УДК 536.42

**Корбут В. П.**, *д.т.н., професор*
**Іщенко М. Ю.**, *інженер*
Київський національний університет будівництва і архітектури

# ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ГАЗО- ПАРОПОВІТРЯНОГО ФАКЕЛУ КОМБІНОВАНОЇ БАШТОВОЇ ГРАДИРНІ.

В світовій практиці все більший розвиток отримує створення і дослідження баштових труб-градирень, тобто градирень, у які вводяться викидні димові гази від котлоагрегатів або газотурбінних установок при ТЕС. Викидний факел від труби-градирні являє собою суміш повітря, водяної пари та димових газів. Основна ідея полягає в тому, що при правильно визначених умовах подачі димових газів стабілізується повітряний і тепловий режим, збільшується термогравітаційний тиск у градирні, підвищується швидкість і кількість повітря, інтенсифікуються процеси тепломасообміну при контакті повітря з водою, здійснюючи більш глибоке охолодження циркуляційної води. Таким чином, викидний факел з градирні має нижчу відносну вологість, вищу температуру і швидкість, що збільшує висоту його підйому та ефективність розсіювання.

Вивчення розсіювання факельного викиду з градирні проводилося в аеродинамічній трубі (АТ). Для забезпечення умов подібності обтікання моделі градирні, виконаної в масштабі 1:400, швидкість повітря у вільній зоні не менше 4 м/с.

Схема експериментальної установки наведена на рис.1. Модель градирні була встановлена в робочій зоні АТ. Для моделювання приземного шару, подібного атмосферному, використовувалися решітки, турбулізатори та крупнозерниста шкірка. Вуглекислий газ, мічений радіоактивним криптоном ($^{85}$Kr), послідовно підмішувався до викиду газів. Для забезпечення перемішування міченого газу з повітряним потоком вуглекислий газ подавався у всмоктуючі отвори нагнітальників моделі градирні або джерела димових газів. Регулювання і контроль витрати газу, що подавався, здійснювалось редуктором, голчастим вентилем та напівпровідниковим витратоміром. Витрати повітря, що подається в модель, контролювалися мікроманометром. Для утворення рівномірного поля швидкостей потоку в гирлі моделі, що імітує пароповітряний факел, модель на 2/3 її висоти була заповнена металевою стружкою.

Вертикальний розподіл швидкості і інтенсивність турбулентності в модельованому приземному шарі висотою h = 0,8 м близькі до натурних, які спостерігаються в рівнинній місцевості. Швидкість

потоку у верхній частині моделі градирні ($H_м$ = 0,2 м) фіксувалася в процесі досліджень і була рівною $V_в$ = 4 м/с. Значення числа Рейнольдса, розраховане вздовж висоти моделі, $Re_М = 4 \cdot 10^4$, характеризує умови автомодельного обтікання моделі.

В дослідженнях зберігалося співвідношення швидкостей виходу і набігаючого потоку $V_{гр}/V_в$, що має місце в натурних умовах. Швидкість подачі димових газів при дослідженнях змінювалась в діапазоні 10÷20 м/с, що відповідає області автомодельності. Швидкість викиду з моделі градирні відповідала характерному діапазону (4 ÷6 м/с) для даного типу градирні, що також забезпечувало умови автомодельності ($Re_{гр} = 1{,}8 \cdot 10^4$).

Концентрація міченого газу визначалась методом відбору проб з об'єму робочої частини аеродинамічної труби за допомогою вакуумного насоса через забірний зонд в пробовідбірник, де розташований газорозрядний лічильник СТС-6. Сигнал з лічильника надходив на лічильний прилад ПСО-2М, де фіксувалася швидкість імпульсів $N_i$, пропорційна концентрації індикатора.

Контроль стабільності умов експерименту здійснювався в характерній точці за потоком вздовж градирні на відстані 14 Н (Н – висота градирні), де періодично фіксувалася концентрація, перемиканням забірних зондів на пробовідбірник.

При вивченні розсіювання викидів димових труб методом моделювання прийнята інтерпретація результатів досліджень у вигляді безрозмірного параметра К

$$K = \frac{c \cdot (V_в)_м \cdot H^2}{m}, \qquad (1)$$

де $c$ – концентрація шкідливості в димових газах, мг/м$^3$; $(V_в)_м$ – швидкість потоку на рівні моделі, м/с; $H$ – висота моделі, м; $m$ – маса викиду, мг/с.

