров на характеристики торкрет-бетона

На основе теоретико-экспериментальных исследований и методов математического планирования эксперимента предлагаются зависимости, которые совмещают конечную скорость торкрет-смеси с основными параметрами технологии выполнения, а также предложения оптимизации технологических параметров.

Ключевые слова: скорость частей струи торкрет-смеси, расстояние к поверхности нанесения, давление воздуха, диаметр исходного отверстия сопла, диаметр шланга торкрет-устройства.

Mazurak A., Mazurak O., Terlyha S., Yukhym M., Balabuh Ya. The influence of technological parameters on characteristics of torkreit concrete

Basing on the theoretical experimental researches and methods of mathematic planning of the experiment of the author suggest dependences connecting the final speed of shotcrete with the main parameters of the technology fulfillment and also with suggestion of optimization of technological parameters.

Key words: speed of part of shotcrete stream, distance to the surface of putting, air pressure, the diameter of the shotcrete hose.