

# МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ БУДІВЕЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 536.24:66.045.132

DOI 10.31649/2311-1429-2018-2-57-62

С. С. Титар  
Б. Є. Дарієнко

## ВПЛИВ ВІБРАЦІЇ ПУЧКА ТРУБ НА ТЕПЛООБМІН З ЩІЛЬНИМ ШАРОМ СИПУЧОГО МАТЕРІАЛУ

Одеський національний політехнічний університет

Одним з перспективних засобів інтенсифікації теплообміну щільного шару з поверхнею є вібрація. У ряді випадків вібрація дозволяє не тільки значно інтенсифікувати процес теплообміну, але й забезпечити стабільність руху шару. Данні по теплообміну щільного гравітаційного шару з поверхнею в умовах вібрації, що наведені у літературі, обмежуються дуже вузьким діапазоном режимних і геометричних характеристик із-за чого не мають рекомендації з методики розрахунку та проектування теплообмінних апаратів.

Процес теплообміну з поверхнею відрізняється порівняно низькою інтенсивністю, а для матеріалів з високими коефіцієнтами внутрішнього і зовнішнього тертя часто не може бути здійснений через нестабільність руху. У таких випадках раціонально використання рекуперативних апаратів з різними схемами вібрації.

Вібрація поверхні теплообміну дозволяє не тільки значно інтенсифікувати процес теплообміну, але й забезпечити стабільність руху шару. Данні по теплообміну щільного гравітаційного шару з пучками труб в умовах вібрації, що наведені у літературі, обмежуються дуже вузьким діапазоном режимних і геометричних характеристик із-за чого не містять рекомендації з методики розрахунку та проектування теплообмінних апаратів.

Ключові слова : щільний шар , теплообмін, інтенсивність , вібрація, термічний опір.

### Вступ

Нагрів (охолодження) сипучого матеріалу можливо організувати двома шляхами (за рахунок міжкомпонентного теплообміну або через поверхню). У першому випадку безпосередній контакт матеріалу з теплоносієм часто обмежений (великий гідравлічний опір, можливість виносу частинок, забруднення, окислення і таке інше). У подібних випадках нагрівання (охолодження) може здійснюватися другим шляхом – у поверхневих апаратах, які скомпоновані з поперечно обтічних трубних пучків, а матеріал рухається у вигляді щільного шару.

### Основна частина

Як зазначалося вище, відомість про вплив вібрації на інтенсифікацію теплообміну щільного гравітаційного шару сипучого матеріалу з поверхнею наведені в роботах [1, 2] (теплообмін в умовах вібрації одиночного циліндру) та роботах Львова Д. П. Афоніна В. А. (теплообмін в умовах вібрації трубного пучку) не дозволяють створити методики розрахунку та проектування теплообмінних апаратів в умовах вібрації.

Вказані причини визначили постановку основної задачі досліджень та сформулювати мету досліджень. Мета – вивчення впливу вібрації на теплообмін щільного гравітаційного шару сипучого матеріалу з пучками труб для розробки рекомендацій з методики розрахунку теплообмінних апаратів з віброгравітаційним шаром.

Для проведення досліджень була створена експериментальна установка, яка зображена на рис.1.

Сипкий матеріал з нахилоного жолобу 2 під дією сил тяжіння у вигляді щільного шару потрапляє у шахту 16, де в зоні рівномірного розподілу швидкостей матеріалу горизонтально розташований експериментальний зразок 17. Рух у вигляді щільного шару, рівномірний розподіл швидкості по перерізу, а також її регулювання забезпечувалось здвоєним дірчатим шибром 21, встановленим у випускному перерізі шахти. Пройшовши шахту і мірну місткість 11, матеріал потрапляє на стрічку горизонтального транспортера 13, звідти в ковшовий елеватор 1 і знову в нахилений жолоб 2, тобто рухався по замкнутому контуру. Періодичний вимір витрати проводився за допомогою мірної ємності 11.

