

ЗАСТОСУВАННЯ УЗАГАЛЬНЕНИХ КРИТЕРІЇВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ОЦІНКИ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ПЕРЕМІШУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ СУМІШЕЙ

Назаренко І.І., Клименко М.О.

Київський національний університет будівництва і архітектури

Анотація. Розглянуто процес перемішування будівельних сумішей у барабані гравітаційного бетонозмішувача з точки зору енергетичного балансу системи «барабан змішувача-бетонна суміш» на умовах дискретної та континуальної моделі бетонної суміші. Запропоновані критерії робочого процесу перемішування та критерії подібності процесів перемішування бетонних сумішей, що ґрунтуються на передумовах одночасного протікання процесів диспергування, масопереносу та фізико-хімічних перетворень.

Ключові слова: барабан змішувача, енергетичний баланс, енергія перемішування, критерії робочого процесу.

Вступ

Дослідження, що описують процес перемішування в гравітаційних бетонозмішувачах, ґрунтуються переважно на розгляді робочого процесу з попередньою оцінкою ступеня впливу на ефективність перемішування геометрії барабана та визначення параметрів гравітаційних змішувачів: форми барабана, співвідношення діаметрів і довжин відповідних частин барабана, наявності й розміщення лопатей, частота обертання барабана та продуктивність змішувача. Проте такий підхід потребує прийняття певних припущень до досліджень щодо прийнятого уявлення про процес руху суміші в барабані. Для повного сприймання процесу перемішування послідовно розглядається модель середовища, що на першому етапі зводиться до точки, а потім до в'язко-пластичної суміші. На першому етапі визначаються можливі режими роботи, а на другому – енергетика системи. Під час обертання барабана з визначеною частотою суміш лопатями і під дією сил тертя по внутрішній поверхні барабана піднімається на деяку висоту, а потім завдяки гравітаційним силам падає вниз. Цей процес повторюється кілька разів і тому вихідні компоненти, перемішуючись, утворюють однорідну суміш. Ступінь участі лопатей і внутрішніх стінок барабана в процесі перемішування визначається не тільки їх параметрами, а й властивостями бетонної суміші. Визначена форма барабана і встановлення лопатей дозволяють не тільки забезпечити наявність в елементарному об'ємі вихідних компонентів у необхідній пропорції за мінімальний час, а й розширити можливості

використання циклічних гравітаційних бетонозмішувачів.

Енергетичний баланс складної системи, до яких належить також і бетонна суміш, розглядається багатьма дослідниками [1, 4, 11] на умовах дискретної та континуальної моделі, а основна ідея визначення критеріїв подібності процесів перемішування бетонних сумішей ґрунтується на передумовах, що цей процес супроводжується одночасним протіканням процесів диспергування, масопереносу та фізико-хімічних перетворень.

Аналіз публікацій

У розгляді руху суміші в барабані гравітаційних бетонозмішувачів уважається [7, 9, 10], що геометричні характеристики барабана мають бути визначені за умови максимального підйому суміші внутрішньою поверхнею барабана з лопатями зі збільшеним коефіцієнтом циклічності. Проте такий підхід не враховує характеру взаємодії компонентів системи «барабан змішувача-бетонна суміш». У роботах [1–4, 6] зроблена спроба перенесення певних властивостей середовища на досліджувану модель за допомогою використання критерію Рейнольдса та критерію Фруда.

Своєрідним доповненням до згаданих параметрів можуть бути використані деякі критерії, остосовані в роботі Ю.О. Верігіна [5] для оцінки процесів перемішування складних середовищ.

Мета і постановка завдання

З огляду на проведений аналіз попередніх досліджень завдання роботи полягає в обґрунтуванні методів розгляду системи «ба-

рабан змішувача-бетонна суміш» через оцінку енергетичного балансу та критеріїв робочого процесу. Установлення основних параметрів, які є складниками загального виразу балансу енергії, що відображає процес перемішування, а також використання підходу визначення критеріїв на основі загального критерію термодинамічної подібності, який відтворює процес утворення суміші на основі загальних законів зміни її стану незалежно від структури системи, що розглядається.

