

УДК 532.542:534.142

Виникнення автоколивань тиску в потоках теплоносіїв та розроблення механізмів зменшення амплітуди цих коливань

Б. І. Басок¹, Б. В. Давиденко², В. Г. Новіков³, С. М. Гончарук⁴, Л. М. Кужель⁵, О. М. Лисенко⁶

¹д.т.н., проф., член-кор. НАН України, зав. відділу, Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна, basok@itf.kiev.ua, ORCID:0000-0002-8935-4248

²д.т.н., ст. наук. співробітник, гол. наук. співробітник/ Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна, bdavydenko@ukr.net, ORCID:0000-0001-8738-7612

³к.т.н., ст. наук. співробітник/ Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна, nvg52@i.ua, ORCID:0000-0003-1062-7336

⁴к.т.н., пров. наук. співробітник. Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна, goncharuk-s@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5609-7337

⁵к.т.н., ст. наук. співробітник Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна, kuzhel_liliya@ukr.net, ORCID:0000-0002-5481-4566

⁶к.т.н., ст. наук. співробітник Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ, Україна, lisenko_oks@ukr.net, ORCID:0000-0003-3981-9796

Анотація. Автоколивання тиску, що виникають в елементах енергетичного обладнання з внутрішнім підведенням теплоти, можуть у ряді випадків погіршувати роботу цього обладнання. При високих амплітудах автоколивань можуть створюватися умови для його пошкодження. Термоакустичні автоколивання є наслідком нестійкості течії. Відомим прикладом процесів, що супроводжуються генерацією термоакустичних автоколивань, є вібраційне горіння, що спостерігається в ракетних двигунах, в підігрівачах повітря для доменних печей та ін. З метою визначення характеристик автоколивань тиску виконуються чисельні дослідження природної конвекції у вертикальному каналі при внутрішньому локальному виділенні теплоти. Виділення теплоти від внутрішніх джерел відбувається на обмеженій ділянці каналу, що знаходиться ближче до його вхідного перерізу. Біля вхідного перерізу каналу розташовується система коаксіальних циліндричних тіл, що утворюють додатковий місцевий гідравлічний опір повітряній течії. Характеристики повітряної течії в каналі, що супроводжується автоколиваннями швидкості і тиску, визначаються з чисельного розв'язання системи рівнянь динаміки і перенесення теплоти для стисливого середовища з урахуванням залежності теплофізичних властивостей повітря від температури. За результатами цього розв'язання визначаються поля швидкості, тиску й температури в потоці. Показано, що зміни в часі швидкості й тиску в потоці мають характер коливань зі змінною амплітудою. Коливання швидкості на виході з каналу протікають у протифазі з коливаннями швидкості на вході в канал. Знайдено амплітуди та частоти цих коливань. Визначено заходи, що сприяють зменшенню амплітуди коливань тиску в потоці. Серед них – розосередження джерела внутрішнього виділення теплоти та зменшення місцевого гідравлічного опору. Ці заходи можна застосовувати для зменшення негативного впливу автоколивань на енергетичне обладнання.

Ключові слова: природна конвекція, чисельне моделювання, автоколивання тиску, амплітуда коливань, джерело тепловиділення.

Вступ. При підведенні теплоти в стисливе газове середовище за певних умов виникають автоколивання швидкості й тиску в потоці. Ці коливання можуть утворюватися при спалюванні паливних сумішей у різних теплових пристроях, а також при конвекційному підведенні теплоти до потоку від стороннього джерела. Відомим проявом цього ефекту є вібраційне горіння, яке спостерігається в камерах згорання реактивних двигунів. Цей ефект необхідно враховувати при проектуванні теплоенергетичного обладнання. Коливання тиску можуть створювати додаткові механічні навантаження на елементи конструкцій цього обладнання, що може призводити до його пошкодження. Режим

автоколивань тиску та швидкості змінює також умови перебігу тепломасообмінних процесів. У зв'язку з цим виникає необхідність поглибленого вивчення цього ефекту. Важливою проблемою є також визначення залежності характеристик автоколивань від геометричних та режимних параметрів роботи енергетичного обладнання, а також розроблення механізмів зменшення амплітуди цих коливань.

Актуальність дослідження. Термоакустичні коливання, що виникають в камерах згорання реактивних двигунів, в повітрянагрівачах доменних печей та в інших елементах теплоенергетичного обладнання, можуть бути причиною їх пошкодження та виходу з ладу. Крім то-

го, ці явища змінюють характеристики протікання процесів тепломасообміну в цьому обладнанні. Автоколивання тиску через залежність їхньої амплітуди від рівня теплового навантаження не дозволяють підвищувати температуру дуття доменних печей та покращувати економічні характеристики виробництва.

Термоакустичні автоколивання виникають у газовому потоці внаслідок втрати стійкості. Нестійкі режими течії виникають в енергетичному обладнанні, у якому відбувається внутрішнє виділення теплоти в обмеженому об'ємі або існує зовнішнє підведення теплоти. Закономірності цього явища на сьогодні ще недостатньо вивчені. Тому визначення цих закономірностей та розроблення методів зменшення амплітуди автоколивань тиску для запобігання їхній руйнівній дії на обладнання є на сьогодні актуальною проблемою.

Останні дослідження та публікації.

Теоретичні дослідження термоакустичних коливань виконувалися переважно при спрощених математичних постановках задач гідродинаміки та теплообміну, які дозволяють отримувати їхні аналітичні розв'язання. У роботі [1] наведено результати досліджень автоколивань тиску, що виникають в установках з горінням. В основу теоретичних досліджень покладено енергетичний метод. На його основі розроблено модель, що дозволяє розглядати самозбудження поздовжніх акустичних коливань газу в типових пристроях з горінням. При цьому вважається, що автоколивання виникають унаслідок наявності феноменологічного запізнення процесу горіння.

У роботі [2] зазначається, що автоколивання тиску виникають не лише при горінні, а й при конвекційному підведенні теплоти до потоку. Тобто крім феноменологічного запізнення процесу горіння існують також інші причини збудження автоколивань, серед яких важливе значення має т.з. "негативний" в'язкісний опір тертя. Він проявляється як зниження за певних умов опору тертя в каналі при зростанні швидкості потоку. Адже збільшення швидкості течії супроводжується зменшенням температури. Останнє знижує в'язкість повітря, що і призводить до зменшення опору тертя. Аналіз впливу негативного в'язкісного опору на виникнення автоколивань тиску представлено в роботі [3].

У статті [4] розглядається можливість виникнення негативного опору й автоколивань у потоці рідини, що має експоненціальну залежність в'язкості від температури. Збільшення температури рідини відбувається за рахунок її саморозігріву при русі.

У роботі [5] визначалися механізми теплогідравлічної нестійкості течії газу при локальному підведенні теплоти. Побудовано відповідну математичну модель руху газу. Для розглянутої моделі визначено тензор дисипації теплової енергії, що характеризує наявність негативного опору.

У статті [6] досліджено характер зміни амплітуди автоколивань у камері горіння, що виникають унаслідок феноменологічного запізнення згоряння палива в камері. Встановлено, що при витоку продуктів згоряння через сопло, що звужується, опір в'язкісного тертя зменшується зі збільшенням масової витрати продуктів згоряння. Це призводить до нестійкості стаціонарного режиму горіння.

Математичну модель з зосередженими параметрами, що описує автоколивання в трубі Рійке при розташуванні ресивера на її вході, запропоновано в [7]. З її використанням досліджено вплив потужності електронагрівача і об'єму вхідної ємності на умови самозбудження і форму розглянутих автоколивань.

Спрощену методику для розрахунку параметрів автоколивань, що збуджуються при нестійкому вібраційному горінні у вертикальних камерах згоряння повітрянагрівачів доменних печей, розроблено у роботі [8]. В основу запропонованої методики покладено нелінійну автономну динамічну систему, що подібна до рівнянь теорії помпажа лопатевого нагнітача. У статті [9] розглянуто варіант побудови тривимірної математичної моделі, що описує режим вібраційного горіння у вертикальній камері горіння регенеративного повітрянагрівача доменної печі. У цій моделі камера згоряння розглядається як розподілена динамічна система.