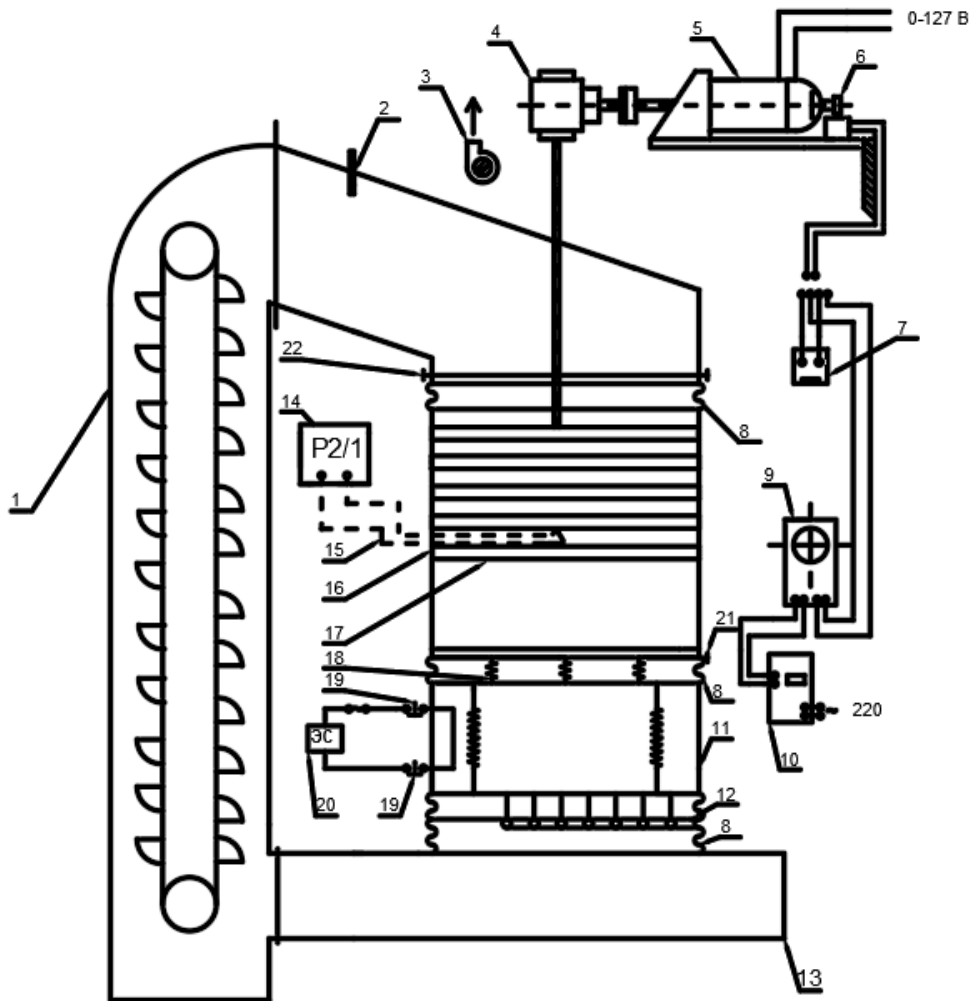


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки

1 - ковшевий елеватор; 2 - точка виміру температури шару; 3 - віброграф; 4 - вібратор;  
 5 - електродвигун; 6 - електромагнітний датчик; 7 - міліамперметр; 8 - сильфон; 9 - осцилограф; 10 - звуковий генератор; 11 - мірна ємність; 12 - привід жалюзі; 13 - транспортер; 14 - потенціометр; 15 - термопара; 16 - шахта; 17 - трубний пучок; 18 - пружини; 19 - кінцевий вимикач; 20 - електро секундомір; 21 - нижній шибер; 22 - шибер отсечной верхній

В задачу досліджень входило визначення коефіцієнтів тепловіддачі при наявності вібрації пучка. Віброприводом служив вібратор 4, який приводився в дію двигуном постійного струму 5. Частота вібрації змінювалась за допомогою зміни обертів електродвигуна. Змінні ексцентрики вібратора 4 дозволяли змінити амплітуду вібрації.

