

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-369-32>

УДК 666.97:66.061.3:621.929

КУРЧ АНДРІЙ

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

<https://orcid.org/0009-0001-4343-3098>

e-mail: a.kurch@kpi.ua

СОКОЛЬСЬКИЙ ОЛЕКСАНДР

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

<https://orcid.org/0000-0002-7929-3576>

e-mail: sokolkiev@ukr.net

ОЛЕКСИШЕН ВІТАЛІЙ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-0477-2388>

e-mail: vitaliy.oleksishen@gmail.com

МАСООБМІННА ПОДІБНІСТЬ ЗМІШУВАЧІВ ДЛЯ КАРБОНІЗАЦІЇ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ

У роботі критично узагальнено закономірності перенесення лабораторних режимів інжекції діоксиду вуглецю у свіжій цементній та бетонній системах на змішувачі промислової місткості. Показано, що масштабування лише за геометричною подібністю, частотою обертання або питомою потужністю не зберігає одночасно циркуляцію в'язкопластичної суміші, диспергування газу, локальну густину потоку CO₂, час макрозмішування та співвідношення між масоперенесенням і карбонізаційною реакцією. Запропоновано розглядати змішувач як періодичний газорідинно-твердофазний реактор з рухомими межами змоченої поверхні та змінною реологією. Систематизовано три технологічні маршрути: карбонізацію води замішування, оброблення цементної суспензії та пряме введення CO₂ у повнокомпонентну суміш. Для кожного маршруту встановлено домінуючі обмеження, контрольовані величини та ризики масштабування. Сформовано ієрархію критеріїв, що поєднує питому механічну енергію, узагальнене число Рейнольдса, колову швидкість робочого органа, числа Фруда і витрати газу, час змішування, об'ємний коефіцієнт масоперенесення та фактичний ступінь зв'язування CO₂. Наведено міжмасштабний розрахунковий приклад переходу від партії 0,05 м³ до 2,0 м³, який виявляє конфлікт між сталою питомою потужністю і сталою безрозмірною витратою газу. Розроблено конструктивний переріз герметизованої двовальної робочої області з розподіленими форсунками, відбором відхідного газу та засобами вимірювання крутного моменту, температури й тиску. Наукова новизна огляду полягає у формуванні масообмінної рамки масштабування, у якій доза CO₂ відокремлена від швидкості його підведення і просторової доступності реакційної поверхні. Практична цінність полягає у запропонованій послідовності перевірок, що запобігає перенесенню лабораторного режиму за одним формальним критерієм без підтвердження однорідності, зв'язування CO₂ та якості бетону.

Ключові слова: змішувач; бетонна суміш; карбонізація; масообмінна подібність; інжекція CO₂; багатofазне змішування.

KURCH ANDRII, SOKOLSKYI OLEKSANDR, OLEKSYSHEN VITALII

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

MASS-TRANSFER SIMILARITY OF MIXERS FOR CARBONATION OF CONCRETE MIXTURES

The paper provides a critical engineering synthesis of how laboratory carbon-dioxide injection regimes for fresh cementitious systems can be transferred to industrial concrete mixers. Existing studies show that carbon mixing can enhance early strength or permit binder reduction under selected conditions, yet the reported outcomes remain sensitive to injection stage, dosage, pressure, mixing sequence, water-to-binder ratio, and the method used to quantify bound CO₂. The central argument is that geometric similarity, rotational speed, blade-tip speed, or constant specific power cannot independently preserve the coupled phenomena that control the process. A carbonation mixer is therefore represented as a batch gas-liquid-solid reactor containing a dense, thixotropic and evolving medium, with intermittent renewal of wetted reactive surfaces. Three implementation routes are compared: carbonation of mixing water, carbonation of an aqueous cement suspension, and direct injection into the complete concrete mixture. For each route, the review identifies the likely rate-limiting resistance, the scale-sensitive hardware features, and the measurements required for qualification. A hierarchy of scaling descriptors is proposed that combines specific mechanical energy, power number, generalized Reynolds number, blade-tip speed, Froude number, gas-flow number, tracer mixing time, volumetric mass-transfer coefficient, injected dose, and verified CO₂ fixation efficiency. Instead of treating the quantities as interchangeable, product-critical invariants, equipment constraints, and adjustable compensators are separated explicitly. An illustrative scale transition from a 0.05 m³ laboratory batch to a 2.0 m³ industrial batch demonstrates that maintaining constant power per unit volume raises blade-tip speed and changes the gas-flow number when the CO₂ dose and injection time are held constant. Conversely, preserving gas-flow similarity requires a longer injection window or a redesigned distributed injection system. The numerical example is a screening calculation rather than a validated equipment prescription. An original vector cross-section of a sealed twin-shaft working chamber is presented, incorporating overlapping circulation zones, distributed CO₂ nozzles, off-gas sampling, torque monitoring, temperature and pressure sensors, and a discharge gate. The scientific contribution is a mass-transfer-centred scale-up framework that distinguishes the amount of CO₂ supplied from the rate and spatial uniformity of its delivery. The practical result is a staged verification procedure in which power and torque signatures, tracer homogenisation, off-gas balance, bound-carbon measurements, fresh-concrete properties and properties of hardened concrete are evaluated at successive acceptance stages. This approach reduces the risk of declaring scale-up successful on the basis of a single hydrodynamic criterion or nominal CO₂ dosage.

Keywords: mixer; concrete mixture; carbonation; mass-transfer similarity; CO₂ injection; multiphase mixing.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.09.2026

Прийнята до друку / Accepted 28.09.2026

Опубліковано / Published 15.10.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Курч Андрій, Сокольський Олександр, Олексішен Віталій

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями

Інжекція CO₂ у свіжу бетонну суміш є технологічно перспективною завдяки поєднанню короткого виробничого циклу з перетворенням газу на термодинамічно стійкі карбонатні фази, проте саме короткотривалість циклу робить визначальним фактор обладнання: реакція має відбутися за десятки секунд або кілька хвилин у середовищі, яке спочатку зернисте, далі проходить стадію капілярно зв'язаного агломерату і лише наприкінці набуває властивостей рухомої в'язкопластичної суміші. Огляди карбонізації виокремлюють карбонізацію води, цементної суспензії та повнокомпонентної суміші, але також констатують малу частку саме промислових випробувань і невизначеність перенесення лабораторних даних [1, 2].

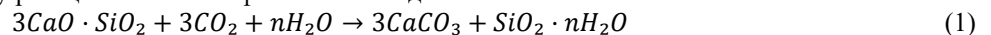
У традиційному змішуванні якість пов'язують із однорідністю, послідовністю завантаження, питомою енергією і моментом досягнення стабільної потужності. Тип змішувача, частота обертання та тривалість циклу формують різні траєкторії структурування навіть для однакового складу [3, 4]. Після додання CO₂ до цього додаються розподіл газу між активними і застійними зонами, площа відновлюваної міжфазної поверхні, швидкість розчинення CO₂ у водних плівках, доступність кальцієвмісних фаз та конкуренція карбонізації й гідратації. Отже, машина водночас виконує функції дозатора, диспергатора газу, реактора, гомогенізатора й засобу керування тепловим та реологічним станом.

