

ЛОКАЛЬНА ПОДАЧА МОДИФІКУЮЧИХ КОМПОНЕНТІВ У ЗОНУ ВІБРАЦІЙНОГО УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ

Анотація. У статті розглянуто систему локальної подачі цементного молочка або рідких модифікуючих компонентів безпосередньо в зону ущільнення бетонної суміші. Обґрунтовано доцільність поєднання глибинного вібраційного впливу з дозованим гідравлічним введенням активної рідкої фази, що дозволяє підвищити ефективність формування щільної та однорідної структури бетону. Запропоновано конструктивно-технологічну схему системи, до складу якої входять бак для приготування цементного молочка або модифікуючої рідини, електрична мішалка, насос, манометр, запобіжний клапан, дросель, кран, напірна магістраль і глибинний вібратор із насадкою для локального введення рідини. Розглянуто послідовність роботи системи, яка передбачає приготування однорідної суспензії, її подачу під тиском до глибинного вібратора та введення через жиклери безпосередньо в активну зону ущільнення бетонної суміші. Показано, що локальне введення цементного молочка або модифікуючих компонентів у вібраційно збуджену суміш сприяє кращому змочуванню заповнювача, зменшенню кількості порожнин і сухих включень, покращенню контакту цементного каменю із заповнювачем та підвищенню однорідності бетонної структури. Встановлено, що ефективність роботи системи залежить від узгодження параметрів тиску, витрати, діаметра жиклерів, тривалості подачі та режиму вібраційного ущільнення. Одержані результати можуть бути використані для вдосконалення технології ущільнення бетонних сумішей, особливо у виробках складної форми, густоармованих конструкціях, жорстких і малорухомих сумішах, а також для подальшого обґрунтування параметрів систем локального введення рідких модифікуючих компонентів.

Ключові слова: бетонна суміш, ущільнення, глибинний вібратор, цементне молочко, модифікуючі компоненти, локальна подача, жиклер, насос, вібраційний вплив, однорідність бетону, пористість, технологія бетонування.

Постановка проблеми. У процесі виготовлення бетонних і залізобетонних виробів якість ущільнення бетонної суміші значною мірою визначає щільність, однорідність, міцність і довговічність готової конструкції, однак традиційний вібраційний вплив не завжди забезпечує рівномірний розподіл цементного тіста та модифікуючих компонентів у зоні ущільнення. Особливо це проявляється у виробках зі складною геометрією, значною товщиною шару або за використання жорстких і малорухомих сумішей, де можуть формуватися порожнини, сухі включення, зони розшарування та недостатнього зчеплення між цементним каменем і заповнювачем. У зв'язку з цим актуаль-

ним є розроблення системи локальної подачі цементного молочка або рідких модифікуючих компонентів безпосередньо в зону дії глибинного вібратора, що дозволяє поєднати механічне ущільнення з цільовим регулюванням структури бетонної суміші.

Аналіз останніх досліджень. У сучасних дослідженнях технології бетонування значна увага приділяється підвищенню якості ущільнення бетонних сумішей, оскільки саме цей процес визначає щільність структури, міцність, довговічність і експлуатаційну надійність бетонних та залізобетонних виробів. У роботі [1] розглянуто вплив конструктивних і технологічних чинників на роботу бетонних елементів, що підтверджує важливість формування якісної структури бетону ще на етапі укладання та ущільнення суміші.

Безпосередньо процес ущільнення бетонної суміші під дією вібрації досліджено у праці [2], де показано, що ефективність консолідації бетону залежить від параметрів вібраційної дії, властивостей суміші та умов передавання коливань у її об'єм. Теоретичні основи роботи вібраційних машин будівельної індустрії, особливості формування коливальних режимів і взаємодії робочих органів із технологічним середовищем узагальнено в праці [3], що є важливою базою для розроблення обладнання з глибинним вібраційним впливом.