Шляхом аналітичних досліджень у роботі [10] визначено характеристики автоколивань вібраційного горіння в моделі РРД, які збуджуються при дії різних механізмів нестійкості. Встановлено особливості зміни параметрів автоколивань вібраційного горіння залежно від системи подачі рідкого палива однокомпонентного рідинного реактивного двигуна. Обґрунтовано можливість зниження амплітуди розглянутих коливань.

У роботі [11] наведено узагальнення результатів аналітичних досліджень автоколивань тиску. Ці результати отримано розв'язанням системи рівнянь руху суцільного середовища у формі, що аналогічна рівнянням теорії помпажу.

Розглянуті результати досліджень одержано за спрощеними математичними моделями, що дозволяють отримувати аналітичні розв'язки.

Ці результати описують переважно умови виникнення та якісний характер автоколивань. Для визначення кількісних характеристик автоколивань необхідно застосовувати більш точні постановки задач гідродинаміки і перенесення теплоти та чисельні методи для їхнього розв'язання.

Формулювання цілей статті. Дослідження виконуються з метою визначення закономірностей розвитку автоколивань тиску в потоці стисливого середовища при локальному внутрішньому підведенні теплоти та розроблення заходів щодо зниження амплітуди цих коливань для запобігання їхній руйнівній дії на теплоенергетичне обладнання.

Основна частина. Для дослідження характеристик автоколивань тиску в потоці та визначення способів зменшення їхньої амплітуди виконується чисельне моделювання динаміки повітряної течії та перенесення теплоти у вертикальному каналі при локальному внутрішньому підведенні теплоти до потоку. Течія повітря відбувається за рахунок природної конвекції. Вона виникає внаслідок локального підводу теплоти до повітряного середовища всередині каналу. Теплота підводиться на деякій ділянці обмеженої довжини Δz , м, за рахунок дії внутрішніх джерел. Ця ділянка розташовується ближче до вхідного перерізу каналу.

Чисельні дослідження гідродинаміки і перенесення теплоти у вертикальному циліндричному каналі виконуються в розрахунковій області (рис.1), яка охоплює циліндричний канал, що розміщений в циліндричній порожнині з відкритими верхнім та нижнім перерізами. Радіус порожнини становить r_{max} , м, а висота її – z_{max} , м.

У пристроях, у яких відбувається процес горіння паливної суміші (камери згорання), зазвичай присутні окремі елементи, що створюють додатковий місцевий гідравлічний опір потоку газу. Такими елементами можуть бути, наприклад, стабілізатори полум'я. Схематично їх можна представити у вигляді системи концентричних кілець, що знаходяться біля вхідного перерізу каналу і мають з каналом спільну вісь симетрії.

Рух стисливого повітряного середовища в циліндричному вертикальному каналі вважається симетричним відносно осі циліндра. Цей рух описується системою рівнянь, до якої входять:

- рівняння нерозривності;
- рівняння перенесення імпульсу;
- рівняння енергії.

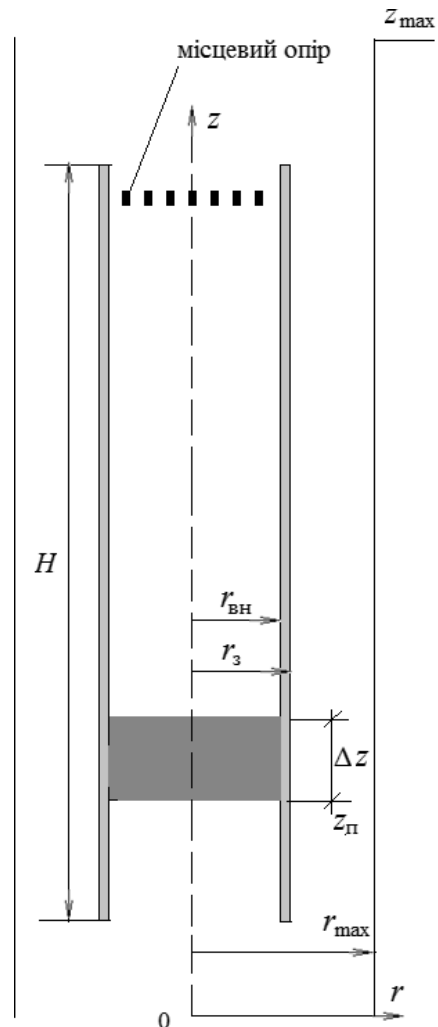


Рис. 1. Схема розрахункової області

Додається також рівняння стану ідеального газу та залежності теплофізичних властивостей газу від температури. Граничними умовами для цієї системи рівнянь будуть значення тиску у вхідному та вихідному перерізах розрахункової області, а також значення температури газу у вхідному перерізі.

Тиск повітря у вихідному перерізі визначається з умови рівності між перепадом тиску між нижнім та верхнім перерізами розрахункової області та вагою стовпа повітря, що знаходиться між цими перерізами. У вихідному перерізі похідна від температури за вертикальною координатою вважається рівною нулю. На поверхнях твердих елементів швидкість повітря дорівнює нулю. Ці поверхні вважаються адиабатичними.

Система диференціальних рівнянь перенесення з зазначеними граничними умовами розв'язується методом скінчених різниць. Для цього будується розрахункова сітка та виконується апроксимація диференціальних рівнянь у частинних похідних скінченими різницями за схемою, наведеною в роботі [12]. Система різницевих рівнянь розв'язується методом матри-

чної прогонки [13]. За результатами її розв'язання визначаються поля швидкості, тиску і температури, що змінюються у часі.

Для визначення закономірностей автоколивань тиску розглядається течія повітря у вертикальному каналі заввишки $H = 1,1$ м, діаметром $D = 2r_{\text{вн}} = 0,1$ м за умов підведення теплоти потужністю $Q = 3000$ Вт від внутрішнього об'ємного джерела. Початок ділянки підведення теплоти знаходиться на відстані $z_n = 0,16$ м від вхідного перерізу каналу. Довжина цієї ділянки становить $\Delta z = 0,12$ м. Приймається, що у вхідному перерізі розрахункової області температура повітря дорівнює $T_\infty = 293$ К, а тиск $-p_0 = 101000$ Па.

За результатами побудовано зміну в часі швидкості повітряної течії у вхідному (рис. 2 а) та у вихідному (рис. 2 б) перерізах каналу на часовому інтервалі $6,50 \text{ с} < \tau < 6,55 \text{ с}$. Ці криві мають характер коливань зі змінною амплітудою. Середня швидкість у вхідному перерізі становить $0,575 \dots 0,59$ м/с, а у вихідному перерізі – $1,31 \dots 1,335$ м/с. Середня швидкість на виході з каналу більш ніж у двічі перевищує швидкість потоку на вході. Частота коливань швидкості становить $\omega_v \sim 220 \dots 240$ Гц.

Характерною особливістю коливального руху газового середовища у вертикальному каналі з локальним підведенням теплоти є те, що коливання швидкості на виході з каналу протікають у протифазі з коливаннями швидкості на вході в канал. Отже, при максимальній швидкості потоку на виході з каналу, швидкість потоку на вході в канал буде мінімальною, а при мінімальній швидкості на виході з каналу, швидкість на вході буде максимальною. Це свідчить про те, що газовий потік, рухаючись поступально вгору під дією термогравітаційної сили, здійснює водночас коливальний рух, розширюючись і звужуючись у напрямках вхідного та вихідного перерізів каналу.

