

УДК 697.33:697.34

РОЗВИТОК МЕТОДІВ АНАЛІЗУ Й УДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМІВ СИСТЕМ КОМУНАЛЬНОЇ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ

Маліновський А.А., д-р техн. наук, Турковський В.Г., канд. техн. наук, Музичак А.З., канд. техн. наук
Національний університет «Львівська політехніка», вул. Степана Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

Одним із інструментів аналізу й удосконалення режимів систем комунальної теплоенергетики є теорія гідравлічних кіл. Неповнота теорії не дозволяє охопити усі особливості сучасних систем тепlopостачання. Запропоновано доповнити теорію гідравлічних кіл законом збереження імпульсів та увести в базову систему рівнянь усі складові рівняння Бернуллі.

Один из инструментов анализа и усовершенствования систем коммунальной теплоэнергетики это теория гидравлических цепей. Из-за неполноты теории невозможно охватить все особенности современных систем теплоснабжения. Предложено дополнить теорию гидравлических цепей законом сохранения импульсов и ввести в базовую систему уравнений все составляющие уравнения Бернулли.

One of the tools of analysis and improvement of municipal power regimes is the theory of hydraulic circuits. Incomplete theory can not cover all the features of modern heating systems. A supplement theory of hydraulic circuits law of conservation of momentum and introduce a basic system of equations all parts of the Bernoulli equation are proposed.

Бібл. 10, рис. 5.

Ключові слова: комунальна теплоенергетика, гідравлічне коло, теорія гідравлічних кіл, закон збереження імпульсу, злиття та розділення потоків, коефіцієнт впливу потоків суміжних віток.

α – коефіцієнт кінетичної енергії, що враховує похибку розрахунків за середньою швидкістю;

γ – питомий об'єм середовища;

ρ – густина середовища;

ζ – коефіцієнт гідравлічного опору;

φ – коефіцієнти впливу потоків суміжних віток;

\mathbf{A}_0, \mathbf{A} – повна, розмірністю $q \times m$, та скорочена, розмірністю $(q - v) \times m$, перша матриця інциденцій;

\mathbf{B} – друга (розмірністю $n \times m$) матриця інциденцій;
 m, q, n, v – кількість віток, вузлів, незалежних контурів у схемі та кількість гідравлічно незв'язаних частин кола;

\vec{E} – вектор вимушувальних тисків віток гідравлічного кола;

\vec{G} – вектор витрат середовища у вузлах;

f – площа поперечного перерізу;

h – втрати напору в вітці;

H – діючий напір у вітці;

p – тиск у центрі ваги перерізу потоку;

$\Delta \vec{p}$ – вектор втрат тиску у вітках гідравлічного

кола;

\vec{P}_0 – вектор тисків у вузлах гідравлічного кола;

s – гідравлічний опір;

\mathbf{S} – діагональна матриця гідравлічних опорів віток гідравлічного кола;

x – витрати транспортованого середовища у вітці;

y – перепад тисків на вітці;

\vec{x}, \vec{y} – вектори витрат транспортованого середовища та перепадів тиску у вітках;

\mathbf{X} – діагональна матриця, складена із модулів елементів вектора \vec{x} ;

v – середня швидкість середовища (рідини) у перерізі;

z – геометрична висота – висота центра ваги перерізу потоку;

Нижні індекси:

i – показник стосується i -ої вітки гідравлічного кола;

j – показник стосується j -го вузла гідравлічного кола;

О – базовий вузол гідравлічного кола;
 п, б, з – прямий, бічний та збірний рукави сполучного вузла у формі трійника відповідно;
 зп, зб – показник впливу потоку збірного рукава на потоки у прямому та бічному рукавах відповідно;

Постановка проблеми. Важливою передумовою ефективного функціонування систем комунальної теплоенергетики (систем теплопостачання та гарячого водопостачання) а також інших інженерних трубопровідних систем (систем холодного водопостачання і водовідведення) є розроблення та забезпечення оптимальних гідравлічних режимів.

Одним з ефективних інструментів аналізу режимів трубопровідних систем, що забезпечує мережний підхід до задачі, є теорія гідравлічних кіл (ТГК) [1]. Проте в ТГК основний акцент зроблено на схемно-структурній оптимізації, як наслідок багато проблем, пов'язаних з удосконаленням режимів, залишаються невирішеними. Зокрема не завжди можливе адекватне відтворення усіх складових інженерних трубопровідних систем (джерело, мережа, абонент) та їх аналіз як єдиного цілого.

Аналіз останніх досліджень. Теорія гідравлічних кіл базується на принциповій спільності явищ і забезпечує єдність математичних моделей і алгоритмів для розрахунку і оптимізації гідравлічних режимів як систем комунальної теплоенергетики так і інших інженерних трубопровідних систем різного типу. Для цього такі системи заміщують гідравлічним колом, для аналізу стану якого виділяють два підходи [1]: алгебричний та екстремальний. Понад півстолітньою практикою підтверджена ефективність першого підходу [2].