Основний матеріал дослідження

Згідно із значно поширеною практикою оцінки балансу енергії за дискретною моделлю прийнято вважати, що внутрішня енергія хаотичного руху частинок суміші генерується не тільки за рахунок дисипації середнього руху, а й за рахунок поперечних сил руху частинок уздовж барабана в межах виділеного об'єму. Ці сили в теорії руху дисперсних систем прийнято називати силами Магнуса, як такі, що діють у поперечному напрямку під час обтікання заповнювачів бетонної суміші. Окрім генерації в системі відбувається також і зменшення внутрішньої енергії за рахунок переходу в теплову енергію внаслідок непружного тертя компонентів бетонної суміші між собою. Енергія руху в приведеному об'ємі V розглядається як доданок кінетичної E_k і внутрішньої E_v енергій:

$$\begin{aligned} E_k &= \frac{1}{2} \int_V \rho V^2 dV ; \\ E_v &= \frac{1}{2} \int_V \rho \bar{E} dV , \end{aligned} \quad (1)$$

де \bar{E} – внутрішня енергія одиниці об'єму.

Баланс повної енергії складається із роботи зовнішніх і внутрішніх сил та енергії, підведеної до системи:

$$\begin{aligned} \frac{d(E_k + E_v)}{dt} &= \\ &= \int_V (FV + \rho gh + E_m + E_o) dV , \end{aligned} \quad (2)$$

де F – сила, що діє в системі «частинка – цементне тісто»; E_m – енергія Магнуса; E_o – дисипативний складник енергії, який у загальному випадку враховує також і ступінь

диспергування під час руйнування структурних елементів.

Енергія робочої поверхні змішувача створює напружено-деформований стан бетонної суміші з перенесенням елементарних об'ємів суміші з одного стаціонарного стану в інший, утворенням зсуву та площини ковзання по поверхнях розділу фаз у порушеній структурі суміші й на внутрішній поверхні барабана. Тобто виникають масообмінні процеси, які викликають дисипацію енергії, зокрема й процеси, пов'язані з хімічними реакціями системи «вода-цемент» та молекулярно-кінетичними ефектами за умови диспергування структурних елементів.

З урахуванням масових сил системи «поверхня барабана-бетонна суміш», які є визначальними для оцінки параметрів робочого органа, загальний баланс енергії (2) ґрунтується на рівняннях суцільного середовища, що рухається під впливом поверхні барабана.

Рух суцільного середовища описується математичною моделлю

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla \sigma + \vec{f} , \quad (3)$$

де $\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V}$ – повна похідна в часі t ; $\vec{V} = \{V_r, V_\varphi, V_z\}$ – вектор швидкості елементарного об'єму суміші; V_r, V_φ, V_z – радіальна, тангенціальна й осьова компоненти вектора швидкості потоку в напрямках r, φ і z (рис. 1); ρ – густина суміші; ∇ – диференціальний оператор Гамільтона; σ – тензор напружень; \vec{f} – вектор сили, віднесений до одиниці маси.

Для стаціонарного руху, що в першому наближенні відповідає руху бетонної суміші, можна прийняти

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = 0 , \quad (4)$$

а модель (3) представляється диференціальним рівнянням Нав'є-Стокса.

За граничні умови приймаються:

– непроникність стінки, якщо $r = R, V_r = 0$;

– ступінь спільного руху системи «стінка-суміш» (прилипання суміші до стінок) за умови $r = R, V_\varphi = 0; V_z = 0$.

Тут $V_r, V_\phi; V_z$ – радіальний, тангенційний і осьовий складники швидкості потоку; r – радіус елементарного об'єму суміші; R – радіус барабана змішувача.

