

ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗСІЮВАННЯ У ВІТРОВОМУ ПОТОЦІ ПАРОВОПІТРЯНОГО ФАКЕЛА З БАШТОВОЇ ГРАДИРНІ

Будівництво висотних промислових споруд, зокрема баштових градирень, повинно виконуватися з урахуванням особливостей їх аеродинамічної та теплової взаємодії із зовнішнім вітровим потоком. Важливість вивчення цих процесів пов'язана не тільки з проблемою стійкості висотних споруд під дією вітрового тиску, а також з тим, що баштові градирні вважаються серед споруд, що входять до складу теплових електростанцій, основними забруднювачами повітряного басейну водяною парою та надлишковим теплом.

Для визначення шляхів підвищення ефективності роботи цих об'єктів енергетики, поліпшення їх аеродинамічної стійкості, а також створення таких умов їх роботи, що відповідали б вимогам екологічної безпеки, необхідне детальне вивчення та теоретичний аналіз аеродинамічних та тепломасообмінних процесів, що водночас протікають в згаданий устроях та навколишньому повітряному просторі. Такий підхід сприятиме вирішенню паралельно з проблемою аеродинамічної стійкості споруд, проблем підвищення ефективності роботи енергетичного обладнання та проблем енергозбереження.

В даній роботі розглядаються результати дослідження впливу зовнішнього вітрового потоку на поля швидкості і температури повітряного потоку, а також на поля концентрації водяної пари в аеродинамічному сліді за баштовою градирнею. Розв'язання цієї проблеми здійснюватиметься шляхом числового моделювання. Числове моделювання згаданих процесів передбачає розв'язання чисельними методами системи рівнянь турбулентного переносу кількості руху, маси та енергії у повітряному потоці з відповідними умовами на твердих поверхнях та на границях розрахункової області. При побудові моделей аеродинамічної взаємодії вітрового потоку зі спорудою (зокрема, з баштовою градирнею) важливо враховувати більшість фізичних факторів, що

істотно впливають на цей процес. Але у той же час необхідно, щоб ці моделі можна було б реалізувати на сучасних обчислювальних машинах. Тому на початкових етапах числових досліджень доцільним є деяке спрощення постановки задачі з врахуванням впливу лише визначальних факторів процесу, що досліджується.

Розглядається повітряна течія над поверхнею, на якій розташована модель баштової градирні. Задача описується системою рівнянь, що складається з рівняння нерозривності, рівнянь турбулентного переносу імпульсу, енергії та маси. Для її замикання використовується $k - \epsilon$ модель турбулентності [1]. Розв'язання задачі тривимірної течії повітря, що супроводжується розповсюдженням тепла та водяної пари, виконується в обмеженій прямокутній розрахунковій області, площини якої паралельні прямокутним координатам. Одна з вертикальних площин розрахункової області (наприклад, площина $x = 0$) збігається з площиною симетрії градирні. Поля швидкостей і концентрацій водяної пари в повітряному потоці також вважаються симетричними щодо цієї площини. Вісь OY має напрямок, що збігається з напрямком незбуреної течії повітря.

Модель градирні розглядається у вигляді порожнього усіченого конуса висотою $h_2 = 20$ м з діаметрами основ 17,6 м (нижня) та 11,7 м (верхня). Нижня основа вважається піднятою над поверхнею на 1,67 м, що забезпечує вільний доступ зовнішнього повітря у градирню. Таким чином моделюється процес уведення повітря до градирні через аераційні вікна.

На поверхнях градирні, а також на нижній горизонтальній граничній площині ($z = 0$), що відповідає земній поверхні, швидкість повітря, а також нормальні в напрямку до твердих поверхонь градієнти температури та концентрації пари, дорівнюють нулю. На протилежній (верхній) горизонтальній граничній площині ($z = z_{\max}$), а також на інших вертикальних граничних площинах, вектор швидкості потоку вважається паралельним одній з горизонтальних осей координат (наприклад, осі OY). Модуль вектора цієї швидкості (v) у вертикальній площині на вході в розрахункову область ($y = 0$) відповідає відомому закону змінення швидкості незбуреного вітрового потоку з висотою над твердою поверхнею, а температура незбуреного потоку повітря і відносна концентрація водяної пари в ньому відповідають їх фоновим значенням T_{∞} , $\rho_{1v, \infty}$. На інших вертикальних граничних площинах складові вектора швидкості u та w , а також нормальні до цих площин градієнти швид-

кості v , так само, як і градієнти температури та концентрації водяної, дорівнюють нулю.