За алгебричного підходу гідравлічне коло описують системою рівнянь за першим та другим законами Кірхгофа, а також рівнянь віток [1, 3]. Рівняння стану кола в матрично-векторній формі має вигляд (додатним прийнято напрям потоку середовища від вузла):

$$\begin{cases} \mathbf{Ax} = -\bar{G}, \\ \mathbf{By} = 0, \\ \bar{y} = \bar{E} - \Delta\bar{p}_t. \end{cases} \quad (1)$$

В ТГК у рівняннях віток використовують век-

пз, бз – показник впливу потоків прямого та бічного рукавів на потік збірного рукава;
 т – тертя;
 шв – швидкісний;
 ін – інерційний.

тор діючих напорів \bar{H} , причому його розмірність подають в Па, хоч традиційно напір подають в м. Щоб уникнути такої неоднозначності введемо поняття вимушувального тиску, а для його позначення використано літеру E (перша літера англійського слова enforcement). Вимушувальний тиск в Па та діючий напір в м пов'язані співвідношенням

$$E = \rho g H. \quad (2)$$

Систему рівнянь (1) називають контурною моделлю інженерної трубопровідної системи [1]. Також в ТГК використовують вузлову модель системи, яка має вигляд

$$\begin{cases} \mathbf{Ax} = -\bar{G}, \\ \bar{y} = \mathbf{A}_0^T \bar{P}_0, \\ \bar{y} = \bar{E} - \Delta\bar{p}_t. \end{cases} \quad (3)$$

Лінійні співвідношення в (1) і (3) доповнює m замикальних співвідношень – нелінійних залежностей між втратами тиску на тертя та витратами середовища у кожній вітці

$$\Delta p_{t,i} = s_i |x_i| x_i, \quad (4)$$

множина яких у матрично-векторній формі має вигляд

$$\Delta\bar{p}_t = \mathbf{S}\mathbf{X}\bar{x}. \quad (5)$$

Базові рівняння ТГК з часу її формування практично не зазнали змін [3]. На нашу думку саме неповнота цієї теорії ускладнює застосування її для аналізу та удосконалення режимів сучасних систем комунальної теплоенергетики та інших інженерних трубопровідних систем.

Виділення невирішеної раніше частини загальної проблеми. ТГК взяла свій початок з теорії електричних кіл (ТЕК). Базові постулати електротехніки адаптували для опису інженерних трубопровідних систем, тому основні фізичні закони протікання середовища у трубопровідних системах в ТГК присутні у тій формі, в якій вони сформувались в ТЕК:

- закон збереження маси – в ТГК він відомий

як закон нерозривності потоку, а математично як і в ТЕК записується у формі першого закону Кірхгофа;

- закон збереження енергії – стосовно інженерних систем існують дві форми врахування:

1) сума всіх сил, прикладених до тіла, у замкненій системі рівна нулю (і в ТЕК і в ТГК для контуру математично записується у формі другого закону Кірхгофа),

2) енергія не зникає, а лише переходить із однієї форми в іншу, чи стосовно ТГК механічна енергія під час руху середовища в трубопроводах перетворюється у теплову енергію (в ТЕК математично записується у формі вольт-амперної характеристики, а в ТГК – у формі замикального співвідношення);

- закон збереження імпульсу – не приймається до уваги ні в ТЕК, ні в ТГК.

У системах рівнянь контурної (1) чи вузлової (3) моделей відсутні рівняння, пов'язані із законом збереження імпульсу. У результаті нехтується фундаментальною властивістю середовищ (рідин) – інертністю.

Формулювання мети роботи. Більшість досліджень в рамках ТГК ведуть в напрямі синтезу оптимальної структури інженерної трубопровідної системи, де неврахування закону збереження імпульсу прийнятне, але створює суттєві перешкоди в задачах удосконалення режимів. Завданням дослідження є усунення

цього недоліку для інженерних трубопровідних систем, якими транспортується в'язке ньютонівське нестискуване середовище – систем водяного теплопостачання, гарячого і холодного водопостачання тощо. Саме такі системи складають основу комунального господарства населених пунктів України.

Виклад основного матеріалу. Для вирішення поставленого у статті завдання потрібно розглянути шлях формалізації задачі аналізу режиму інженерної системи від засад побудови гідравлічного кола, як заступної схеми інженерної системи, до розроблення адекватних моделей її основних елементів – віток та вузлів.

Розглянемо послідовно ці етапи.

Етап 1 – засади побудови заступної схеми. Розрізняють три основні типи елементів інженерних трубопровідних систем: активні джерела, лінії зв'язку (трубопроводи) і навантаження (абоненти). Залежно від представлення останніх отримуємо заступну схему (гідравлічне коло) різного рівня складності.

