

УДК 697.2

О.Ю.Пересипкіна, студент, керівники О.В.Ленькин, В.П.Студенець
НТУУ «КПІ», ІЕЕ, Київ, Україна

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ТА ОЦІНКА МЕТОДІВ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЧЕРЕЗ ОРЕБРЕНУ ГОРИЗОНТАЛЬНУ ТРУБУ

Анотація – Складена за допомогою ПК математична модель процесу теплопередачі через оребрену горизонтальну трубу. Встановлені залежності ефективності теплообміну від різних факторів: температур та швидкостей теплоносіїв, параметрів труби та ребер. Після аналізу цих залежностей зроблені висновки щодо ефективності впровадження методів інтенсифікації теплопередачі.

Аннотация - Создана с помощью ПК математическая модель процесса теплопередачи через оребренную горизонтальную трубу. Установлены зависимости эффективности теплообмена от разных факторов: температур и скоростей теплоносителей, параметров трубы и ребер. Сделаны выводы об эффективности внедрения методов интенсификации теплопередачи.

Annotation – Mathematical model of heat-transfer process through ribbed horizontal pipe was computer-produced. Dependencies of heat-transfer efficiency are determined from various factors such as temperatures and speeds of heat-transfer agents, the parameters of pipe and gills. The conclusion was made about efficiency of implementation methods of the intensification of heat transfer.

Вступ

На сьогоднішній день все більш проявляється тенденція використання в системах опалення теплоносія з низькотемпературним потенціалом. Це пов'язано з такими факторами:

- по-перше, старі теплові мережі мають дуже великі тепловтрати, тому теплоносіє, який потрапляє в опалювальний прилад, має температуру нижче нормованої;
- по-друге, в цілях економії невідновлювальних ресурсів, йде розвиток нетрадиційної енергетики, при використанні якої є можливість отримати низькотемпературний теплоносіє.

Беручи до уваги цю тенденцію, постає питання вирішення задачі отримання необхідної кількості теплоти для опалення приміщень. Вирішенням цієї задачі може бути впровадження методів інтенсифікації теплопередачі через опалювальний прилад.

Найбільш розповсюдженими методами інтенсифікації теплопередачі є:

- збільшення швидкості теплоносія на вході в опалювальний прилад;
- збільшення опалювальної площі приладу (способом нанесення оребрення з боку меншого коефіцієнта тепловіддачі, збільшення кількості та довжини ребер до максимально можливо ефективного).
- вибір опалювального приладу з матеріалу з найбільш високим показником коефіцієнта теплопровідності;
- створення умов для вимушеної зовнішньої тепловіддачі конвекцією (примусове обдування опалювального приладу) замість вільної.

Постановка завдання

Розглядається оребрена горизонтальна труба довжиною L , з внутрішнім діаметром $d_{вн}$ та товщиною стінки δ , в середині якої тече зі швидкістю $w_{Т1}$ гарячий теплоносіє з середньою температурою $t_{Т1}$, а сама труба при цьому має температуру внутрішньої $t_{ст1}$ та зовнішньої стінки $t_{ст2}$. Труба має ребра циліндричної форми висотою H та товщиною δ_p відстань між

котрими δ_r , а температури сусідніх ребер прийняті t_{p1} та t_{p2} . Зовні ребрена горизонтальна труба омивається холодним теплоносієм з температурою t_{r2} та швидкістю w_{r2} , яка нагнітається вентилятором(див.рис.1)