Параметри вібрації контролювались вібрографом ВР-1 (амплітуда) і за допомогою осцилографа по рис. Ліссажу (частота). Забір витрат сипучого матеріалу проводився за допомогою мірної ємності, яка працювала за принципом дозатора і контролювалась ваговим засобом.

Теплообмін досліджувався при сталому русі сипучого матеріалу методами стаціонарного і регулярного теплових режимів. Схеми калориметрів з розміщеними термопарами докладно описані у [1, 2].

Треба підкреслити, що при досліді теплообміну щільного шару сипучого матеріалу з пучками труб не ставилася задача визначення впливу рядності на величину коефіцієнту тепловіддачі, тому що такі досліді були проведені Донсковим С.В. Автор показав, що зміна коефіцієнту тепловіддачі (незначне зменшення) має місце у перших трьох рядах пучка і подальше стабілізується. Зважаючи на це, ми калориметр встановлювали у четвертий ряд пучка з тим, щоб отримати залежність характерну для більшості рядів теплообмінного апарату ( локальне теплове моделювання).

Результати, що отримані при вібрації одиночного калориметру [1, 2], дозволили виявити причини і ступінь інтенсифікації теплообміну. В даній роботі вирішувалась задача по перевірці

ефективності вібрації стосовно трубного пучка, що особливо важливо при розробці трубчастих теплообмінних апаратів.

Режимні характеристики змінювались в такому діапазоні: швидкість гравітаційного руху шару  $V_{\text{ш}} = 0,4 \pm 12$  мм/с, параметри вертикальної вібрації – амплітуда  $A = 0 \pm 1$  мм, частота  $f = 0 \pm 20$  Гц швидкість вібрації  $V_v = 4Af = 0 \pm 60 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$ , відносна швидкість вібрації  $V_v/V = 0 \pm 110$ .

Компоновка пучка прийнята шахова при відносних кроках  $S_1/D = 1,82$ ;  $S_2/D = 6,13$ . Як показали досліди з нерухомим пучком, така компоновка забезпечує максимальну інтенсивність теплообміну. В якості модельного матеріалу досліджувався кварцевий пісок ( суміш з середнім розміром часток 0,45 мм).

На рис. 2 представлена залежність коефіцієнту тепловіддачі пучка труб від швидкості шару при вібрації з різними параметрами .