Як узагальнюючий приклад систем комунальної теплоенергетики та інших інженерних трубопровідних систем розглянемо систему теплопостачання з двома джерелами (*a*, *b*) та чотирма абонентами (*c*, *d*, *e*, *f*), схема якої наведена на рис. 1 (цифрами 1-11 позначено ділянки мережі системи теплопостачання, великими латинськими літерами А-К – вузли системи).

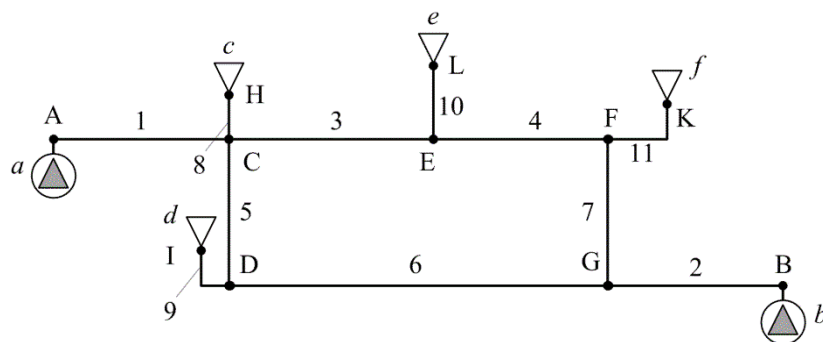


Рис. 1. Схема системи теплопостачання з чотирма абонентами.

В задачах синтезу оптимальної структури інженерної трубопровідної системи можна обмежитись однолінійною заступною схемою. Така схема для нашого прикладу наведена на рис. 2, де

вітки 1-11 відповідають ділянкам системи теплопостачання, а вітки 0, 12 – обладнанню джерел, основним елементом гідравлічних контурів яких є циркуляційна помпа.

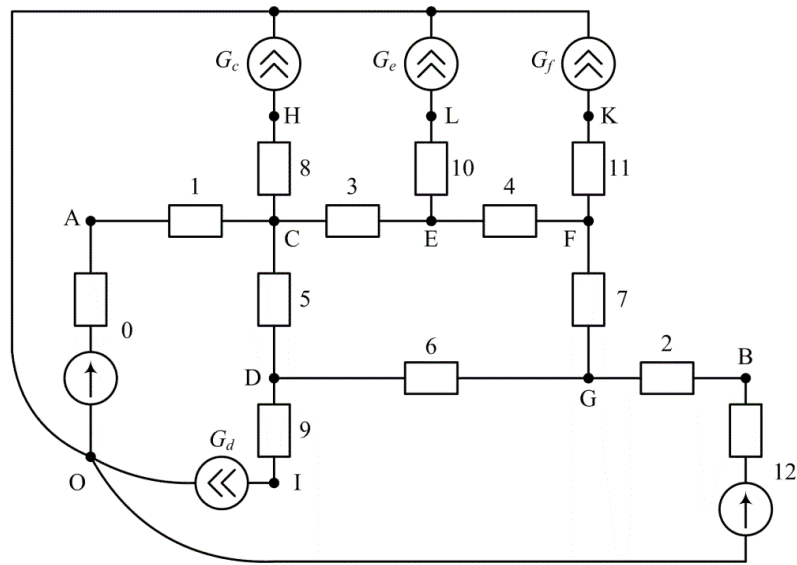


Рис. 2. Однолінійна заступна схема системи теплопостачання за рис. 1.

У такій заступній схемі абоненти задають як термінальні вузли з проектними витратами (з так званним фіксованим відбором, незалежним від змін тиску у вузлі). На заступній схемі їх відтворюють джерелами потоків із заданими витратами G_c, G_d, G_e, G_f в (1) та (3) – це складові вектора \vec{G} . На схемі усі нижні кінці віток, що відповідають джерелам (циркуляційним помпам), сходяться у вузлі О, який у розрахунках приймають за базовий. У цьому ж вузлі сходяться джерела потоків абонентів.

Однолінійна заступна схема відтворює лише структуру системи теплопостачання, нею користуються для вирішення задач схемно-структурної оптимізації. Однак в схемі відсутня інформація про параметри абонентів, тому вона непридатна для вирішення задач аналізу та удосконалення робочих режимів.

Для режимних задач необхідно відтворити «кругообіг» середовища в системі теплопостачання та врахувати, що механічна енергія на відміну від електричної має дві форми – кінетичну та потенціальну. Це відображено в одному з основних рівнянь гідравліки – рівнянні Бернуллі [5]

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_t + h_{in} \quad (6)$$

З фізичної точки зору інерційний напір h_{in}

впливає на зміну енергії вздовж потоку та може виступати і як джерело додаткової енергії і як своєрідний опір [5].