Отримані в лабораторних і виробничих дослідженнях [5–9] позитивні результати прямого введення CO₂ в бетон (збереження рухливості, прискорення тужавлення або збільшення міцності за оптимальності дози) проте не утворюють універсальної залежності ефекту від дози. Попередня карбонізація рідшої цементної суспензії, прискорюючи іонні реакції та підвищуючи ефективність зв'язування, потребує окремого апарата або двостадійного циклу [10]. Надлишкова доза чи невдалий момент інжекції можуть зменшити подальший ступінь гідратації, погіршити реологію чи знизити резерв лужності [9, 11, 12].

Практичне завдання полягає не в механічному збільшенні лабораторної витрати газу пропорційно об'єму партії, а в збереженні просторово-часових умов, за яких CO₂ контактує з поновлюваною реакційною поверхнею без локального переохолодження, пересушування, грудкування або газового прориву. Кліматичний результат залежить від фактично зв'язаної кількості, енергії підготовки та транспортування газу, зміни рецептури й функціональних властивостей бетону [13] і також не може бути ототожнений з поданою масою CO₂; тому потрібна рамка масштабування, що з'єднує конструкцію робочої області, силовий привод, газорозподіл, кінетику масоперенесення та критерії якості продукту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Матеріалознавчі дослідження пояснюють ефекти ранньої карбонізації утворенням CaCO₃ і кремнеземистого гелю, нуклеаційною дією дрібнодисперсних карбонатів та зміною порової структури [11, 12, 14]. Для спрощеного запису реакції силікатної фази можна подати як:



Такий запис відображає стехіометричну межу, не визначаючи, проте, досяжного зв'язування в змішувачі. Реальна швидкість обмежується розчиненням CO₂, дифузією через рідинну плівку, розчиненням кальцієвмісних фаз, зародженням карбонату та екрануванням поверхні продуктами реакції. В повнокомпонентному бетоні додаткову роль відіграють великі заповнювачі, що займають більшу частину об'єму, руйнують бульбашки, переносять пасту, створюючи при цьому макроскопічні тіньові зони.

Роботи з внутрішньозмішувальних вимірювань показали, що крива потужності розрізняє стадії зволоження, формування максимально когезійного стану, переходу до текучої суміші та стабілізації [15, 16] і може бути використана для порівняння змішувачів і визначення достатньої тривалості гомогенізації [17]. Крива набуває додаткового змісту для карбонізації: імпульс крутного моменту після інжекції може вказувати на охолодження, зміну водоутримання або структурну перебудову, однак без паралельного газового балансу не доводить зв'язування CO₂.

Реологічні моделі свіжого бетону описують границю текучості, пластичну або степеневу в'язкість і тиксотропне відновлення структури [18, 19]. Класична концепція Метцнера–Отто, дозволяючи зіставити частоту обертання з характерною швидкістю зсуву для ньютонівських середовищ, корисна як перша апроксимація для пасты чи будівельного розчину, але в бетоні коефіцієнт зсуву залежить від робочого органа, заповнення, зернистості заповнювача і стану агломерації, отже, має бути ідентифікований за вимірними потужністю та реологією.

Теорія апаратів із мішалками пропонує критерії циркуляції, змішування, диспергування газу та масоперенесення [20, 21, 22]. Дослідження суспензій підтверджують, що сталі питома потужність, колова швидкість і швидкість повного зависання частинок призводять до різних результатів зі збільшенням масштабу [23–27], причому більшість таких кореляцій отримано для значно рідших за бетон систем. Пряме застосування водних кореляцій об'ємного коефіцієнта масоперенесення k_{fd} до суміші з границею текучості є методологічно слабким; кореляції можуть задавати форму плану експерименту, але їх коефіцієнти й показники степеня необхідно калібрувати на модельному та натурному обладнанні.

Енергетичні дослідження бетонозмішування демонструють можливість скорочення циклу за стабілізацією потужності та врахування впливу добавок на енергоспоживання [28, 29]. Окремий кластер невизначеності пов'язано з вимірюванням поглиненого CO₂: мала проба для термогравіметрії може бути нерепрезентативною для гетерогенної партії, а масова різниця чутлива до випаровування води. Сучасні рекомендації наголошують на поєднанні газового балансу з аналізом зв'язаного неорганічного вуглецю та контрольними пробами [30, 31]. Отже, в наявних роботах детально розглянуто хімію, реологію або окремі

критерії змішування, але недостатньо сформовано їхню спільну ієрархію для конструювання та масштабування карбонізаційного змішувача.

Формулювання цілей статті

Метою статті є формування інженерно придатної масообмінної рамки масштабування змішувачів для карбонізації бетонних сумішей, для чого необхідно: встановити межі об'єкта масштабування; зіставити технологічні маршрути за домінуючими опорами перенесенню; визначити систему взаємодоповнювальних безрозмірних і розмірних критеріїв; обґрунтувати конструктивну організацію робочої області та вимірювального контуру; продемонструвати конфлікт критеріїв у міжмасштабному прикладі; сформувати послідовність верифікації промислового режиму. Стаття не встановлює універсальних коефіцієнтів конкретної моделі змішувача, а окреслює те, які величини мають бути виміряні для їх ідентифікації.

Виклад основного матеріалу

Системна межа та технологічні маршрути

Об'єктом масштабування доцільно вважати не корпус змішувача із приводом, а замкнену систему «підготовка CO₂ — дозування — форсунки — робоча область — відхідний газ — продукт». Межа починається в точці, де відомі агрегатний стан, температура, тиск і склад газу, і завершується підтвердженою масою зв'язаного CO₂ в репрезентативній пробі продукту, що дозволяє уникнути ігнорування втрат в трубопроводі, випаровування сухого льоду, витоку через нещільності та винесення газу разом з повітрям.

Процес слід розкласти на чотири часові масштаби: час макроциркуляції суміші t_c , час диспергування та оновлення міжфазної поверхні t_d , час газорідного перенесення t_{MT} та характерний час реакції t_R . За найбільшого t_c виникають необроблені зони; за найбільшого t_{MT} підвищення реакційної здатності в'язучого мало впливає на загальну швидкість; за найбільшого t_R газ проходить крізь систему без достатнього зв'язування. Порядок цих величин може змінитися протягом одного циклу внаслідок зволоження, руйнування агломератів, карбонізації й тиксотропного відновлення.