При використанні в якості мітки радіоактивного газу про величину його концентрації в досліджуваній точці судять по швидкості імпульсів $N_i$ в об'ємі проби. Знаючи швидкість імпульсів $N_o$ в гирлі джерела, безрозмірний комплекс $K$ визначається як

$$K = \frac{N_i \cdot (V_в)_м \cdot H^2}{N_o \cdot L}, \qquad (2)$$

де $L$ – витрата міченого газу, в гирлі джерела, м$^3$/с.

При дотриманні основних вимог до моделювання безрозмірні комплекси $K$ в моделі і натурі повинні бути рівними, тобто $K_м = K_н$

Таким чином, знаючи розподіл величин $K$ в моделі, можна визначити поля концентрацій в натурі і розрахувати їх значення:

$$c_н = \frac{K_м \cdot m_н}{(V_в)_н \cdot H_н^2}, \text{ мг/м}^3 \qquad (3)$$

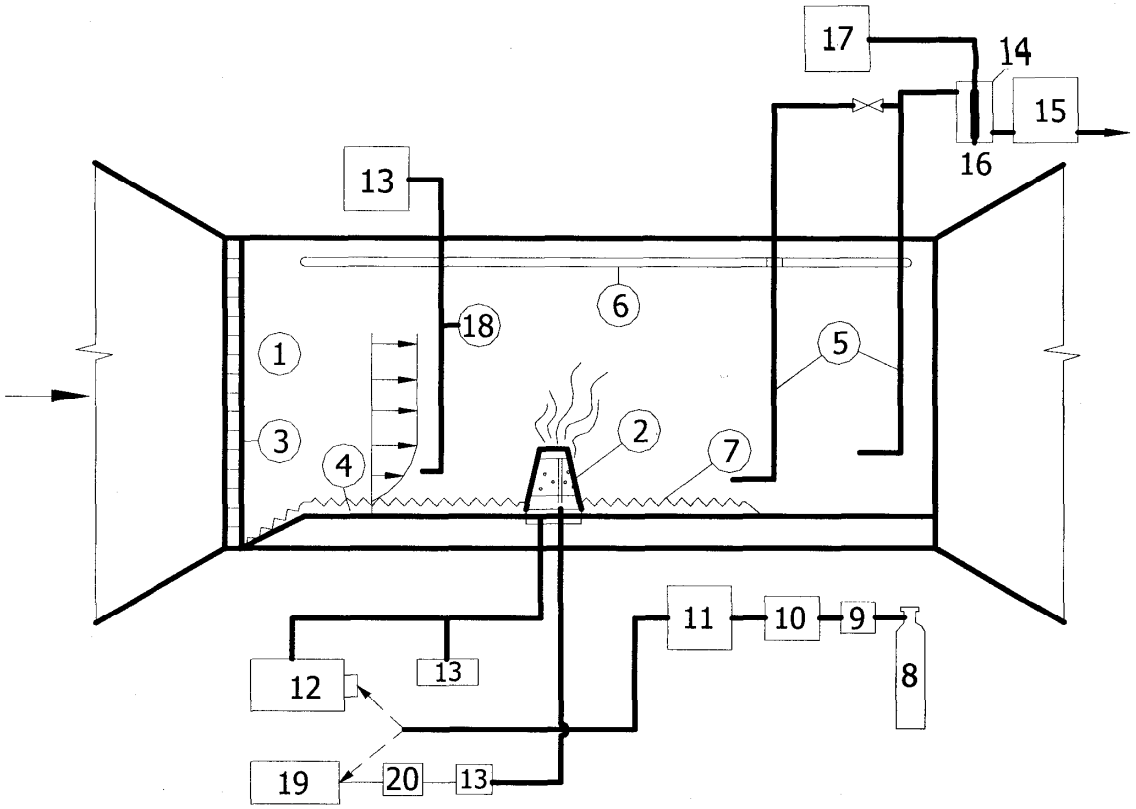


*Рис. 1 Схема експериментальної установки:*
*1- робоча частина аеродинамічної труби; 2- модель; 3- профілююча решітка; 4- елементи шорсткості; 5- забірний зонд; 6 – координатне обладнання; 7- крупнозерниста шкірка; 8- балон з вуглекислим газом; 9- редуктор; 10-голчастий вентиль; 11- полупровідниковий витратомір; 12, 19- повітродувка; 13- мікроманометр; 14- повітрозбірник; 15- вакуумний насос; 16- газорозрядний лічильник; 17-перераховувальний лічильник ПСО-2М; 18- трубка Піто; 20- ЛАТР.*