Також побудовано (рис. 3) зміну в часі надлишкового тиску в перерізі каналу, що знаходиться на відстані $0,1$ м від його вихідного перерізу. Цей переріз знаходиться перед місцевим гідравлічним опором на відстані $0,03$ м від нього. Результати відповідають двом часовим інтервалам: $6,3 \text{ с} < \tau < 6,35 \text{ с}$ (рис. 3 а) та $6,5 \text{ с} < \tau < 6,55 \text{ с}$ (рис. 3 б). Надлишковий тиск відраховується від його значення при $z = 0$, де він дорівнює p_0 .

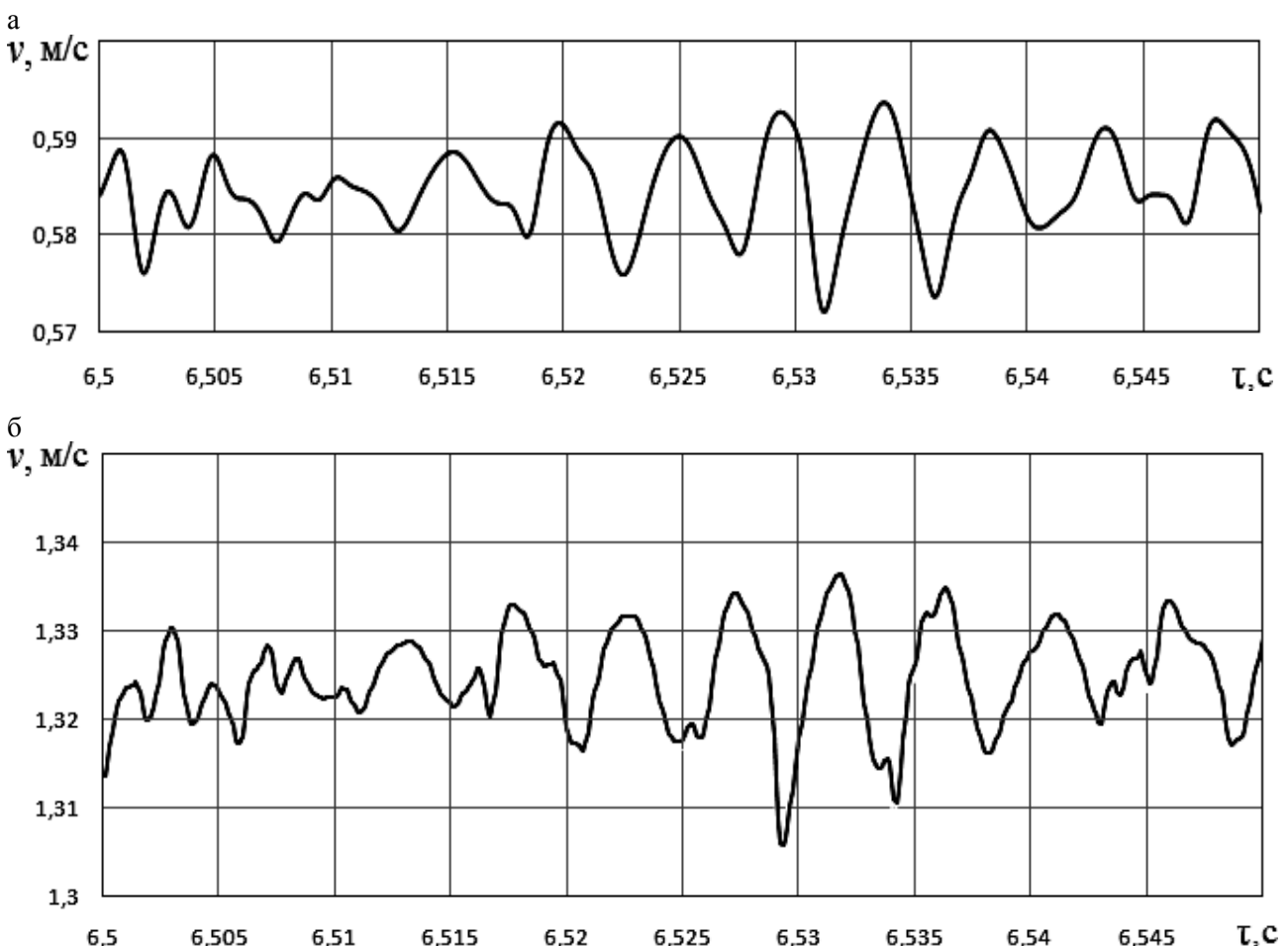


Рис. 2. Зміна швидкості течії на часовому інтервалі $6,5 \text{ с} < \tau < 6,55 \text{ с}$ за умов підведення теплоти потужністю $Q = 3000$ Вт у перерізі: а – вхідному; б – вихідному

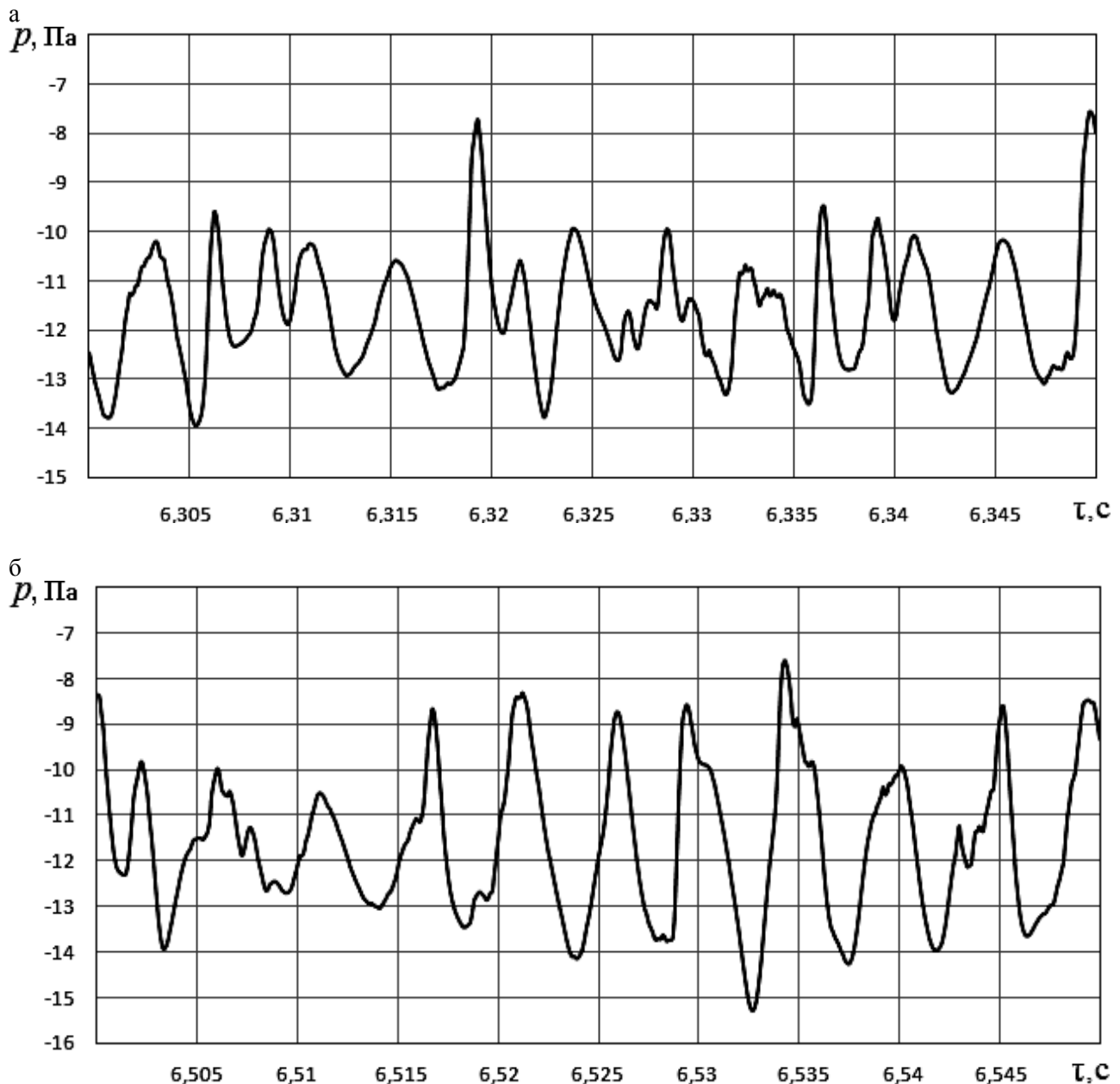


Рис. 3. Зміна надлишкового тиску в перерізі, що знаходиться на відстані 0,1 м від вихідного перерізу каналу, за умов підведення теплоти потужністю $Q = 3000$ Вт на часовому інтервалі:
а – $6,3 \text{ с} < \tau < 6,35 \text{ с}$; б – $6,5 \text{ с} < \tau < 6,55 \text{ с}$