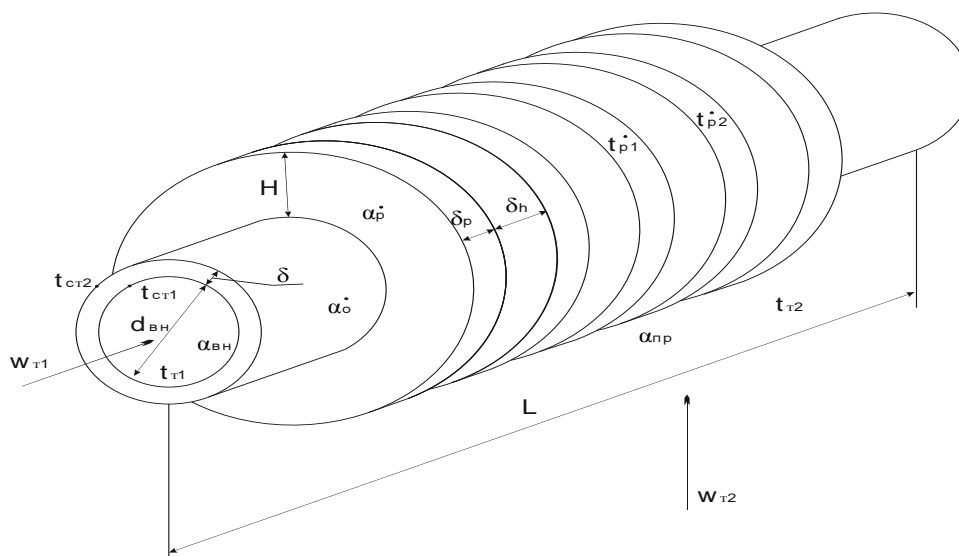


Рис. 1. Загальний вигляд ребреної труби:

$d_{вн}$ – внутрішній діаметр труби; δ – товщина стінки труби; H – висота ребра; δ_p – товщина ребра; δ_r – відстань між ребрами; L – довжина ребреної труби; w_{r1} – швидкість теплоносія, що протікає в трубі; w_{r2} – швидкість теплоносія, що омиває трубу ззовні; t_{r1} – температура теплоносія, що протікає в трубі; t_{r2} – температура теплоносія, що омиває трубу ззовні; t_{cr1} – температура внутрішньої стінки труби; t_{cr2} – температура зовнішньої стінки труби; t_{p1} – температура першого ребра; t_{p2} – температура другого ребра, яке знаходиться біля першого; $\alpha_{вн}$ – коефіцієнт тепловіддачі усередині труби; $\alpha_о$ – коефіцієнт тепловіддачі зовні неоребреної труби; α_p – коефіцієнт тепловіддачі ребра; $\alpha_{пр}$ – приведений загальний зовнішній коефіцієнт тепловіддачі ребреної труби.

1) Загальний тепловий потік Q [Вт] через розглянуту горизонтальну ребрену трубу, описується рівнянням [1]:

$$Q = k(t_{r1} - t_{r2})L \quad (1)$$

де k – коефіцієнт теплопередачі [Вт/(мК)], що розраховується за формулою:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\pi d_{вн} \alpha_{вн}} + \frac{1}{2\pi \lambda_{тр} \ln\left(\frac{d_{вн} + 2\delta}{d_{вн}}\right)} + \frac{1}{\pi(d_{вн} + 2\delta) \alpha_{пр} - \frac{f_p + f_o}{f_o}}} \quad (2)$$

де $\alpha_{вн}$ – внутрішній коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²К);

$\alpha_{пр}$ – зовнішній приведений коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²К).

$\lambda_{тр}$ – коефіцієнт теплопровідності труби, Вт/(мК).

f_p – площа бокової поверхні ребра, м²:

$$f_p = \left(\pi \left(\frac{d_{вн}}{2} + \delta + H\right)^2 - \pi \left(\frac{d_{вн}}{2} + \delta\right)^2\right) \cdot 2 \cdot n \quad (3)$$

де n – кількість ребер на поверхні труби, шт.

f_o – міжреберна площа, м²:

$$f_o = 2\pi \left(\frac{d_{вн}}{2} + \delta\right) L - 2\pi \left(\frac{d_{вн}}{2} + \delta\right) \delta_p n \quad (4)$$

2)Визначимо коефіцієнт тепловіддачі усередині труби при вимушеному протіканні гарячого теплоносія (вода) в трубі $\alpha_{вн}$ [2].