Для порівняння розрахункового викиду оксидів азоту, що містяться в димових газах, за результатами експериментальних досліджень використовувався коефіцієнт мінімального розбавлення

$$(K^{p}_{min})_{м} = \frac{m}{C_{max}}, \text{ м}^3/\text{с} \qquad (4)$$

де $C_{max}$ – максимальна приземна концентрація викидів, мг/м$^3$.

Для натурних умов коефіцієнт мінімального розбавлення визначається з врахуванням безрозмірного комплексу $K^{max}_{м}$

$$(K^{p}_{\min})_{н} = \frac{(V_в)_{м} \cdot H^{2}_{н}}{K^{max}_{м}}, \qquad \text{м}^3/\text{с} \qquad (5)$$

де $(V_в)_н$ - швидкість потоку на рівні висоти градирні, м/с.

Безрозмірні величини *К*, отримані при моделюванні, відповідають часу осереднення концентрацій протягом кількох

хвилин. Внаслідок цього проводиться відповідне коригування експериментальних даних і приведення їх до 20-хвилинного осереднення .

Використовуючи коефіцієнт мінімального розбавлення, можна розрахувати значення гранично допустимих викидів ( ГДВ ) для оксидів азоту, що містяться в димових газах

$$\text{ГДВ} = (K^{p}_{min})_{н} \cdot (\text{ГДК} - C_{ф}),\ \text{мг/м}^3 \quad (6)$$

де *ГДК* – гранично допустима концентрація шкідливостей , мг/м$^3$;
$C_ф$ – фонова концентрація шкідливостей, мг/м$^3$.

При вивченні розсіювання пароповітряного факелу градирні мічений газ уводився в забірний отвір повітродувки, що подає повітря в гирло градирні. Швидкості виходу пароповітряної суміші і набігаючого потоку підтримувалися рівними між собою. Імітація викиду димових газів здійснювалася через трубку d=14мм, яка розміщена по центру градирні.

Для оцінки впливу подачі димових газів на характер розсіювання пароповітряного факелу градирні попередньо були отримані розподіли безрозмірних приземних величин *К* для викиду градирні. Розподіл приземних значень *К* по потоку без подачі димових газів ілюструє крива 1 на рис. 2. Крива розподілу *К* має чітко виражений максимум в перетинах
x = (7…9) Н. Криві 2 і 3 характеризують розподіл приземних величин *К* по потоку при швидкостях факельного викиду відповідно 15 і 20 м/с. Очевидно, що подача димових газів практично не впливає на локалізацію максимальних приземних концентрацій. Значення максимальних *К* зменшується при збільшенні швидкості факельного викиду димових газів від 0 до 20м/с.

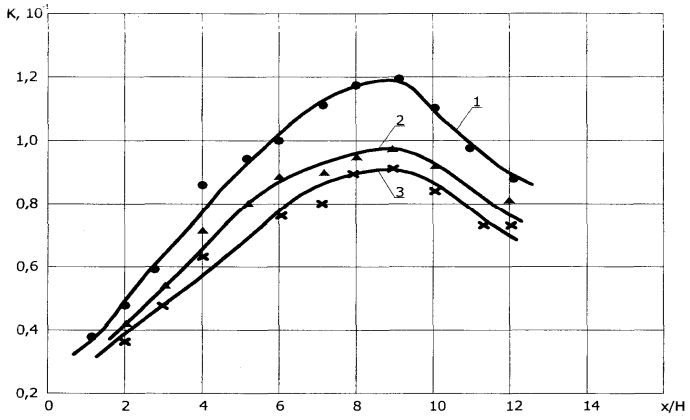


*Рис.2. Розподіл приземних величин К по потоку від окремо стоячої градирні при різних швидкостях димових газів ($V_{г.р.} = V_в$):*
*1.без подачі димових газів; 2. подача димових газів з швидкістю $V_г$ =15 м/с;*
*3. подача димових газів з швидкістю $V_г$ =20 м/с;*

Значення вертикального розподілення експериментальних безрозмірних концентрацій К на різних відстанях від градирні характеризують траєкторію факелу і висоту його підйому (рис. 3). Для варіантів викиду з градирні пароповітряної (1) або газоповітряної (2)суміші вісь факелу фіксувалась відповідно на висоті: для x=0,05H-z=1,2 і z=1,25H, для x=8H(область максимальних величин К) – z=1,7H і z=1,85H. Такі траєкторії характеризують більш висоту підйому факелу градирні. Вертикальні розподіли К дозволяють також оцінити розсівання факела і падіння вісьових концентрацій по потоку при подачі в неї димових газів.