Як видно з цього рисунку, зміна в часі тиску в цьому перерізі має характер негармонійних коливань, що відбуваються зі змінною амплітудою $A_p \sim 2,0 \dots 3,0$ Па та з частотою $\omega_p \sim 220 \dots 240$ Гц.

Найчастіше автоколивання тиску, що виникають при роботі теплоенергетичного обладнання, вважається негативним та несприятливим явищем. Особливо це стосується випадків, коли коливання тиску відбуваються зі значною амплітудою, або якщо частота цих коливань збігається з однією з власних частот елементів обладнання. У таких випадках необхідно вживати заходи щодо зменшення амплітуди або зміни частоти коливань.

Згідно з даними [11], дієвим заходом зі

зменшення амплітуди коливань тиску при внутрішньому виділенні теплоти може бути розосередження джерел тепловиділення або розподіл теплового навантаження за довжиною вертикального каналу. Для підтвердження цього способу зменшення амплітуди коливань тиску досліджуються характеристики повітряної течії у вертикальному каналі висотою $H = 1,1$ м з місцевим гідравлічним опором біля вихідного перерізу для двох випадків внутрішнього підведення теплоти в потік.

Порівнюються випадки суцільної ділянки внутрішнього підведення теплоти потужністю $Q = 3000$ Вт (рис. 4 а), а також двох ділянок підведення теплоти, кожна з яких має потужність $Q = 1500$ Вт (рис. 4 б).

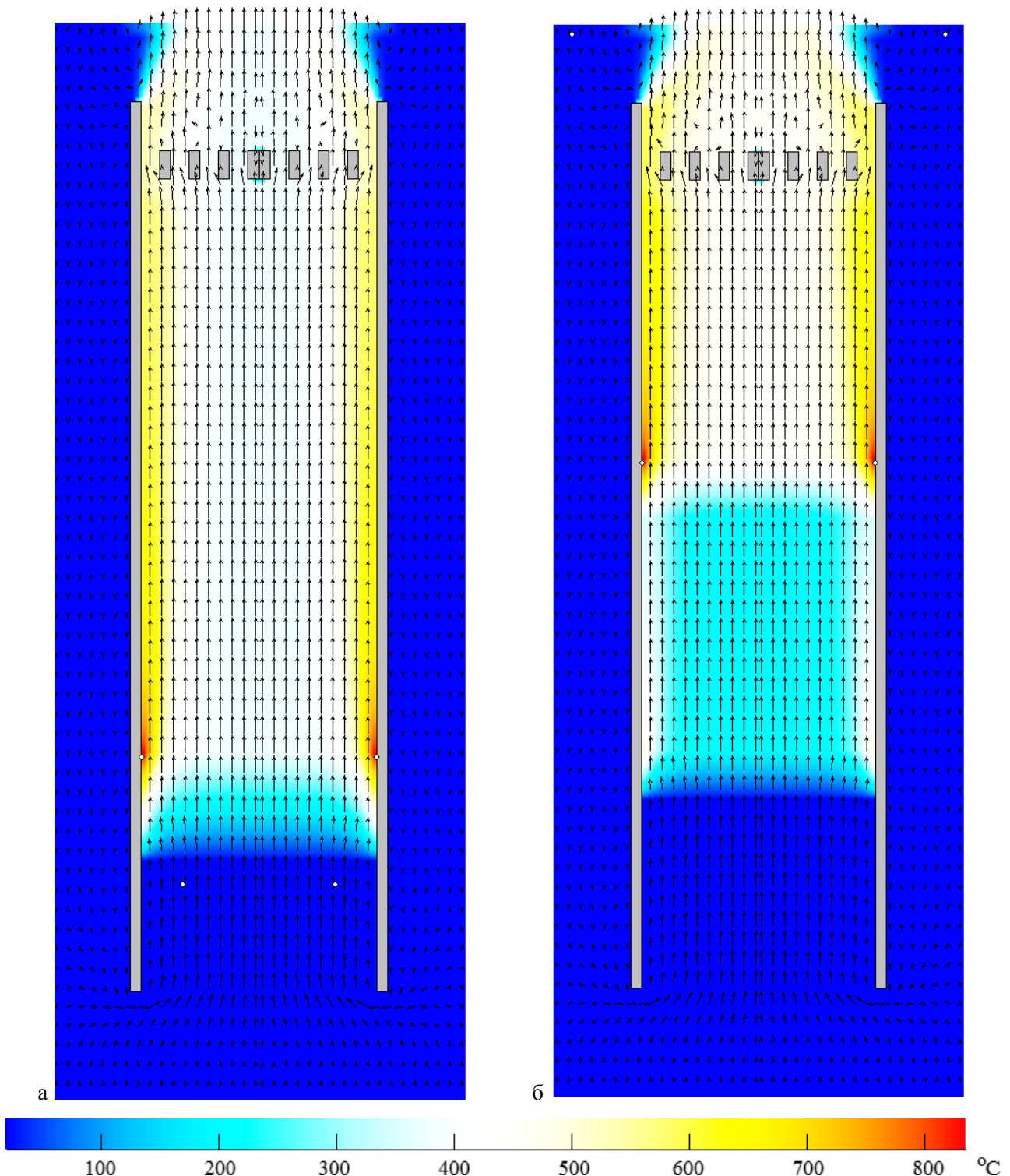


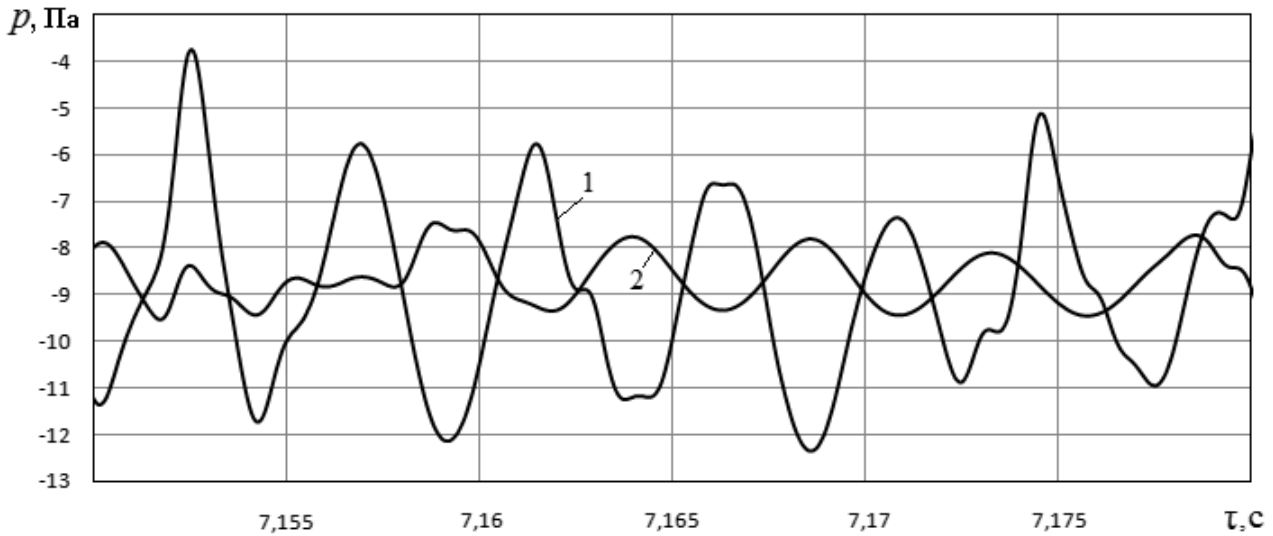
Рис. 4. Поля швидкості і температури у вертикальному каналі заввишки $H = 1,1$ м, діаметром $D = 0,1$ м при $\tau = 6$ с:
 а – при одноступінчастому підведенні теплоти потужністю $Q = 3000$ Вт; б – при двохступінчастому підведенні теплоти (два джерела тепловиділення по $Q = 1500$ Вт)