Природна підйомна течія повітря у баштовій градирні виникає за рахунок його нагріву вище температури зовнішнього середовища внаслідок теплообміну повітря з краплинами конденсату води. Для спрощення задачі, нагрів повітря від краплин конденсату замінюється його нагрівом від уявних внутрішніх джерел тепла в потоці, що діють в межах градирні. Потужність цих джерел вибирається у відповідності з необхідним рівнем перегріву повітря у градирні, що спостерігається на практиці. Водяна пара у градирні вважається насиченою. Тому, у межах її об'єму відносна концентрація пари визначається температурою повітря в даній точці та термодинамічними умовами насичення.

Прямокутна розрахункова область обмежується вертикальними і горизонтальними граничними площинами. З граничних площин фіксованими є лише площини $x = 0$, $y = 0$ та $z = 0$. Місцезнаходження границь $x = x_{\max}$, $y = y_{\max}$ та $z = z_{\max}$ визначається шляхом послідовних наближень з умови, що їх подальше збільшення вже слабо впливає на результати розв'язання задачі.

На твердих поверхнях значення кінетичної енергії турбулентності дорівнюють нулю. Що стосується величин швидкості дисипації ϵ , то вони на твердих поверхнях вважаються невизначеними. Замість граничних умов для ϵ на твердих поверхнях їх значення розраховуються в найближчих до поверхні розрахункових точках області течії за виразом, наведеним в [2].

Система диференціальних рівнянь переносу з відповідними граничними умовами розв'язується методом сіток. Дискретизація диференціальних рівнянь виконується за методом контрольного об'єму. Розв'язок одержаної системи різницевих рівнянь виконується на прямокутній різницевій сітці ($20 \times 80 \times 27$) методом ітерацій, що подібний до наведеного в [3]. Різницева сітка приймається рівномірною в області розташування градирні. За межами цієї області кроки за координатами збільшуються в напрямках граничних площин $x = x_{\max}$, $y = y_{\max}$ та $z = z_{\max}$, де градієнти величин, що розраховуються, прямують до нуля. З розв'язання наведеної системи диференціальних рівнянь переносу визначаються поля швидкості повітряної течії, тиску, температури та концентрації водяної пари в повітряному потоці.

Розглянемо його результати для випадку густини внутрішніх джерел $q_v = 2500 \text{ Вт/м}^3$. Зовнішній вітровий потік рухається з ліва направо.

Профіль його швидкості на вході в розрахункову область в першому наближенні вважається рівномірним: $v_{\infty} = 4,3$ м/с. Температура на вході в розрахункову область становить $T_{\infty} = 20$ °С, а відносна концентрація водяної пари – $\rho_{1\infty} = 0,00695$, що відповідає вологості повітря $\phi = 0,5$.

Максимальна температура усередині градири за наведених умов складає 43,3 °С. Відповідна до цієї температури максимальна відносна концентрація пари в умовах насичення становить $\rho_{1s} = 0,05809$. Картини течії повітря та ізолінії температури у площині симетрії $x = 0$ відображені на рис. 1. Як видно з рисунка, ширина пароповітряного факела спочатку збільшується в напрямку руху повітряних мас, а потім починає поступово зменшуватися, що є наслідком розсіювання факела в зовнішньому вітровому потоці. Видно також, що в повітряному потоці за градиною утворюються циркуляційні зони, які відповідним чином впливають на форму ізотерм у площинах, що розглядаються.