Для оцінки впливу подачі димових газів на дисперсію пароповітряного факелу вивчались поперечні і вертикальні розподіли *К*. На рис. 4 приведено порівняння поперечних розподілів приземних величин *К* в перерізі *x*=6H при наявності подачі димових газів ($V_г$ =15 м/с) і без них. Ширина пароповітряного факелу градирні при наявності факельного викиду більша, що свідчить про більш інтенсивне його розсіювання і зниження концентрацій окислів азоту в приземній області.

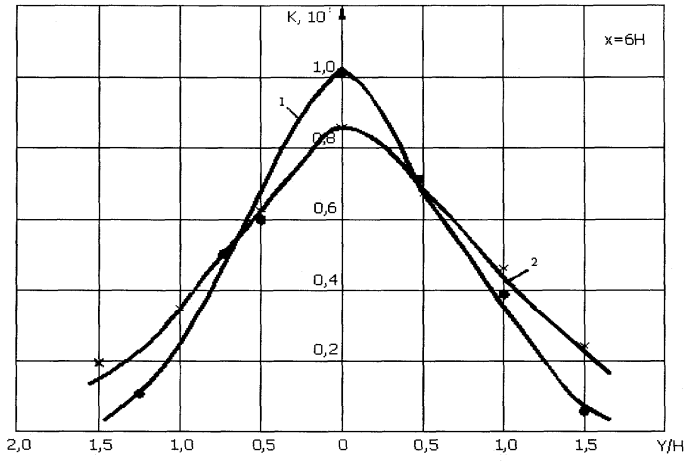


*Рис. 4 Поперечний розподіл безрозмірних приземних величин К в перерізі X=6H,* $\frac{V\text{гр}}{V_в}=1$

*1- без подачі димових газів;2-з подачею димових газів із швидкістю* $V_г$ *=15 м/с*

В результаті досліджень було встановлено вплив співвідношення швидкостей подачі димових газів $V_{г.}$ і швидкості пароповітряного факела *V*гр на величину приземних концентрацій в зоні максимуму. Значення $\frac{V_Г}{V_{ГР}}$ змінялося в межах від 3 до 10. Найбільша зміна концентрацій, що відповідає границям вказаного діапазону, не перевищувала 25%.