2.1)Для даних умов - вимушена течія теплоносія (вода) в трубі, визначимо визначальну температуру та розмір:

$$t_{визн} = t_{т1} \quad (5)$$

$$l_{визн} = d_{вн} \quad (6)$$

2.2)Визначимо необхідні критерії подібності при теплоносії - вода ,щоб визначити режим потоку теплоносія,в залежності від якого розрахунок ведеться по одній з нижче приведених формул:

Якщо $Re < 2200$ - ламінарний режим:

$$Nu = 0,15Re^{0,33} Pr^{0,43} Gr^{0,1} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \quad (7)$$

Якщо $Re > 10^4$ - турбулентний режим:

$$Nu = 0,021Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \quad (8)$$

Якщо $Re = 2200 - 10^4$ - перехідний режим:

$$Nu = K \cdot Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \quad (9)$$

Величина K обирається в залежності від величини критерію Re з табл. 1.

Таблиця 1.

$Re \cdot 10^3$	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
K	2,2	3,6	4,9	7,5	10,0	12,2	16,5	20,0	24,0	27,0	30,0	33,0

2.3)Використовуючи знайдений Nu , знаходимо значення внутрішнього коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_{вн}$ [Вт/(м²К)] за формулою:

$$\alpha_{вн} = (Nu \cdot \lambda) / l_{визн} \quad (10)$$

3)Визначимо коефіцієнти тепловіддачі ззовні труби при обтіканні холодним теплоносієм (повітрям).

Оскільки дана труба має оребрення, то для визначення зовнішнього коефіцієнта тепловіддачі необхідно знайти приведений коефіцієнт від окремо визначених коефіцієнта тепловіддачі неореброваної частини труби і коефіцієнта тепловіддачі ребра, при цьому зовнішня тепловіддача розглядається за двох умов, коли вентилятор, що обдуває трубу, включений (вимушена конвекція) та виключений (вільна конвекція).

3.1)Вимушена конвекція

3.1.1)Визначимо коефіцієнт тепловіддачі ззовні неореброваної частини труби при вимушеній конвекції α_0 (теплоносій - повітря) [2].

а)Для даних умов - зовнішнє обтікання поодинокі труби, визначимо визначальну температуру та розмір:

$$t_{визн} = t_{т2} \quad (11)$$

$$l_{визн} = d_{зовн} = d_{вн} + 2 \cdot \delta \quad (12)$$

б)Визначимо необхідні критерії подібності при теплоносії – повітря, щоб визначити режим потоку теплоносія,в залежності від якого розрахунок ведеться по одній з нижче приведених формул:

Ламінарний при $Re < 10^3$:

$$Nu = 0,56Re^{0,5} Pr^{0,38} \quad (13)$$

Турбулентний при $Re \geq 10^3$

$$Nu = 0,28Re^{0,6} Pr^{0,38} \quad (14)$$

в) Використовуючи знайдений Nu , знаходимо значення коефіцієнта тепловіддачі від необребеної частини труби α_o [Вт/(м²К)] за формулою:

$$\alpha_o = (Nu \cdot \lambda) / l_{визн} \quad (15)$$

3.1.2) Визначимо коефіцієнт тепловіддачі ребра при вимушеній конвекції α_p (теплоносій - повітря) [2].

а) Для даних умов - вимушена конвекція вздовж пластини, визначимо визначальну температуру та розмір:

$$t_{визн} = t_{т2} \quad (16)$$

$$l_{визн} = H \quad (17)$$

б) Визначимо необхідні критерії подібності при теплоносії - повітря, щоб визначити режим потоку теплоносія, в залежності від якого розрахунок ведеться по одній з нижче приведених формул:

Ламінарний при $Re < 10^3$:

$$Nu = 0,66 Re^{0,5} Pr^{0,43} \quad (18)$$

Турбулентний при $Re \geq 10^3$

$$Nu = 0,037 Re^{0,8} Pr^{0,43} \quad (19)$$

в) Використовуючи знайдений Nu , знаходимо значення коефіцієнта тепловіддачі від ребра α_p [Вт/(м²К)] за формулою:

$$\alpha_p = (Nu \cdot \lambda) / l_{визн} \quad (20)$$

3.2) Вільна конвекція

3.2.1) Визначимо коефіцієнт тепловіддачі ззовні необребеної частини труби при вільній конвекції α_o (теплоносій - повітря) [3].