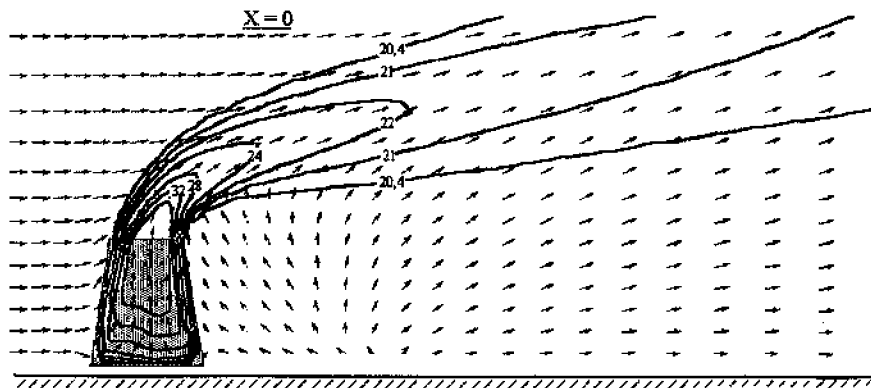


Рис. 1. Картина течії і поле температури (°С) в площині симетрії $x = 0$

На рис. 2 наведено графіки зміни з висотою z над землею поверхнею різниці $\Delta\rho_{1s} = \rho_{1s}(0,y,z) - \rho_{1\infty}$ у площині симетрії $x = 0$ для різних безрозмірних значень відстані $\Delta y/h$ від градири в напрямку течії. На деякій висоті z функції $\rho_{1s}(0,y,z)$ досягають максимальних значень. Ці значення z_{\max} можна вважати висотами підйому факела для наведених відносних відстаней $\Delta y/h$. Вони змінюються від $z_{\max} = 1,5h$ для малих значень $\Delta y/h$ до $z_{\max} = 2,4h$ при $\Delta y/h \approx 8$. Максимальні значення перепаду відносних концентрацій $\Delta\rho_{1s}$ при цьому зменшуються від $\Delta\rho_{1s, \max} = 0,0175$ при $\Delta y/h = 0,05$ до $\Delta\rho_{1s, \max} = 0,0032$ при $\Delta y/h = 8$. Зазначені ве-

личини характеризують інтенсивність розсіювання пароповітряного факела вітровим потоком.

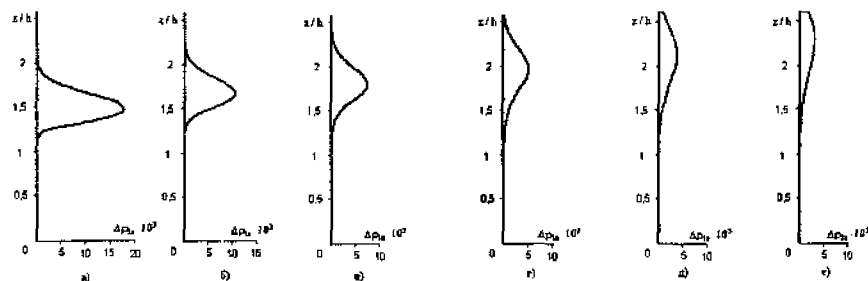


Рис. 2. Зміна з висотою надлишкової відносної концентрації водяної пари в повітрі в площині симетрії $x = 0$: а) $\Delta y / h = 0,05$; б) $\Delta y / h = 1,0$; в) $\Delta y / h = 2,0$; г) $\Delta y / h = 4,0$; д) $\Delta y / h = 6,0$; е) $\Delta y / h = 8,0$

З наведених результатів випливає, що навіть при $\Delta y / H = 8$ величина відносної концентрації водяної пари в повітрі, джерелом якої є факел градирні, відчутно перевищує її фонове значення. Наслідком цього є надлишкового зволоження оточуючого середовища не тільки на території електростанції, але й за її межами. З цим може бути пов'язане додаткове кригоутворення на дахах будівель, накопичення надлишкової вологи у навколишніх спорудах тощо. Одним з можливих напрямків зниження додаткового зволоження при випарному охолодженні води в баштових градирнях є збільшення висоти підйому, а також осушення пароповітряного факела, наприклад, шляхом спільної роботи градирні з викидними пристроями продуктів згоряння після котлоагрегатів або газотурбінних установок [4]. Для аналізу можливого результату цих заходів, розв'язання подібної задачі виконано також за умов, що усередині градирні міститься патрубок діаметром 1,47 м, через який в пароповітряний потік додатково вводиться струмінь нагрітого до температури 120°C повітря, що має швидкість на виході з патрубку 20 м/с та відносну концентрацію пари $\rho_{1v,\infty}$ (таку ж, як і в незбуреному потоці повітря).

За цих умов, максимальна температура усередині градирні не перевищуватиме температуру повітряного струменя, що вводиться через патрубок, а умови насиченості можна прийняти лише для тієї частини пароповітряної суміші в градирні, що знаходиться нижче рівня верхнього перерізу патрубку (тобто в тій частині об'єму градирні, де вплив струменя – не суттєвий). Вище перерізу патрубку концентрація пари в повітрі визначається вже з розв'язання системи рівнянь переносу за

умов, що в пароповітряний потік вводиться струмінь, що має більш високу температуру та меншу концентрацію пари. З результатів розрахунків випливає, що за згаданих умов максимальна концентрація пари в градирні становить $\rho_{1в} = 0,042$ при температурі $38,39^\circ\text{C}$. Під впливом високотемпературного струменя відбувається часткове осушення повітря.

Картина течії повітря і температурне поле в площині симетрії $x = 0$ відображені на рис. 3. В порівнянні з попереднім (див. рис. 1), у даному випадку напрямок руху пароповітряного факела, що надходить з градир-

ні – більш прямовисний. Це є наслідком додаткового імпульсу з боку струменя, що вводиться у потік, а також дії природної конвекції, яка завдяки більш високій температурі виявляється інтенсивнішою, ніж у випадку, що розглядався раніше.