Відповідно перепад тисків на пасивній вітці має складові геометричного тиску, швидкісного тиску, втрат тиску на тертя та зміни інерційного тиску

$$y = \rho g(z_1 - z_2) + \rho(\alpha_1 v_1^2 - \alpha_2 v_2^2)/2 - \Delta p_t - \Delta p_{in} \quad (7)$$

Традиційний апарат ТГК з чотирьох складових правої частини цього рівняння враховує лише втрати тиску на тертя, що допустимо для однолінійних заступних схем. Однак під час відтворення кругообігу середовища в системі теплопостачання певну вагу відіграють й інші складові.

Якщо система теплопостачання розімкнена, однолінійну заступну схему замінюють розширеною зв'язною схемою (таку схему ще називають циклічною) [1]. Для цього в однолінійну заступну схему вводять додаткові умовні (фіктивні) вітки 13-16, що відповідають абонентам системи (рис. 3).

Фіктивні вітки виходять із вузлів, до яких приєднані абоненти, та сходяться в один вузол, зазвичай у нижній вузол вітки одного з джерел. Як і в попередньому випадку цей вузол (на рис. 3 вузол О) приймають за базовий.

Фіктивні вітки абонентів системи теплопостачання подають як активний двополюсник з

діючими напорами, спрямованими від базового вузла. Значення діючого напору H_i рівне різниці висот j -го вузла, в який входить i -та вітка та базового вузла [6]

$$H_i = z_j - z_0. \quad (8)$$

Значення втрати швидкісного тиску $\Delta p_{шв}$ у фіктивній вітці залежить лише від швидкості по-

току у вхідному перерізі вітки [7], відповідно до (7) воно рівне

$$\Delta p_{шв,i} = \frac{\alpha_i \rho v_i^2}{2} = \gamma \frac{\alpha_i}{2 f_i^2} x_i^2, \quad (9)$$

оскільки швидкість середовища за межами трубопроводної системи приймається нульовою.

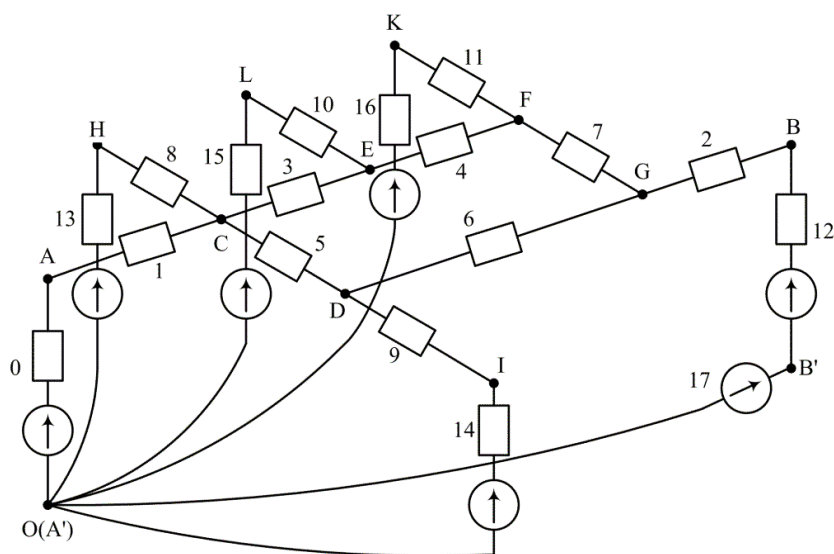


Рис. 3. Розширена зв'язна заступна схема системи тепlopостачання за рис. 1.

В зв'язну заступну схему вводять також додаткові фіктивні вітки, що поєднують нижні вузли решти джерел живлення із базовим вузлом. Такі фіктивні вітки містять лише діючі напори, рівні різницям висот вузла джерела та базового вузла. На рис. 3 це вітка 17 для джерела 12.

Отримані значення напорів H_i входять у вектор діючих напорів \vec{E} систем рівнянь (1) чи (3) згідно з (2). Щодо втрат швидкісного тиску, то відповідно до рівняння Бернуллі (6), вони є доданком до втрат тиску на тертя. Подібним чином їх необхідно ввести і в рівняння віток, яке набуде вигляду

$$\vec{y} = \vec{E} - (\Delta \vec{p}_r + \Delta \vec{p}_{шв}). \quad (10)$$

Якщо система тепlopостачання замкнена, однолінійну заступну схему замінюють дволінійною заступною схемою, яка наведена на рис. 4. На рисунку вітки 0, 12 відповідають джерелам, вітки 1-11 – подавальним, а 1'-11' – зворотним трубопроводам ділянок трубо-

проводної системи, вітки 13-16 – обладнанню абонентів.

Якщо із системи тепlopостачання є частковий відбір середовища (теплоносія) чи необхідно врахувати його витоки, тоді в заступну схему вводять вітки, що відповідають живильним помпам, а відбір середовища подають через джерела потоків чи фіктивними (умовними) вітками.