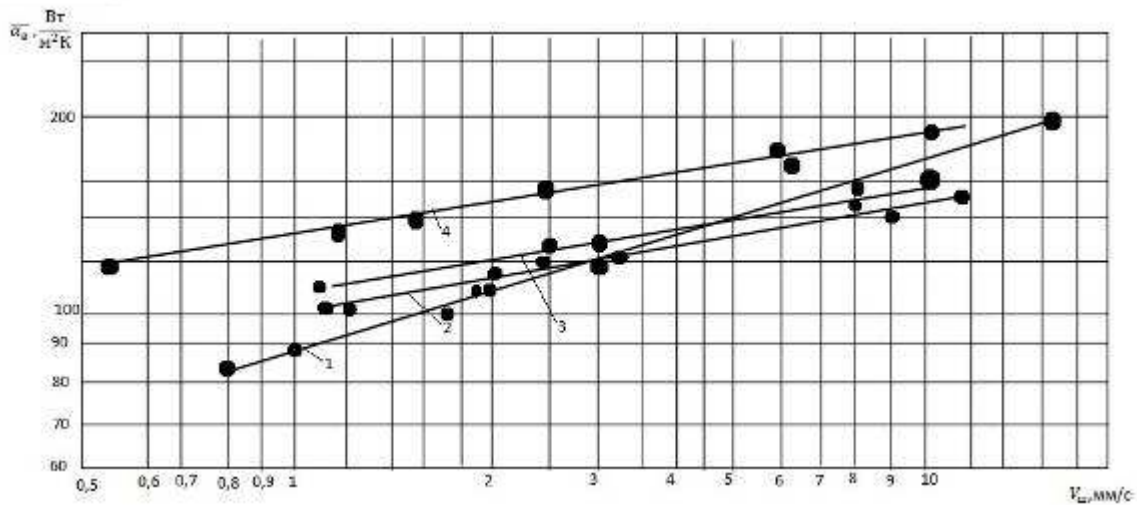


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнту тепловіддачі пучка від швидкості шару  
1-без вібрації; 2-f=9Гц; 2A=0,75мм; 3-f=9Гц; 2A=1,75мм; 4-f=15Гц; 2A=2мм

Як показують зображені графіки, вплив вібрації на теплообмін в пучках зберігається таким, як для одиночного калориметра. Найбільша інтенсифікація теплообміну має місце в області малих швидкостей шару. При зростанні швидкості шару інтенсифікація теплообміну зменшується. При швидкості шару  $V_{\text{ш}} \approx 8 \pm 10 \frac{\text{мм}}{\text{с}}$  тепловіддача в умовах вібрації погіршується. Зміна параметрів вібрації якісно не міняє темп залежності коефіцієнту тепловіддачі пучка від швидкості шару. В області малих швидкостей шару вібрація приводить до інтенсифікації теплообміну тим більшому, чим вище параметри вібрації і чим нижче швидкість шару. В досліджуваних межах частота і амплітуда коливань чинять рівноцінний вплив, який може бути врахований одним параметром – швидкістю вібрації. Причини, що приводять до цієї закономірності, для пучка ті ж, що і для одиночного калориметру [1, 2]. При інших рівних умовах темп зростання коефіцієнту тепловіддачі для пучка трохи нижче ніж для одиночного калориметра. Це видно з рис. 1 і пояснюється тим, що при обтіканні пучка відбувається значніше зменшення щільності шару, ніж при обтіканні одиночного циліндру.

На рисунку 3 представлена залежність коефіцієнту тепловіддачі від швидкості шару при вібрації з однаковими параметрами одиночного калориметра і пучка труб.

З аналізу цього графіка треба зробити висновок, що темп зростання інтенсивності теплообміну одиночного калориметра при збільшенні швидкості шару дорівнює темпу зростання інтенсивності теплообміну для трубного пучка. Треба також відмітити, що коефіцієнт тепловіддачі для одиночного калориметра вище, ніж для пучка труб при інших рівних умовах.

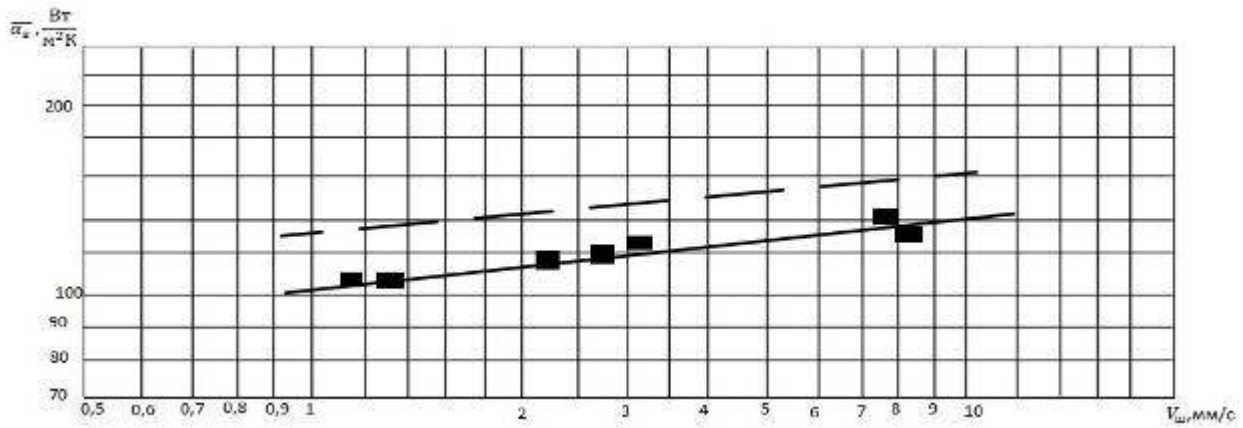


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі від швидкості шару при вібрації однаковими параметрами одиночного калориметра та пучка труб ( - - одиночний калориметр)

