

УДК 621.165

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЗАЦІЇ ПОТОКУ ВОЛОГОЇ ПАРИ НА ЙОГО ДІЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

А. В. Нечаєв,

канд. техн. наук

nechaev@ipmach.kharkov.ua

ORCID: 0000-0001-6586-4713

І. Є. Аннопольська,

канд. техн. наук

anna@ipmach.kharkov.ua

ORCID: 0000-0002-3755-5873

В. М. Лук'яновub5-45104@ukr.net

ORCID: 0000-0002-2661-6212

Інститут проблем
машинобудування
ім. А. М. Підгорного
НАН України,
61046, Україна, м. Харків,
вул. Пожарського, 2/10

Констатовано, що задля вивчення теплоелектрофізичних явищ у вологопарових турбінах в ППМаш НАН України протягом останнього часу проводилися дослідження впливу об'ємного заряду вологопарового потоку на його діелектричні й теплофізичні властивості. За їх результатами встановлено, що найбільш представницьким електрофізичним параметром, який дозволяє оцінювати зміни теплофізичних властивостей пари, що відбуваються під дією власного об'ємного заряду, є його діелектрична проникність. Висловлено припущення, що величина діелектричної проникності електризованої пари може суттєво відрізнятися від значення для нейтральної пари, проведено математичну оцінку її можливої зміни. Підтверджено, що вплив електрофізичних явищ, зумовлених електризацією вологопарового потоку, є суттєвим, але не враховується в існуючих фізичних і математичних термодинамічних моделях процесу розширення пари. Доведено, що для уточнення основних термодинамічних параметрів і розрахункових характеристик потоку електризованої вологої пари необхідно визначити, як змінюється її діелектрична проникність. На підставі аналізу обґрунтовано актуальність експериментального встановлення діелектричної проникності вологопарового потоку з об'ємним зарядом із метою отримання залежності її зміни від температури й тиску потоку, а також щільності об'ємного заряду. Для виконання завдання дослідження використовувався газодинамічний лабораторний стенд, який дозволяє отримувати вологопаровий потік з об'ємним зарядом. Внутрішній простір проточної частини реальної вологопарової турбіни має значний розмір і дозволяє сформуватися потоку з об'ємним зарядом складної просторової конфігурації та структури. Акцентовано, що в проточній частині стенду невеликого об'єму, на відміну від проточної частини турбіни, при організації умов виникнення вологопарового потоку з об'ємним зарядом виникають суттєві технічні складності. З урахуванням цього на першому етапі прийнято рішення проводити дослідження парового потоку з об'ємним зарядом, що витікає в атмосферу, у приміщенні лабораторії з достатнім об'ємом для формування його просторової структури. Для оцінки величини його діелектричної проникності обрано індуктивний метод (L-метод) визначення діелектричних властивостей, в якому досліджувана речовина вводиться всередину індуктивної соленоїдної комірки. Проведено експерименти й отримано дані, за якими можлива попередня оцінка зміни діелектричної проникності за наявності об'ємного електричного заряду в потоці пари.

Ключові слова: вологопарові турбіни, теплофізичні властивості робочого тіла, діелектрична проникність, об'ємний заряд потоку пари.

Вступ

У попередній статті [1] предметом вивчення був вплив об'ємного заряду вологопарового потоку на його діелектричні й теплофізичні властивості. На підставі аналізу результатів обґрунтовано актуальність експериментального визначення діелектричної проникності вологопарового потоку з об'ємним зарядом. Однак варто пам'ятати, що вимірювання діелектричної проникності (ДП) потоку двофазного парокрапельного середовища з об'ємним зарядом є нетривіальним науково-технічним завданням. До цього часу в теплоенергетичному обладнанні застосовувалося вимірювання діелектричної проникності потоку вологої пари для визначення його вологості виключно за умов відсутності електризації [2]. Крім того, діелектрична проникність віднесена до одного з основних параметрів контролю стану робочого тіла, що дозволяє оцінювати не тільки його вологість, а також щільність й фазовий стан [3]. Одним із

найпоширеніших методів вимірювання ДП вважається дієлькометричний з використанням конденсаторної С-комірки, перевага якого полягає в малій інерційності і порівняльній простоті використання, високій надійності обладнання. Однак цей параметр вимірюється, як правило, тільки для випадку електрично нейтрального діелектрика, а досліджувана речовина є діелектриком, поміщеним у вимірювальний конденсатор, ємність якого залежить від властивостей діелектрика. До того ж наявність у діелектрика об'ємного електричного заряду суттєво ускладнює процеси в конденсаторній комірці.