Таблиця 1

Технологічні маршрути та домінуючі обмеження масштабування

Маршрут	Середовище	Перевага	Масштабозалежні обмеження	Контрольні параметри
Карбонізація води замішування	Газ–рідина; низька в'язкість	Висока керованість k_{LA} , відсутність крупного заповнювача	Потреба у герметичній ємності; дегазація під час транспортування; рН та сумісність з добавками; маса розчиненого CO ₂ обмежена рівновагою	Витрата/тиск газу, рН, температура, розчинений неорганічний вуглець
Карбонізація цементної суспензії	Газ–рідина–дрібний твердий компонент	Велика доступна поверхня й швидка іонна реакція; можливість окремого реактора	Зростання в'язкості; налипання; керування часткою цементу та води; ризик надмірної передкарбонізації	Потужність, t_{95} , k_{LA} , температура, зв'язаний CO ₂ , реологія суспензії
Пряма інжекція у повну суміш	Газ–вода–цемент–пісок–крупний заповнювач	Найпростіший retrofit і відсутність проміжного продукту	Екранування пасти заповнювачем; нестационарна реологія; локальні струмені, прорив газу, нерівномірне охолодження	Крутий момент, локальна температура, t_{95} , газовий баланс, просторові проби

Примітка: k_{LA} — об'ємний коефіцієнт масоперенесення; t_{95} — час досягнення 95 % однорідності трасера.

Маршрути в табл. 1 не можна ранжувати одним показником. Карбонізована вода спрощує гідродинаміку, додаючи при цьому ємність і ризик дегазації. Суспензійний маршрут відокремлює реакцію від переміщення крупного заповнювача, проте змінює послідовність приготування бетону. Пряма інжекція найкраще відповідає модернізації чинної лінії, однак має найбільшу просторову неоднорідність. Вибір визначається не максимальною лабораторною величиною поглинання, а сумісністю з тактом заводу, можливістю герметизації, допустимою зміною рецептури та засобами доказового контролю.

Реологічна основа

На часовому інтервалі одного циклу бетон можна наближено описувати моделлю Гершеля–Балклі. Для характерної швидкості зсуву $\dot{\gamma} \approx k_s N$ ефективна в'язкість залежить від частоти обертання, тому узагальнене число Рейнольдса не масштабується так, як для ньютонівської рідини:

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n; \mu_{app} = \tau_0 / (k_s N) + K(k_s N)^{n-1} \quad (2)$$

Тут τ_0 — границя текучості, K і n — параметри консистенції, k_s — коефіцієнт, що зв'язує частоту обертання N із характерною швидкістю зсуву. Значення цих параметрів змінюються з введенням суперпластифікатора, з температурою та з перебігом карбонізації, тому реологічна подібність вимагає замість використання паспортного значення в'язкості вимірювання стану суміші у визначені моменти циклу.

$$Po = P/(\rho N^3 D^5); R_g = \rho N D^2 / \mu_{app}; Fr = N^2 D / g; Fl = Q_g / (ND^3) \quad (3)$$

В рівнянні (3) Po характеризує силову навантаження, Re_g — співвідношення інерційних і в'язких сил, Fr — вплив вільної поверхні й гравітації, Fl — відносну об'ємну витрату газу, D — характерний діаметр робочого органа. Для двовальних змішувачів D доцільно визначати за огинальною траєкторією лопаті, а геометричні відношення доповнювати безрозмірним перекриттям робочих зон і відносним кроком лопатей, без чого однакові Po та Re_g не гарантують однакової циркуляції.

Питома механічна енергія є інтегральним дескриптором циклу й краще за номінальну потужність враховує перехідні стадії:

$$e_v = (1/V) \int_0^t [P(t) - P_0] dt \quad (4)$$

P_0 — втрати холостого ходу. Однакова e_v не означає однакової пікової швидкості зсуву: короткий інтенсивний режим і довгий м'який режим можуть мати однакову енергію, але відрізнятися розміром газових включень, зносом лопатей і ступенем руйнування агломератів. Тому e_v є продуктивним критерієм лише сукупно з граничними значеннями крутного моменту та колової швидкості $u_T = \pi ND$.

Масоперенесення, реакція та неоднорідність газорозподілу

Для рідких систем базовий потік газорідинного перенесення виражають через k_{La} і рушійну силу концентрації. У бетонній суміші доцільно трактувати k_{La} як ефективний параметр, що включає доступну воду, періодичне покриття зерен пастою, руйнування газових включень і швидке споживання розчиненого CO_2 :

$$\dot{m}_{CO_2} = k_{La} \cdot V_{eff} (C^* - C); \eta_{mt} \approx 1 - \exp(-k_{La} \cdot t_{eff}) \quad (5)$$

V_{eff} — ефективний об'єм рідинної фази, C^* — рівноважна концентрація за локального парціального тиску, C — фактична концентрація, t_{eff} — ефективний час контакту. Через швидку реакцію C може залишатися малою, але це не усуває опір підведенню газу. Навпаки, швидке споживання підтримує рушійну силу і робить площу міжфазної поверхні визначальною. Збільшення витрати газу після досягнення межі диспергування призводить не до пропорційного поглинання, а до прориву й зростання концентрації у відхідному газі.

Класичні залежності типу $k_{La} = A(P/V)^{\alpha} u_{sg}^{\beta}$ (де u_{sg} — поверхнева швидкість газу) одержано переважно для середовищ з низькою в'язкістю [21]. В густій суміші A , α і β є функціями заповнення, границі текучості, крупності заповнювача, схеми форсунок і стадії циклу. Отже, така залежність є гіпотезою калібрування, а не готовим проектним рівнянням. Для суспензій присутність твердих частинок може як збільшувати, так і зменшувати міжфазну поверхню та коефіцієнт перенесення [22, 27].

Просторову якість інжекції слід описувати щонайменше двома величинами: часом макрозмішування t_{95} за інертним трасером і коефіцієнтом варіації зв'язаного вуглецю CV_{CO_2} в пробах із визначених зон. Перша величина показує здатність циркуляції рознести домішку, друга — сукупний наслідок газорозподілу й реакції. Низький t_{95} за рідинним трасером не гарантує низького CV_{CO_2} , якщо газ вводиться струменем у локальну зону або швидко реагує до завершення циркуляції.

Доцільно розділяти ступінь використання поданого газу η_g і ступінь підтвердженого зв'язування η_{fix} . Перший визначають за інтегральним балансом подачі та відхідного газу, другий — за різницею вмісту неорганічного вуглецю в дослідній і контрольній сумішах. Їх розбіжність виявляє накопичення газу в вільному об'ємі, розчинення без стабільної мінералізації або похибку пробовідбору. Термогравіметрію доцільно підтверджувати газовим балансом чи аналізом загального неорганічного вуглецю, особливо за наявності карбонатного заповнювача [30, 31].

