

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ІМПУЛЬСНОГО ТОРЦЕВОГО УЩІЛЬНЕННЯ

Кузнєцов Е. Г., Нагорний В. В., Ващенко С. М.

Сумський державний університет (м. Суми)

*Запропоновано вдосконалена математичну модель імпульсного ущільнення, яка використовує гібридний підхід в розрахунках характеристик та дозволяє прогнозувати роботу на нештатних режимах експлуатації.*

**Постановка проблеми.** Насосне устаткування широко застосовується практично в усіх галузях сільськогосподарства для перекачування різноманітних за своїми хімічними властивостями середовищ та продуктів, які нерідко характеризуються високою корозійною активністю та токсичністю. На практиці для відсікання витоків середовища, що ущільнюється по валу насоса широко застосовуються подвійні торцеві ущільнення з буферною рідиною, яка потрапляє в порожнину насоса й частково псує основний продукт.

В результаті пошуку конструкції ущільнення, в якій відсутнє потрапляння технологічних рідин в продукт, що перекачується, створено конструкцію торцевого імпульсного ущільнення, в якому виток продукту запираються за допомогою півки нейтрального газу підвищеного тиску в робочому проміжку (рис. 1).

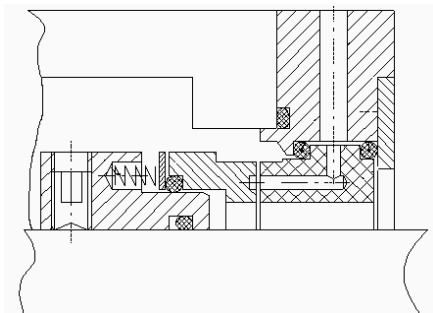


Рисунок 1 – Імпульсне торцеве ущільнення

Розробка адекватної математичної моделі винайденої конструкції ущільнення являється актуальним питанням сьогодення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При проектуванні імпульсних ущільнень на рідинному змащенні вважають, що при досить великій кількості камер на робочих поверхнях ущільнення відстань між ними в окружному напрямку невелика, тому тиск на кільцевій ділянці проміжку між камерами можна вважати рівним осередненому тиску в камерах [1, 2].

Проведені експериментальні дослідження імпульсного ущільнення на газовому змащенні з метою вивчення впливу на характеристики ущільнення кількості каналів підводу газу (живильників) і камер показують, що витратна характеристика ущільнення не тільки кількісно, але і якісно залежить від кількості камер і живильників на робочих поверхнях ущільнення, що відбивається на жорсткості газового шару в робочому проміжку, яка характеризує надійність ущільнення.

**Мега статті.** З урахуванням вищезазначеного, а також того, що в'язкість і щільність газового шару в

робочому проміжку значно відрізняються від в'язкості й щільності рідинного шару, допущення про розподіл тиску на ділянці проміжку між камерами стає непридатним для проектування надійних ущільнень і встає питання про вивчення дійсного розподілу тиску газового шару в робочому проміжку ущільнення.

**Основні матеріали дослідження.** Для детального дослідження процесів, що відбуваються в торцевому проміжку працюючого ущільнення спроектовано і зібрано спеціальний стенд, що дозволяє під час випробувань експериментального ущільнення спеціальними п'єзо-резистивними датчиками робити вимір тиску в замкненій камері й у просторі між камерами в торцевому проміжку. Для відображення, обробки й запису сигналів з датчиків використовувався комп'ютер. За допомогою описаного устаткування проведена велика кількість випробувань, під час яких варіювалися комбінація значень тиску середовища, що ущільнюється (від 0,05 до 0,45 МПа), тиску буферного газу (від 0,1 до 0,5 МПа) і частоти обертання приводного валу (від 1000 до 3000 об/хв). В якості середовища, що ущільнюється, використовувалися вода й повітря.

В результаті досліджень вивчений вплив режимних параметрів на зміну епюри розподілу тиску буферного газу безпосередньо в камерах і на кільцевій ділянці робочого проміжку між сусідніми камерами. Дані досліджень показують, що при незмінній величині перепаду між буферним й ущільнювальним робочими тисками з ростом частоти обертання ротора або величини тиску, що ущільнюється, амплітуда коливань тиску буферного газу в камері й у просторі між камерами зменшується. Збільшення перепаду робочих тисків приводить до збільшення амплітуди коливання тиску в камерах і між камерами, що може стати причиною прориву середовища, що ущільнюється, через торцевий проміжок (рис. 2). Застосування торцевих кілець зі зменшеною кількістю камер дозволяє зменшити амплітуду коливання тиску в місцях установки датчиків при однакових робочих параметрах.

Отримані експериментальні дані показують, що при досить великій кількості камер (тобто коли окружна відстань між сусідніми камерами менше окружної довжини самої камери) робота ущільнення може бути описана традиційною математичною моделлю рідинних імпульсних ущільнень на рідинному змащенні, яка адаптована для газових середовищ, що й підтверджується задовільним збігом експериментальних даних з розрахунковими. При використанні в ущільненні кілець зі зменшеною кількістю камер (ко-

ли відстань між окремими камерами значно більше окружної довжини самих камер) у математичну модель імпульсного ущільнення необхідно вводити облік окружних плинів газу в робочому проміжку. Для цього доцільно одержати розв'язок задачі про розподіл тиску в робочому проміжку ущільнення [3].