Характер розподілення гідростатичного тиску p суміші на стінку:

$$\text{якщо } r = R, \quad p = f_p(r, \phi, z).$$

Виділяючи за головну фізичну сутність явища, прийнятий ламінарний характер руху, кутову швидкість елементарного об'єму потоку можна записати у вигляді

$$\omega_0 = \frac{1}{2R} \left(\frac{\partial}{\partial r} (rV_\phi) - \frac{\partial V_r}{\partial \phi} \right). \quad (5)$$

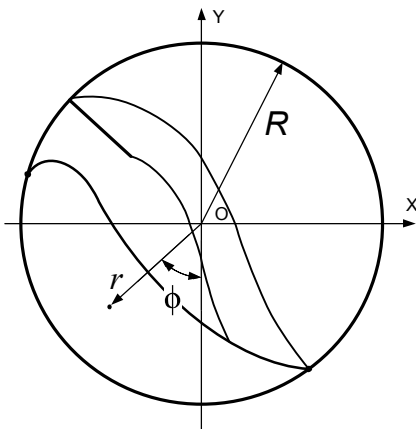


Рис. 1. Розрахункова схема моделі руху суцільного середовища

Зазвичай для опису руху в'язкого середовища, яким є бетонна суміш, модель (3) представляється системою диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса [3, 6, 10], рішення якої зводиться до визначення швидкості руху рідини та тиску. Оскільки ця процедура розв'язання рівнянь відома [3, 11] і, наприклад, є вирішення для систем, подібних за формою змішувача, у роботі досліджуються зведені безрозмірні складники рівняння руху, визначені на основі класичної теорії розмірностей для двовимірної системи координат:

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{V_r}{R\omega}; & K_2 &= \frac{V_\phi}{R\omega}; \\ K_3 &= \frac{r}{R}; & K_4 &= \frac{(p - p_0)}{\mu\omega}; \\ K_5 &= \frac{R\omega^2}{g}; & K_6 &= \frac{\rho\omega R}{\mu}, \end{aligned} \quad (6)$$

де r, ϕ – радіальна й кутова координати (рис. 1); V_r, V_ϕ – радіальний і кутовий складники швидкості; ω – кутова швидкість; p, p_0 – тиск у суміші й атмосферний відповідно; μ – коефіцієнт в'язкості.

Доповненням до наведених параметрів можуть бути використані деякі критерії, застосовані в роботі Ю.О. Верігіна для оцінювання процесів перемішування та диспергування [5]:

$$\begin{aligned} k_{n1} &= \frac{F}{\rho V^2}; \\ k_{n2} &= \frac{gl}{V^2}; \\ k_{n3} &= \frac{F_i}{l^2 E}, \end{aligned} \quad (7)$$

де l – характерний розмір перерізу мікрооб'єму; F – загальне питоме зусилля на стінці барабана; F_i – поточне значення зусилля.

Критерій (7) отриманий на основі критерію подібності Г.Н. Покровського і І.С. Федорова, який використовується в роботі В.І. Баловнева під час моделювання процесів дослідження ґрунтів [1]

$$\frac{TdS}{dE} - \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) d \left(\frac{1}{\rho} \right) = idem, \quad (8)$$

де TdS – енергія (ентропія), що підводиться робочим органом; dE – загальна енергія системи.

Рівняння балансу повної енергії можна представити з позиції розгляду суцільного середовища зі складниками його напружено-деформованого стану

$$dE = dE_k + dE_n + dE_{np}, \quad (9)$$

де dE_k, dE_n, dE_{np} – відповідно кінетична, потенційна і пружна енергія деформування.

Розглядаючи енергію E_{np} у межах пружної деформації відповідно до залежності $\sigma = E\varepsilon$, де E – модуль пружності, а ε – відносна деформація, вираз для визначення енергії можна представити у вигляді [5]

$$dE_{np} = 0,5\sigma^2 \Delta V / E, \quad (10)$$

де ΔV – елементарний об'єм суміші.

Інші складники енергетичного балансу досліджуваної системи оцінюються шляхом визначення критеріїв подібності та їх параметрів.

Застосування критеріїв (6) розширює уявлення про процес утворення бетонної суміші. Аналіз складників цих критеріїв указує, що за узагальнений критерій можна прийняти співвідношення критерію K_6 (критерій Рейнольдса) та критерію K_5 (критерій Фруда)

$$K_{p,\phi} = \rho g R / \mu \omega, \quad (11)$$

який за фізичною сутністю визначає співвідношення масових сил і сил тертя.

Для з'ясування впливу критерію (11) на процес перемішування розглянемо модель повороту сегмента суміші (рис. 2), поверхня якого буде підніматися за умови, коли кут підйому $\delta > \phi$ (ϕ – кут тертя).