Крім вказаного, у статті [1] розглянуто різні варіанти вибору фізичної моделі структури об'ємного заряду потоку пари та його впливу на властивості вологопарового середовища як діелектрика (електропровідність, поляризація й розсіювання енергії). За результатами зроблено припущення, що водяна пара знаходиться в електричному полі, яке створюється розподіленими в об'ємі позитивно зарядженими краплями. Провідність середовища під впливом поля об'ємного заряду була прийнята несуттєвою, втрати на розсіювання енергії під впливом змінної складової електричного поля – також несуттєвими. До того ж не бралася до уваги наявність дрібних заряджених негативно крапель. Основним чинником впливу поля на пару розглядалася поляризація водяної пари як полярного середовища. З урахуванням цих припущень обрано якісну електричну модель геометрії внутрішньої структури парового потоку з об'ємним зарядом. Однак відповідно до цієї моделі виникають суттєві складнощі експериментального визначення поляризації діелектрика в ємнісній С-комірці, оскільки до неї повинна прикладатися зовнішня поляризуюча напруга. Статичний варіант накладення електричного поля в даному випадку неприйнятний, бо збуджуватиме струми провідності і взаємодіятиме з об'ємним електричним зарядом потоку. Очевидно, у даному випадку необхідно використовувати методи зі змінним поляризуючим полем із параметрами, що надають мінімальне збурення в досліджуване середовище.

Теоретичне обґрунтування методу

Враховуючи вказані вище труднощі, для оцінки діелектричної проникності вологопарового потоку з об'ємним зарядом обрано індуктивний метод (L-метод) Q-метра визначення діелектричних властивостей рідини, представлений у публікаціях [4, 5]. Згідно з цим методом досліджувана речовина міститься всередину котушки індуктивності (L-комірки) послідовного коливального контуру (рис. 1).

Сутність методу полягає в тому, що наявність речовини всередині L-комірки коливального контуру, налаштованого на резонанс із частотою генератора G, зменшує добротність контуру Q, викликаючи втрати електромагнітної енергії в контурі, і змінює його резонансну частоту (відповідно, змінюється значення ємності C для умови резонансу) (рис. 2).

Умовою резонансу такого контуру з добротністю $Q = \omega L / R$ є

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2} = \frac{1}{LC \left(1 + \frac{1}{4Q^2} \right)}, \quad (1)$$

де $\omega = 2\pi f$ – кругова частота сигналу генератора; L – індуктивність; R – активний опір котушки; C – ємність електричного конденсатора.

У випадку $Q > 20$ внеском від Q можна знехтувати [4, 5]. Враховуючи те, що L-комірка має власну міжвиткову ємність, умову резонансу можна виразити у вигляді

$$\omega^2 = \frac{1}{L(C + C_0)}. \quad (2)$$

Даний метод дозволяє визначити у слабких електричних полях L-комірці величину тангенсу кута діелектричних втрат ($\text{tg } \delta$) рідини й її діелектричну проникність ϵ_L (індекс «L» вказує на індуктивний метод вимірювання) за співвідношенням

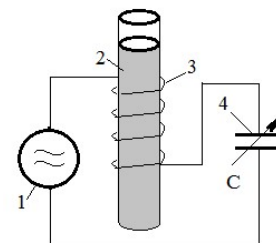


Рис. 1. Індуктивний метод (L-метод) Q-метра визначення діелектричних властивостей рідини:

1 – генератор; 2 – L-комірка із зразком рідини; 3 – котушка індуктивності L-комірки; 4 – вимірювальний конденсатор

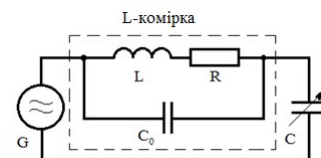


Рис. 2. Електрична схема послідовного контуру з L-коміркою:

G – генератор змінного струму, L – індуктивність, R – активний опір котушки, C – вимірювальний конденсатор, C_0 – міжвиткова ємність котушки L

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{Q_1 C_1 - Q_2 C_2}{Q_1 Q_2 (C_1 - C_2)}; \quad (3)$$

$$\varepsilon_L = \alpha(\Delta C - \Delta C^*), \quad (4)$$

де Q_1, Q_2, C_1, C_2 – значення добротності й вимірювальної ємності коливального контуру до (індекс 1) та після (індекс 2) вводу досліджуваної речовини всередину L-комірки; $\Delta C = C_1 - C_2$ – зміна резонансної ємності при введенні в L-комірку досліджуваної речовини в діелектричному посуді, а ΔC^* – зміна ємності при введенні порожнього посуду; α – постійна вимірювальної комірки, що визначається за калібрувальними експериментами.

Враховуючи той факт, що L-метод застосовувався для дослідження електрофізичних властивостей води і різних рідин, що містяться у пробірці всередині L-комірки або протікають через комірку в діелектричному каналі, необхідно було на першому етапі експериментів з'ясувати можливість використання L-комірки з паровим потоком, а далі відпрацювати методику використання L-комірки для роботи з потоком вологої пари в нейтральному й електризованому стані.

Експериментальна частина

Робота проводилася на газодинамічному стенді [6]. На зрізі сопла була встановлена L-комірка, через яку проходив струмінь пари.

Схема стенду представлена на рис. 3, структурна схема діелектрометричної системи на рис. 4, а її загальний вигляд на рис. 5.

Індуктивна комірка підключена до виходу вимірювача добротності TESLA BM560 (Q-метр). Q-метр працює у діапазоні частот 50 кГц–35 МГц. Для проведення дослідження обрано частоту 4,8 МГц з урахуванням [2, 4, 5].

Конструкція L-комірки – двосекційна котушка індуктивності, що намотана на циліндричному склотекстолітовому каркасі діаметром 90 мм, з кількістю витків 5 і 10. Добротність системи близько 300, що відповідає умові ($Q > 20$) в рівнянні (1).

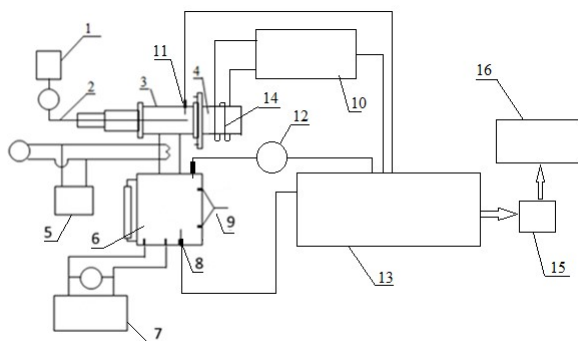


Рис. 3. Схема парової установки з іонізацією пари коронним розрядом:

1 – джерело високої напруги; 2 – високовольтне введення; 3 – іонізаційна камера котла; 4 – соплова частина іонізаційної камери; 5 – пароперегрівач; 6 – котел; 7 – джерело живлення нагрівачів котла; 8 – датчик температури води в котлі; 9 – датчики сигналізації рівня води в котлі; 10 – Q-метр (вимірювач добротності) BM 560; 11 – датчик температури перед соплом; 12 – вимірювач тиску в котлі АВВ; 13 – модуль введення аналоговий МВА8; 14 – котушка індуктивності на вихлопі сопла (L-комірка); 15 – перетворювач інтерфейсів АС4; 16 – персональний комп'ютер

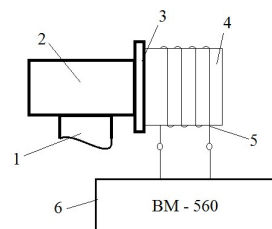


Рис. 4. Схема діелектрометричної системи:
1 – вихід парогенератора; 2 – пароперегрівач;
3 – соплова вставка; 4 – корпус індуктивної комірки (L-комірки); 5 – обмотка котушки;
6 – вимірювач добротності



Рис. 5. Загальний вигляд діелектрометричної системи

Методика визначення реакції системи на потік пари була наступною: після прогріву й налаштування діелектрометричної системи встановлювалося значення вихідної добротності системи в

режимі резонансу на робочій частоті без потоку пари. Далі включався парогенератор і струмінь пари з сопла спливав через внутрішній простір L-комірочки в атмосферу. При цьому проводилася реєстрація сигналу добротності й зміни ємності вимірювального конденсатора за умови резонансу.