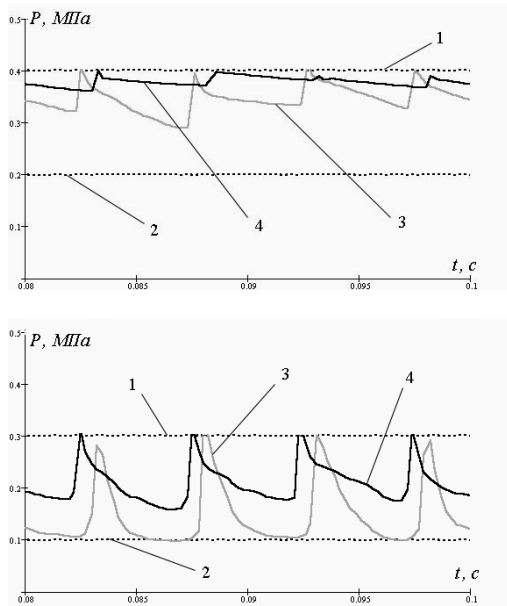


Рисунок 2 – Графіки зміни тиску в місцях установки датчиків: 1 – тиск буферного газу; 2 – тиск середовища, що ущільнюється; 3 – тиск у міжкамерному проміжку; 4 – тиск у камері

Побудова математичної моделі торцевого імпульсного ущільнення з буферним газом засноване на чисельному розв'язку задачі про знаходження розподілу тиску в газовому шарі, розміщеному в робочому проміжку між торцевими кільцями ущільнення. Для знаходження розподілу тиску буферного газу  $p(y, z)$  в торцевому проміжку розглядається рівняння плинущого газу змащення – рівняння Рейнольдса:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \rho x^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho x^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\mu \frac{\partial(p x U)}{\partial y} + 12\mu \frac{\partial(p x)}{\partial t}, \quad (1)$$

де  $p$  – тиск,  
 $x$  – товщина газового шару;  
 $U$  – швидкість руху однієї з поверхонь, що обмежують мастильний шар,  
 $\rho$  – щільність  
 $\mu$  – в'язкість газу.

Розв'язок цього рівняння виконане чисельним методом граничних елементів [4]. Згідно із суттю застосованого методу початкова крайова задача (1) приводиться до інтегрального рівняння по границі досліджуваної області. У якості області для визначення поля тиску змащення обраний об'єм газу на ділянці торцевого проміжку, який обмежений зовнішнім і

внутрішнім радіусами торцевих кілець і радіальними січними, що проходять через середини сусідніх камер. У ході розв'язку границя області розбивається на окремі елементи, на кожному з яких задаються граничні умови типу Діріхле – значення тиску  $P$ . Чисельне інтегрування по границі виконується методом механічних квадратур Гаусса.

Завдання граничних умов на границі в місцях розташування камер стикається з певними труднощами, тому що згодом тиск у камерах змінюється. Наведені на рис. 2 графіки зміни тиску в місцях установки датчика в загальному випадку аналітично описати досить складно. З погляду фізики процесу, форма кривих на графіках характеризує величину й інтенсивність витікання накопиченого в замкненій камері (або в каналі датчика) тиску буферного газу через робочий проміжок в порожнину насоса й в атмосферу. Причому, чим проміжок більше, тим витікання газу з камери (падіння тиску газу в камері) відбувається швидше, тому що опір самого робочого проміжку менше. Подібний процес у фізиці називається перехідним і добре вивчений, наприклад, в електротехніці в розділі лінійних електричних кіл. З метою приведення задачі про знаходження закону витікання затворного газу з камер ущільнення до відомих у фізиці процесів знайдені відповідності між фізичними величинами механіки газу й електротехніки й побудована наступна фізична аналогія процесу.

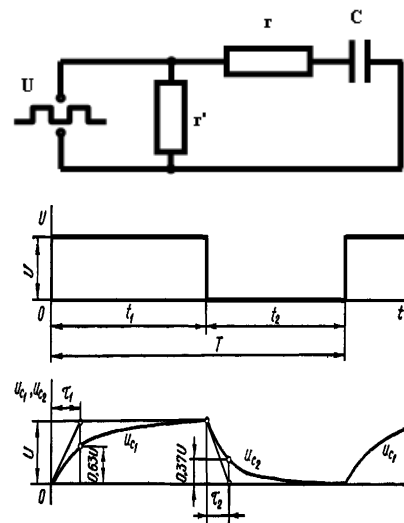


Рисунок 3 – Схема електричного аналога перехідного процесу й графік зміни перехідної напруги на обкладках конденсатора

Найбільш близьким до процесу, що розглядається, є процес заряду-розряду електричного конденсатора  $C$  й характер зміни напруги  $U$  на його обкладках (рис. 3). Графік зміни перехідної напруги на обкладках конденсатора приводиться у відповідність із графіками на рис. 2, якщо врахувати, що час заповнення камери буферним газом у момент її сполучення з живильником (час  $t_1$  і ділянка  $u_{c1}$  на рис. 3) значно менше часу її наступного спорожнювання (час  $t_2$  і ділянка  $u_{c2}$  на рис. 3).