а) Для даних умов - необмежений простір біля гріючої труби, визначимо визначальну температуру та розмір:

$$t_{визн} = (t_{т2} + t_{ст2}) / 2 \quad (21)$$

$$l_{визн} = d_{зовн} = d_{вн} + 2 \cdot \delta \quad (22)$$

б) Визначимо необхідні критерії подібності при теплоносії - повітря, щоб визначити режим потоку теплоносія, в залежності від якого розрахунок ведеться по одній з нижче приведених формул:

Ламінарний при $10^{-3} \ll GrPr \ll 500$

$$Nu = 1,18 (GrPr)^{0,125} \quad (23)$$

Перехідний при $500 < GrPr \ll 2 \cdot 10^7$

$$Nu = 0,54 (GrPr)^{0,25} \quad (24)$$

Турбулентний при $2 \cdot 10^7 < GrPr \ll 10^{13}$

$$Nu = 0,135 (GrPr)^{0,33} \quad (25)$$

в) Використовуючи знайдений Nu , знаходимо значення коефіцієнта тепловіддачі від необребеної частини труби α_o [Вт/(м²К)] за формулою:

$$\alpha_o = (Nu \cdot \lambda) / l_{визн} \quad (26)$$

3.2.2) Визначимо коефіцієнт тепловіддачі ребра при вільній конвекції α_p (теплоносій - повітря) [3].

а) Для даних умов - вільна конвекція в обмеженому просторі (між ребрами), визначимо визначальну температуру та розмір:

$$t_{визн} = (t_{p1} + t_{p2}) / 2 \approx t_p = (t_{т2} + t_{ст2}) / 2 \quad (27)$$

$$l_{визн} = \delta_n \quad (28)$$

б) Традиційно тепловий потік в щільному зазорі розраховується по рівняннях теплопровідності, визначивши потік таким чином, ми можемо, використовуючи його

величину, оцінити коефіцієнт тепловіддачі з поверхні ребра. Для цього прирівняємо величини теплових потоків, отриманих методом теплопровідності та конвективним методом:

$$q_{\alpha} = q_{\lambda} \quad (29)$$

Підставимо розрахункові формули:

$$\alpha_p (t_p - t_{T2}) = 2 \frac{\lambda_{\text{екв}}}{\delta_h} (t_p - t_{T2}) \quad (30)$$

де $\lambda_{\text{екв}}$ - еквівалентний коефіцієнт теплопровідності, що враховує перенесення теплоти через щілину як теплопровідністю, так і конвекцією:

$$\lambda_{\text{екв}} = \varepsilon_k \lambda \quad (31)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності теплоносія(повітря), характеризує вплив конвекції на перенесення через щілину;

ε_k - функцією комплексу GrPr.

Для визначення ε_k проводиться розрахунок необхідних критеріїв подібності при теплоносії - повітря.

У разі малих значень аргументу $(GrPr) < 10^3$, як впливає з проведених досліджень Міхеєва М.А., $\varepsilon_k = 1$ та $\lambda_{\text{екв}} = \lambda$, тобто передача теплоти між стінками здійснюється тільки теплопровідністю

При $10^3 < (GrPr) < 10^6$:

$$\varepsilon_k = 0,105 (GrPr)^{0,3} \quad (32)$$

Та при $10^6 < (GrPr) < 10^{10}$:

$$\varepsilon_k = 0,4 (GrPr)^{0,2} \quad (33)$$

3.3)Визначимо приведений коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої оребреної стінки труби $\alpha_{пр}$ [2]:

$$\alpha_{пр} = \alpha_p \frac{f_p}{f_p + f_o} E + \alpha_o \frac{f_o}{f_p + f_o} \quad (34)$$