Таким чином, у випадку відтворення кругообігу середовища в системі тепlopостачання, необхідно враховувати усі складові рівняння Бернуллі, а отже необхідне введення їх у системи рівнянь (1) та (3). Це у свою чергу вимагає адекватної математичної моделі вітки гідравлічного кола.

Етап 2 – удосконалення математичної моделі вітки. Під час розроблення математичної моделі необхідно розглядати вітки двох типів – реальну, ту, яка відповідає конкретному елементу системи тепlopостачання, та умовну (фік-

тивну) вітку, яка відтворює відбір середовища з системи.

Для реальної вітки враховується лише одна складова рівняння Бернуллі – втрати тиску на тертя, які визначають за формулою Дарсі-Вайсбаха. Проте така формула неуніверсальна, оскільки коефіцієнт гідравлічного тертя для кожного виду труб визначають за своєю залежністю. Тому часто користуються наближеною апроксимаційною функцією, зокрема в ТКК прийнята квадратична апроксимаційна залежність (4). Квадратична залежність добре відтворює замикальні характеристики сталевих трубопроводів, проте не забезпечує належної

точності для трубопроводів з нових матеріалів як пластмаса, полімери тощо [8].

Сучасний рівень розвитку засобів перетворення інформації дозволяє у розрахунках використовувати не лише одночленні, а й багаточленні залежності. Степені залежності доцільно брати цілими, оскільки перший та другий степені уже присутні в рівняннях (1) чи (3) та (9).

Обґрунтовано, що оптимальною апроксимаційною залежністю є кубічний поліном з продовженням характеристики у третій квадрант [8].

$$\Delta p_{\tau} = \gamma (s_1 |x| + s_2 |x|^2 + s_3 |x|^3) \operatorname{sgn}(x). \quad (11)$$

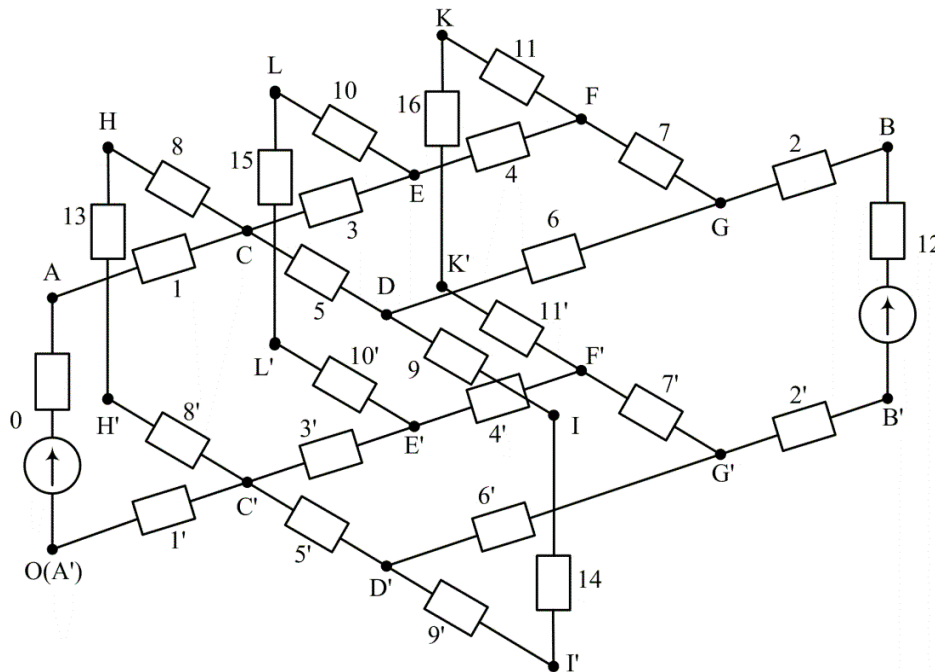


Рис. 4. Дволінійна заступна схема системи теплопостачання за рис. 1.

Точність відтворення оцінювалась коефіцієнтом варіації та максимальною відносною похибкою. Для труб різного матеріалу та різного діаметру в діапазоні зміни швидкості середовища від 0,2 м/с до 3 м/с коефіцієнт варіації не перевищує 1,2 %, а відносна максимальна похибка – 3,5 %.

Апроксимаційна функція (11) також адекватно відтворює гідравлічні характеристики pomp як вітчизняного так і закордонного виробництва [8].

Щодо фіктивних віток, то втрати швидкісного тиску (9) також охоплюються цим поліномом, тому замикальне співвідношення включає обидві складові

$$(\Delta p_{\tau} + \Delta p_{\text{шв}}) = \gamma (s_1 |x| + s_2 |x|^2 + s_3 |x|^3) \operatorname{sgn}(x). \quad (13)$$

Щоб записати отримані системи рівнянь компактно у матрично-векторній формі в [1] було прийняте двояке представлення компонентів витрат у вигляді вектора-стовпця \vec{x} і діагональної матриці \mathbf{X} (4), що на той час було незвично, зокрема й з точки зору ТЕК.