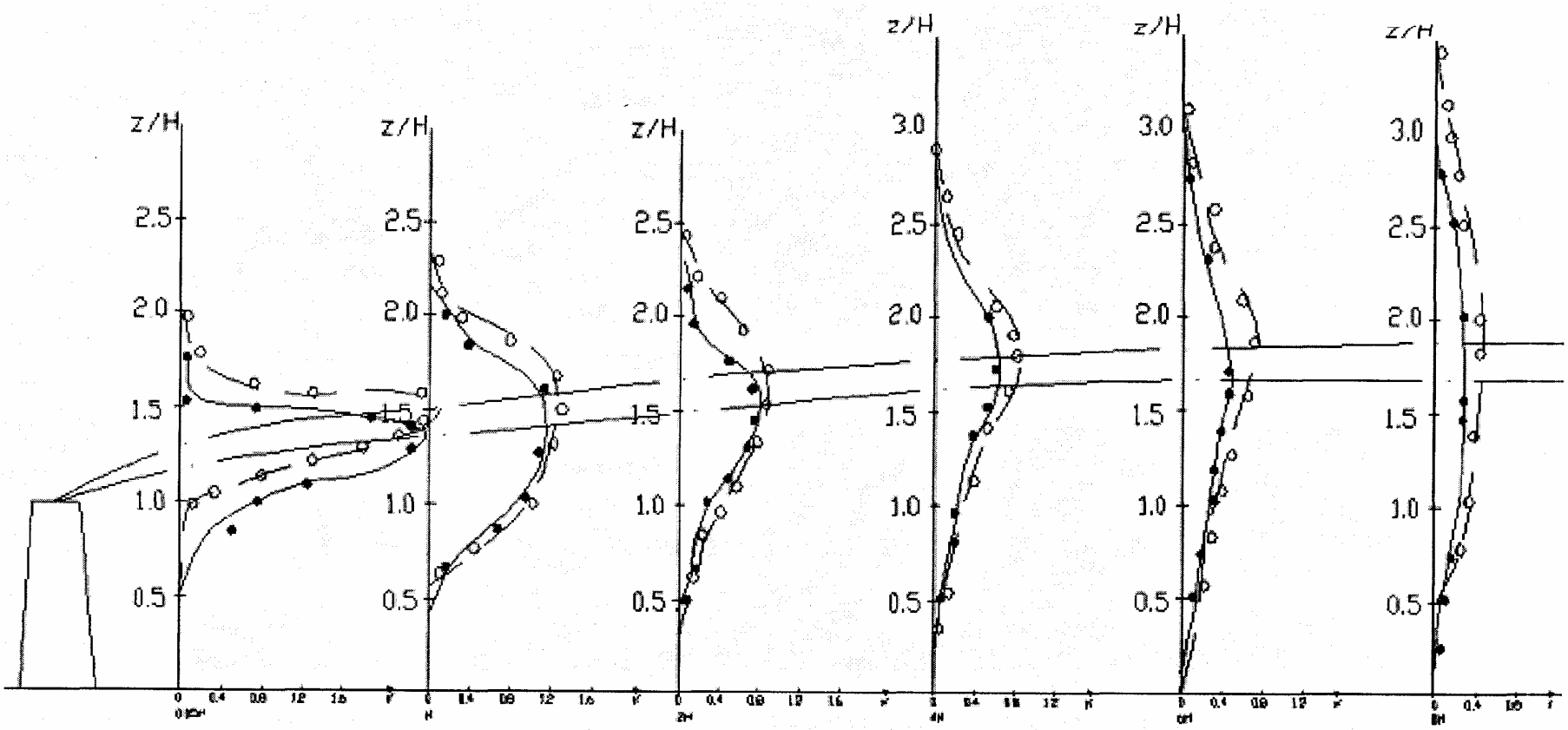


*Рис. 3 Вертикальні розподіли безрозмірних величин К в різних перерізах по потоку для окремо стоячої градирні (швидкість викиду $V_{гр}$=6м/с, $V_{гр}/v_{в}$=1*

*без подачі в градирню димових газів;*

*з подачею димових газів через швидкістю $V_{г}$=20м/с і температурою $t_{г}$=80°С.*

Вплив подачі димових газів ($V_г$ =15 м/с) на вертикальні розподіли максимальних приземних концентрацій *K* при x=8H наведені на рис. 5. Аналіз приведених розподілів показав, що спостерігається зменшення максимальних приземних концентрацій вниз за потоком.

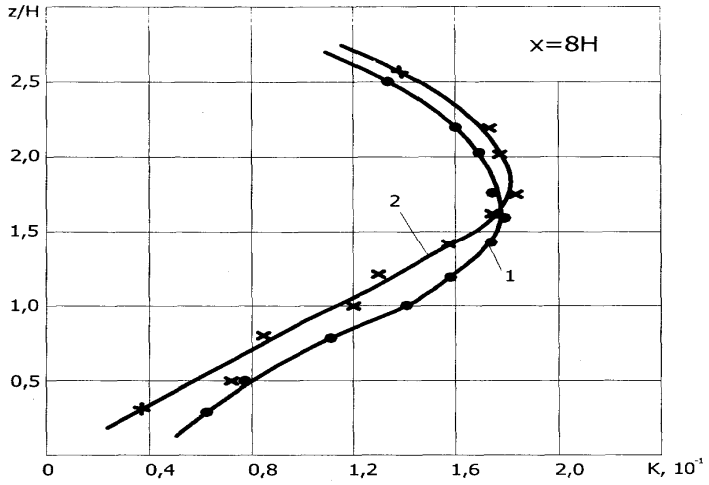


*Рис. 5 Вертикальний розподіл безрозмірних величин K в перерізі по потоку X=8H при $V_{гр}/V_в$=1*
*1 – без подачі димових газів; 2 – з подачею димових газів з швидкістю$V_г$ =15 м/с.*

На рис. 6 наведені поперечні розподіли концентрацій в пароповітряному факелі градирні з подачею димових газів ($V_Г$ =15 м/с) в різних перерізах по потоку. Одержані криві ілюструють зростання ширини факельного викиду.