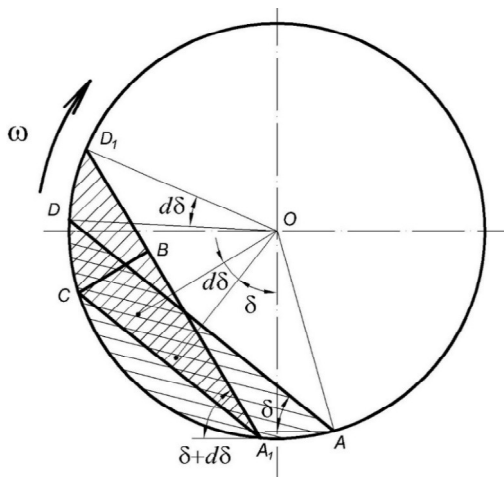


Рис. 2. Модель суміші як суцільного середища

Тоді, за повороту барабана на кут $d\delta$ барабан піднімає частину суміші, яка змінює своє положення з площини AD у нове положення A_1D_1 з наступним зсуванням у вихідне положення, здійснюючи таким чином перемішування суміші.

Утворений клин A_1D_1C має площу перерізу

$$dS = 0,5 A_1 D_1 \cdot CB = 0,5 AD \cdot CB, \quad (12)$$

де $AD = D_{cep} \sin \delta$. Здійснивши тригонометричні перетворення $\sin \delta = d\delta$ і $\cos \delta = 1$, отримаємо

$$\begin{aligned} dS &= 0,5 D_{cep} \sin \delta \times D_{cep} \sin \delta d\delta = \\ &= 0,5 D_{cep}^2 \sin^2 \delta d\delta. \end{aligned} \quad (13)$$

Оскільки поворот барабана, а отже, і процес зсування суміші і, як наслідок, перемішування здійснюється безперервно, то під час повороту барабана за час dt відбувається поворот на кут $d\delta$, а за одиницю часу площа суміші, що зсувається, становитиме

$$\begin{aligned} S' &= \frac{dS}{dt} = 0,5 D_{cep}^2 \sin^2 \delta \frac{d\delta}{dt} = \\ &= 0,5 D_{cep}^2 \omega \sin^2 \delta, \end{aligned} \quad (14)$$

за умови, що $d\delta/dt = \omega$.

Оскільки площа сегмента, що займає суміш у барабані, становить $S' = 0,5 D_{cep}^2 (2\delta - \sin 2\delta)$, то відношення площі суміші, що повертається S' , до вихідної площі буде визначати інтенсивність перемішування

$$I = \frac{S'}{S} = \frac{4\omega \sin^2 \delta}{2\delta - \sin 2\delta}. \quad (15)$$

Інтенсивність суттєво залежить від частоти обертання барабана, яка, у свою чергу, виходячи з максимального підйому суміші, визначається за залежністю [2, 7]

$$\omega = \left(\frac{2,1 \dots 2,4}{\sqrt{D_{max}}} \right), \quad (16)$$

де D_{max} – діаметр найбільшої циліндричної частини бетонозмішувача.

Висновки

1. Доведено доцільність застосування методу оцінювання системи «барабан змішувача-бетонна суміш» через енергетичний баланс системи та запропоновані критерії робочого процесу.

2. Отримані в роботі результати можуть бути використані в подальшому для уточнення та вдосконалення методів наявних інженерних розрахунків барабаних апаратів та ступеня їх взаємодії з оброблюваним середовищем.

Література

- Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. – Изд. 4-е, испр. – Москва: Издательство ЛКИ, 2007. – 400 с.

2. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин: учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. – Москва: Машиностроение, 1994. – 432 с.
3. Капранова А.Б. Стохастическое описание движения осветленной фракции суспензии // Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология. – Иваново, 2004. – Т. 47. – Вып. 6. – С. 99–101.
4. Волков М.В., Королев Л.В., Таршис М.Ю. Исследование механики движения сыпучего материала в поперечном сечении смесителя гравитационно-пересыпного действия // Фундаментальные исследования. Технические науки. – № 5. – 2014. – С. 692–696.
5. Веригин Ю.А. Термодинамический анализ процесса смесеобразования бетонов и других дисперсных систем // Тез. докл. Всесоюз. конф. «Фундаментальные исследования и новые технологии в строительном материаловедении». – Белгород: БТИСМ, 1989. – Ч. 6. – С. 72–73.
6. Демущий В.П. Моделі неklasичних середовищ: Нац. акад. наук. Укр., Харк. держ. ун-т, Технол. центр. – Харків: ХФТЦ, 1994. – 72 с.
7. Емельянова И.А., Анищенко А.И. Определение минимальной частоты вращения корпуса бетоносмесителя гравитационно-принудительного // Механизация строительства. – 2012. – № 1. – С. 2–5.
8. Морозов М.К. Механическое оборудование заводов сборного железобетона. – Київ: Вища школа, 1986. – 311 с.
9. Новиков А.А. Интенсивность смешивания бетонных смесей в барабанных смесителях непрерывного действия // Строительные и дорожные машины. – 1978. – № 2. – С. 23–24.
10. Сівко В.Й. Питання теорії сумішей // Труды научн.-техн. конф. «Прогрессивные технологии и машины для производства стройматериалов, изделий и конструкций». – Полтава, 1996. – С. 153–157.
11. Серебренников А.А. и др. Интенсификация смешивания в гравитационном бетоносмесителе // Строительные и дорожные машины. – 2000. – № 12. – С. 34–35.
4. Volkov M.V., Korolev L.V., Tarshis M.Yu. The study of the mechanics of the movement of bulk material in the cross section of the mixer gravity-overburden action // Fundamental research. Technical science. – No. 5. – 2014. – S. 692–696.
5. Verigin Yu.A. (1989). Termodinamicheskiy analiz protsessa smeseobrazovaniya betonov i drugih dispersnyih system [Thermodynamic analysis of the process of mixing concrete and other dispersed systems]. Tez.dokl. Vsesoyuzn. konf. «Fundamentalnye issledovaniya i novyye tehnologii v stroitelnom materialovedenii» [Abstracts «Fundamental research and of new technologies in building materials»]. Belgorod, BTISM Publ. – Vol. 6. – S. 72–73.
6. Demutskiy V.P. (1994). Modeli neklasichnih seredovisch [Models nonclassical environments]. National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv state university, HFTTs Publ., 72.
7. Emelyanova I.A., Anischenko A.I. (2012). Opredelenie minimalnoy chastoty vrascheniya korpusa betonosmesitelya gravitatsionno-prinuditelnogo [Determination of the minimum speed of the mixer housing compulsory]. Mehanizatsiya stroitelstva [Mechanization of the construction]. – No 1. – S. 2–5.
8. Morozov M.K. (1986). Mehanicheskoe oborudovanie zavodov sbornogo zhelezobetona [Mechanical equipment of factories of precast concrete]. Kiyv, Vischa shkola Publ., 311.
9. Novikov A.A. (1978). Intensivnost smeshivaniya betonnyih smesey v barabannyih smesitelyah nepreryvnogo deystviya [The intensity of mixing concrete mixes drum continuous mixers]. Stroitelnyie i dorozhnyie mashiny [Building and road machines]. – No. 2. – S. 23–24.
10. Sivko V.Y. (1996). Pitannya teorii sumishey [Problems in the theory of mixtures]. Trudyi nauchn.-tehn. konf. «Progressivnyie tehnologii i mashinyi dlya proizvodstva stroymaterialov, izdeliy i konstruktsiy» [Advanced technologies and machines for production of building materials, components and structures]. Poltava, S.153–157.
11. Serebrennikov A.A. and others (2000). Intensifikatsiya smeshivaniya v gravitatsionnom betonosmesitele [The intensification of mixing in the gravity mixer]. Stroitelnyie i dorozhnyie mashiny [Building and road machines]. – No.12 – S. 34–35.

References

1. Gnedenko B.V., Kovalenko I.N. Introduction to queuing theory. – Ed. 4th, rev. – M.: Publishing house LCI, 2007. – 400 p.
2. Balovnev V.I. (1994). Modelirovanie protsessov vzaimodeystviya so sredoy rabochih organov dorozhno-stroitelnyih mashin: ucheb. posobie dlya vuzov [Modeling of the processes for interaction with the environment of working bodies of road and constructional machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 432.
3. Kapranova A.B. A stochastic description of the motion of a clarified suspension fraction // Izv. Universities. Chemistry and chemical technology. – Ivanovo, 2004. – Т. 47. – No. 6. – S. 99–101.

