

ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДХОДІВ ДО ЕНЕРГЕТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНИХ АПАРАТІВ

У роботі представлено результати дослідження, сутність якого полягала у проведенні аналітичного огляду тематичних інформаційних ресурсів, спрямованого на виявлення підходів до визначення розрахунковим шляхом витрат енергії у роторно-пульсаційних апаратах, складанні загальної методики розрахунку і визначенні за нею витрат енергії в роторно-пульсаційному апараті для двох основних варіантів конструкцій апарату (пульсаційного і імпульсного), узагальненні одержаних даних і зазначенні рекомендації щодо визначення потужності роторно-пульсаційного апарата.

Ключові слова: критерій потужності, критерій Рейнольдса, робоча ступінь, роторний-пульсаційний апарат.

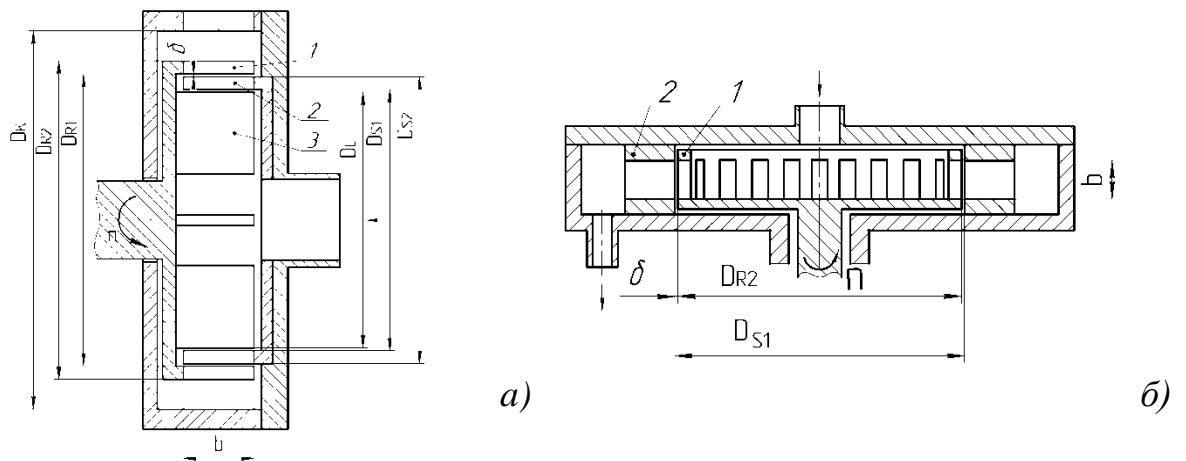
© Семінський О. О., Косенко В. В., 2018

Постановка проблеми. Роторно-пульсаційні апарати (РПА) – це високоефективне обладнання, яке широко застосовується в промисловості. Їх переваги над іншими типами гідромеханічного обладнання зумовлені комплексним багатофакторним впливом на рідину, що дозволяє пришвидшити протікання технологічних процесів у багатокомпонентних рідких системах [1-3]. Різноманітність варіантів поєднання за інтенсивністю сукупності впливів на рідину в РПА призводить до встановлення значної кількості різноманітних формул, що рекомендуються для визначення характеристик апаратів і параметрів технологічних процесів, що проводяться у них. Однак, у більшості випадків, такі формули визначені для однієї або декількох обраних конструкцій РПА, що працюють у заданих умовах. Наслідком цього є відсутність систематизованого підходу до обґрунтування рекомендацій щодо визначення конфігурацій і параметрів робочих органів апаратів при заданих режимах роботи. Тому дослідження у цьому напрямі актуальні.

Мета статті полягає в узагальненні результатів дослідження підходів до енергетичного розрахунку роторно-пульсаційних апаратів.

Методика дослідження. На основі проведеного авторами аналітичного огляду інформаційних ресурсів, відібрано формул для визначення витрат енергії в РПА з урахуванням параметрів їх конструкцій та динаміки ротора. В якості критеріїв відбору прийнято: 1) повнота опису щодо одержання формул та величин, що входять до їх складу; 2) наявність відомостей щодо практичної апробації формул; 3) наявність посилань на роботу, у якій запропоновано формули, в інших джерелах інформації.

З використанням обраних формул визначено витрати енергії в РПА для двох варіантів конструкцій апарата (пульсаційний (РПАп – рис. 1.а) та імпульсний (РПАі – рис. 1.б)).