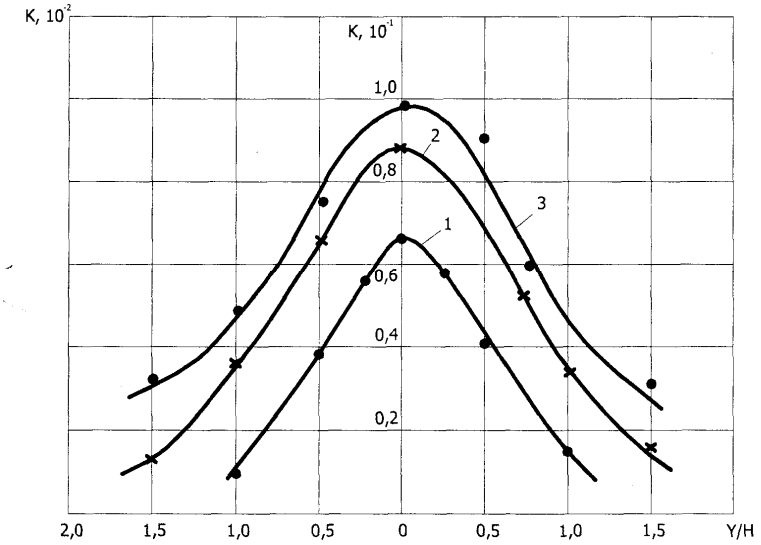


*Рис. 6 Поперечний розподіл безрозмірних приземних величин K в різних перерізах по потоку $V_{гр}/V_в$=1; швидкість подачі димових газів $V_г$ =15 м/с.*
*1 - в перерізі X=4H; 2 - в перерізі X=6H; 3 - в перерізі X=9H.*

Для більш надійної кількісної оцінки впливу подачі димових газів на дисперсію пароповітряного факела градирні була проведена серія вимірів концентрацій в точці локалізації максимуму приземних концентрацій при різних швидкостях виходу димових газів.

Результати розрахунку величин *К*, що характеризують розподілення концентрацій шкідливостей в пароповітряному факел градирні, дозволяють зробити висновок, що за наявності подачі димових газів з швидкістю $V_г$=30 м/с величина приземних максимальних величин *К* зменшується на 16%. Збільшення швидкості факельного викиду з 30 до 40 м/с зменшує значення *К* на 7 %. Відносна похибка розрахунків не перевищувала 5 %.

В подальших дослідженнях мічений газ підмішувався до факельного викиду, розсіювання якого вивчалося з метою виявлення області максимальних приземних концентрацій і оцінки їх найбільших значень. Для отримання кривої розподілу приземних величин *К*, внаслідок значного розбавлення, потрібно було збільшити концентрацію радіоактивного газу, що вводиться у факельний викид. Швидкість відліку імпульсів у факельному викиді в горловині градирні склала $N_o = 3 \cdot 10^5$ ім/с. Крива розподілу приземних значень *К*, що отримана при дослідженнях, показана на рис. 7. Область найбільших приземних значень відповідає перетинам (8…10) Н. Значення *К* в точці максимуму $K^{max} = 1,2 \cdot 10^{-2}$.

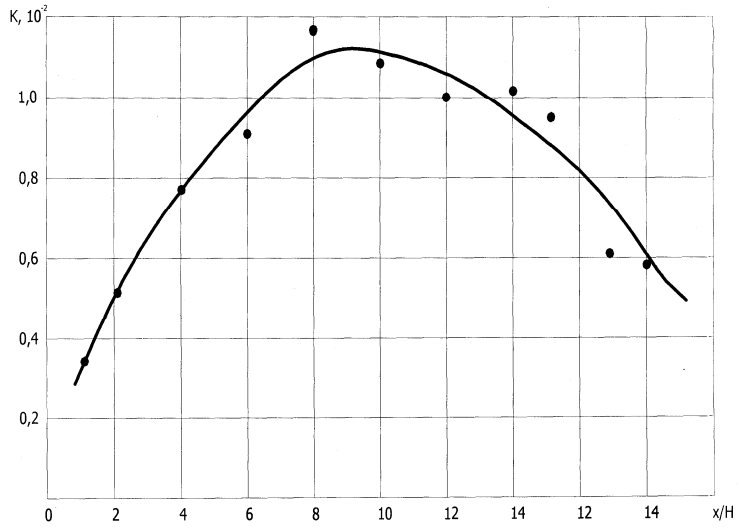


*Рис. 7 Розподіл безрозмірних приземних величин К по потоку для подачі газів зі швидкістю $V_г$=15 м/с, швидкість викиду пароповітряної суміші градирні $V_{гр}$=6 м/с.*