Таблиця 2

Критерії, які необхідно розглядати спільно

Критерій	Наближено зберігається	Недолік або обмеження	Спосіб перевірки
Геометричні відношення	Подібність корпусу, лопатей, перекриття	Не зберігають реологію, газовий потік і час реакції	3D-модель, обміри, контроль зносу
P/V та e_v	Середня інтенсивність і енергія циклу	За зростання масштабу змінюються u_T , локальні піки й охолодження	Потужність, крутий момент, частота
$u_T = \pi ND$	Граничний зсув, дроблення, знос	Стала u_T зменшує P/V за геометричного збільшення	N , D , вібрація, знос
Re_g	Режим течії з урахуванням μ_{app}	μ_{app} змінюється в циклі; k_s залежить від геометрії	Реометрія, $P(N)$, ідентифікація k_s
Fr	Вільна поверхня, підкидання матеріалу	Конфліктує зі сталими P/V та u_T	Відео/тиск, висота шару
$Fl = Q_g/(ND^3)$	Відносне газове навантаження	Доза, масштаб і фіксований час можуть вимагати іншого Fl	Масова й об'ємна витрата, p , T

Критерій	Наближено зберігається	Недолік або обмеження	Спосіб перевірки
$k_{La}, k_{La} \cdot t_{eff}$	Швидкість і ступінь газорідного контакту	Довідникові кореляції для води не описують бетон	Відгук газового балансу, трасерний тест
t_{95}/t_{inj}	Часова доступність усіх зон	t_{95} часто збільшується за масштабу	Інертний трасер, багатоточкові датчики
η_{fix}, CV_{CO_2}	Фактичне зв'язування та його однорідність	Залежать від пробовідбору і карбонатів заповнювача	термогравіметрія + контрольна партія + просторові проби

Ієрархія критеріїв і правила переходу

Через недосяжність повної динамічної подібності критерії слід розподіляти за пріоритетом. До першої групи належать продуктові інваріанти: доза на масу в'язучого, фактичне η_{fix} , допустимий CV_{CO_2} , t_{95}/t_{inj} , рухливість, вміст повітря та міцність. До другої — обмеження машини: максимальний крутний момент, u_T , тиск, температура, допустиме заповнення, знос і герметичність. До третьої — компенсатори: частота обертання, тривалість і момент інжекції, число й орієнтація форсунок, поділ газового імпульсу, частка попередньо карбонізованої суспензії. Масштабування успішне лише в умовах виконання інваріантності в межах обмежень за допомогою доступних компенсаторів.

За геометричної подібності $V \propto D^3$ і наближено сталого Ro потужність визначається $P = Ro \rho N^3 D^5$. Зміни частоти і колової швидкості за умов збереження P/V :

$$N_2/N_1 = \lambda^{-2/3}; u_{T,2}/u_{T,1} = \lambda^{1/3}; \lambda = D_2/D_1 = (V_2/V_1)^{1/3} \quad (6)$$

Отже, стала питома потужність неминує підвищує колову швидкість на великому апараті. За сталої u_T , навпаки, P/V зменшується приблизно як λ^{-1} у турбулентному наближенні. Стале Fr потребує $N \propto D^{-1/2}$, що дає іншу закономірність. Ці суперечності є не похибкою методу, а фізичним наслідком масштабування. Для неньютонівського режиму додатково змінюються $Ro(Re_g)$ і розмір активної каверни навколо робочого органа [26].

Газова частина дає ще одну несумісність. За однакової дози на об'єм і незмінної тривалості інжекції $Q_g \propto V \propto D^3$. Тоді за умови сталого P/V число Fl збільшується як $D^{2/3}$. Для збереження Fl газову подачу слід масштабувати як ND^3 , а тривалість введення тієї самої дози — збільшувати приблизно як $D^{2/3}$. Якщо виробничий такт не допускає подовження, необхідні розподілені форсунки, локальна інтенсифікація або перехід до карбонізації частини суспензії.

Мінімальна умова часової подібності полягає в тому, щоб t_{95} був істотно меншим за t_{inj} і за інтервал, протягом якого суміш зберігає потрібну рухливість. Практичним початковим критерієм може бути $t_{95} \leq t_{inj}/3$; він не є універсальною константою, але забезпечує кілька циклів макроциркуляції під час подачі газу. Якщо зв'язування є надто швидким порівняно з t_{95} , слід зменшувати локальну густину газового потоку або подавати CO_2 ступінчасто після досягнення текучого стану, а не просто збільшувати швидкість вала.

Конструктивна організація робочої області

Для прямої інжекції конструктивно доцільна примусова двовальна схема, у якій зустрічні лопатеві потоки створюють перекрити активну область. Перевага схеми полягає не в наявності двох валів, а в повторному перенесенні матеріалу через зону високої деформації. Форсунки слід розташовувати так, щоби струмені потрапляли не на нерухому стінку або відкриту поверхню, а в траєкторії поновлюваних порцій пасти. Газогерметичний кожух зменшує неконтрольовані втрати й дає можливість підтримувати баланс, але робочий надлишковий тиск має залишатися в передбачених проектом обладнання межах категорії та захисту.

Колектор має забезпечувати вирівнювання масових витрат між форсунками; однаковий діаметр отворів сам по собі цього не гарантує через падіння тиску вздовж магістралі та різний протитиск у шарі. Доцільні калібровані дроселі або окремі вимірювачі, зворотні клапани, продування від цементного пилу й змінні наконечники. Система відхідного газу повинна мати відомий інфільтраційний потік повітря або працювати з вимірюванням загальної витрати та складу, інакше концентрація CO_2 без витрати не дає масового балансу.

Крутний момент слід вимірювати на приводі або валі з достатньою частотою дискретизації для розрізнення піку когезійної стадії від відповіді на інжекцію. Температурні датчики потрібні щонайменше в зоні введення й на протилежному боці: при подачі зрідженого CO_2 локальне охолодження може маскувати хімічний тепловий ефект і змінювати реологію. Положення форсунок, що забезпечує прийнятний баланс на чистому апараті, необхідно повторно перевіряти після зносу лопатей і зміни зазору біля стінки.

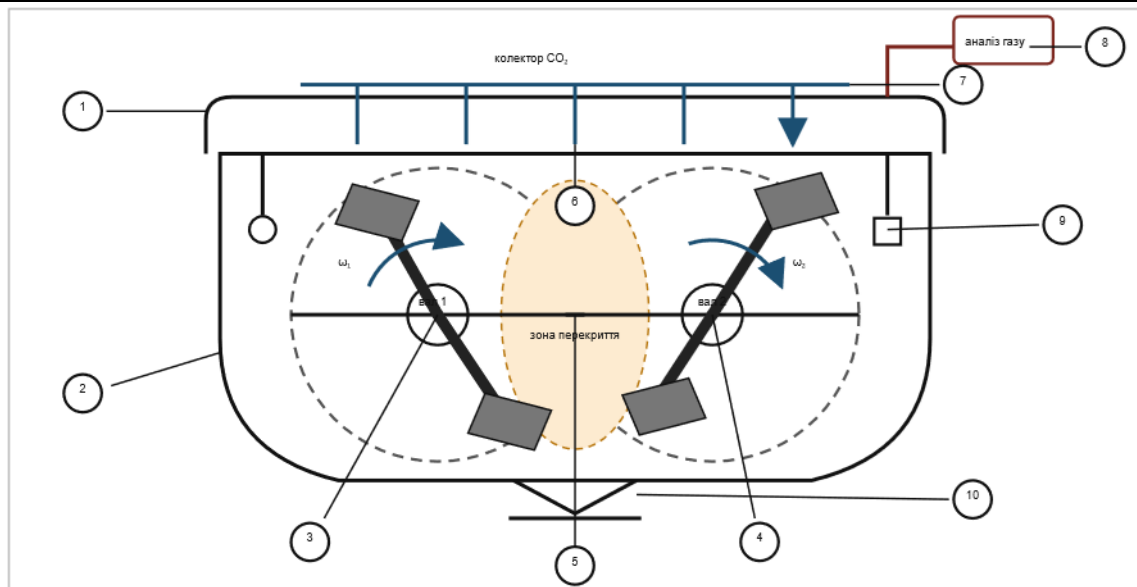


Рис. 1. Схематичний переріз робочої області пропонуваного двовального карбонізаційного змішувача
1 — газощільний кожух; 2 — коритоподібний корпус; 3, 4 — зустрічні обертові вали з лопатками; 5 — зона перекриття циркуляційних контурів; 6 — розподілені форсунки; 7 — колектор CO₂; 8 — відбір відхідного газу до аналізатора; 9 — датчики температури й тиску; 10 — нижній розвантажувальний затвор