З розвитком комп'ютерної техніки та математичних програмних пакетів поширення набули поелементні операції над векторами та матрицями, зокрема у системі математичного програмування Matlab такі операції носять назву операцій над масивами. Для таких операцій передбачені спеціальні оператори: в Matlab перед операцією ставиться крапка.

У цьому разі замикальне співвідношення (12) для віток гідравлічного кола у матрично-векторній формі набуде вигляду

$$(\Delta \bar{p}_\tau + \Delta \bar{p}_{шв}) = \gamma (S_1 |\vec{x}| + S_2 |\vec{x}|^2 + S_3 |\vec{x}|^3) \cdot \text{sgn}(\vec{x}), \quad (13)$$

де $|\vec{x}|^2$, $|\vec{x}|^3$ – поелементне піднесення до квадрату та кубу компонентів вектора x відповідно,

$\cdot \text{sgn}(\vec{x})$ – поелементне перемноження вектора $(S_1 |\vec{x}| + S_2 |\vec{x}|^2 + S_3 |\vec{x}|^3)$ та вектора (\vec{x}) .

Таким чином у замикальному співвідношенні (13) враховано зв'язок між втратами тиску на тертя і швидкісного тиску та параметрами

елементів системи. Роль ще однієї складової рівняння Бернуллі – зміни інерційного тиску проявляється в елементах трубопроводної системи, в яких відбувається злиття чи розділення потоків, тобто у вузлах гідравлічного кола.

Етап 3 – розроблення математичної моделі вузла. На відміну від електричних кіл, де вузли не мають опору, сполучні елементи гідравлічних кіл чинять опір протіканню середовища, а отже необхідні їх математичні моделі.

В усіх сполучних елементах наявний процес злиття чи розділення потоків окремих рукавів, а тому тут необхідно розглядати одночасно два процеси: процес деформації середовища та процес вирівнювання швидкостей під час змішування потоків у збірному рукаві.

Злиття потоків у сполучному елементі зумовлює нестационарні процеси в окремих елементах системи навіть за усталеного режиму її роботи, що веде до зміни інерційного тиску вздовж потоку.

Розглянемо сполучний вузол гідравлічного

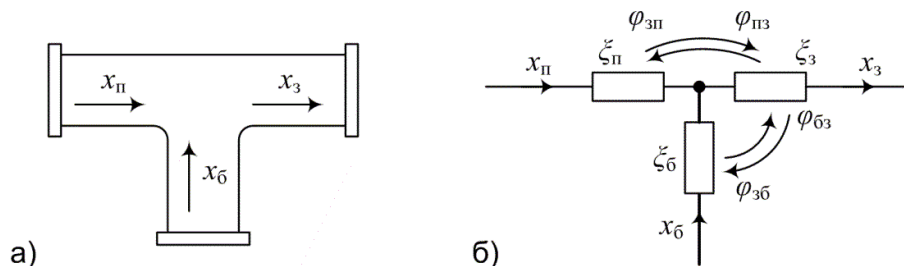


Рис. 5. Сполучний вузол трьох віток гідравлічного кола.

а) схематичне зображення у витяжному режимі; б) заступна схема вузла.

кола, у якому сходиться три вітки (рис. 5,а).

Зазвичай втрати тиску у трійнику визначають через сталий коефіцієнт місцевого опору, хоч насправді він залежить від співвідношення витрат середовища у рукавах трійника [7], основною причиною чого є зміна інерційного тиску. І якщо, нехтування зміною інерційного тиску у трійниках чи хрестовинах зумовлює лише похибку в розрахунках (до 25 % в розрахунку внутрішньобудинкових мереж [9]), то математичні моделі таких елементів як елеваторний вузол чи триходовий клапан без цієї складової будуть зовсім неадекватними.

У рівнянні Бернуллі (6) зміна інерційного тиску є доданком до втрат тиску на тертя, тому його слід вносити як ще один доданок у рівняння віток (10), яке набуде вигляду

$$\vec{y} = \vec{E} - (\Delta \bar{p}_\tau + \Delta \bar{p}_{шв} + \Delta \bar{p}_{ин}). \quad (14)$$

Для сполучних елементів значення зміни інерційного тиску одержане з рівняння імпульсів, при цьому введено нове поняття – коефіцієнт впливу суміжних віток, за допомогою якого описано вплив потоків один на одного [8, 10]. Ці коефіцієнти введені в матрицю S_2 коефіцієнтів апроксимуючої функції (12) як позадіаго-

нальні елементи. Для вузла, заступна схема якого наведеного на рис. 5,б, така матриця має вигляд

$$S_2 = \begin{pmatrix} \frac{\xi_{п1}}{2f_{п1}^2} & 0 & \frac{\varphi_{зп1}}{f_{п1}f_3} \\ 0 & \frac{\xi_{б6}}{2f_6^2} & \frac{\varphi_{зб6}}{f_6f_3} \\ \frac{\varphi_{пз}}{f_{п1}f_3} & \frac{\varphi_{бз}}{f_6f_3} & \frac{\xi_3}{f_3^2} \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Наведена математична модель адекватно відтворює гідравлічні характеристики широкого спектру елементів [8], розглянутий звичайний трійник є лише наочним прикладом. Методика визначення коефіцієнтів (15), та їх значення для трійників різного виконання наведено в [10].

