

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Теплові та гідравлічні розрахунки електричних машин»
для студентів спеціальності 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка (освітня програма
«Електричні машини і апарати»)
усіх форм навчання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Теплові та гідравлічні розрахунки електричних машин» для студентів спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (освітня програма «Електричні машини і апарати») усіх форм навчання / Укл.: Д.С. Яримбаш, С.Т. Яримбаш, С.А. Лапкіна - Запоріжжя: ЗНТУ, 2018, - 38 с.

Укладачі:	Д.С. Яримбаш, доцент, д-р.техн.наук; С.Т. Яримбаш, доцент, канд.техн.наук; С.А. Лапкіна, асистент.
Рецензент:	І.М. Коцур, доцент, канд.техн.наук
Відповідальний за випуск:	Г.В. Дьомічева, завідувач лабораторією.

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електричні машини»
Протокол № 8
від «22» березня 2018р.

Затверджено до видання
НМК Електротехнічного
факультету
Протокол № 8
від «29» березня 2018р.

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Лабораторна робота № 1 Визначення гідростатичного тиску . . .	5
2 Лабораторна робота № 2 Визначення режиму руху рідини	13
3 Лабораторна робота № 3 Випробування трубопроводу	20
4 Лабораторна робота № 4 Випробування відцентрового вентилятора.	26
5 Лабораторна робота № 5 Рух газу в каналі змінної площі живого перетину.	32
Рекомендована література	38
.....	

ВСТУП

Мета виконання лабораторних робіт з дисципліни "Теплові та гідравлічні розрахунки електричних машин" - закріплення основних положень досліджуваного теоретичного матеріалу, придбання навичок практичної роботи на експериментальних установках і з контрольно-вимірювальними приладами, оволодіння методами проведення експериментальних досліджень і оцінки їх результатів при порівнянні з теоретичними, табличними або розрахунковими даними.

Методичні вказівки містять опис п'яти лабораторних робіт, що охоплюють основний розділ курсу "Теплові та гідравлічні розрахунки електричних машин". У кожній роботі дається опис лабораторної установки, порядку виконання досвідів і обробки отриманих даних, вказуються зміст звіту й питання для самоперевірки.

При виконанні лабораторних робіт студент повинен мати журнал лабораторних досліджень, оформлений на аркушах писального паперу формату А4 (210x297 мм) або зошити (за розсудом викладача). У журналі, насамперед, повинна бути накреслена схема експериментальної установки, виписуються формули й залежності, необхідні для обчислень обумовлених у роботі величин, готуються таблиці для заповнення експериментальними й розрахунковими даними, викреслюються графіки або діаграми, побудовані по експериментальних і розрахункових даних.

Перед початком конкретної лабораторної роботи необхідно усвідомити її мету, зміст і послідовність спостережень і вимірів. При обчисленнях треба уважно стежити за правильною розмірністю величин, що підставляються у формулу. У розрахунках слід використовувати розмірність у міжнародній системі одиниць вимірів.

Повністю оформлений журнал спостережень повинен бути підписаний викладачем, що керував ходом лабораторних досліджень. Лабораторна робота вважається виконаною, якщо вона представлена в повністю оформленому виді й зарахованою, якщо основні результати обґрунтовані й захищені студентом при уснім опитуванні.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

ВИЗНАЧЕННЯ ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ

Мета роботи: набути навичок вимірювання тиску стрілочними манометрами і п'єзометрами.

Завдання роботи:

- визначити ціну ділення шкали стрілочного манометра в атмосферах і Н/м², враховуючи, що манометр має 100 елементарних ділень;
- визначити щільність другої рідини, вважаючи, що в лівому диференційному п'єзометрі – вода.

Теоретичний довідковий матеріал

Усі рідини на Землі знаходяться під тиском поверхневих і масових сил. До поверхневих належать сили, що діють на поверхню, яка відокремлює розглянутий об'єм рідини від газової або твердої фази. Наприклад, сила тиску атмосферного повітря або поршня на поверхню рідини.

До масових належать сили, напрямок і величина яких обумовлена масою самої рідини. Наприклад, сила ваги, сили інерції, відцентрова, доцентрова тощо.

Найбільш простим випадком рівноваги рідини, що часто зустрічається в природі і техніці є рівновага під дією однієї поверхневої сили (сили тиску на вільну поверхню рідини) і однієї масової сили (сили ваги).