де E - коефіцієнт ефективності ребра, який розраховується як:

$$E = \text{th}\left(\frac{H}{\delta_p} \sqrt{2Bi}\right) / \frac{H}{\delta_p} \sqrt{2Bi} \quad (35)$$

де Bi - безрозмірне число Біо, яке обрховується:

$$Bi = (\alpha_p \cdot \delta_p) / \lambda_p \quad (36)$$

де λ_p - коефіцієнт теплопровідності ребра, Вт/(м · К).

Результати обрахунків

Розрахунки були проведені, використовуючи вихідні данні приведені в табл.1:

Таблиця 1. Вихідні дані:

$t_{T1} = 60^{\circ}\text{C}$	температура теплоносія, що протікає в трубі
$t_{T1} = 50^{\circ}\text{C}$	температура внутрішньої стінки труби
$d_{вн} = 0,02\text{м}$	внутрішній діаметр труби
$w_{T1} = 0,25\text{ м/с}$	швидкість теплоносія, що протікає в трубі
$\delta_p = 0,0005\text{м}$	товщина ребра
$w_{T2} = 4\text{м/с}$	швидкість теплоносія, що омиває трубу ззовні
$t_{T2} = 18^{\circ}\text{C}$	температура теплоносія, що омиває трубу ззовні
$t_{ст2} = 20^{\circ}\text{C}$	температура зовнішньої стінки труби
$\lambda_{Tr} = 203,5\text{Вт/(мК)}$	коефіцієнт теплопровідності труби(метал-алюміній)
$n = 300, \text{шт}$	кількість ребер
$H = 0,05, \text{м}$	висота ребра
$\delta = 0,002, \text{м}$	товщина стінки труби
$L = 1, \text{м}$	довжина оребреної труби

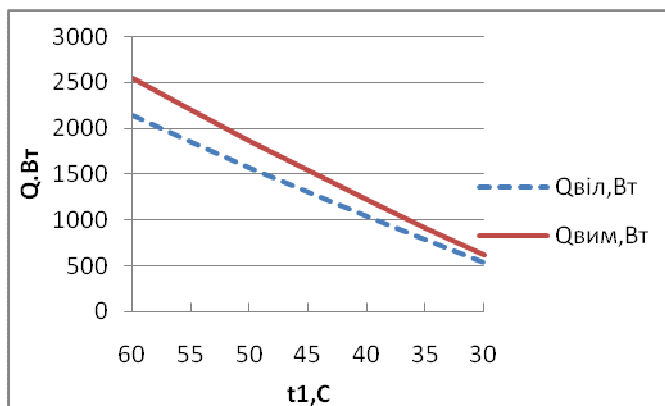


Рис. 2. Графік залежності теплового потоку від температури теплоносія в приладі

Прослідкуємо на графіку залежності наскільки впливовим є зменшення температури гарячого теплоносія в опалювальному приладі t_{T1} на тепловий потік. Змінюючи t_{T1} від 60°C до 30°C у випадку вільної зовнішньої конвекції (вентилятор вимкнений), отримуємо результати (див.рис.2), де видно стрімко спадаючу залежність теплового потоку від t_{T1} , наприклад при зменшенні t_{T1} в 2рази величина теплового потоку зменшиться в 4 рази.

Проаналізуємо дієвість розглянутих методів інтенсифікації теплопередачі.

1-ий метод. При збільшенні швидкості теплоносія в опалювальному приладі w_{T1} з $0,1\text{м/с}$ до $0,7\text{м/с}$ кількість теплоти, що передається опалювальним приладом збільшиться аж в 2,67рази (див.рис.3). Цей метод є дієвим, але збільшення швидкості має свої обмеження у зв'язку з можливою максимальною міцністю матеріалу труби та виникнення небажаного шуму.