Перехідні процеси в електричних колах із зосередженими параметрами описуються рівняннями Кірхгофа стосовно до миттєвих напруг і струмів. У цьому випадку перехідна напруга на обкладинках конденсатора змінюється за законом:

$$u_{c1} = U \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right); \quad u_{c2} = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}, \quad (2)$$

де  $\tau_1 = rC$  й  $\tau_2 = (r+r')C$  – постійні часу системи.

Застосувати цей закон для визначення тиску буферного газу в камерах ущільнення дозволили наступні фізичні відповідності:

– в електротехніці фізичною величиною взаємодії є заряд; у газовій механіці йому відповідає  $\rho \cdot dV = dm$  (або  $dV$  в механіці рідини);

– аналогами різниці потенціалів  $U$  і струму  $I$  в електротехніці є аеродинамічний потенціал  $\Delta P/\rho$  і витрата газу  $Q$  в газодинаміці;

– аналогом електричного опору  $R$  є гідравлічний опір дроселів (каналів і проміжків), по яких протікає буферний газ.

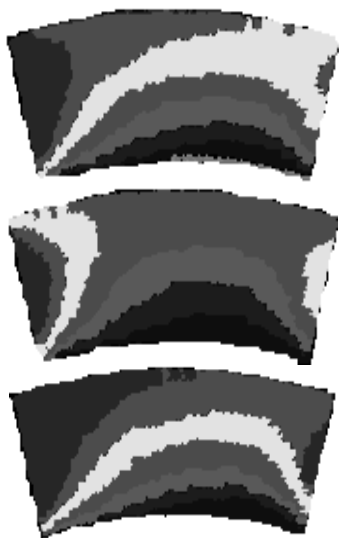


Рисунок 4 – Візуалізація поля тиску в робочому проміжку ущільнення

Використання даної фізичної аналогії й методу граничних елементів дозволило одержати аналітичні залежності для знаходження тиску буферного газу в кожній замкненій камері торцевого кільця й визначити розподіл поля тиску в робочому проміжку ущільнення в будь-який момент часу.

На рис. 4 представлена тонова візуалізація результатів чисельного розв'язання рівняння Рейнольдса й моделювання знайденого поля тиску в робочому проміжку ущільнення для трьох різних режимів роботи.

Наведений гібридний підхід знаходження поля тиску дозволяє: а). знаходити несучу здатність газового шару в робочому проміжку ущільнення й визначати його основні характеристики; б). проводити чисельні

дослідження розподілу тиску газу в робочому проміжку з метою перевірки роботи ущільнення з точки зору прориву середовища, що ущільнюється, через ділянки торцевого проміжку між окремими камерами, не прибігаючи до натурних експериментів.

**Висновки.** Таким чином, описані вище експериментальні дослідження й отримані з їхньою допомогою результати дозволили одержати картину робочого процесу в торцевому імпульсному ущільненні. Завдяки виявленим особливостям плинину газу в робочому проміжку ущільнення встановлена необхідність розробки математичної моделі, яка вдосконалює існуючі. Використання в моделі ущільнення чисельного розв'язку рівняння Рейнольдса для плинину газу дозволяє прогнозувати роботу ущільнення на номінальних і позаштатних режимах роботи.

#### Список використаних джерел

1. Загорулько А. В. Теоретические и экспериментальные исследования торцовых затворных импульсных уплотнений с дискретным подводом. // Восточно-европейский журнал передовых технологий № 7 (76). Харьков: Технологический центр, 2015. – С. 45-52.
2. Марцинковский В. А., Ворона П. Н. Насосы атомных электростанций. - М.: Энергоатомиздат. 1987. - 256 с.
3. Кузнецов Э. Г. Расчет статических характеристик газозатворного торцевого уплотнения импульсного типа.// Известия ОрёлГТУ - № 4 (282) 2010, Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орёл: ОрёлГТУ, 2010. – С. 28-35.
4. Методы граничных элементов: Пер. с англ. / Бреббия К., Телес Ж., Вроубел Л. – М.: Мир, 1987. – 524 с., ил.

#### Аннотация

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСНОГО ТОРЦЕВОГО УПЛОТНЕНИЯ

Кузнецов Э. Г., Нагорный В. В.,  
Ващенко С. М.

*Предложена усовершенствованная математическая модель импульсного уплотнения, которая использует гибридный подход в расчетах характеристик и позволяет прогнозировать работу на нештатных режимах эксплуатации.*

#### Abstract

#### THE MATHEMATICAL MODEL OF THE FACE PULSE SEAL

E. Kuznetsov, V. Nahornyi,  
S. Vashchenko

*The advanced mathematical model of pulse seal which uses hybrid approach in calculations of characteristics and allows to predict work on the emergency modes of operation is offered.*