На рис. 4 представлені результати сумісної обробки всіх дослідних даних по теплообміну у вигляді залежності  $\frac{\bar{\alpha}_s}{\alpha_0} = f\left(\frac{V_s}{V_{ш}}.$

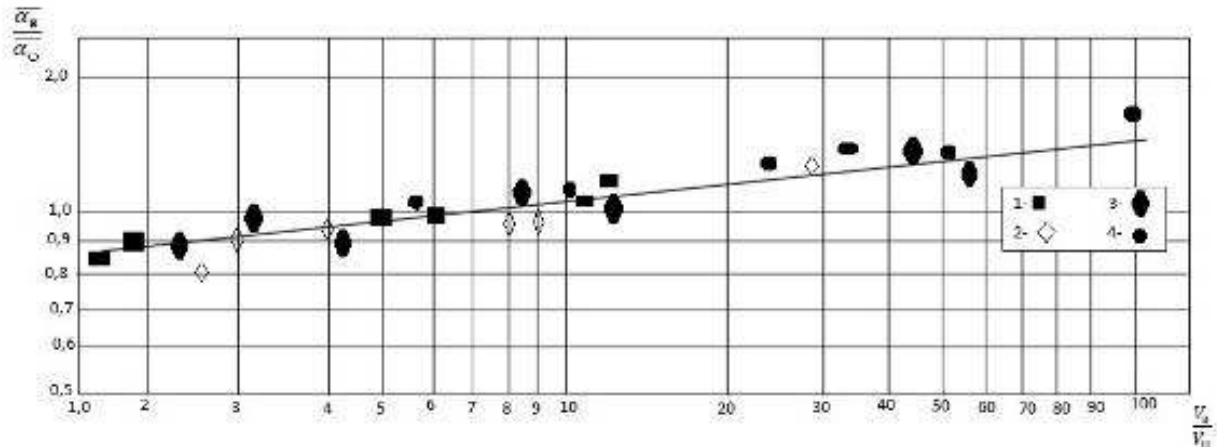


Рисунок 4 – Залежність ступеня інтенсифікації теплообміну відносною швидкості вібрації  
1-f=9Гц; 2A=0,75мм; 2-f=9Гц; 2A=1,75мм; 3-f=20Гц; 2A=0,55мм; 4-f=20 Гц; 2A=2 мм

Така обробка добре узагальнює данні експерименту (максимальна похибка становить 10%). Це ще раз підтверджує той факт, що ступінь інтенсифікації теплообміну визначається відносною швидкістю вібрації. Характерно, що темп зростання залежності ступеня інтенсифікації теплообміну від відносною швидкості вібрації для пучка такий, як в одиночного калориметру, тобто:

$$\frac{\bar{\alpha}_s}{\alpha_0} \sim \left(\frac{V_s}{V_{ш}}\right)^{0,1} \quad (1)$$

У зв'язку з тим, що експерименти по теплообміну в умовах вібрації виконані для пучка, зібраного з труб одного діаметру ( $D=22$  мм) з постійними поперековими і продольними кроками не вдалося визначити вплив на ступінь інтенсифікації теплообміну симплексів  $\frac{D}{s}$  (використовувались одна суміш  $d=0,45$  мм),  $s_1/D$  і  $s_2/D$ . Тим не менш узагальнююча залежність,

яка дозволяє розрахувати інтенсифікацію теплообміну у пучках труб під впливом вібрації була отримана. На рис. 4 пряма лінія зображує результати розрахунку ступеня інтенсифікації теплообміну під впливом вібрації, отримані у [1] для одиночного калориметру.