Назаренко Иван Иванович, д.т.н., проф.,
+380-50-740-6070, i_nazar@i.ua,
Клименко Микола Олександрович, к.т.н., доц.,
+380-50-131-7677, klymenko.2012@gmail.com,
Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський просп., 31, Київ, Україна.

Application of general energy assessment criteria for preparing building mixtures

Abstract. The goal of this work is to describe mixing process of mortars in concrete mixer drums in terms of energy balance of "drum mixer-concrete mixture" system as discrete and continuum models. The analysis of existing studies and publications of the movement of building mixtures particles for internal mixing tools, such as blades and the inner surface of the drum has been made. The main **problem** is highlighted, namely, that of the methodology of analysis and evaluation of the efficiency of the mixing apparatus of the blades, analysis of the movement of particles in the mixture. **Methodology.** Researches in this work are of analytical character. **Results.** Using the results of these studies allows to improve mixing process by taking into account the workflow criteria proposed. Mixing processes similarity criteria based on assumptions simultaneous processes of dispersion, mass transfer, physical and chemical transformations are studied. Analytical studies highlight that as a result of it will be possible to develop working bodies with specified parameters of the blades and the shape of the drum, whose effectiveness can be assessed even at the stage of designing the working body. This makes it possible to compare the operating modes of the equipment and evaluate the energy loss for the tasks of mixing mixtures with predetermined properties. **Practical value.** All the proposed methods are aimed at minimizing the mixing time without loss of the mixture quality. Criteria are proposed for evaluating mass transfer processes that cause energy dissipation, including processes associated with chemical reactions of the water-cement system and molecular kinetic effects in the dispersion of structural elements. **Originality.** The results received can be used for further improvement of mixing process with minimal losses. The work has scientific and practical interest for concrete drum mixer designers.

Key words: mixer drum, energy balance, mixing energy, workflow criteria.

Nazarenko Ivan, Doctor of Sciences, Professor, tel. +380-50-740-6070, i_nazar@i.ua,

Klymenko Mykola, PhD, Associate Professor, tel. +380-50-131-7677, klymenko.2012@gmail.com, Kyiv National University of Construction and Architecture, Povitroflotsky av., 31, Kyiv, Ukraine.

Применение обобщенного критерия энергетической оценки рабочего процесса перемешивания строительных смесей

Аннотация. Проведен анализ существующих исследований движения частиц строительных смесей по внутренним смесительным рабочим органам, таким, как лопасти и внутренняя поверхность барабана, Рассмотрен процесс перемешивания строительных смесей в барабане гравитационного смесителя с точки зрения энергетического баланса системы на условиях дискретной и континуальной модели бетонной смеси. Предложенные критерии рабочего процесса перемешивания и критерии подобия процессов перемешивания бетонных смесей, основанных на предпосылках одновременного протекания процессов диспергирования, массопереноса и физико-химических превращений. Также предложены критерии оценки массообменных процессов, которые вызывают рассеивание энергии, в том числе и процессы, связанные с химическими реакциями системы «вода-цемент» и молекулярно-кинетическими эффектами при диспергировании структурных элементов. В результате использования предложенного анализа возможно разрабатывать рабочие органы с заданными параметрами лопастей и формой барабана, эффективность которых можно будет оценить еще на этапе проектирования рабочего органа. Это дает возможность сравнить режимы работы оборудования и оценить энергетические потери на выполнение задач перемешивания смесей с наперед заданными свойствами. При этом минимизируется время перемешивания без потери качества смеси.

Ключевые слова: смесительный барабан, энергетический баланс, энергия перемешивания, критерии рабочего процесса.

Назаренко Иван Иванович, д.т.н., проф., + 380-50-740-6070, i_nazar@i.ua,

Клименко Николай Александрович, к.т.н., доц., + 380-50-131-7677, klymenko.2012@gmail.com, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Воздухофлотский просп., 31, Киев, Украина