Міжмасштабний розрахунковий приклад

Розглянемо перехід від лабораторної партії $V_1 = 0,05 \text{ м}^3$ до промислової $V_2 = 2,0 \text{ м}^3$ за геометрично подібних оригінальних робочих зон. Об'ємний коефіцієнт масштабу дорівнює 40, а лінійний $\lambda = 40^{1/3} = 3,42$. У лабораторному апараті $D_1 = 0,32 \text{ м}$, $N_1 = 3,0 \text{ с}^{-1}$ (180 хв^{-1}), виміряна корисна потужність $P_1 = 0,75 \text{ кВт}$; отже $P_1/V_1 = 15 \text{ кВт/м}^3$, $u_{t,1} = 3,02 \text{ м/с}$, а питома енергія за 90 с становить $1,35 \text{ МДж/м}^3$.

За сталого P/V і наближено сталого P_0 рівняння (6) дає $N_2 = 1,32 \text{ с}^{-1}$ (79 хв^{-1}), $D_2 = 1,09 \text{ м}$ і $P_2 = 30 \text{ кВт}$. Колова швидкість зростає до $4,54 \text{ м/с}$, крутний момент — від $39,8 \text{ Н·м}$ до приблизно $3,62 \text{ кН·м}$. Уже цей результат потребує перевірки зносу, пікових навантажень і допустимого дроблення заповнювача. Якщо зберегти u_t , частота становитиме $0,877 \text{ с}^{-1}$, а очікувана P/V у турбулентному наближенні зменшиться до $4,39 \text{ кВт/м}^3$; час змішування та k_d , імовірно, погіршаться.

Нехай вміст цементу становить $c_b = 360 \text{ кг/м}^3$, задана доза $x_{\text{CO}_2} = 0,003 \text{ кг CO}_2/\text{кг цементу}$, цільове використання поданого газу $\eta_g = 0,85$, а тривалість інжекції $t_{inj} = 45 \text{ с}$. Тоді подана маса і масова витрата визначаються як:

$$m_{\text{CO}_2,s} = x_{\text{CO}_2} \cdot c_b \cdot V / \eta_g; \dot{m}_{\text{CO}_2,s} = m_{\text{CO}_2,s} / t_{inj} \quad (7)$$

Для лабораторної партії слід подати $0,0635 \text{ кг}$, або $1,41 \text{ г/с}$; для промислової — $2,54 \text{ кг}$, або $56,5 \text{ г/с}$. При оцінюванні газової витрати за $0,30 \text{ МПа}$ (абсолютного тиску) і 293 К ідеальногазова густина CO_2 дорівнює приблизно $5,42 \text{ кг/м}^3$, тому $Q_{g,1} \approx 2,60 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ і $Q_{g,2} \approx 1,04 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$. Ці значення наведено у перерахунку до однакових p і T ; витратомір та специфікацію форсунки слід задавати масовою витратою або нормальними умовами.

За отриманих величин $Fl_1 = 0,00265$, $Fl_2 = 0,0060$. Отже, пропорційне об'єму збільшення газової подачі за фіксованих 45 с більш ніж удвічі підвищує відносне газове навантаження. Щоб зберегти Fl_1 за частоти $1,32 \text{ с}^{-1}$, $Q_{g,2}$ мало б бути лише близько $4,58 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. Для введення повної дози за такої витрати інжекційне вікно зростає приблизно до 102 с, що і становить конфлікт між виробничим тактом, газодинамічною подібністю та заданою дозою.

Для попереднього масообмінного скринінгу ціль $\eta_{\text{mt}} = 0,85$ за 45 с у моделі ідеального першого порядку відповідає $k_d \geq -\ln(0,15)/45 = 0,042 \text{ с}^{-1}$. Ця оцінка не доводить, що весь поглинутий CO_2 мінералізовано; вона задає нижню межу швидкості зникнення газу з доступної фази. Окремо приймемо $t_{95} \leq 15 \text{ с}$. Якщо промисловий трасерний тест дає 28 с, номінальне виконання P/V не приймають: змінюють крок лопатей, заповнення, послідовність завантаження або розподіляють інжекцію після досягнення текучого стану.

Таблиця 3

Перехід від лабораторного до промислового змішувача за сталої питомої потужності

Параметр	Лабораторний	Промисловий	Інженерна інтерпретація
Робочий об'єм V , м ³	0,050	2,00	Об'ємне відношення 40
Лінійний масштаб λ	1,00	3,42	Геометрична гіпотеза
Діаметр оригінальної D , м	0,320	1,09	$D_2 = \lambda D_1$

Параметр	Лабораторний	Промисловий	Інженерна інтерпретація
Частота N, c^{-1}	3,00	1,32	Стале P/V за сталого P_0
Частота, xv^{-1}	180	79	Перевірити паспорт привода
Корисна потужність $P, кВт$	0,75	30,0	$P/V = 15 кВт/м^3$
Крутний момент, $Н·м$	39,8	≈ 3620	Без коефіцієнта пікового перевантаження
Колова швидкість $u_T, м/с$	3,02	4,54	Зростання у 1,50 раза
F_T	0,294	0,195	Гравітаційна подібність не збережена
Маса CO_2 у в'язучому, $кг$	0,054	2,16	0,3 % маси цементу
Подана маса за $\eta_g = 0,85$, $кг$	0,0635	2,54	Потрібен газовий баланс
Масова витрата, $г/с$	1,41	56,5	За $t_{inj} = 45 с$
Q_g за 0,30 МПа, 293 К, $м^3/с$	$2,60 \cdot 10^{-4}$	$1,04 \cdot 10^{-2}$	Ілюстративне приведення
Fl	0,00265	0,0060	Не збережено при масштабуванні дози
t_{inj} для сталого Fl , $с$	45	≈ 102	Конфлікт із тактом виробництва
Скринінговий k_{La}, c^{-1}	$\geq 0,042$	$\geq 0,042$	Підлягає натурній ідентифікації

Примітка: приклад демонструє логіку перевірки критеріїв і не є паспортним розрахунком конкретної машини.