На цьому ж рисунку 5 представлені результати, отримані для пучка.

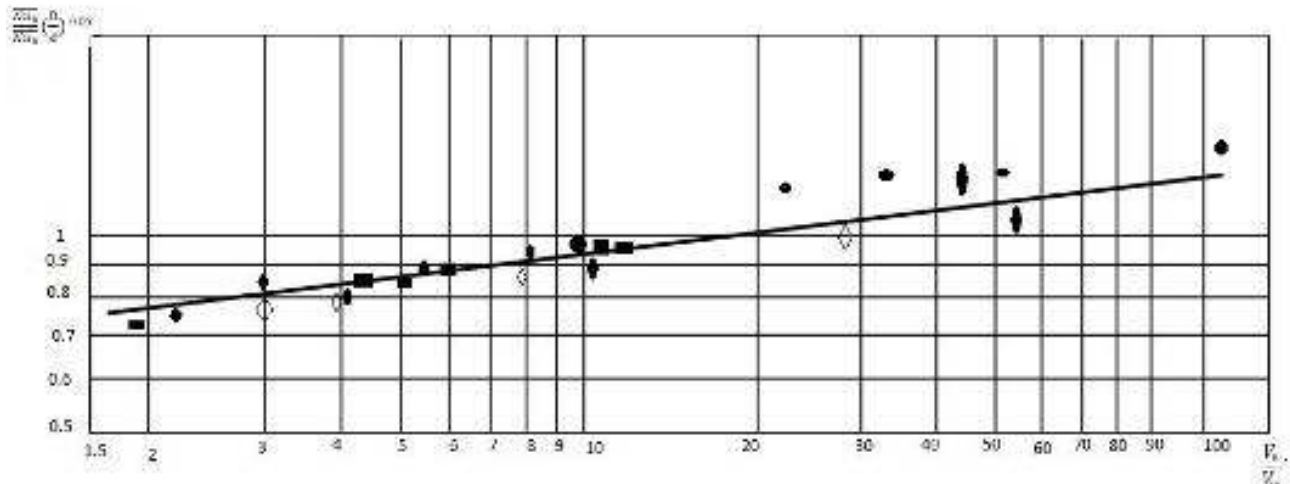


Рисунок 5 – Узагальнююча залежність ступеня інтенсифікації теплообміну шахових пучків з гравітаційним щільним шаром в умовах вібрації

Добре узгодження результатів дозволяє рекомендувати для розрахунку ступеня інтенсифікації теплообміну у шахових пучках під впливом вібрації наступну залежність:

$$\frac{N_{\text{в}}}{N_{\text{г}}} = 0,71 \left(\frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{г}}}\right)^{0,1} \left(\frac{D}{d}\right)^{0,05}, \quad (2)$$

Що є справедливою з вірогідністю  $\pm 4,9\%$  при

$$1,8 \leq \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{г}}} \leq 110; \quad 2,3 \leq \frac{D}{d} \leq 111; \quad 1,36 \leq \frac{S_{\text{в}}}{D} \leq 2,7;$$

$$1,82 \leq \frac{S_{\text{в}}}{D} \leq 6,13$$

### Висновки

При вібрації з однаковими параметрами:

1. Темп зростання залежності коефіцієнта тепловіддачі від швидкості щільного шару сипучого матеріалу для одиночного циліндра такий, як і для трубчатого пучка.
2. В області малих швидкостей шару сипучого матеріалу вібрація приводить до інтенсифікації теплообміну тим більшому, чим вище параметри вібрації і чим нижче швидкість шару.
3. В результаті проведених дослідів отримана критеріальна залежність, яка дозволяє розраховувати теплообмінні апарати для нагріву (охолодження) щільного шару сипучого матеріалу в умовах вібрації.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Титар С.С. Інтенсифікація теплообміну сипучого матеріалу щільного шару з циліндром за допомогою вібрації / С. С. Титар, О. С. Фурман // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. – 2016. - №1. – с. 65 – 70.
2. Титар С. С. Локальний теплообмін щільного шару сипкого матеріалу з циліндром за відсутності та наявності вібрації / С. С. Титар, О. М. Шраменко // Вісник Вінницького політехнічного університету. – 2018. - №1(136). – с.18 – 23.
3. Бошкова И. Л. Исследование эффективности теплообмена в теплообменниках-утилизаторах с гранулированной насадкой / И. Л. Бошкова, А. В. Солодкая // Энергетика. Проблема регионального развития. – 2016. – Т.3, №32. – с. 110 – 106.