Як видно з цих рисунків, у випадку двох ділянок (рис. 4 б) має місце ступінчасте зміння температури за висотою каналу. Після першої ділянки потік нагрівається до певної температури, яка залежить від потужності джерела тепловиділення. Після другої ділянки температура потоку знову підвищується

Виконано порівняння характеру зміни у часі надлишкового тиску в перерізі на відстані

0,3 м від вхідного перерізу (рис. 5 а), та у перерізі, що знаходиться на відстані 0,1 м (рис. 5 б) від вихідного перерізу, при одноступінчастому та двоступінчастому способах підведення теплоти. Як видно з цих рисунків, амплітуда коливань тиску при двоступінчастому підведенні зменшується порівняно з випадком одноступінчастого підведення від $A_p \sim 2,0...3,0$ Па до $A_p \sim 0,75...1,0$ Па.

а



б

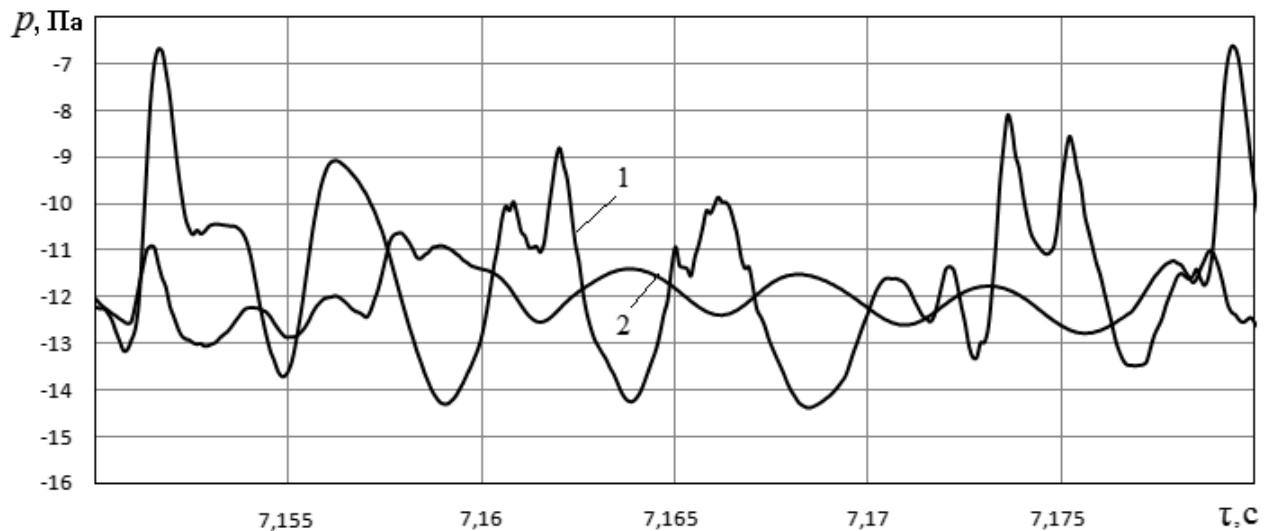


Рис. 5. Зміна в часі надлишкового тиску в каналі заввишки $H = 1,1$ м при сумарному підведенні теплоти $Q = 3000$ Вт у перерізі, що знаходиться на відстані: а – $0,3$ м від вхідного перерізу; б – $0,1$ м від вихідного перерізу:
1 – одноступінчасте підведення теплоти; 2 – двоступінчасте підведення теплоти

Також виконано порівняння характеру зміни в часі швидкості у вхідному та вихідному перерізах каналу при одноступінчастому та двоступінчастому підведенні теплоти (рис. 6). Як видно з цього рисунку, при двоступінчастому підведенні амплітуда коливань швидкості зменшується порівняно з випадком одноступінчатого підведення. При цьому зменшується також і середня швидкість потоку як у вхідному, так і у вихідному перерізах каналу.

Розглянуті вище результати стосувалися випадку місцевого додаткового гідравлічного опору у вигляді чотирьох концентричних циліндричних тіл, що знаходяться біля вихідного перерізу каналу. Далі розглядається варіант додаткового гідравлічного опору, що складається з двох концентричних циліндрів. Гідродинамічний опір цієї системи менше, ніж опір си-

стеми з чотирьох кілець, що розглядалася раніше. Всі інші умови залишаються незмінними.

Наостанок виконано порівняння (рис. 7) характеру зміни в часі надлишкового тиску в перерізі, що знаходиться на відстані $0,3$ м від вхідного перерізу, та у перерізі, що знаходиться на відстані $0,1$ м від вихідного перерізу, при більш високому (криві 1) та зниженому (криві 2) гідравлічних опорах.

Як видно з рис. 7, при зменшенні гідравлічного опору амплітуда коливань тиску також суттєво знижується. Знижується також амплітуда коливань швидкості у вхідному і вихідному перерізах каналу (рис. 8). Сама ж середня швидкість повітря при зниженому гідравлічному опорі підвищується: з $0,6$ м/с до $0,9$ м/с у вхідному перерізі каналу та з $1,35$ м/с до $1,78$ м/с у вихідному перерізі.