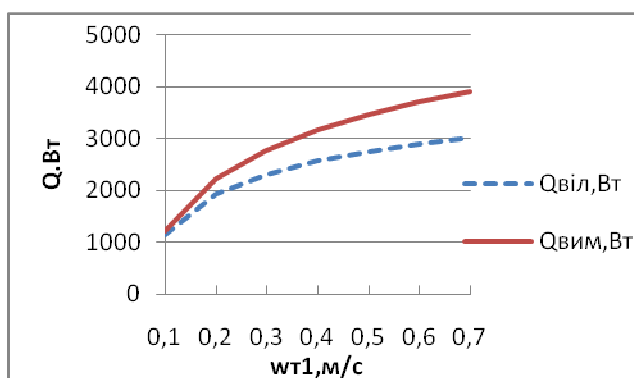


Рис. 3. Графік залежності теплового потоку від швидкості теплоносія в приладі

2-ий метод. При збільшенні кількості ребер з 50 до 300шт/м величина теплового потоку збільшується в 7,3 разів, а при збільшенні висоти ребер з $0,01\text{м}$ до $0,2\text{м}$ - в 6,7разів (див.рис.4). Отже цей метод є дієвим, але дуже матеріаломістким, тож для його ефективного застосування необхідно зіставити затрати на модернізацію та вигоду, яка буде отримуватись з кожного додаткового ребра або міліметру його довжини.

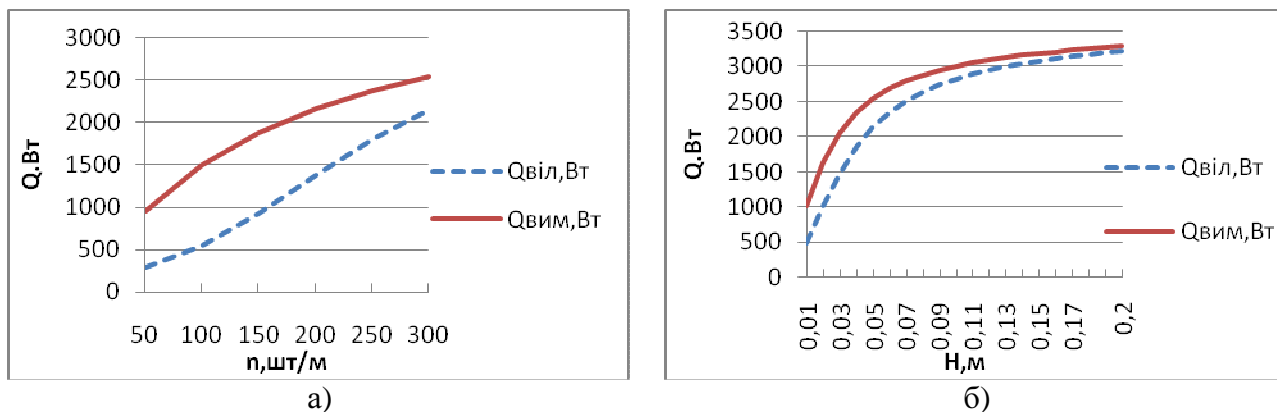


Рис. 4. Графік залежності теплового потоку від а) кількості ребер, б) довжини ребер

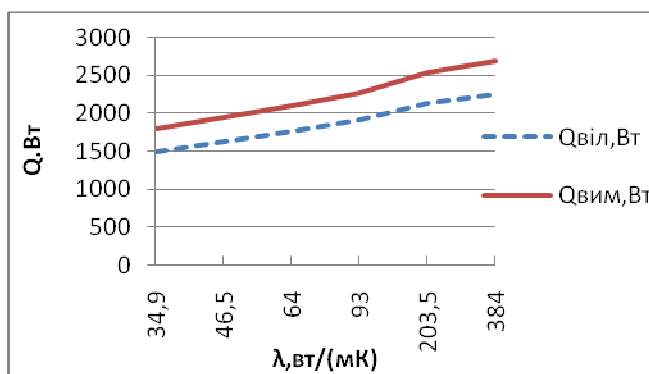


Рис. 5. Графік залежності теплового потоку від коефіцієнту теплопровідності матеріалу, з якого вироблено прилад