1 – ротор; 2 – статор; 3 – крилатка

Рис. 1. – Схема апарата: а) РПАп; б) РПАі

Методика дослідження передбачає визначення потужності однієї робочої ступені (пари робочих органів що складається з ротора і статора), і потужності РПА в цілому (без врахування втрат енергії). Потужність РПА визначалась як сумарна потужність робочих ступіней, до якої додавались значення потужності у ступенях «крилатка – статор» і «ротор – корпус апарата» (за наявності у конструкції). Причому, визначення величини потужності в останніх двох із зазначених випадків проводилось за тією ж формулою, що і для робочих ступіней, як це запропоновано в [1]. Додатково враховано потужність на торцеве тертя в зазорі між основою ротора і корпусом. Таким чином, для визначення потужності приводу РПА прийнято формулу:

$$N = \sum_i N_{cm_i} + N_m, \quad (1)$$

де $N_m = 0,33 \text{Re}^{-0,2}$, а $\text{Re} = \frac{\rho n D_{R2}^2}{\mu}$.

Вибір формул

У [1] запропоновано формули для визначення потужності РПА з довільною кількістю робочих ступіней:

$$N_{cm} = 0,8 \text{Re}^{-0,3} \left(\frac{\delta}{D_{R2}} \right)^{0,2} \left(\frac{S_1 + S_2}{D_{R2}} \right)^{0,1} \left(\frac{a_1 z_1 a_2 z_2}{D_{R2}^2} \right)^{0,35} \left(1 + 10Q \frac{a_1 z_1 + a_2 z_2}{w b a_1 z_1 a_2 z_2} \right) \rho F_c w^3, \quad (2)$$

де $\text{Re} = \frac{\rho n D_{R2}^2}{\mu}$.

У [2] для визначення потужності, що споживає робоча ступінь РПАі запропоновано формули

$$N_{cm} = K_N \rho n^3 b D_{R2}^4, \quad (3)$$

де $K_N = 10,69 \text{Re}^{-0,21} \left(\frac{\delta}{D_{R2}} \right)^{0,2} \left(\frac{a_1 z_1}{D_{R2}} \right)^{0,7} \left(\frac{b}{D_{R2}} \right)^{-1,3}$, а $\text{Re} = \frac{\rho \pi n D_{R2}^2}{2\mu}$.

У [3] для визначення потужності ступені РПА з довільною кількістю робочих ступіней приймаються формули:

$$N_{cm} = K_N \rho n^3 b D_{R2}^4, \quad (4)$$

де $K_N = 37,5 \text{Re}^{-0,3} \left[\left(\frac{a_1 z_1}{D_{R2}} \right)^{0,7} + \left(\frac{a_2 z_2}{D_{S2}} \right)^{0,7} \right] \left(1 + \frac{Q}{\pi n D_{R2} a_2 z_2 b} \right) \left(\frac{\delta}{D_{R2}} \right)^{0,2}$, а $\text{Re} = \frac{\rho n D_{R2}^2}{\mu}$.

У [5] потужність робочої ступені РПА, незалежно від кількості ступіней, пропонується визначати як

$$N_{cm} = \begin{cases} \frac{(\pi D_{R2} - z_1 a_1) b \mu w^2}{\delta}, & \text{якщо } \delta \leq \delta_{\min} \\ \frac{(\pi D_{R2} - z_1 a_1) b w^2}{\delta} \left(\rho \chi^2 w - \frac{2\mu}{\delta} + \frac{2\mu^2}{\rho \chi^2 \delta^2 w} \right), & \text{якщо } \delta > \delta_{\min}. \end{cases} \quad (5)$$

За [6] величину потужності робочої ступені пропонується розраховувати за формулами

$$N_{cm} = K_N \rho n^3 D_{R2}^5, \quad (6)$$

де $K_N = \begin{cases} 3,55 \cdot 10^3 \text{Re}^{-0,5} \left(\frac{\delta}{D_{R2}} \right)^{0,25} \left(\frac{D_{S1}}{D_{R2}} \right)^{1,8} & \text{якщо } 1,3 \cdot 10^{-3} \leq \frac{\delta}{D_{R2}} \leq 12 \cdot 10^{-3} \\ 1,3 \cdot 10^3 \text{Re}^{-0,5} \left(\frac{D_{S1}}{D_{R2}} \right)^{1,8} & \text{якщо } \frac{\delta}{D_{R2}} > 12 \cdot 10^{-3}, \end{cases}$, а $\text{Re} = \frac{\rho n D_{R2}^2}{\mu}$.