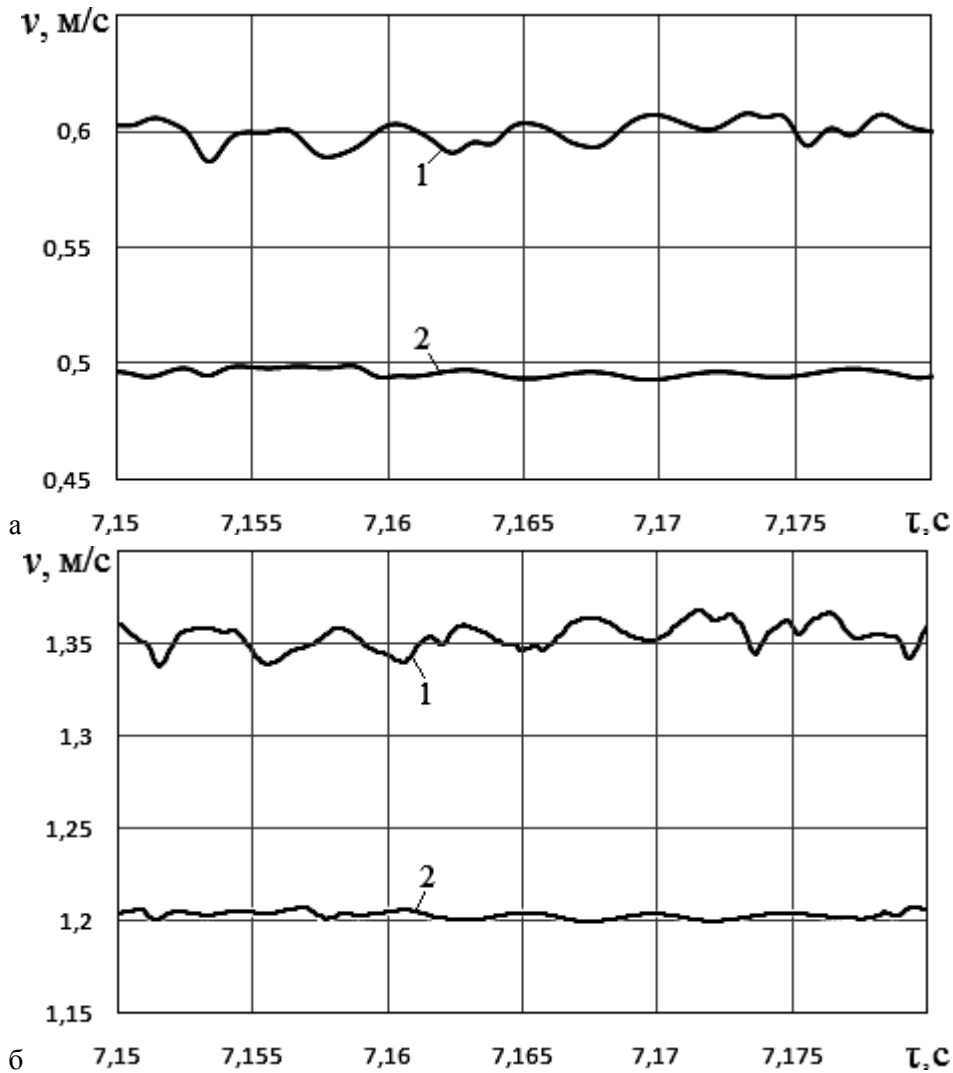


Рис. 6. Зміна в часі швидкості в каналі заввишки $H = 1,1$ м при сумарному підведенні теплоти $Q = 3000$ Вт:
 а – у вхідному перерізі; б – у вихідному перерізі:
 1 – одноступінчасте підведення теплоти; 2 – двоступінчасте підведення теплоти

Висновки. Виконано чисельне моделювання природної конвективної течії повітря у вертикальному каналі з внутрішнім виділенням теплоти на обмеженій ділянці. З результатів чисельних досліджень випливає, що при локальному підведенні теплоти в стисливе газове середовище, що знаходиться у вертикальному каналі з місцевим гідравлічним опором, виникають автоколивання тиску та швидкості. Характер цих автоколивань негармонійний. Вони відбувається з непостійною амплітудою. Результати досліджень показали, що величина швидкості повітряної течії у нижньому (вхідному) перерізі каналу завжди менша, ніж у верхньому (вихідному) перерізі. Коливання швидкості в нижньому та верхньому перерізах каналу відбуваються в протифазі. При

мінімальній швидкості у верхньому перерізі швидкість у нижньому перерізі буде максимальна, і навпаки. Для каналів заввишки 1,1 м та діаметром 0,1 м частота коливань тиску і швидкості становить 220...240 Гц. При розосередженні джерел внутрішнього виділення теплоти амплітуди автоколивань швидкості й тиску зменшуються. Зменшуються також значення швидкості у вхідному та вихідному перерізах каналу. Також амплітуда коливань швидкості й тиску знижується при зменшенні місцевого гідравлічного опору, що знаходиться біля верхнього перерізу каналу. Але при цьому зростають значення швидкості повітря у вхідному та вихідному перерізах. Ці заходи можна застосовувати для зменшення негативного впливу автоколивань на енергетичне обладнання.

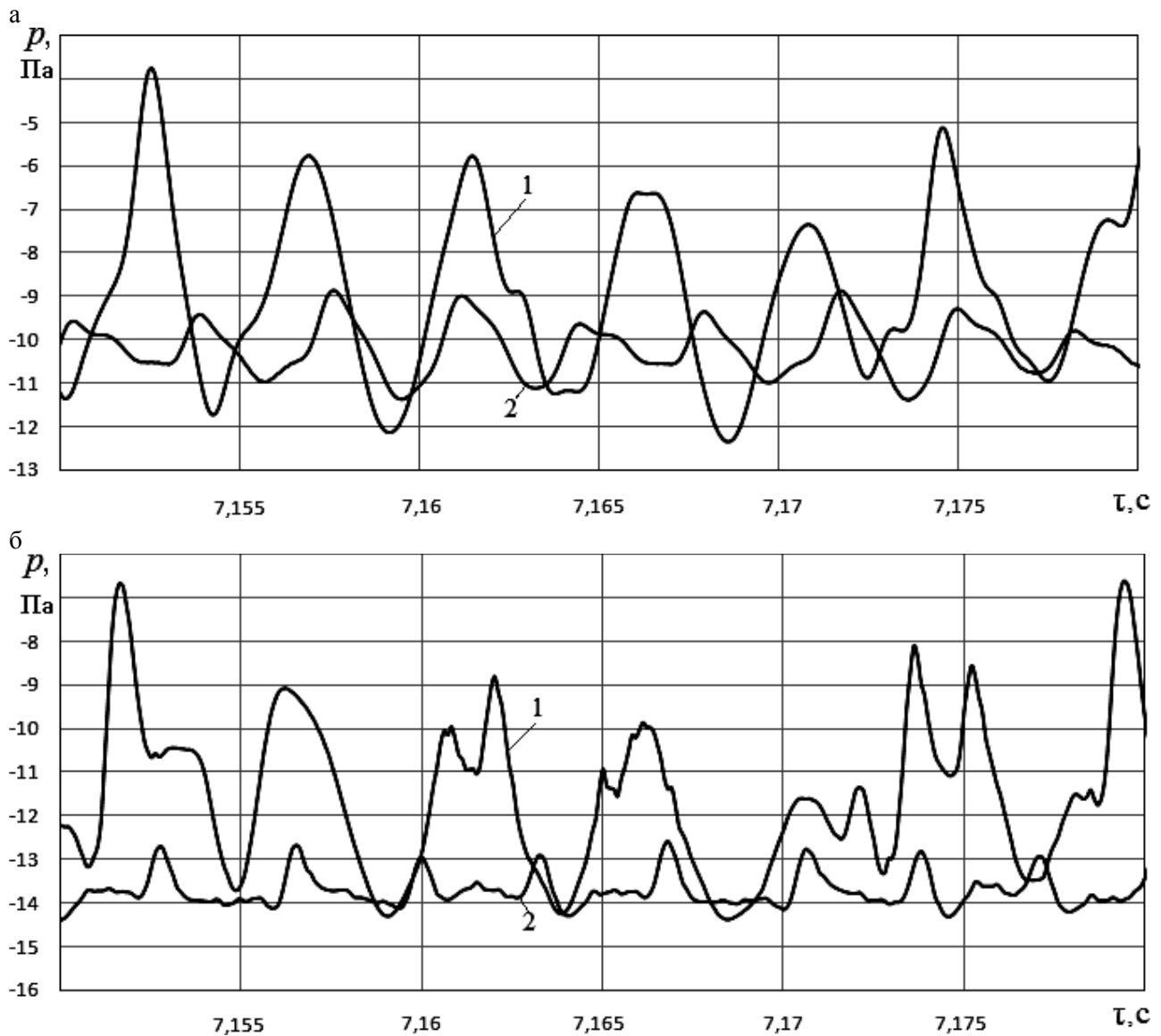


Рис. 7. Зміна в часі надлишкового тиску в каналі заввишки $H = 1,1$ м при сумарному підведенні теплоти $Q = 3000$ Вт у перерізі, що знаходиться на відстані: а – 0,3 м від вхідного перерізу; б – 0,1 м від вихідного перерізу:
1 – підвищений місцевий гідравлічний опір; 2 – знижений місцевий гідравлічний опір