Результат вимірів

Було проведено 2 дослідів, в яких оцінювалася можливість використання методу реєстрації діелектричних властивостей парового потоку і налаштування каналів вимірювання. Графіки першого дослідів представлені на рис. 6.

Найбільш значущим параметром є сигнал добротності, представлений в умовних одиницях. Попереднє узгодження вихідного сигналу Q-метра і входу каналу виміру МВА8 дозволяло отримати невеликий діапазон сигналу добротності близько 10 умовних одиниць. Як видно на рис. 7, поява потоку пари із сопла і проходження його через індуктивний датчик чітко відстежується на графіку добротності. Поступове посилення потоку пари корелює з перебігом кривої добротності. Момент початку електризації пари не призводить до помітного стрибка значень добротності. Виходячи з цього, можна зробити попередній висновок про незначну зміну діелектричних властивостей вологого електризованого парового потоку.

У другому експерименті було змінено коефіцієнт перетворення сигналу Q-метра з метою збільшення його амплітуди і введено канал мітки часу.

Другий графік показує, що, як і в попередньому експерименті, значення добротності Q в момент появи об'ємного заряду в потоці пари не змінюються стрибком на значну величину. Зміна ходу кривої добротності при включенні електризації найімовірніше пов'язана з умовами розтікання потоку пари в атмосфері: при електризації істотно інтенсифікується конденсація і потік пари збільшується в перерізі за рахунок сил електростатичного відштовхування.

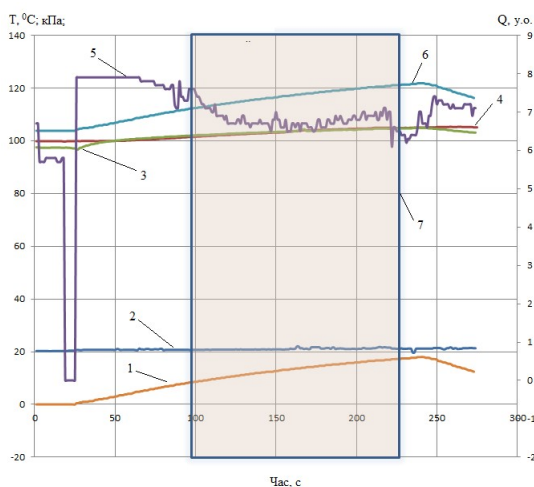


Рис. 6. Результати першого дослідів:

- 1 – перепад тиску сопла; 2 – температура у лабораторії;
- 3 – температура перед соплом; 4 – температура у котлі;
- 5 – добротність; 6 – тиск у котлі; 7 – виділена область наявності об'ємного заряду

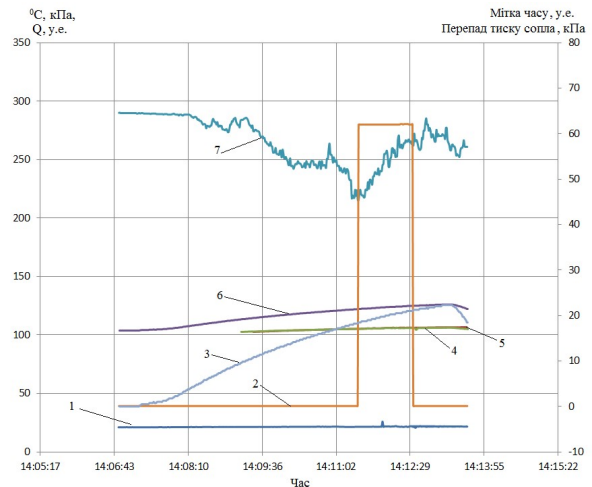


Рис. 7. Графік другого експерименту:

- 1 – температура в лабораторії; 2 – мітка часу (наявність об'ємного заряду); 3 – перепад тиску сопла;
- 4 – температура перед соплом; 5 – температура у котлі;
- 6 – тиск у котлі; 7 – добротність

Обговорення

У [1] було прийнято, що в проточній частині турбіни електричне поле має квазістатичний характер: постійну й змінну складові, а термодинамічною роботою діелектрика (пари) у полі об'ємного заряду крапель є поляризація. У [7] було висловлено припущення, що діелектрична проникність пари, яка містить об'ємний заряд з великою щільністю, може значно відрізнятися від ДП нейтральної пари, а відповідно, і робота поляризації (оскільки ДП характеризує здатність до поляризації у зовнішньому електричному полі [8]). Це припущення ґрунтувалося на визначенні ДП через силу взаємодії між двома пробними зарядами за законом Кулона у вакуумі й досліджуваному середовищі

$$F = \frac{q_1 q_2}{2\pi\epsilon_0 \epsilon r^2}, \quad (5)$$

де ДП характеризує ослаблення взаємодії порівняно з вакуумом

$$\epsilon = \frac{F_{\text{вакуума}}}{F_{\text{середовища}}}. \quad (6)$$

На думку авторів [7], при внесенні пробних зарядів у проточну частину з об'ємним зарядом їх взаємодія може бути ослаблена екрануванням поля об'ємного заряду. Враховуючи характер джерела електростатичного поля в проточній частині й особливості об'ємного заряду, можна припустити, що в даному випадку деяке екранування об'ємного заряду великих позитивно заряджених крапель може відбуватися за рахунок меншої кількості розподілених в об'ємі потоку дрібних негативно заряджених крапель. Крім того, процес екранування залежатиме від рухливості негативно заряджених крапель. У такому разі можна очікувати деякого збільшення ефективного значення діелектричної проникності потоку з об'ємним зарядом. До того ж внесок у поляризацію вологопарового потоку може давати наявність нейтральних крапель вологи (оскільки ДП води значно більше ДП пари).

ДП, а відповідно, поляризація робочого тіла впливають не тільки на роботу розширення [1], а й на накопичення енергії електричного поля в об'ємі діелектрика [7]

$$W_v = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2}.$$

Фактично енергія W_v – це додаткові втрати перетворення енергії робочого тіла на енергію електричного поля. В [7] проведена оцінка величини W_v для робочого тіла з незначною поляризацією (ДП близької одиниці як у нейтральній парі). У такому разі $W_v=0,177$ Дж/м³ парового потоку. На думку авторів [7], у разі збільшення ϵ на кілька порядків енергія електричного поля може досягати ~ 100 Дж/м³ і більше. Експериментальне визначення фактичного значення ϵ потоку пари з такими електрофізичними характеристиками вимагає розробки спеціального методу.

У використовуваному L-методі [4] сигнал добротності, що формується зміною магнітного потоку $\Delta\Phi$ всередині L-комірочки, переважно визначається різницею його компонентів $\Delta\Phi_1$ і $\Delta\Phi_2$

$$\Delta\Phi = \Phi_0 \left(\frac{1}{8} r_0^2 \mu \epsilon \omega^2 - \frac{5}{384} r_0^4 \mu^2 \omega^2 \chi^2 \right) = \Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2, \quad (7)$$

де r_0 – радіус об'єму діелектрика в датчику; μ – магнітна проникність; ω – кругова частота; χ – питома електропровідність досліджуваної речовини.

Перша компонента пов'язана з виникненням у комірці струмів зміщення, що залежать від діелектричної проникності, друга – вихрових струмів, пропорційних питомій електропровідності χ^2 . Використання L-комірочки для діелькометрії правомірно, коли $\Delta\Phi_1 \gg \Delta\Phi_2$ і $\chi < \chi_{\text{max}}$. Величину χ_{max} пропонується оцінювати за умови [4]

$$\frac{\Delta\Phi_2}{\Delta\Phi_1} = \frac{5r_0^2 \mu \chi^2}{48\epsilon} < 0,05. \quad (8)$$

Оскільки питома електропровідність водяної пари низька, умова (8) для використання L-методу виконується.