Апробацію формул та визначення емпіричних коефіцієнтів проведено з використанням РПАп зануреного типу.

Відповідно до [7], потужність робочої ступені може бути визначено як

$$N_{cm} = K_N \rho b n^3 D_{R2}^4, \quad (7)$$

де $K_N = 1,54 \cdot 10^9 \text{Re}^{-1,17} \left(\frac{\delta}{D_{R2}} \right)^{0,2} \left(\frac{a_1 z_1}{D_{R2}} \right)^{0,7}$, а $\text{Re} = \frac{\rho \pi n D_{R2}^2}{2\mu}$.

Апробацію формул та визначення емпіричних коефіцієнтів проведено з використанням РПАі.

Формули (2) - (7) одержані для визначення потужності в апаратах статори і ротори у яких мають бічну перфорацію у вигляді прямокутних прорізів або пазів.

У [8] потужність робочої ступені пропонується розраховувати з урахуванням співвідношення режимних параметрів $Q/(nD_{R2}^3)$, відповідно до значення якого вибирається одна з формул:

$$N_{cm} = \begin{cases} 0,47\rho n^3 D_{R2}^5, & \text{якщо } \frac{Q}{nD_{R2}^3} < 0,013 \\ 0,10\rho n^3 D_{R2}^5 + 18,4n^2 D_{R2}^2 Q, & \text{якщо } \frac{Q}{nD_{R2}^3} > 0,013. \end{cases} \quad (8)$$

Формули рекомендовані для розрахунку як для апаратів з прямокутною, так і з круглою або квадратною (у тому числі багаторядною) перфорацією робочих органів. Апробацію формул та визначення емпіричних коефіцієнтів проведено з використанням апарата проточного типу, що має статор, бічна поверхня якого перфорована круглими отворами, розміщеними у шаховому порядку, і ротор з прямокутними каналами, які розширюються у радіальному напрямку.

У [9] розрахунок потужності складається з трьох частин. Перша частина відображає потужність, необхідну для обертання валу у відповідь на опір рідини. Друга частина, що відображає вплив конвекції на змішування. Третя, частина відображає втрати:

$$N_{cm} = K_1 \rho n^3 D_{R2}^5 + K_2 \rho Q n^2 D_{R2}^2. \quad (9)$$

Апробацію формул та визначення емпіричних коефіцієнтів для РПАп з різними конфігурацією і компонованням робочих органів проведено у [9 і 10].

Результати дослідження. У відповідності до прийнятої методики, з використанням обраних за визначеними критеріями формул, проведено розрахунки витрат енергії у робочих ступінях і в РПА. Обчислення потужності і верифікація результатів розрахунків проводились за даними (табл. 1) для обраних конструкцій апаратів, що наведені в [1 і 4].

Таблиця 1 – Вихідні данні для розрахунку

РПАп			РПАі		
Параметри	Значення	Розмірність	Параметри	Значення	Розмірність
n	51,667	об/с	n	50	об/с
μ	0,0009	Па с	μ	0,0009	Па с
ρ	1000	кг/м ³	ρ	1000	кг/м ³
Q	0,001366	м ³ /с	Q	0,0047	м ³ /с
D_L	0,098	м	D_{R2}	0,2	м
D_{S1}	0,1041	м			
D_{S2}	0,1156	м			
D_{R1}	0,117	м	D_{S1}	0,24	м
D_{R2}	0,1289	м			
D_K	0,138	м			
b	0,011	м	b	0,1	м

Результати обчислень узагальнені і представлені графічно у вигляді гістограм на рис. 2 і рис. 3, де на вісях абсцис відкладені значення потужності, а на вісях ординат зазначені ідентифікаційні дані інформаційних ресурсів, у яких запропоновано відповідні формули для розрахунку.