Література

1. Ларинов В. М. Автоколебания газа в установках с горением / В. М. Ларинов, Р. Г. Зарипов. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. Ун-та. 2003. – 227 с.
2. Басок Б. И. Автоколебания в трубе Рийке при расположении электронагревателя непосредственно на ее входе / Б. И. Басок, Б. В. Давыденко, В. В. Гоцуленко // Сибирский журнал индустриальной математики. – 2013. – Т. 14. – № 2(54). – С. 50-61.
3. Басок Б. И. Отрицательное тепловое сопротивление в одномерном установившемся течении совершенного невязкого газа / Б. И. Басок, В. В. Гоцуленко // Труды МФТИ. – 2014. – Т. 6. – № 4(24). – С. 153-157.
4. Мелких А. В. Автоколебания неизоэнтальпического течения вязкой жидкости в канале / А. В. Мелких, В. Д. Селезнев // Теплофизика высоких температур. – 2008. – Т. 46. – № 1. – С. 100-109.
5. Басок Б. И. Механизмы теплогидродинамической неустойчивости при локальном подводе теплоты к газу / Б. И. Басок, В. В. Гоцуленко // Доповіди Національної академії наук України. – 2018. – № 3. – С. 69-79. – <http://dx.doi.org/10.15407/dopovidi2018.03.069>
6. Гоцуленко В. В. К проблеме управления амплитудой автоколебаний поющего пламени / В. В. Гоцуленко, В. Н. Гоцуленко // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87. – № 2. – С. 312-316.
7. Басок Б. И. Автоколебания в трубе Рийке при расположении ресивера на её входе / Б. И. Басок, В. В. Гоцуленко // Теплофизика и аэромеханика. – 2014. – Т. 21. – № 4. – С. 487-496.
8. Басок Б. И. Расчёт параметров автоколебаний в вертикальной камере горения воздухонагревателя доменной печи при неустойчивом горении / Б. И. Басок, В. В. Гоцуленко // Теплоэнергетика. – 2015. – № 1. – С. 59-64.

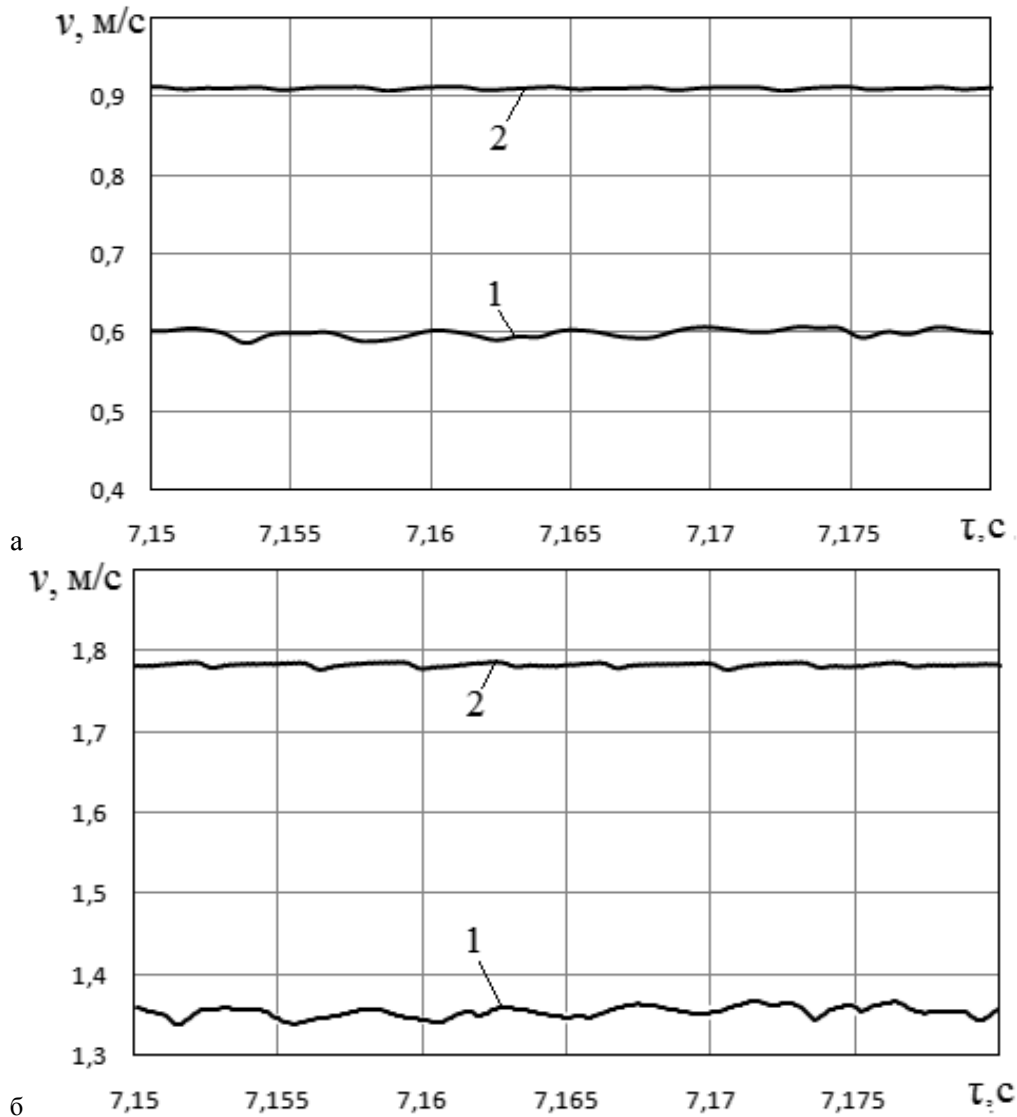


Рис. 8. Зміна в часі швидкості в каналі заввишки $H = 1,1$ м при сумарному підведенні теплоти $Q = 3000$ Вт у перерізі:
 а – вхідному; б – вихідному:
 1 – підвищений місцевий гідравлічний опір; 2 – знижений місцевий гідравлічний опір

9. Басок Б. И. Математическое моделирование режима вибрационного горения в распределенной камере горения воздухоподогревателя доменной печи с теплоподводом / Б. И. Басок, В. В. Гоцуленко // Математическое моделирование и численные методы. – 2019. – № 1(21). – С. 1-18.

10. Басок Б. И. Математическое моделирование общесистемной неустойчивости в ЖРД на унитарном топливе / Б. И. Басок, В. В. Гоцуленко // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2016. – № 3(130). – С. 86-91.

11. Басок Б. И. Термогидродинамическая неустойчивость потока теплоносителя / Б. И. Басок, В. В. Гоцуленко – Київ: ТОВ ВД “КАЛИТА”, 2015. – 412 с.

12. Пе́йре Р. Вычислительные методы в задачах механики жидкости / Р. Пе́йре, Т. Д. Тейлор. – Ленинград: Гидрометеиздат. 1986. – 352 с.

13. Давыденко Б. В. Метод матричной прогонки для решения сеточных уравнений гидродинамики / Б. В. Давыденко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 5₅(35). – С. 7-11.

References

1. Larinov V. M., Zaripov R. G. *Avtokolebaniya gaza v ustanovkakh s goreniiem*. Izd - vo Kazan. gos. tekhn. In-ta. 2003. 227 s.

2. Basok B. I., Davydenko B. V., Gotsulenko V. V. «Avtokolebaniia v tube Riike pri raspolzhenii elektronagrevatelja neposredstvenno na ee vkhode». *Sibirskii zhurnal industrialnoi matematiki*. 2013. T. 14. № 2 (54). P. 50-61.

3. Basok B. I., Gotsulenko V. V. «Otritsatelnoe teplovoe soprotivlenie v odnomernom ustanovivshemsia techenii sovershennoho neviazkogo gaza». *Trudy MFTI*. 2014. T 6. № 4 (24). P. 153 -157.