Чутливість прикладу найвища до η_g , тиску приведення газу, прийнятого P_0 та реологічного режиму. Якщо фактичне η_g зменшиться з 0,85 до 0,60, потрібна маса поданого газу зросте на 42 %, а Fl і ризик прориву — пропорційно. Якщо реологія переводить апарат у перехідну область, рівність P_0 між масштабами порушується і $P_2 = 30 кВт$ слід замінити на результат випробувальної кривої $P(N)$. Тому числовий приклад має завершуватися планом ідентифікації, а не вибором двигуна лише за степеневим законом.

Контроль, верифікація та критерії приймання

Верифікацію доцільно виконувати послідовними стадіями: визначення без CO_2 холостої потужності, кривої $P(N)$, пікового моменту, t_{95} і просторової однорідності стандартної суміші; перевірка інертним газом або повітрям газорозподільного колектора, перепадів тиску, герметичності та впливу газування на крутний момент; введення CO_2 малими ступенями з реєстрацією синхронних рядів $\dot{m}_{in}$, масової витрати та складу відхідного газу, $P(t)$, $M(t)$, $N(t)$, $p(t)$ і температур у кількох зонах.

Газовий баланс має не порівнювати лише початкову й кінцеву концентрації, а інтегрувати масові потоки в часі. Накопичення CO_2 у вільному об'ємі враховують за тиском, температурою та об'ємом; після інжекції перед відкриттям кришки забезпечують контрольований період додаткового спостереження. Показник η_g приймають лише за закриття балансу в установленій межі, потім незалежно визначають η_{fix} у продукті; при великій різниці між ними режим не може бути кваліфікований як мінералізація.

Пробовідбір має бути просторово стратифікованим: зона біля форсунок, перекриття валів, периферія, верхній і нижній шари, початок і кінець розвантаження. Для кожної проби визначають неорганічний вуглець або приріст карбонатів відносно контрольної партії, а також густину, рухливість і вміст повітря. Репрезентативність особливо критична для термогравіметрії, оскільки десятки міліграмів не відтворюють розподіл крупного заповнювача; пробу пасти треба відокремлювати за заздалегідь валідованою процедурою [31].

Машинний критерій приймання включає відсутність перевищення моменту й температури, t_{95}/t_{inj} у заданій межі та відтворювану криву енергії. Процесний критерій — η_g і η_{fix} , допустима нерівномірність CV_{CO_2} та відсутність неконтрольованого газового піку у витяжці. Продуктовий критерій — відповідність рухливості, густини, повітряності, часу тужавлення, міцності та довговічності контрольній специфікації. Стандартизовані випробування ефективності змішування і однорідності партії можуть бути основою, але їх необхідно доповнити показниками вуглецю [33, 34].

Керування режимом доцільно будувати не за фіксованим часом від старту циклу, а за подією на кривій потужності. Інкєкція після переходу через максимум когезійності та формування циркулюючої пасти зменшує ймовірність локального контакту CO_2 з сухим цементом. Підхід узгоджується з даними про важливість моменту інжекції [9] і дозволяє компенсувати коливання вологості заповнювача. Для кожної рецептурної родини потрібне власне вікно події, оскільки суперпластифікатор і мінеральні добавки змішують стадії енергетичної кривої [29].

Наявні проблеми та напрями подальших досліджень

1. Відсутність універсального методу вимірювання k_{La} в свіжому бетоні. Вимірювання розчиненого CO_2 електродом у високощільній лужній пасті локальне і нестійке, а газовий відгук поєднує масоперенесення з реакцією. Перспективним є калібрування ефективного k_{La} за інертним газовим трасером у модельній пасті з

подальшим визначенням реакційного внеску за CO_2 , але подібність такої пасти до повного бетону має бути доведена силовими й циркуляційними показниками.

2. Масштабна залежність між зносом лопатей, зазором біля корпусу і газовою однорідністю. Знос часто розглядають лише як причину погіршення гомогенізації, хоча він також змінює проходження порцій пасти через зони форсунок. Потрібні досліді на кількох станах зносу з картами CV_{CO_2} , t_{95} і питомої енергії. Такі дані дозволять перейти від календарного технічного обслуговування до критерію, пов'язаного з масоперенесенням.

3. Узгодження прискореної ранньої карбонізації з довгостроковою карбонізаційною стійкістю армованого бетону. Методи випробувань глибини карбонізації суттєво відрізняються за попереднім кондиціонуванням, концентрацією CO_2 та інтерпретацією фронту [30, 32]. Раннє зв'язування малої дози не слід автоматично прирівнювати до небезпечної повної нейтралізації, але й підвищення ранньої міцності не є доказом збереження пасивації арматури. Необхідні паралельні вимірювання лужного резерву, проникності, хлоридної стійкості й природної карбонізації.

Висновки

Аналітичний огляд показав, що карбонізаційний змішувач є не просто машиною для гомогенізації, а періодичним багатофазним реактором зі змінною реологією та рухомою доступною поверхнею. Тому геометрична подібність або один силовий критерій не забезпечують достовірного перенесення режиму. Масштабування має зберігати продуктивні інваріанти — дозу на масу в'язучого, фактичне зв'язування, допустиму просторову неоднорідність і часову доступність — у межах моменту, швидкості, тиску, температури та виробничого такту.

Сформована система критеріїв поєднує P_0 , Re_g , Fr , Fl , P/V , e_v , u_T , t_{95} , k_{La} , η_g і $\eta_{\text{фк}}$. Їхня роль різна: частина характеризує машину, частина — контакт фаз, частина — кінцевий продукт. Критерії не слід взаємозамінювати. Найважливішим методологічним наслідком є відокремлення маси поданого CO_2 від швидкості та просторової рівномірності його підведення.

Міжмасштабний приклад для 0,05 і 2,0 м³ показав, що за сталої питомої потужності та незмінного 45-секундного вікна інжекції число газової витрати Fl збільшується більш ніж удвічі. Його збереження подовжує інжекцію приблизно до 102 с. Отже, у промисловому апараті необхідно свідомо обирати між довшим циклом, розподіленою подачею, зміною активної геометрії або окремою карбонізацією суспензії; жодне з рішень не впливає лише з кубічного масштабування витрати.

Запропонований конструктивний переріз двовальної герметизованої робочої області реалізує принцип введення газу в поновлювані циркуляційні потоки, а вимірювальний контур поєднує крутий момент, температуру, тиск, вхідний і вихідний газ. Кваліфікація режиму повинна проходити через послідовні стадії: базова гомогенізація без CO_2 ; газодинамічна перевірка; ступінчаста інжекція; закриття газового балансу; незалежне вимірювання зв'язаного вуглецю; підтвердження властивостей свіжого й затверділого бетону.

Подальші дослідження доцільно спрямовувати на натурну ідентифікацію ефективного k_{La} , картування CV_{CO_2} , встановлення впливу зносу та зазорів, а також на багатомасштабні серії для різних реологічних класів сумішей. Порівнювати обладнання слід за функціональною одиницею, що включає придатний бетон заданої міцності й довговічності та чисту кількість стабільно зв'язаного CO_2 , а не за номінальною дозою газу. Саме така постановка перетворює масштабування з емпіричного збільшення продуктивності на кероване проектування масообмінного процесу.