У роботі [4] запропоновано систему локальної подачі цементного молочка або модифікуючих компонентів безпосередньо в зону ущільнення бетонної суміші. Такий технічний підхід дає змогу поєднати глибинну вібраційну дію з дозованим введенням активної рідкої фази в найбільш інтенсивну зону переміщення частинок суміші. Це створює передумови для покращення змочування заповнювача, зменшення пористості, підвищення однорідності структури та зниження ризику утворення сухих або недостатньо ущільнених ділянок.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із вивченням реологічної поведінки свіжого бетону під час вібраційного впливу. У роботі [5] запропоновано підхід до прогнозування радіуса дії глибинних вібраторів на основі поширення хвиль у бетонній суміші, що дає змогу оцінити ефективну зону ущільнення. У дослідженні [6] розглянуто реологічні властивості свіжого бетону у вібраційному стані та запропоновано модель, яка враховує зміну поведінки суміші під дією коливань. Це має важливе значення для вибору режимів локального введення цементного молочка або модифікуючих компонентів, оскільки ефективність їх розподілу залежить від в'язкості, рухливості та структурного стану суміші.

Узагальнення сучасних підходів до вібраційного ущільнення бетону наведено в огляді [7], де проаналізовано механізми ущільнення, основні фактори впливу та перспективні методи підвищення ефективності вібраційної технології. Особливу увагу в сучасних роботах приділено не лише механічному ущільненню, а й регулюванню властивостей бетонної суміші за допомогою добавок. Зокрема, у праці [8] досліджено вплив в'язкісно-модифікуючих добавок на повітряно-порову систему віброущільненого бетону, що підтверджує доцільність поєднання вібраційної дії з цільовим коригуванням складу суміші.

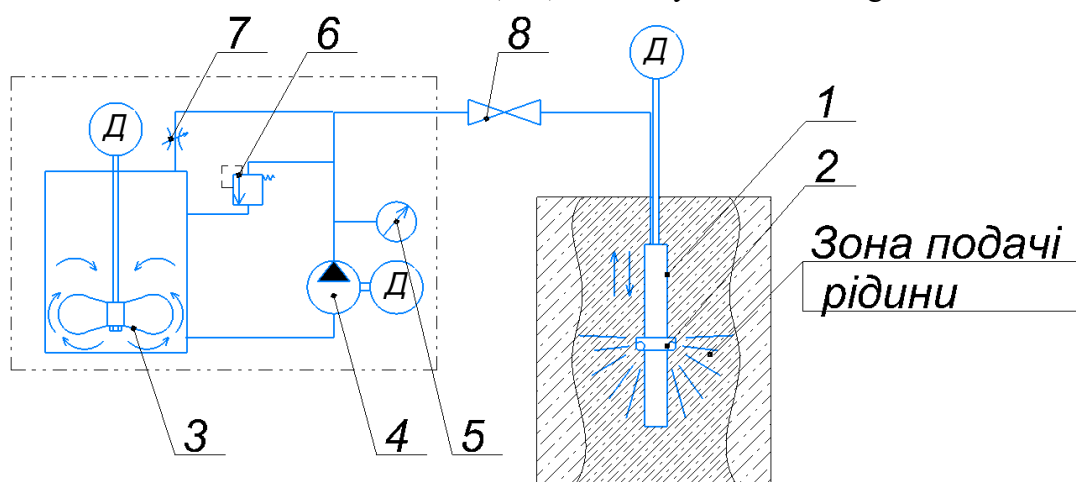
Перспективним напрямом є також використання систем контролю процесу ущільнення. У роботі [9] розроблено систему візуального моніторингу в реальному часі для оцінювання впливу вібрації на свіжий бетон, що дозволяє оперативно визначати характер розповсюдження вібраційної дії та стан ущільнення суміші. Такий підхід є важливим для подальшого розвитку автоматизованих систем, у яких подача модифікуючих компонентів може бути узгоджена з фактичним станом бетонної суміші в зоні ущільнення.

