

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

На правах рукопису

РОГОВИЙ АНДРІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 621.22:621.694.3

**РОЗРОБКА ТЕОРІЇ ТА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ  
ВИХОРОКАМЕРНИХ НАГНІТАЧІВ**

05.05.17 – Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків 2017

## ЗМІСТ

	Стор.
ВСТУП .....	7
РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМИ ПЕРЕКАЧУВАННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ СЕРЕДОВИЩ ТА НАПРЯМКИ РОЗВИТКУ Й УДОСКОНАЛЕННЯ СТРУМИННИХ НАГНІТАЧІВ .....	18
1.1. Сучасні умови роботи нагнітачів в промисловості.....	18
1.2. Сучасні засоби для перекачування однорідних середовищ в складних умовах експлуатації.....	21
1.2.1. Нагнітачі динамічного типу.....	22
1.2.2. Нагнітачі об'ємного типу .....	26
1.2.3. Ерліфти .....	27
1.2.3. Струминні нагнітачі.....	28
1.3. Енергетична ефективність пневмотранспортних установок ...	33
1.3.1. Аерожолоби .....	36
1.3.2. Струминні насоси для пневмотранспорту.....	38
1.3.3. Установки всмоктувальної дії.....	40
1.3.4. Шлюзові насоси.....	43
1.3.5. Пневмогвинтові насоси.....	45
1.3.6. Пневматичні камерні насоси.....	48
1.4. Енергетична ефективність гідротранспортних установок .....	54
1.4.1. Динамічні насоси для гідротранспорту.....	56
1.4.2. Об'ємні насоси для гідравлічного транспорту .....	59
1.4.3. Струминні насоси для гідравлічного транспорту.....	61
1.5. Струминно-вихрові насоси.....	66
1.6. Можливість дослідження робочого процесу нагнітачів за допомогою розрахункового експерименту.....	70
1.7. Висновки за 1-м розділом.....	72

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ З БІЛЬШ ВИСОКИМИ ПОКАЗНИКАМИ ЕФЕКТИВНОСТІ В ОБМЕЖЕНИХ ОБЕРТОВИХ ПОТОКАХ ТЕКУЧИХ СЕРЕДОВИЩ .....	74
2.1. Робочі процеси вихорокамерного нагнітача.....	74
2.2. Концепція створення вихорокамерних нагнітачів .....	76
2.3. Гідродинамічні підходи до математичного моделювання робочих процесів у вихорокамерних нагнітачах .....	83
2.4. Моделювання течії ідеальної рідини.....	87
2.5. Зональне моделювання течії в'язкої рідини .....	92
2.6. Тривимірне моделювання течії в'язкої рідини.....	96
2.7. Числова реалізація математичної моделі .....	105
2.7.1. Метод кінцевих об'ємів. ....	105
2.7.2. Одержання дискретних аналогів рівнянь Нав'є-Стокса. ....	110
2.7.3. Критерії відбору програмних засобів, використаних при рішенні поставленої задачі. ....	117
2.8. Висновки за 2-м розділом .....	120
РОЗДІЛ 3. ВЕРИФІКАЦІЯ РОЗРАХУНКІВ ТЕЧІЇ У ВИХОРОКАМЕРНИХ НАГНІТАЧАХ .....	124
3.1. Математичні моделі, що використалися для верифікації течії у вихорокамерному нагнітачі .....	126
3.2. SST модель турбулентності із коригуванням на кривизну ліній струму та обертання потоку.....	127
3.3. Метод DES. ....	129
3.4. Результати верифікації вихорокамерного нагнітача з закритим вихідним каналом .....	130
3.5. Вплив виду сітки та точність розрахунку течії у вихорокамерному нагнітачі.....	138
3.6. Вплив кількості елементів сітки та точність розрахунку	