Література

1. Davolio M., Muciaccia G., Ferrara L. Concrete carbon mixing – A systematic review on the processes and their effects on the material performance. *Cleaner Materials*. 2025. Vol. 15. Art. 100292. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100292>
2. Zhang S., Yuan Q., Ni J., Zheng K., Xu Y., Zhang J. CO₂ utilization and sequestration in ready-mix concrete—A review. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 907. Art. 168025. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168025>
3. Ferraris C. F. Concrete mixing methods and concrete mixers: State of the art. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2001. Vol. 106, No. 2. P. 391–399. <https://doi.org/10.6028/jres.106.016>
4. Dils J., De Schutter G., Boel V. Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: a review. *Materials and Structures*. 2012. Vol. 45, No. 11. P. 1673–1683. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9864-8>
5. Monkman S., MacDonald M., Hooton R. D., Sandberg P. Properties and durability of concrete produced using CO₂ as an accelerating admixture. *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 74. P. 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.007>
6. Monkman S., MacDonald M. On carbon dioxide utilization as a means to improve the sustainability of ready-mixed concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 167. P. 365–375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.194>
7. Qian X., Wang J., Fang Y., Wang L. Carbon dioxide as an admixture for better performance of OPC-based concrete. *Journal of CO₂ Utilization*. 2018. Vol. 25. P. 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.03.007>

8. He Z., Li Z., Shao Y. Effect of carbonation mixing on CO₂ uptake and strength gain in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017. Vol. 29, No. 10. Art. 04017176. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002031](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002031)
9. Zhang S., Yuan Q., Ni J., Shi C., Zheng K., Tan J. Study of CO₂ injection timing within the mixing process of ready-mix concrete for win-win improvements of mechanical properties and CO₂ sequestration. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 4. P. 1480–1492. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c05896>
10. Fu X., Guerini A., Zampini D., Rotta Loria A. F. Storing CO₂ while strengthening concrete by carbonating its cement in suspension. *Communications Materials*. 2024. Vol. 5, No. 1. Art. 109. <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00546-9>
11. Ashraf W. Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 120. P. 558–570. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.080>
12. Zhang D., Ghouleh Z., Shao Y. Review on carbonation curing of cement-based materials. *Journal of CO₂ Utilization*. 2017. Vol. 21. P. 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.07.003>
13. Ravikumar D., Zhang D., Keoleian G., Miller S., Sick V., Li V. Carbon dioxide utilization in concrete curing or mixing might not produce a net climate benefit. *Nature Communications*. 2021. Vol. 12, No. 1. Art. 855. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21148-w>
14. Rostami V., Shao Y., Boyd A. J., He Z. Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing. *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42, No. 1. P. 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.010>
15. Cazaciu B. In-mixer measurements for describing mixture evolution during concrete mixing. *Chemical Engineering Research and Design*. 2008. Vol. 86, No. 12. P. 1423–1433. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.08.021>
16. Cazaciu B., Roquet N. Concrete mixing kinetics by means of power measurement. *Cement and Concrete Research*. 2009. Vol. 39, No. 3. P. 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.12.005>
17. Chopin D., Cazaciu B., de Larrard F., Schell R. Monitoring of concrete homogenisation with the power consumption curve. *Materials and Structures*. 2007. Vol. 40, No. 9. P. 897–907. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9187-8>
18. Roussel N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*. 2006. Vol. 36, No. 10. P. 1797–1806. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.025>
19. Roussel N., Ovarlez G., Garrault S., Brumaud C. The origins of thixotropy of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42, No. 1. P. 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.004>
20. Nienow A. W. On impeller circulation and mixing effectiveness in the turbulent flow regime. *Chemical Engineering Science*. 1997. Vol. 52, No. 15. P. 2557–2565. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(97\)00072-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(97)00072-9)
21. Garcia-Ochoa F., Gomez E. Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview. *Biotechnology Advances*. 2009. Vol. 27, No. 2. P. 153–176. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.10.006>
22. Beenackers A. A. C. M., Van Swaaij W. P. M. Mass transfer in gas–liquid slurry reactors. *Chemical Engineering Science*. 1993. Vol. 48, No. 18. P. 3109–3139. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(93\)80199-Z](https://doi.org/10.1016/0009-2509(93)80199-Z)
23. Jirout T., Rieger F. Impeller design for mixing of suspensions. *Chemical Engineering Research and Design*. 2011. Vol. 89, No. 7. P. 1144–1151. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.12.005>
24. Jafari R., Tanguy P. A., Chaouki J. Experimental investigation on solid dispersion, power consumption and scale-up in moderate to dense solid–liquid suspensions. *Chemical Engineering Research and Design*. 2012. Vol. 90, No. 2. P. 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.07.009>
25. Harrison S. T. L., Kotsiopoulos A., Stevenson R., Cilliers J. J. Mixing indices allow scale-up of stirred tank slurry reactor conditions for equivalent homogeneity. *Chemical Engineering Research and Design*. 2020. Vol. 153. P. 865–874. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.10.049>
26. Russell A. W., Kahouadji L., Mirpuri K., Quarumby A., Piccione P. M., Matar O. K., Luckham P. F., Markides C. N. Mixing viscoplastic fluids in stirred vessels over multiple scales: A combined experimental and CFD approach. *Chemical Engineering Science*. 2019. Vol. 208. Art. 115129. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.07.047>
27. Montante G., Paglianti A. How to evaluate the mass transfer resistances in dense solid–liquid suspensions. *Chemical Engineering Research and Design*. 2021. Vol. 167. P. 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.01.015>
28. Ngo H.-T., Kaci A., Kadri E.-H., Ngo T.-T., Trudel A., Lecrux S. Energy consumption reduction in concrete mixing process by optimizing mixing time. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 139. P. 810–816. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.293>
29. Arularasi V., Pachiappan T., Avudaiappan S., Raman S. N., Guindos P., Amran M., Fediuk R., Vatin N. I. Effects of admixtures on energy consumption in the process of ready-mixed concrete mixing. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 12. Art. 4143. <https://doi.org/10.3390/ma15124143>
30. Bernal S. A. et al. Report of RILEM TC 281-CCC: A critical review of the standardised testing methods to determine carbonation resistance of concrete. *Materials and Structures*. 2024. Vol. 57, No. 8. Art. 173. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02424-9>
31. Matschei T. et al. Test methods for CO₂ mineralization in cement-based materials: A review by RILEM TC 309-MCP. *Materials and Structures*. 2026. Vol. 59, No. 4. Art. 175. <https://doi.org/10.1617/s11527-026-03064-x>
32. Thiery M., Villain G., Dangla P., Platret G. Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics. *Cement and Concrete Research*. 2007. Vol. 37, No. 7. P. 1047–1058. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.002>
33. ISO 18650-2:2014. Building construction machinery and equipment — Concrete mixers — Part 2: Procedure for examination of mixing efficiency. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.