3-ій метод. Вибір опалювального приладу з більшим коефіцієнтом теплопровідності, є дієвим, але потрібно враховувати що іноді невелике збільшення інтенсивності теплопередачі може привести до величезних затрат на обраний матеріал. Розглянемо використання міді замість алюмінію. Мідь має кращі показники коефіцієнту теплопровідності ($\lambda_{Cu} \approx 384 \text{ Вт/(мК)}$, $\lambda_{Al} \approx 203,5 \text{ Вт/(мК)}$), але збільшення теплового потоку складає усього лише 5,3% в той час коли вартість розростає на 234% (див.рис.5) Одним з найбільш поширених ефективних методів часткової інтенсифікації теплопередачі є вироблення частин опалювального приладу з різних матеріалів

4-ий метод. Одним з найбільш впливових методів інтенсифікації, хоч при цьому доволі затратним, є створення умов вимушеного обтікання теплоносія ззовні опалювального приладу. Як видно з рис.6 при вимушеній конвекції тепловий потік дуже різко зростає при збільшенні швидкості обдування. Але перевагою цього методу є ще й те, що при використанні вимушеної конвекції інші методи становляться більш ефективними - це добре видно на рис.3 та 4.

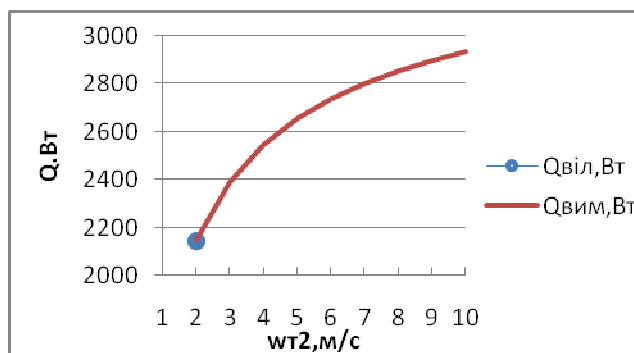


Рис. 6. Графік залежності теплового потоку від швидкості теплоносія, що омиває трубу ззовні

Зробимо порівняння зіставлень значень теплового потоку при мінімальному значенні параметру, що змінюється при умові вільної конвекції, зі значеннями теплового потоку при максимальному значенні параметру за умови вільної конвекції або за умови вимушеної конвекції(це значення буде вказане у дужках).

Отже при збільшенні швидкості потоку теплоносія з 0,1м/с до 0,7м/с кількість теплоти, що передається опалювальним приладом збільшиться в 2,67рази(3,5рази). При збільшенні ж кількості ребер з 50 до 300шт величина теплового потоку збільшується в 7,3 разів(8,7разів).

Висновок

В даній роботі за допомогою використання створеної програми розрахунку теплопередачі через оребрену трубу, були проведені ряд розрахунків, проаналізувавши результати яких можна зробити висновки про ефективність впровадження перерахованих вище методів інтенсифікації теплопередачі. Беручи до уваги тенденцію до зниження температури теплоносія в опалювальних приладах, рішення проблеми передачі необхідної кількості тепла в опалювальний простір можливе за рахунок створення нових модернізованих опалювальних приладів з впровадженими методами інтенсифікації.

Слід підкреслити, що при виборі методу необхідно перевіряти ефективність кожного, зробивши зіставлення затрат на впровадження та майбутньої економії від його використання.

[1] Николаев Г.И. и др., Тепловые процессы: Учебное пособие. – Улан-Уде: Изд-во ВСГТУ, 2004. – 124с.

[2] Нащокин В.В., Техическая термодинамика и теплопередача. Учебн.пособие . М .«Высшая школа», 1975, 496с.

[3] Исаченко В.П. и др., Теплопередача. Учебник для вузов, Изд.3-е, перераб. И доп.М., «Энергия»,1975. 488с.