Завершена система рівнянь

Згідно з розробленими математичними моделями вітки і вузла рівняння віток окрім втрат тиску на тертя за традиційним апаратом ТГК, повинне містити зміну швидкісного та інерційного

тисків. З врахуванням цього контурна математична модель інженерної трубопровідної системи (1) набуде вигляду

$$\begin{cases} \mathbf{A}\bar{x} = -\bar{G}, \\ \mathbf{B}\bar{y} = 0, \\ \bar{y} = \bar{E} - (\Delta\bar{p}_T + \Delta\bar{p}_{шв} + \Delta\bar{p}_{ін}), \end{cases} \quad (16)$$

а вузлова модель (3) – вигляду

$$\begin{cases} \mathbf{A}\bar{x} = -\bar{G}, \\ \bar{y} = \mathbf{A}_0^T \bar{P}_0, \\ \bar{y} = \bar{E} - (\Delta\bar{p}_T + \Delta\bar{p}_{шв} + \Delta\bar{p}_{ін}). \end{cases} \quad (17)$$

Ці системи рівнянь доповнені замикальним співвідношенням, яке з врахуванням зміни інерційної складової тиску має вигляд

$$(\Delta\bar{p}_T + \Delta\bar{p}_{шв} + \Delta\bar{p}_{ін}) = \gamma (S_1|\bar{x}| + S_2|\bar{x}|^2 + S_3|\bar{x}|^3) \cdot \text{sgn}(\bar{x}). \quad (18)$$

Врахування усіх складових зміни тиску у кубічному поліномі наочно показано на рис. 6.

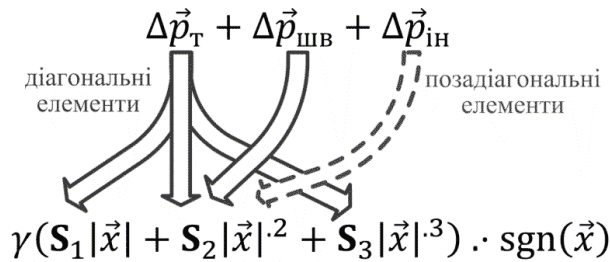


Рис. 6. Механізм відтворення складових рівняння Бернуллі.

Запропоновані зміни у вихідних рівняннях теорії гідравлічних кіл дозволяють адекватно відтворити гідравлічні характеристики широкого спектру елементів сучасних систем комунальної теплоенергетики та інших інженерних трубопровідних систем. Отримана модель дозволяє виконувати аналіз усіх складових системи (джерело, мережа, абонент) як єдиного цілого та ефективно застосовувати методи теорії гідравлічних кіл для аналізу та удосконалення їх гідравлічних режимів. У системах комунальної теплоенергетики раціональний гідравлічний режим окрім заощадження енергоресурсів є також передумовою забезпечення необхідного теплового режиму.

Ефективність застосування розробленої

моделі підтверджена на прикладі аналізу та оптимізації характерної ділянки системи теплопостачання, наведеного в [8].

Висновки

1. Адекватне відтворення гідравлічних режимів систем комунальної теплоенергетики та інших інженерних трубопровідних систем можливе лише за системного підходу до формування мережної математичної моделі з врахуванням в рівняннях стану обох форм механічної енергії та впливу інертності теплоносія.
2. Нове поняття – коефіцієнт впливу суміжних віток дозволяє врахувати закон збереження імпульсу і змоделювати в рамках теорії гідравлічних кіл елементи, у яких відбувається

злиття чи розділення потоків.

3. Форма замыкального співвідношення, яка враховує усі складові рівняння Бернуллі (втраги тиску на тертя, зміну швидкісного тиску та зміну інерційного тиску) дозволяє адекватно відтворити гідравлічні характеристики елементів інженерних трубопровідних систем та ефективно застосовувати методи теорії гідравлічних кіл для аналізу та удосконалення їх режимів.