4. Melkikh A. V., Seleznev V. D. «Avtokolebaniia neizotermicheskogo techeniia viazkoi zhidkosti v kanale». *Teplofizika vysokikh temperatur*. 2008. Т. 46. № 1. P. 100-109.
5. Basok B. I., Gotsulenko V. V. «Mekhanizmy teplogidrodinamicheskoi neustoichivosti pri lokalnom podvode teploty k gazu». *Dopovidi Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy*. 2018. № 3. P. 69 - 79. <http://dx.doi.org/10.15407/dopovidi2018.03.069>
6. Gotsulenko V. V., Gotsulenko V. N. «K probleme upravleniia amplitudoi avtokolebaniia poiushchego plameni». *Inzhenerno - fizicheskii zhurnal*. 2014. Т. 87. № 2. P. 312 - 316.
7. Basok B. I., Gotsulenko V. N. «Avtokolebaniia v trube Riike pri raspolozhenii resivera na ee vkhode». *Teplofizika i aeromekhanika*. 2014. Т. 21 № 4. P. 487 - 496.
8. Basok B. I., Gotsulenko V. V. «Raschet parametrov avtokolebaniia v vertikalnoy kamere goreniiia vozdukhonagrevatel'ia domennoi pechi pri neustoichivom gorenii». *Teploenergetika*. 2015. № 1. P. 59-64.
9. Basok B. I., Gotsulenko V. V. «Matematicheskoe modelirovanie rezhima vibratsionnogo goreniiia v raspredel'noy kamere goreniiia vozdukhonagrevatel'ia domennoi pechi s teplopodvodom». *Matematicheskoe modelirovanie i chislennyye metody*. 2019. № 1 (21). P. 1-18.
10. Basok B. I., Gotsulenko V. V. «Matematicheskoe modelirovanie obshchiesistemnoi neustoychivosti v ZHRD na unitarnom toplive». *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. 2016. № 3 (130). P. 86-91.
11. Basok B. I., Gotsulenko V. V. *Termogidrodinamicheskaya neustoichivost potoka teplonositel'ia*. ООО ID "KALITA". 2015.
12. Peyre R., Teylor T. D. *Vychislitel'nye metody v zadachakh mekhaniki zhidkosti*. Gidrometeoizdat. 1986.
13. Davydenko B. V. «Metod matrichnoi progonki dlia resheniia setochnykh uravnenii gidrodinamiki». *Vostochno - Yevropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*. 2008. № 5/5 (35). P. 7-11.

УДК 532.542:534.142

Возникновение автоколебаний давления в потоках теплоносителей и разработка механизмов уменьшения амплитуды этих колебаний

Б. И. Басок¹, Б. В. Давыденко², В. Г. Новиков³, С. М. Гончарук⁴, Л. Н. Кужель⁵, О. Н. Лысенко⁶

¹ д.т.н., проф., член-корр. НАН Украины, зав. отделом, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина, basok@jttf.kiev.ua, ORCID: 0000-0002-8935-4248

² д.т.н., ст. науч. сотрудник, гл. науч. сотрудник, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина, bdavydenko@ukr.net, ORCID: 0000-0001-8738-7612

³ к.т.н., ст. науч. сотрудник, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина, nvg52@i.ua, ORCID: 0000-0003-1062-7336

⁴ к.т.н., вед. науч. сотрудник, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина, goncharuk-s@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5609-7337

⁵ к.т.н., ст. науч. сотрудник, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина, kuzhel_liliya@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5481-4566

⁶ к.т.н., ст. науч. сотрудник, Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина, lisenko_oks@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3981-9796

Аннотация. Автоколебания давления, возникающие в элементах энергетического оборудования с внутренним подводом теплоты, могут в ряде случаев ухудшать работу этого оборудования. При высоких амплитудах автоколебаний могут создаваться условия для его повреждения. Термоакустические автоколебания являются следствием неустойчивости течения. Известным примером процессов, сопровождающихся генерацией термоакустических автоколебаний, является вибрационное горение, которое наблюдается в ракетных двигателях, в подогревателях воздуха для доменных печей и пр. С целью определения характеристик автоколебаний давления выполняются численные исследования естественной конвекции в вертикальном канале при внутреннем локальном выделении теплоты. Выделение теплоты от внутренних источников происходит на ограниченном участке канала, который находится ближе к его входному сечению. У выходного сечения канала расположена система коаксиальных цилиндрических тел, составляющих дополнительное местное гидравлическое сопротивление воздушному потоку. Характеристики воздушного течения в канале, которые сопровождаются автоколебаниями скорости и давления, определяются из численного решения системы уравнений динамики и переноса теплоты для сжимаемой среды с учётом зависимости теплофизических свойств воздуха от температуры. По результатам этого решения определяются поля скорости, давления и температуры в потоке. Показано, что изменения во времени скорости и давления в потоке имеют характер колебаний с переменной амплитудой. Колебания скорости на выходе из канала происходят в противофазе с колебаниями скорости на входе в канал. Найдены амплитуды и частоты этих колебаний. Определены мероприятия, способствующие уменьшению амплитуды колебаний давления в потоке. Среди них – рассредоточение источников внутреннего выделения теплоты и уменьшение местного гидравлического сопротивления. Эти меры можно применять для уменьшения негативного влияния автоколебаний на энергетическое оборудование.

Ключевые слова: естественная конвекция, численное моделирование, автоколебания давления, амплитуда колебаний, источник тепловыделения.

UDC 532.542:534.142

The emergence of pressure self-oscillations in the flow of heat carriers and the development of mechanisms for reducing the amplitude of these oscillations

B. Basok¹, B. Davydenko², V. Novikov³, S. Goncharuk⁴, L. Kuzhel⁵, O. Lysenko⁶

¹Sc.D, professor, Corresponding member NAS of Ukraine, Head of Department, Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, basok@ittf.kiev.ua, ORCID:0000-0002-8935-4248

²Sc.D, Senior Researcher, Chief Researcher, Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, bdavydenko@ukr.net, ORCID:0000-0001-8738-7612

³PhD, Senior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, nvg52@i.ua, ORCID: 0000- 0003-1062-7336

⁴PhD, Leading Researcher, Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine, goncharuk-s@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5609-7337

⁵PhD, Senior Researcher Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine kuzhel_liliya@ukr.net, ORCID:0000-0002-5481-4566

⁶PhD, Senior Researcher, Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine lisenko_oks@ukr.net, ORCID:0000-0003-3981-9796

Abstract. Self-oscillations of pressure arising in the elements of power equipment with an internal heat supply can, in some cases, impair the operation of this equipment. At high amplitudes of self-oscillations, conditions for its damage can be created. Thermoacoustic self-oscillations are a consequence of flow instability. A well-known example of processes accompanied by the generation of thermoacoustic self-oscillations is vibration combustion, which is observed in rocket engines, in air heaters for blast furnaces, etc. In order to determine the characteristics of pressure self-oscillations, numerical studies of natural convection in a vertical channel with internal local heat release are carried out. Heat release from internal sources occurs in a limited section of the channel, which is closer to the inlet cross section of the channel. At the outlet cross section of the channel, there is a system of coaxial cylindrical bodies that constitute additional local hydraulic resistance to air flow. The characteristics of the air flow in the channel, which are accompanied by self-oscillations of velocity and pressure, are determined from the numerical solution of the system of equations of dynamics and heat transfer for a compressible medium, taking into account the dependence of the thermophysical properties of air on temperature. Based on the results of this solution, the velocity, pressure and temperature fields in the flow are determined. It is shown that changes in flow velocity and pressure with time have the character of oscillations with variable amplitude. Velocity oscillations at the channel outlet are in antiphase with velocity oscillations at the channel inlet. The amplitudes and frequencies of these oscillations are found. The measures were determined to reduce the amplitude of pressure fluctuations in the flow. Among them - the dispersal of sources of internal heat release and a decrease in local hydraulic resistance. These measures can be applied to reduce the negative impact of self-oscillations on power equipment.

Keywords: natural convection, numerical simulation, pressure self-oscillations, oscillation amplitude, heat source

Надійшла до редакції / Received 03.06.2021