течії у вихорокамерному нагнітачі .....	141
3.7. Результати верифікації вихорокамерного нагнітачі в нормальному режимі роботи .....	144
3.8. Результати верифікації методу DES для розрахунку течії у вихорокамерному нагнітачі .....	150
3.9. Висновки за 3-м розділом .....	157
<b>РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ</b>	
<b>ВИХОРОКАМЕРНИХ НАГНІТАЧІВ</b> .....	160
4.1. Загальні положення .....	160
4.2. Експериментальні стенди .....	161
4.2.1. Пневматичний експериментальний стенд. ....	161
4.2.2. Пневматичний експериментальний стенд для дослідження пневмотранспорту .....	163
4.2.3. Гідравлічний експериментальний стенд. ....	166
4.3. Прилади й контрольно-вимірювальна апаратура .....	168
4.4. Методика обробки експериментальних даних й оцінка похибок вимірів .....	169
4.4.1. Порядок виконання обробки експериментальних досліджень .....	169
4.4.2. Систематичні похибки при непрямим вимірах. ....	171
4.4.3. Регресійний аналіз й оцінка похибок апроксимацій. ....	173
4.4.4. Методика й порядок проведення експериментальних досліджень .....	174
4.5. Експериментальні дослідження робочих характеристик вихорокамерних нагнітачів із двостороннім всмоктуванням .....	176
4.6. Результати досліджень вихорокамерних нагнітачів із урахуванням впливу гравітації .....	181
4.7. Перевірка адекватності математичної моделі течії в вихорокамерному нагнітачі .....	189

4.8. Рух газового пухирця в короткій вихровій камері.....	190
4.8.1. Розрахунок траєкторій руху газового пухирця в короткій вихровій камері.....	190
4.8.2. Математичне моделювання руху газового пухирця в центральної області короткої вихрової камери.....	197
4.8. Висновки за 4-м розділом.....	204
<b>РОЗДІЛ 5. УДОСКОНАЛЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХОРОКАМЕРНИХ НАГНІТАЧІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ НА ОДНОРІДНИХ СЕРЕДОВИЩАХ.....</b>	
5.1. Особливості робочих процесів вихорокамерних нагнітачів.....	207
5.2. Вплив умов входу середовища, що перекачується, на енергетичні характеристики вихорокамерних нагнітачів.....	213
5.3. Вплив закручення потоку, що перекачується, на енергетичні характеристики вихорокамерних нагнітачів.....	219
5.4. Використання багатоступінчастих вихорокамерних нагнітачів.....	225
5.5. Критерії подоби вихорокамерних нагнітачів.....	230
5.6. Висновки за 5-м розділом.....	236
<b>РОЗДІЛ 6. ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ ВИХОРОКАМЕРНИХ НАГНІТАЧІВ У СИСТЕМАХ ПЕРЕКАЧУВАННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ СЕРЕДОВИЩ.....</b>	
6.1. Порівняльний аналіз робочих характеристик струминних нагнітачів вихрового типу.....	239
6.2. Використання вихорокамерних нагнітачів в гідро- та пневмотранспортних системах.....	245
6.2.1. Системи пневмо- і гідротранспорту, Використовувані в промисловості.....	247
6.2.2. Особливості застосування вихорокамерних нагнітачів.....	248
6.2.3. Зведений графік полів струминних нагнітачів,	

використовуваних у гідро- та пневмотранспортних системах.....	255
6.3. Управління роботою вихорокамерного нагнітача .....	256
6.3.1. Управління роботою вихорокамерного нагнітача вихровим клапаном, встановленим у дренажному каналі. ....	257
6.3.2. Управління роботою вихорокамерного нагнітача вихровим клапаном, встановленим у каналі всмоктування.....	259
6.3.3. Управління роботою вихорокамерного нагнітача вихровим клапаном, встановленим у тангенціальному вихідному каналі. ....	260
6.4. Методика інженерного розрахунку вихорокамерних нагнітачів.....	262
6.4.1. Вихорокамерний нагнітач високої напірності. ....	268
6.4.2. Методика інженерного розрахунку вихорокамерних нагнітачів високої напірності для перекачування твердих середовищ. ....	270
6.4.3. Вихорокамерний нагнітач високої продуктивності.....	272
6.4.4. Методика інженерного розрахунку вихорокамерних нагнітачів високої продуктивності для перекачування твердих середовищ. ....	273
6.5. Методика розрахунку пневмотранспортної установки вугільного пилу на основі вихорокамерного нагнітача .....	275
6.5. Висновки за 6-м розділом.....	281
ВИСНОВКИ.....	285
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	288
ДОДАТКИ.....	330