Мета досліджень. Метою досліджень є обґрунтування конструктивно-технологічного рішення системи локальної подачі цементного молочка або модифікуючих компонентів у зону ущільнення бетонної суміші, яка забезпечує сумісну дію глибинного вібратора та дозованого введення рідкої фази. Запропонований підхід спрямований на інтенсифікацію процесу ущільнення, рівномірний розподіл в'язучого і добавок у бетонній суміші, зменшення кількості пор та підвищення якості сформованої структури бетону.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для підвищення ефективності ущільнення бетонних сумішей запропоновано систему локальної подачі цементного молочка або рідких модифікуючих компонентів безпосередньо в зону дії глибинного вібратора. Основна ідея такого рішення полягає в тому, що в процесі ущільнення бетонної суміші до неї додатково вводиться активна рідка фаза, яка подається не по всьому об'єму форми, а саме в зону найбільш інтенсивного вібраційного впливу. Це дозволяє поєднати механічне руйнування внутрішніх структурних зв'язків суміші з локальним покращенням змочування заповнювача, перерозподілом цементного тіста та зменшенням кількості пор.

У традиційних технологіях ущільнення основним чинником формування щільної структури бетону є вібраційна дія. Під впливом коливань зменшується внутрішнє тертя між частинками, бетонна суміш тимчасово переходить у більш рухомий стан, а повітряні включення витісняються з її об'єму. Однак ефективність цього процесу залежить від складу суміші, її водоцементного відношення, рухливості, крупності заповнювача, товщини шару, геометрії виробу та параметрів вібратора. У разі недостатньої кількості рідкої фази або нерівномірного її розподілу в суміші можуть виникати сухі включення, порожнини, локальні зони зниженої щільності та погіршене зчеплення цементного каменю із заповнювачем.

Запропонована система (рисунок 1) дає змогу усунути ці недоліки шляхом дозованого введення цементного молочка або модифікуючих компонентів безпосередньо в активну зону ущільнення. На відміну від попереднього додавання добавок у загальний об'єм суміші, локальна подача забезпечує надходження рідкої фази саме туди, де вібраційний вплив створює найкращі умови для її розподілу. У результаті підвищується ефективність використання добавок, зменшуються втрати матеріалу, покращується рівномірність ущільнення та знижується ризик розшарування бетонної суміші.



1 – глибокий вібратор, 2 – насадка, 3 – бак з електричною мішалкою,
4 – насос, 5 – манометр, 6 – клапан запобіжний, 7 – дросель, 8 – кран.

Рисунок 1 – Принципова схема системи локальної подачі цементного молочка або модифікуючих компонентів в зону ущільнення бетонної суміші

Принципова схема системи містить кілька взаємопов'язаних функціональних вузлів: бак для приготування цементного молочка або рідкої модифікуючої композиції, електричну мішалку, насос, манометр, запобіжний клапан, дросель, кран, напірну магістраль і глибокий вібратор із насадкою для локального введення рідини. У бак подаються вода, цемент, а за необхідності — пластифікуючі, протиморозні, ущільнювальні або інші функціональні добавки. Електрична мішалка забезпечує перемішування компонентів до утворення однорідної суспензії, яка надалі подається насосом у напірну систему.

Наявність мішалки є важливою умовою стабільної роботи системи, оскільки цементне молочко є суспензією, частинки якої можуть осідати під дією сили тяжіння. Без постійного або періодичного перемішування можливе розшарування рідини, зміна її концентрації та нерівномірна подача в зону ущільнення. Тому бак із мішалкою виконує не лише функцію накопичення рідкого компонента, а й забезпечує підтримання його однорідності протягом усього технологічного циклу.

Після приготування цементного молочка насос подає його в напірну гідравлічну лінію. Манометр використовується для контролю робочого тиску, що дає змогу оператору або автоматизованій системі оцінювати стабільність подачі. Запобіжний клапан призначений для захисту системи від перевищення допустимого тиску. У разі засмічення жиклерів, перекриття крана або різкого зростання опору в магістралі клапан спрацьовує і запобігає пошкодженню насоса, трубопроводів та елементів глибокого вібратора.

Дросель забезпечує регулювання витрати рідини, що подається в зону ущільнення. Це дає змогу змінювати інтенсивність локального введення цементного молочка залежно від складу бетонної суміші, її рухливості, товщини шару, тривалості вібрування

та необхідного технологічного ефекту. Кран використовується для вмикання або припинення подачі, а також для можливого обслуговування системи.