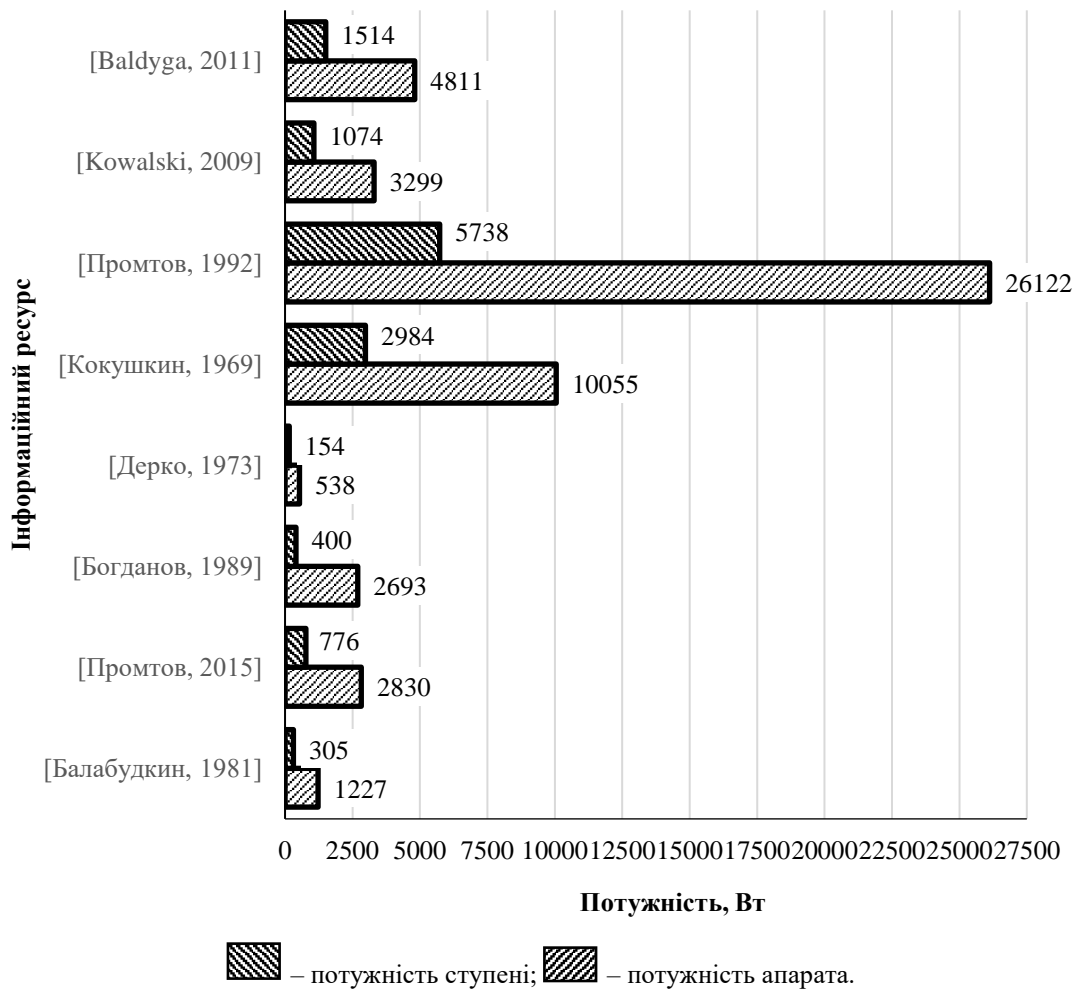


Рис 2. – Величини витрат енергії у РПАп

Оцінка відповідності результатів розрахунків реальним значенням проведена за значеннями, одержаними для РПА, оскільки це відповідає даним, обраним для верифікації. Окремо розраховано потужність ступеней, що дає можливість зіставлення реальності використання формул для визначення потужності робочої ступені, незалежно від конструкції апарата і можливість порівняння формул.

Наведені на гістограмах дані свідчать про суттєві розбіжності розрахованих значень. Причому ці розбіжності проявляються при визначенні енерговитрат як у пульсаційному, так і у імпульсному варіанті конструкції. Відношення максимального значення розрахованої потужності до мінімального для пульсаційного варіанту конструкції складає 48,6, а для імпульсного варіанту – 10,6.

Найкраще співпадіння розрахованих і визначених експериментально значень потужності мають: для пульсаційного варіанту апарата – формули (2), а для імпульсного – формули (2) і (7). Відтак, для оціночних розрахунків незалежно від конструкції РПА можна рекомендувати формули (2), які забезпечують задовільне співпадіння результатів розрахунків як для пульсаційного, так і для імпульсного варіантів. Крім того, для розрахунків робочих ступеней пульсаційного варіанту можна можливе використання формул (4).

Порівняльний аналіз формул, що забезпечують найбільшу точність розрахунку, дав можливість виявити їх спільні ознаки і зробити такі узагальнення:

1. В кожному із виділених математичних виразів присутні параметри, що враховують: властивості середовищ, які піддаються обробці; динаміку обертання ротора; характерні геометричні розміри ротора.