Аналізуючи характер зміни сигналу добротності при включенні іонізації парового потоку, можна визнати, що в даному разі різкої зміни сигналу немає. Отже, суттєво не змінюються характеристики магнітного потоку в L-комірці і співвідношення між процесами, викликаними струмами зміщення й вихровими струмами провідності. Вочевидь, і ДП у даному разі істотно не змінюється. У такому випадку відсутність значної зміни сигналу добротності можна пояснити тим, що об'ємний заряд парового потоку на стенді є уніполярним (тільки позитивно заряджені краплі), він відрізняється від структури об'ємного заряду в проточній частині турбіни (великі позитивні краплі і дрібні негативно заряджені краплі), тобто в ньому відсутня компонента, здатна екранувати позитивний заряд. Крім того, в об'ємі датчика (L-комірочки) не відбувається і різкої зміни вологості потоку, бо датчик має обмежену довжину, а інтенсивна конденсація високошвидкісного потоку із сопла відбувається вже за ним у просторі лабораторії.

Висновки

Проведені дослідження показали, що сигнали вимірювальної діелькометричної системи на базі L-методу пов'язані з наявністю потоку вологої пари й її режимом течії в L-комірці. Характер сигналів корелює з термодинамічними й електрофізичними параметрами вологопарового потоку. На основі даного методу можлива розробка системи оцінки діелектричної проникності й вологості парового електрично нейтрального потоку й такого, що має об'ємний електричний заряд.

Отримані дані дозволяють зробити попередній висновок про несуттєву зміну діелектричних властивостей парового потоку з об'ємним електричним уніполярним зарядом із параметрами й просторовою структурою, використаними в даному експерименті. Спрощена уніполярна фізична модель поляризації потоку без урахування другої компоненти дрібних заряджених крапель не дозволяє моделювати ефект екранування електричного поля в потоці й збільшення його діелектричної поляризації.

Очевидно, що для отримання більш представницької інформації про електрофізичні властивості вологопарового потоку з об'ємним зарядом у турбіні необхідно створити в експериментальній установці умови, що дозволяють отримувати об'ємний заряд із параметрами й структурою, подібними до реальної турбоустановки, зокрема, із двокомпонентною зарядженою дисперсною фазою, представленою позитивно і негативно зарядженими краплями в паровому потоці.

Література

1. Nechaiev A. V., Tarelin A. O., Annapolska I. Ye. Analysis of the influence of steam electrification on the working processes of a wet steam turbine. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*. 2022. Vol. 25. No. 3. P. 56–64. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.056>.
2. Мулев Ю. В. Управление встроенными сепараторами прямооточных котлоагрегатов СКД на основе контроля влажности отсепарированного пара: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / Белорусский политехнический институт. Минск, 1984. 212 с.
3. Мулев Ю. В., Беляева О. В., Мулев М. Ю., Саплица В. В., Заяц Т. А. Диэлектрическая проницаемость как один из основных параметров контроля состояния рабочего тела. *Теплоэнергетика*. 2011. № 7. С. 36–40.
4. Семихина Л. П. Индуктивный метод определения диэлектрических свойств жидкостей. *Научное приборостроение*. 2005. Т. 15. № 3. С. 83–87.
5. Семихина Л. П. Определение магнитных и диэлектрических свойств веществ с помощью индуктивных L-ячеек. *Вестник Тюменского государственного университета*. 2005. № 1. С. 94–100.
6. Тарелин А. А., Скляр В. П. Паровые турбины: электрофизические явления и неравновесные процессы. Санкт-Петербург: Энерготех, 2012. 292 с.
7. Тарелин А. А., Сурду Н. В., Нечаев А. В. Влияние электризации влажно-парового потока на поверхностную прочность материалов лопаток турбины. *Теплоэнергетика*. 2020. № 1. С. 72–81.
8. Поплавко Ю. М. Физика диэлектриков. Учеб. пособие для вузов. Киев: Вища школа, 1980. 400 с.

Надійшла до редакції 20.10.2022