Найважливішим елементом запропонованої системи є глибинний вібратор із насадкою, через яку рідкий компонент подається безпосередньо в бетонну суміш. Насадка може бути виконана з вбудованими жиклерами або каналами, розміщеними в зоні робочої булави. Під час занурення вібратора в бетонну суміш і запуску коливального режиму цементне молочко подається під тиском через жиклери в навколишній об'єм матеріалу. Оскільки в цій зоні частинки суміші перебувають у стані інтенсивного переміщення, рідка фаза швидше розподіляється між зернами заповнювача та заповнює порожнини.

Робота системи може бути подана як послідовність технологічних операцій. Спочатку в баку готується цементне молочко або модифікуюча рідина заданого складу. Потім глибинний вібратор занурюється в бетонну суміш на необхідну глибину. Після запуску вібраційного режиму вмикається насос, який подає рідину в насадку. Через жиклери рідина надходить у зону ущільнення, де під дією вібрації рівномірно розподіляється в локальному об'ємі суміші. Після завершення ущільнення подача припиняється, а вібратор переміщується в наступну робочу позицію.

Ефективність локальної подачі визначається узгодженням трьох основних процесів: приготування однорідної рідкої фази, її стабільного транспортування під заданим тиском і рівномірного введення в зону вібраційної дії. Якщо витрата рідини буде надто малою, технологічний ефект може бути недостатнім. Якщо ж витрата буде надмірною, виникає ризик локального збільшення водоцементного відношення, розшарування суміші або утворення зон із надлишком рідкої фази. Тому параметри подачі мають бути обґрунтовані з урахуванням властивостей бетонної суміші та режиму роботи вібратора.

Зміна діаметра жиклера або тиску в системі безпосередньо впливає на кількість рідини, що вводиться в бетонну суміш. Це дає змогу регулювати подачу відповідно до технологічних вимог. Для жорстких бетонних сумішей доцільно збільшувати інтенсивність локальної подачі, оскільки такі суміші мають більший внутрішній опір і потребують кращого змочування частинок. Для рухливих сумішей подача має бути обмеженою, щоб не допустити локального перезволоження і розшарування.

Особливістю запропонованої системи є те, що рідкий компонент вводиться в зону, де бетонна суміш перебуває у вібраційно збудженому стані. За таких умов знижується її ефективна в'язкість, підвищується рухливість частинок, полегшується проникнення цементного молочка між зернами заповнювача та прискорюється витіснення повітря. Це узгоджується з положеннями про зміну реологічної поведінки свіжого бетону під час вібраційного впливу [5, 6].

Застосування системи локальної подачі може бути особливо ефективним під час виготовлення виробів зі складною геометрією, густим армуванням або значною товщиною шару. У таких умовах звичайне вібрування не завжди забезпечує достатнє проникнення цементного тіста в усі локальні зони виробу. Дозоване введення цементного молочка безпосередньо в проблемну ділянку дозволяє підвищити щільність структури,

покращити контакт цементного каменю із заповнювачем і зменшити ризик утворення пустот.

Крім цементного молочка, система може використовуватися для введення рідких модифікуючих компонентів. До них можуть належати пластифікуючі добавки, прискорювачі або сповільнювачі тужавлення, протиморозні добавки, гідрофобізуючі або ущільнювальні компоненти. Це розширює технологічні можливості обладнання, оскільки дозволяє не лише ущільнювати бетонну суміш, а й локально змінювати її властивості залежно від умов формування виробу.

У разі роботи в умовах знижених температур особливого значення набуває можливість локального введення протиморозних добавок. Такий підхід дозволяє підвищити морозостійкість і технологічну надійність бетонування без надмірного збільшення кількості добавок у всьому об'ємі суміші. При цьому важливо забезпечити рівномірний розподіл добавки в зоні ущільнення, щоб уникнути концентраційних неоднорідностей, які можуть негативно вплинути на структуру бетону.