4. Наведені у статті заступні схеми та математичні моделі справедливі для інженерних трубопровідних систем, у яких середовищем є ньютонівська нестискувана рідина, – систем водяного теплопостачання, гарячого і холодного водопостачання тощо. Поширення наведених даних на парові системи теплопостачання чи системи газопостачання вимагають подальших досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Меренков А.П.* Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 278 с.
2. *Сеннова Е.В.* Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем / Е.В. Сеннова, В.Г. Сидлер. – Новосибирск: Наука, 1987. – 219 с.
3. *Новицкий Н.Н.* Гидравлические цепи. Развитие теории и приложения / Н.Н. Новицкий, Е.В. Сеннова, М.Г. Сухарев и др. – Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, – 2000. – 273 с.
4. *Меренков А.П.* Обобщение электротехнических методов на гидравлические цепи / А.П. Меренков, В.Г. Сидлер, М.К. Такайшвили. – Электронное моделирование. – 1982. – №2. – С. 3-11.
5. *Френкель Н.З.* Гидравлика. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 456 с., ил.
6. *Абрамов Н.Н.* Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. – М.: Стройиздат, 1972. – 288 с.
7. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям // Под ред. Штейнберга М.О. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.: ил.
8. *Музичак А.З.* Математичні моделі й алгоритми аналізу та удосконалення режимів систем централізованого теплопостачання: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.14.01 / Музичак Андрій Зіновійович – Київ, 2014 – 20 [1] с.
9. *Malinowski A.* Analiza stanów hydraulicznych celem optymalizacji pracy systemów ogrzewania budynków mieszkalnych / A. Malinowski, W. Turkowski, A. Muzyczak // Czasopismo techniczne politechniki Krakowskiej. – 2010. – 2-B. – P.107-115.
10. *Маліновський А.А.* Математична модель трійника з коефіцієнтами взаємного впливу рукавів / А.А. Маліновський, В.Г. Турковський, А.З. Музичак // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Теплоенергетика, Інженерія доквілля. Автоматизація – 2010. – №677 – С.27-32.

**DEVELOPMENT METHODS OF ANALYSIS
AND IMPROVEMENT OF REGIMES
OF MUNICIPAL HEATING SYSTEMS**

Malinovskyi A.A., Turkovskyi V.H., Muzychak A.Z.

Lviv Polytechnic National University,
str. Stepan Bandera 12, Lviv, 79013, Ukraine

One of the modern tools of analysis and improvement of municipal power regimes is the theory of hydraulic circuits. This theory was formed on the basis of the theory of electrical circuits in the 60 s of last century. It is well suited for structural optimization municipal power but was effective for optimization of regimes. A supplement theory of hydraulic circuits law of conservation of momentum and introduce a basic system of equations all parts of the Bernoulli equation are proposed. In this paper the mathematical model of the modern heating systems it takes into account amendments referred to in the equivalent circuit models of system and its elements.

References 10, figures 5.

Key words: municipal power system, hydraulic circuit, theory of hydraulic circuits, law of conservation of momentum, merge and separation flows, impact factor related branches.

1. *Merenkov A.P.* Theory of hydraulic circuits / A.P. Merenkov, V.Ja. Hasilev – Moscow: Nauka, 1985. – 278 p. (Rus.)
2. *Sennova E.V.* Mathematical modeling and optimization of heat supply systems / E.V. Sennova, V.G. Sidler – Novosibirsk: Nauka, 1987. – 219 p. (Rus.)

3. *Novickij N.N.* Hydraulic circuits: Development of the theory and applications / N.N. Novickij, E.V. Sen-nova, M.G. Suharev – Novosibirsk: Nauka, – 2000. – 273 p. (Rus.)
4. *Merenkov A.P.* Generalization of electrical methods for hydraulic circuits / A.P. Merenkov, V.G. Sidler, M.K. Takajshvili. – Electronic simulation. – 1982. – Vol. 2. – P. 3-11 (Rus.)
5. *Frenkel N.Z.* Hydraulics. – M.-L.: Gosjenergizdat, 1956. – 456 с., ill. (Rus)
6. *Abramov N.N.* Theory and methods of calculation systems water supply and distribution. – Moscow: Stroiyzdat, 1972. – 288 p. (Rus.)
7. *Idel'chik I.E.* Handbook of hydraulic resistance. // By red. Shteinberh M.O. – 3-rd edition. – Moscow: Mashynostroenye, 1992. – 672 p. (Rus.)
8. *Muzychak A.Z.* Mathematical models and algorithms of analysis and improvement of regimes of centralized heat supply systems: abstract. diss. candidate of technical science: 05.14.01 / Muzychak Andrii Zinoviiovykh – Kyiv, 2014 – 20 [1] с. (Ukr.)
9. *Malinowski A.* The analysis of hydraulic regimes for the purpose of optimization of work of heating systems of apartment buildings / A. Malinowski, V. Turkowski, A. Muzychak // Technical transactions Politechnika Krakowska. – 2010. – 2-B. – P.107-115. (Pol.)
10. *Malinowski A.A.* Mathematical model tee with coefficients of mutual influence sleeves / A.A. Malinowski, V.G. Turkowski, A.Z. Muzychak // Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnik» Teploenerhetyka, Inzheneriia dovkillia. Avtomatyzatsiia – 2010. – №677 – P.27-32. (Ukr.)

Получено 20.07.2015

Received 20.07.2015