### REFERENCES

1. Tytar S. S. Intensyfikatsiya teploobminu sypuchoho materialu shchil'noho sharu z tsylindrom za dopomohoyu vibratsiyi / S. S. Tytar, O. S. Furman // Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi. 2016. – №1. – s.65 – 70.
2. Tytar S.S. Lokal'nyu teploobmin shchil'noho sharu sypkoho materialu z tsylindrom za vidсутnosti ta nayavnosti vibratsiyi / S. S. Tytar, O. M. Shramenko // Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho universytetu. – 2018. - №1(136). – s. 18 – 23.
3. Boshkova Y.L. Yssledovanye efektyvnosti teploobmena v teploobmennyykakh-utylyzatorakh s hranulyrovannoy nasadkoy / Y. L. Boshkova, A. V. Solodkaya // Enerhetyka. Problema rehyonal'noho razvytyya. – 2016. – T.3, №32. – s. 110 – 106.

**Титар Сергій Семенович** – к.т.н., професор кафедри теплових електричних станцій та енергозберігаючих технологій, Одеський національний політехнічний університет.

**Дарієнко Богдан Євгенійович** – студент, Одеський національний політехнічний університет, email: redbeard.odessa@gmail.com.

**S. Titar**  
**B. Darienko**

## **INFLUENCE OF VIRGIN BRAKE PIPE ON HEAT EXCHANGER WITH DOMINANT CYCLE MATERIAL CHAIN**

Odessa National Polytechnic University

*Vibration is one of perspective methods of intensification of packet bed heat transfer with surface. It happens that vibration provides not only considerably intensify the process of heat transfer but also ensures stability of bed's motion. Data on the heat transfer of a dense gravitational layer with the surface in terms of vibrations is limited to a narrow range of variation of the mode and geometric characteristics/ Due to this fact scientific works do not contain recommendations on the methods of calculation and design of heat transfer apparatuses.*

*Keywords: packer bed, heat transfer, intensification, pipe bundles.*

*Titar Sergii* – Cand. Cs. (Eng.), Professor of the chair of thermal power plant and energy saving technologies.

*Darienko Bogdan* – student, Odessa National Polytechnic University, Odessa, email: redbeard.odessa@gmail.com.

**С. С. Титар**  
**Б. Е. Дариенко**

## **ВЛИЯНИЕ ВИБРАЦИИ ПУЧКА ТРУБ НА ТЕПЛООБМЕН С ПЛОТНЫМ СЛОЕМ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

Одесский национальный политехнический университет

*Одним из перспективных средств интенсификации теплообмена плотного слоя с поверхностью является вибрация. В ряде случаев вибрация позволяет не только значительно интенсифицировать процесс теплообмена, но и обеспечить стабильность движения слоя. Данные по теплообмена плотного гравитационного слоя с поверхностью в условиях вибрации, приведенные в литературе, ограничиваются очень узким диапазоном режимных и геометрических характеристик из-за чего не имеют рекомендации по методике расчета и проектирования теплообменных аппаратов.*

*Ключевые слова: плотный слой, теплообмен, интенсивность, вибрация, термическое сопротивление.*

*Титар Сергей Семёнович* – к.т.н., профессор кафедры тепловых электрических станций и энергозберегающих технологий, Одесский национальный политехнический университет.

*Дариенко Богдан Евгениевич* – студент, Одесский национальный политехнический университет, email: redbeard.odessa@gmail.com.