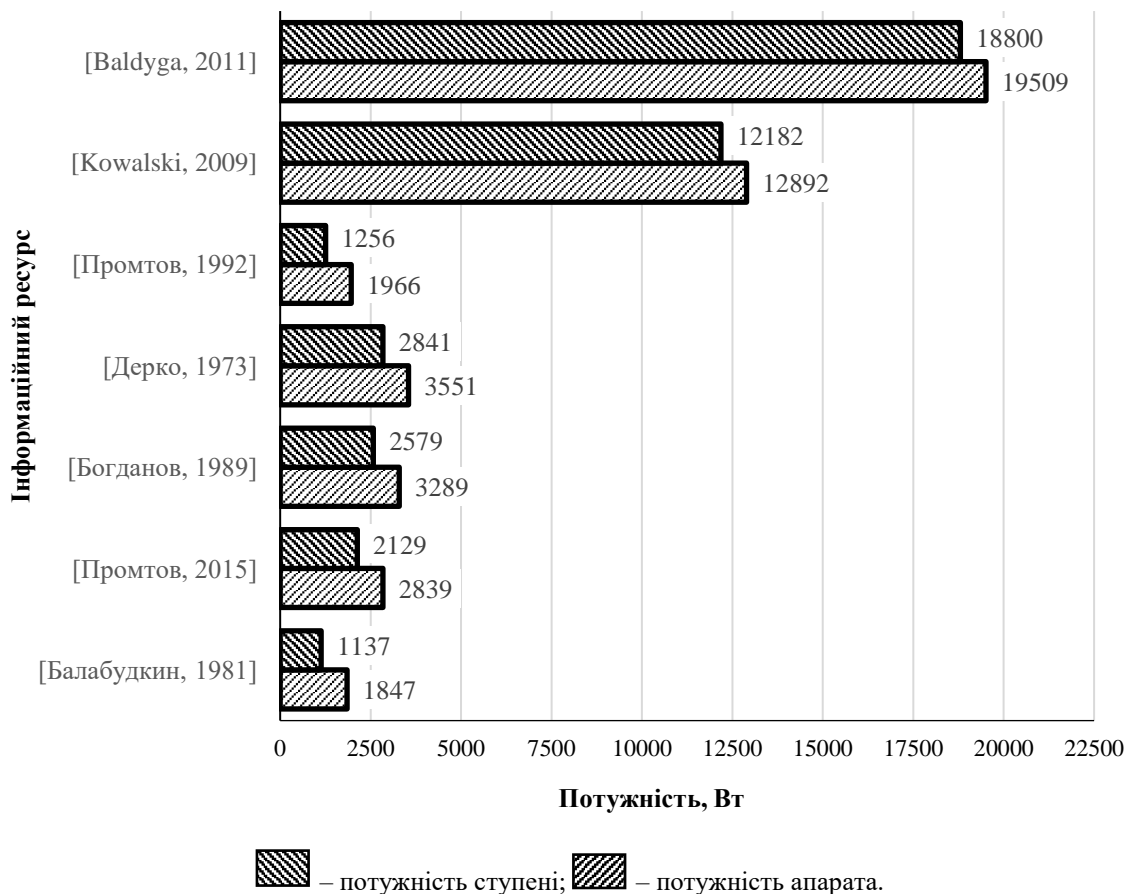


Рис. 3. – Величини витрат енергії у РПАі

- 1.1. У двох із трьох виразів ((2) і (4)) критерій Рейнольдса використовується піднесеним до однакового ступеня -0,3. У виразі (7) він записаний у видозміненому вигляді і має показник ступеня -1,17.
- 1.2. Вплив ширини радіального зазору між ротором і статором враховано сімплексом геометричної подібності (δ/D_{R2}), який в усіх трьох випадках має однаковий показник ступеня 0,2.
- 1.3. Вплив ширини прорізів у робочих органах у виразі (7) пропонується враховувати тільки відношенням $a_{1,z_1}/D_{R2}$. У виразах (2) і (4) вказується на необхідність врахування ширини і кількості прорізів як у роторі, так і у статорі. Тим не менше, для всіх трьох виразів добутки ширин прорізів на їх кількість, віднесені до діаметрів ротора підносяться до степені 0,7.
2. Загальний вираз для обчислення величини критерія потужності робочої ступені у всіх трьох випадках може бути приведений до однакового вигляду:

$$K_N = \frac{N_{cm}}{\rho n^3 b D_{R2}^4},$$

у якому для визначення величини критерію потужності, на відміну від перемішувальних пристроїв, використовуються два визначальні розміри – висота прорізів і діаметр ротора. Причому, значення висоти прорізів береться у першій степені, а значення діаметра ротора – у четвертій.