Система локальної подачі також може бути інтегрована з засобами контролю ущільнення. Зокрема, перспективним є використання візуального або сенсорного моніторингу стану бетонної суміші під час вібраційного впливу. У роботі [9] показано можливість застосування системи візуального моніторингу для оцінювання ефектів вібрації у свіжому бетоні. Поєднання такого контролю з локальною подачею рідких компонентів створює передумови для автоматичного регулювання тиску, витрати та тривалості введення залежно від фактичного стану суміші.

До основних переваг запропонованої системи можна віднести локальне введення активної рідкої фази саме в зону найбільш інтенсивного ущільнення; можливість регулювання тиску і витрати; підвищення рівномірності розподілу цементного тіста або добавок; зменшення кількості пор і сухих включень; покращення контакту між цементним каменем і заповнювачем; зниження витрат модифікуючих компонентів за рахунок їх цільового використання; можливість адаптації системи до різних складів бетонних сумішей.

Разом з тим ефективність роботи системи залежить від правильного вибору конструктивних і технологічних параметрів. Недостатній тиск може не забезпечити проникнення рідини в ущільнюваний об'єм, тоді як надмірний тиск може спричинити локальне розмивання структури суміші. Занадто малі отвори жиклерів можуть засмічуватися цементними частинками, а надто великі — створювати нерівномірне надходження рідини. Тому конструкція насадки має забезпечувати надійну роботу в умовах контакту з абразивним і в'язким середовищем.

Важливою умовою є синхронізація моменту подачі рідини з роботою глибинного вібратора. Найбільш доцільним є введення цементного молочка або модифікуючих компонентів після початку вібраційної дії, коли суміш уже перебуває у стані зниженої в'язкості та підвищеної рухливості. Завершення подачі доцільно виконувати до припинення вібрування, щоб залишкові коливання забезпечили остаточний розподіл рідкої фази в локальному об'ємі бетонної суміші.

Висновки: Обґрунтовано доцільність поєднання глибинного вібраційного ущільнення бетонної суміші з локальною подачею цементного молочка або модифікуючих компонентів безпосередньо в активну зону дії вібратора. Показано, що дозоване введення рідкої фази під час вібрування забезпечує кращий розподіл в'язучого, покращує контакт цементного каменю із заповнювачем, зменшує ймовірність утворення порожот і підвищує однорідність бетонної структури. Запропонована система може бути використана для підвищення якості ущільнення бетонних сумішей, особливо у виробках складної форми, густоармованих конструкціях і за умов застосування жорстких або малорухомих сумішей.

ЛІТЕРАТУРА

1. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.011> Bending performance of dapped-end beams having web opening: Experimental and numerical investigation / C. Aksoylu та ін. *Structures*. 2023. Т. 48. С. 736–753. URL: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.110>
2. Date, S., Goryozono, Y., & Hashimoto, S. (2012). Study on Consolidation of Concrete with Vibration. *Physics Procedia*, 25, 325–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.091>
3. Назаренко І. І. Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії : навч. посіб. М.; Київ : КНУБА, 2007. 230 с.
4. Нестеренко М. М., Склярєнко Т. О., Бугрова Т. М., Гавріков В. В. Система локальної подачі цементного молочка або модифікуючих компонентів в зону ущільнення бетонної суміші. Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки : матеріали VIII Всеукр. наук.-техн. конф., м. Полтава, 24 квіт. 2025 р. Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2025. С. 38–40.
5. Banfill, P. F. G., Teixeira, M. A. O. M., & Craik, R. J. M. (2011). Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 932–941.
6. Li, Z., & Cao, G. (2019). Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state. *Cement and Concrete Research*, 120, 217–226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.020>
7. Zhao, X., Huang, Y., Dong, W., Liu, J., & Ma, G. (2024). A review of compaction mechanisms, influencing factors, and advanced methods in concrete vibration technology. *Journal of Building Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110757>
8. Zhang, J., Gao, X., & Yu, L. (2020). Improvement of viscosity-modifying agents on air-void system of vibrated concrete. *Construction and Building Materials*, 239, 117843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117843>
9. Tian, Z., Sun, X., Su, W., Li, D., Yang, B., Bian, C., & Wu, J. (2019). Development of real-time visual monitoring system for vibration effects on fresh concrete. *Automation in Construction*, 98, 61–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.025>