34. ASTM C94/C94M-24a. Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024. https://doi.org/10.1520/C0094_C0094M-24A

References

1. Davolio M., Muciaccia G., Ferrara L. Concrete carbon mixing – A systematic review on the processes and their effects on the material performance. *Cleaner Materials*. 2025. Vol. 15. Art. 100292. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2025.100292>
2. Zhang S., Yuan Q., Ni J., Zheng K., Xu Y., Zhang J. CO₂ utilization and sequestration in ready-mix concrete—A review. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 907. Art. 168025. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168025>
3. Ferraris C. F. Concrete mixing methods and concrete mixers: State of the art. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2001. Vol. 106, No. 2. P. 391–399. <https://doi.org/10.6028/jres.106.016>
4. Dils J., De Schutter G., Boel V. Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: a review. *Materials and Structures*. 2012. Vol. 45, No. 11. P. 1673–1683. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9864-8>
5. Monkman S., MacDonald M., Hooton R. D., Sandberg P. Properties and durability of concrete produced using CO₂ as an accelerating admixture. *Cement and Concrete Composites*. 2016. Vol. 74. P. 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.007>
6. Monkman S., MacDonald M. On carbon dioxide utilization as a means to improve the sustainability of ready-mixed concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 167. P. 365–375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.194>
7. Qian X., Wang J., Fang Y., Wang L. Carbon dioxide as an admixture for better performance of OPC-based concrete. *Journal of CO₂ Utilization*. 2018. Vol. 25. P. 31–38. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.03.007>
8. He Z., Li Z., Shao Y. Effect of carbonation mixing on CO₂ uptake and strength gain in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2017. Vol. 29, No. 10. Art. 04017176. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002031](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002031)
9. Zhang S., Yuan Q., Ni J., Shi C., Zheng K., Tan J. Study of CO₂ injection timing within the mixing process of ready-mix concrete for win–win improvements of mechanical properties and CO₂ sequestration. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 4. P. 1480–1492. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c05896>
10. Fu X., Guerini A., Zampini D., Rotta Loria A. F. Storing CO₂ while strengthening concrete by carbonating its cement in suspension. *Communications Materials*. 2024. Vol. 5, No. 1. Art. 109. <https://doi.org/10.1038/s43246-024-00546-9>
11. Ashraf W. Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities. *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 120. P. 558–570. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.080>
12. Zhang D., Ghoul Z., Shao Y. Review on carbonation curing of cement-based materials. *Journal of CO₂ Utilization*. 2017. Vol. 21. P. 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.07.003>
13. Ravikumar D., Zhang D., Keoleian G., Miller S., Sick V., Li V. Carbon dioxide utilization in concrete curing or mixing might not produce a net climate benefit. *Nature Communications*. 2021. Vol. 12, No. 1. Art. 855. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21148-w>
14. Rostami V., Shao Y., Boyd A. J., He Z. Microstructure of cement paste subject to early carbonation curing. *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42, No. 1. P. 186–193. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.010>
15. Cazacliu B. In-mixer measurements for describing mixture evolution during concrete mixing. *Chemical Engineering Research and Design*. 2008. Vol. 86, No. 12. P. 1423–1433. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2008.08.021>
16. Cazacliu B., Roquet N. Concrete mixing kinetics by means of power measurement. *Cement and Concrete Research*. 2009. Vol. 39, No. 3. P. 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.12.005>
17. Chopin D., Cazacliu B., de Larrard F., Schell R. Monitoring of concrete homogenisation with the power consumption curve. *Materials and Structures*. 2007. Vol. 40, No. 9. P. 897–907. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9187-8>
18. Roussel N. A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*. 2006. Vol. 36, No. 10. P. 1797–1806. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.025>
19. Roussel N., Ovarlez G., Garrault S., Brumaud C. The origins of thixotropy of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42, No. 1. P. 148–157. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.09.004>
20. Nienow A. W. On impeller circulation and mixing effectiveness in the turbulent flow regime. *Chemical Engineering Science*. 1997. Vol. 52, No. 15. P. 2557–2565. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(97\)00072-9](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(97)00072-9)
21. Garcia-Ochoa F., Gomez E. Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview. *Biotechnology Advances*. 2009. Vol. 27, No. 2. P. 153–176. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.10.006>
22. Beenackers A. A. C. M., Van Swaaij W. P. M. Mass transfer in gas–liquid slurry reactors. *Chemical Engineering Science*. 1993. Vol. 48, No. 18. P. 3109–3139. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(93\)80199-Z](https://doi.org/10.1016/0009-2509(93)80199-Z)
23. Jirout T., Rieger F. Impeller design for mixing of suspensions. *Chemical Engineering Research and Design*. 2011. Vol. 89, No. 7. P. 1144–1151. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.12.005>
24. Jafari R., Tanguy P. A., Chaouki J. Experimental investigation on solid dispersion, power consumption and scale-up in moderate to dense solid–liquid suspensions. *Chemical Engineering Research and Design*. 2012. Vol. 90, No. 2. P. 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.07.009>
25. Harrison S. T. L., Kotsiopoulos A., Stevenson R., Cilliers J. J. Mixing indices allow scale-up of stirred tank slurry reactor conditions for equivalent homogeneity. *Chemical Engineering Research and Design*. 2020. Vol. 153. P. 865–874. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.10.049>
26. Russell A. W., Kahouadji L., Mirpuri K., Quarmby A., Piccione P. M., Matar O. K., Luckham P. F., Markides C. N. Mixing viscoplastic fluids in stirred vessels over multiple scales: A combined experimental and CFD approach. *Chemical Engineering Science*. 2019. Vol. 208. Art. 115129. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.07.047>
27. Montante G., Paglianti A. How to evaluate the mass transfer resistances in dense solid–liquid suspensions. *Chemical Engineering Research and Design*. 2021. Vol. 167. P. 242–251. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.01.015>
28. Ngo H.-T., Kaci A., Kadri E.-H., Ngo T.-T., Trudel A., Lecrux S. Energy consumption reduction in concrete mixing process by optimizing mixing time. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 139. P. 810–816. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.293>
29. Arularasi V., Pachiappan T., Avudaiappan S., Raman S. N., Guindos P., Amran M., Fediuk R., Vatin N. I. Effects of admixtures on energy consumption in the process of ready-mixed concrete mixing. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 12. Art. 4143. <https://doi.org/10.3390/ma15124143>
30. Bernal S. A. et al. Report of RILEM TC 281-CCC: A critical review of the standardised testing methods to determine carbonation resistance of concrete. *Materials and Structures*. 2024. Vol. 57, No. 8. Art. 173. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02424-9>
31. Matschei T. et al. Test methods for CO₂ mineralization in cement-based materials: A review by RILEM TC 309-MCP. *Materials and Structures*. 2026. Vol. 59, No. 4. Art. 175. <https://doi.org/10.1617/s11527-026-03064-x>
32. Thierry M., Villain G., Dangla P., Platret G. Investigation of the carbonation front shape on cementitious materials: Effects of the chemical kinetics. *Cement and Concrete Research*. 2007. Vol. 37, No. 7. P. 1047–1058. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.04.002>
33. ISO 18650-2:2014. Building construction machinery and equipment — Concrete mixers — Part 2: Procedure for examination of mixing efficiency. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.
34. ASTM C94/C94M-24a. Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2024. https://doi.org/10.1520/C0094_C0094M-24A