Наслідком прямовисного напрямку руху факела є збільшення висоти його підйому. Про це свідчать криві розподілу функції $\Delta\rho_{1в} = \rho_{1в}(0, y, z) - \rho_{1в,\infty}$ у площині симетрії $x = 0$ в залежності від безрозмірної висоти z/h над поверхнею та безрозмірної відстані $\Delta y/h$ від градирні (рис. 4). Ці функції, як і ті, що наведені (див. рис. 2), мають максимуми на деякій висоті z . Але в порівнянні з випадком, що розглядався спочатку, їх максимальні значення виявляються у 2,5...3,1 раза меншими, що є наслідком часткового осушення факела. При цьому, значення z , що відповідають максимумам функції $\Delta\rho_{1в}$, в 1,3...1,4 раза вищі за аналогічні значення z_{\max} для першого випадку.

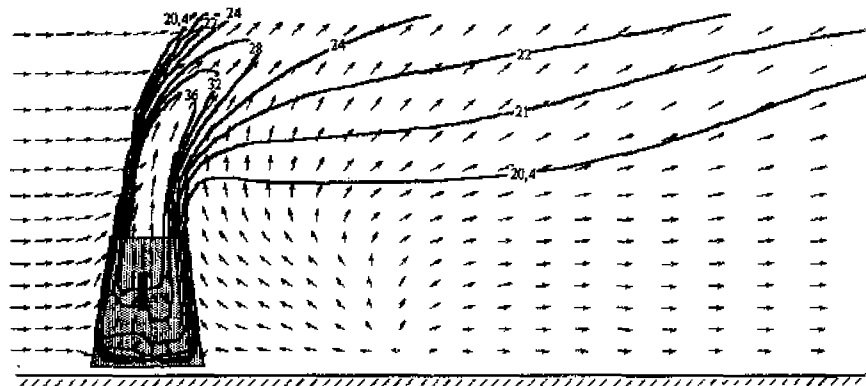


Рис. 3. Картина течії і поле температури ($^\circ\text{C}$) в площині симетрії $x = 0$ у випадку подачі нагрітого повітряного струменя в градирню

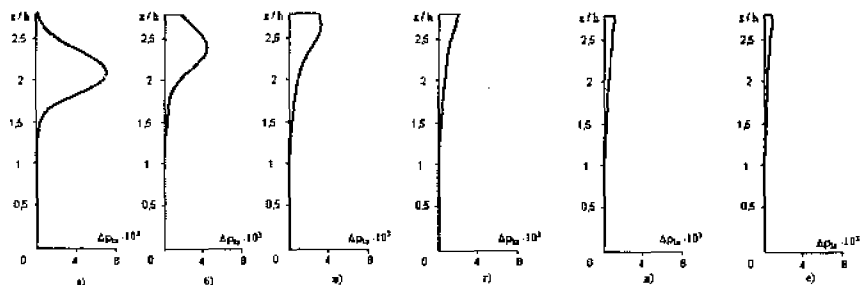


Рис. 4. Зміна з висотою надлишкової відносної концентрації водяної пари в повітрі в площині симетрії $x = 0$ у випадку подачі нагрітого повітряного струменя в градирню: а) $\Delta y / h = 0,05$; б) $\Delta y / h = 1,0$; в) $\Delta y / h = 2,0$; г) $\Delta y / h = 4,0$; д) $\Delta y / h = 6,0$; е) $\Delta y / h = 8,0$

Таким чином, з результатів числового моделювання процесу розсіювання в зовнішньому вітровому потоці пароповітряного факела, що надходить з баштової градирні, впливає, що осушення факела та збільшення висоти його підйому досягається шляхом об'єднання факела з нагрітим повітряним струменем. Це відбувається внаслідок додаткового імпульсу з боку струменя, а також внаслідок збільшення виштовхувальної сили, що діє на повітряний потік з більш високою температурою. Для організації такого струменя може використовуватися система видалення димових газів, що суміщається з градирнею.

Використана література

1. Роді В. Модели турбулентности окружающей среды // Методы расчета турбулентных течений. М.: Мир, 1984. – С. 227–315.
2. Озо, Маури, Хирамицу, Черчилл, Лайор. Численный расчет трехмерной турбулентной свободной конвекции в кубической полости с помощью модели турбулентности из двух уравнений // Теплопередача. – 1986. – № 4. – С. 67–75.
3. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
4. Корбут В. П., Иценко М. Ю. Особенности совместной работы котлоагрегатов и газотурбинных установок с башенными градирнями // Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. Науково-технічний збірник КНУБА – К.: 2003. – № 6. – С. 39–46.