REFERENCES

1. Aksoylu, C., Özkılıç, Y. O., Çeledir, E., & Arslan, M. H. (2023). Bending performance of dapped-end beams having web opening: Experimental and numerical investigation. *Structures*, 48, 736–753. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.110>

2. Date, S., Goryozono, Y., & Hashimoto, S. (2012). Study on consolidation of concrete with vibration. *Physics Procedia*, 25, 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.091>
3. Nazarenko, I. I. (2007). *Vibratsiini mashyny i protsesy budivelnoi industrii: Navchalnyi posibnyk* [Vibration machines and processes of the construction industry: Textbook]. KNUBA.
4. Nesterenko, M. M., Skliarenko, T. O., Buhrova, T. M., & Havrikov, V. V. (2025). Systema lokalnoi podachi tsementnoho molochka abo modyfikuiuchykh komponentiv v zonu ushchilnennia betonnoi sumishi [System of local supply of cement slurry or modifying components to the compaction zone of concrete mixture]. In *Stvorennia, ekspluatatsiia i remont avtomobilnoho transportu ta budivelnoi tekhniki: Materialy VIII Vseukrainskoi naukovotekhnichnoi konferentsii* (Poltava, April 24, 2025) (pp. 38–40). National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”.
5. Banfill, P. F. G., Teixeira, M. A. O. M., & Craik, R. J. M. (2011). Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 932–941. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.011>
6. Li, Z., & Cao, G. (2019). Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state. *Cement and Concrete Research*, 120, 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.020>
7. Zhao, X., Huang, Y., Dong, W., Liu, J., & Ma, G. (2024). A review of compaction mechanisms, influencing factors, and advanced methods in concrete vibration technology. *Journal of Building Engineering*, 110757. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110757>
8. Zhang, J., Gao, X., & Yu, L. (2020). Improvement of viscosity-modifying agents on air-void system of vibrated concrete. *Construction and Building Materials*, 239, 117843. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117843>
9. Tian, Z., Sun, X., Su, W., Li, D., Yang, B., Bian, C., & Wu, J. (2019). Development of real-time visual monitoring system for vibration effects on fresh concrete. *Automation in Construction*, 98, 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.025>

Received 22.04.2026.
Accepted 27.04.2026.
Published 30.04.2026

Local supply of modifying components to the vibration compaction zone of a concrete mixture

The article considers a system for the local supply of cement slurry or liquid modifying components directly into the compaction zone of a concrete mixture. The feasibility of combining deep vibration action with dosed hydraulic introduction of an active liquid phase is substantiated, which makes it possible to improve the formation of a dense and homogeneous concrete structure. A structural and technological scheme of the system is proposed, which includes a tank for preparing cement slurry or modifying liquid, an electric mixer, a pump, a pressure gauge, a safety valve, a throttle valve, a shut-off valve, a pressure line, and an internal vibrator with a nozzle for local liquid injection. The sequence of system operation is considered, which involves preparing a homogeneous suspension, supplying it under pressure to the internal vibrator, and injecting it through nozzles directly into the active compaction

zone of the concrete mixture. It is shown that the local introduction of cement slurry or modifying components into the vibration-activated mixture improves aggregate wetting, reduces voids and dry inclusions, improves the contact between cement stone and aggregate, and increases the homogeneity of the concrete structure. It is established that the system efficiency depends on the coordination of pressure, flow rate, nozzle diameter, supply duration, and vibration compaction mode. The obtained results can be used to improve concrete mixture compaction technology, especially for products of complex shape, densely reinforced structures, stiff and low-workability mixtures, as well as for further substantiation of the parameters of local injection systems for liquid modifying components.

Keywords: concrete mixture, compaction, internal vibrator, cement slurry, modifying components, local supply, nozzle, pump, vibration action, concrete homogeneity, porosity, concreting technology.

Гавріков Володимир Володимирович – аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-6893-7739>

Бугрова Тетяна Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри нафтогазової інженерії та технологій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2690-4131>

Havrikov Volodymyr – Postgraduate student of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic».

ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-6893-7739>

Buhrova Tetiana – PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Engineering and Technology National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic».

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2690-4131>