При подачі димових газів у факелі градирні збільшується вміст оксидів азоту $NO_x$. Кількість оксидів азоту, які викидаються в градирню, прийнято 180 г/с.

При перерахунку експериментальних величин $K_м$ на натурні умови отримані наступні результати. Найбільші значення приземних концентрацій оксидів азоту, очікувані в натурних умовах, складають (формула 3)

$$C_н^{max} = \frac{1{,}2 \cdot 10^{-2} \cdot 180 \cdot 10^3}{6 \cdot 80^2} = 0{,}06 \text{ (мг/м}^3\text{), що менше ГДК=0,085мг/м}^3$$

Відповідно коефіцієнт мінімального розбавлення, який очікується в натурних умовах (формула 5)

$$(K_{\min}^{p})_н = \frac{6 \cdot 64 \cdot 10^2}{1{,}2 \cdot 10^{-2}} = 3{,}2 \cdot 10^6 \text{ м}^3\text{/с.}$$

Гранично допустимий викид розраховувався по величині ГДК для населених місць.

Таким чином, ГДВ для комбінованої градирні при використанні димових газів без врахування фонових концентрацій складає (формула 6)

$$\text{ГДВ} = 3{,}2 \cdot 10^6 \cdot 85 \cdot 10^{-3} = 272 \cdot 10^3 \text{ мг/с. } ГДВ_{NO_x} = 272 \text{ г/с.}$$

Для більш обережної оцінки значення ГДВ розраховувалися за максимальними експериментальними величинами $K$ без врахування корегуючих коефіцієнтів на час усереднення концентрацій.

Експериментальні дані порівнювались з розрахунковими за відомими методиками. Максимальні розрахункові значення приземних концентрацій склали $c_m$=0,07мг/м$^3$, що практично збігається з результатами експерименту. Відстань $x_м$=26.Н=2080м від градирні до точки максимуму істотно перевищує експериментальний результат.

### *Висновки*

1. На моделі градирні в аеродинамічній трубі експериментально вивчено розсіювання факельного викиду з використанням методу радіоактивної мітки. Обробка отриманих даних виконувалась у вигляді універсальних безрозмірних комплексів концентрацій шкідливостей. Показано, що за відносних швидкостей $\frac{V_{ГР}}{V_В} = 1$, зони приземних максимальних концентрацій від факелу труби-градирні знижуються на відстані (8-10)Н градирні.

2. Для газоповітряного факелу в зоні локалізації максимальних приземних концентрацій подача димових газів в градирню знижує величини $K$ при $V_г$=40 м/с на 25%, при $V_г$=15 м/с на 16%. Виявлено, що концентрації окисів азоту в зоні максимуму при цих умовах не перевищує ГДК.

## Список література

1. Корбут В.П., Ищенко М.Ю. Особенности совместной работы котлоагрегатов и газотурбинных установок с башенными градирнями //Вентиляция, освітлення та теплопостачання – К.:КНУБА, 2003, с.3-10.
2. Ищенко М.Ю. Физическое моделирование тепломассообменных процессов в градирне // Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины. – Херсон-2004.-№2(9), с.159-169
3. Корбут В. П., Іщенко М. Ю. Енерго- та екологоефективні технології видалення димових газів з використанням баштових градирень//Нова тема.-К.-2006.-№3.-см.28-30
4 Корбут В. П., Іщенко М. Ю. Результати експериментальних досліджень модернізованої баштової градирні //Нова тема.-К.-2007.-№4-с.9-11.

**УДК 697. 34**

**А.А. Олексюк,** *д.т.н., професор,*
**М.В. Долгов,** *аспірант*
Донбаська національна академія будівництва та архітектури

## ОПТИМІЗАЦІЯ ГІДРАВЛІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЕПЛОВИХ МЕРЕЖ.