Врахування наведених ознак дозволяє більш правильно підійти до вибору параметрів РПА на етапах конструювання або підбору обладнання.

Висновки. За результатами розрахунків встановлено, що більшість відомих формул для визначення потужності РПА не відрізняється універсальністю і не може бути рекомендована для розрахунків апаратів, конструкція робочих органів або компоновання яких відмінні від тих, для яких безпосередньо одержані ці формули. Таким чином, використання існуючих підходів до енергетичного розрахунку РПА потребує ретельного обґрунтування для кожного конкретного випадку, що ускладнює розробку і підбір обладнання.

Виявляється перспективним продовження досліджень, спрямованих на знаходження більш універсальних і точних формул для визначення енергетичних характеристик РПА.

Умовні позначення

Re – критерій Рейнольдса;	F_c – площа бічної поверхні циліндра, м ² ;
a_1, a_2 – ширини прорізів ротора і статора, м;	χ – коефіцієнт довжини шляху змішування;
z_1, z_2 – кількості прорізів ротора і статора, шт.;	N_{cm} – потужність робочої ступені, Вт;
S_1, S_2 – радіальні товщини циліндрів ротора і статора, м;	N_m – витрати енергії на подолання гідравлічного тертя у торцевому зазорі між ротором і корпусом РПА, Вт;
D_{R1} – менший діаметр ротора, м;	K_N – критерій потужності;
D_{R2} – більший діаметр ротора, м;	K_1, K_2 – емпіричні коефіцієнти ;
D_{S1} – менший діаметр статора, м;	ρ – густина середовища, що піддається обробці, кг/м ³ ;
D_{S2} – більший діаметр статора, м;	δ – ширина зазору між ротором і статором, м;
Q – об'ємна витрата, м ³ /с;	δ_{\min} – мінімальна відстань між ротором і статором, м;
b – висота прорізів, м;	μ – динамічний коефіцієнт в'язкості середовища, що піддається обробці, Па с.
i – індекс цілочисельного перебігу даних;	
n – частота обертання ротора, с ⁻¹ ;	
w – швидкість обертання ротора, м/с;	

Список використаної літератури

1. [Балабудкин М.А. Масштабирование роторно-пульсационных аппаратов. / Балабудкин М.А. // Хим.-фарм. журнал. – 1981. – т.15. № 1. – С. 100-105.](#)
2. [Промтов М.А. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата/ М.А. Промтов, А.Ю. Степанов, А.В. Алешин. – М.: Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 148 с.](#)
3. [Богданов В.В. Эффективные малообъемные смесители / В.В. Богданов, Е.И. Христофоров, Б.А. Клоцунг. – Л.: Химия, 1989. – 224 с.](#)
4. [Червяков В.М., Однолько В.Г. Использование гидродинамических и кавитационных явлений в роторных аппаратах. – М.: "Машиностроение", 2008. – 116 с.](#)
5. [Дерко П.П. О гидромеханических закономерностях работы роторно-пульсационных аппаратов / Дерко П.П. // Теоретические основы химической технологии, – 1973, – т.7, № 1, – С. 123-125.](#)
6. [Кокушкин О.А. О расчете мощности ротационных аппаратов / Кокушкин О.А., Барам А.А., Павлушенко И.С. // Журнал прикладной химии. – 1969. – т.42. № 8. – С. 1793-1798.](#)
7. [Интенсификация процессов эмульгирования и растворения в аппаратах роторного типа : дис. канд. техн. наук: 05.17.08 / М.А. Промтов. – Тамбов, 1992. – 149 с.](#)
8. [Baldyga J. Reactive mixing and dispersion processes in rotor-stator devices / J. Baldyga, M. Jasińska // Process Engineering and Chemical Plant Design. – 2011. – P. 135-144. / ISBN 978-3-7983-2361-2.](#)
9. [Kowalski A.J. An expression for the power consumption of in-line rotor-stator devices / A.J. Kowalski // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2009. Vol. 48. – P. 581-585.](#)
10. [Ozcan-Taskin G. Power and flow characteristics of three rotor-stator heads / G. Ozcan-Taskin, D. Kubicki, G. Padron. // The Canadian Journal of Chemical Engineering. – 2011. Vol. 89. – P. 1005-1017.](#)

Надійшла до редакції 21.05.2018