У результаті дії даних сил усередині рідини виникає тиск, який у будь-якій точці визначається по формулі:

$$p_{абс} = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{F}{S}, \quad (1.1)$$

де $p_{абс}$ - абсолютний одиничний гідростатичний тиск в точці рідини, Н/м²; F - сила тиску на вільну поверхню рідини на розглянутою точкою, Н; G - сила гідростатичного тиску, яка дорівнює вазі рідини над розглянутою точкою, Н; S - площа поверхня, на яку діють сили F і G , м².

Тиск P у будь-якій точці рідини, що виникає під впливом сили тяжіння, називають гідростатичним тиском:

$$p = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{G}{S}. \quad (1.2)$$

Одиничний гідростатичний тиск має дві основні властивості: тиск в точці діє з однаковою силою по всім напрямкам і ця сила спрямована завжди по внутрішній нормалі (перпендикуляру) до виділеного майданчика. Іншими словами, одиничний гідростатичний тиск – це стискаюча напружка, що виникає в рідині під впливом сил тяжіння.

Одиничний гідростатичний тиск залежить від глибини занурення точки і ваги рідини над даною точкою:

$$p = \rho gh, \quad (1.3)$$

де $\rho = \frac{m}{V}$ - щільність рідини (відношення маси рідини до її об'єму), кг/м^3 ;

g - прискорення вільного падіння, м/с^2 ;

h - відстань від точки в об'ємі рідини до вільної поверхні, м.

Під вільною поверхнею рідини мають на увазі поверхню розділу фаз (наприклад рідина – газ або рідина – тверде тіло).

Якщо на вільну поверхню рідини діє атмосферний тиск p_o , загальний або абсолютний тиск в точці рідини:

$$p_{абс} = p_o + \rho gh = p_o + p_{изб}. \quad (1.4)$$

У цьому випадку одиничний гідростатичний тиск називають надлишковим тиском і позначають, як $p_{изб}$.

Якщо на вільну поверхню рідини діє тиск p_m , що є більшим ніж атмосферний ($p_m > p_a$), то абсолютний тиск в точці рідини:

$$p_{абс} = p_o + p_m + \rho gh = p_o + p'_{изб}. \quad (1.5)$$

У цьому випадку під надлишковим тиском розуміють суму тисків манометричного p_m і гідростатичного, що дорівнює ρgh .

Співвідношення (1.3), (1.4) називають основними рівняннями гідростатики, що дозволяють розрахувати абсолютний і надлишковий тиск у будь-якій точці об'єму рідини, що знаходиться під дією однієї

масової сили (сили тяжіння) і однієї поверхневої сили (сили тиску на вільну поверхню).

Гідростатичний тиск у СІ вимірюється в Паскалях: $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

Надлишковий тиск вимірюється манометром. Найбільш розповсюдженими є манометри мембранного і сільфонового типів.

Другим, не менш розповсюдженим приладом для вимірювання надлишкового тиску є рідинний манометр (п'єзометр), що являє собою скляну вертикальну трубку, один кінець якої з'єднується із ємністю з рідиною. Другий кінець з'єднується з атмосферою. П'єзометр дає покази надлишкового тиску, що вимірюються в метрах висоти рідини в п'єзометрі:

$$h = \frac{p_{\text{изб}}}{\rho h}.$$

Для вимірювання тиску, що дорівнює одній атмосфері ($9.81 \times 10^4 \text{ Па}$), потрібен п'єзометр із висотою трубки, яка заповнена водою:

$$h = \frac{p_{\text{изб}}}{\rho h} = \frac{9.81 \cdot 10^4}{1000 \cdot 9.81} = 10 \text{ м}.$$

Щільність води $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ при температурі $t = 20^\circ \text{C}$.

При вимірюванні аналогічного тиску ртутним п'єзометром (щільність ртуті $\rho_{\text{р}} = 13600 \text{ кг/м}^3$):

$$h = \frac{9.81 \cdot 10^4}{13600 \cdot 9.81} = 0.735 \text{ м} = 735 \text{ мм}.$$

Таким чином, тиск у 1 атмосферу можна виразити у найбільш розповсюджених для гідравлічних приладів одиницях наступним чином:

$$1 \text{ атм. (кгс/см}^2) = 1 \cdot 10^4 \text{ кгс/м}^2 = 9.81 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2 (\text{Па}) = 735 \text{ мм.рт.ст.}$$

Для визначення різниці тисків у двох довільно обраних точках застосовують рідинний диференціальний манометр, який являє собою U-твірну вертикальну трубку, яка заповнена рідиною (найчастіше водою або ртуттю). Рідинний дифманометр дає показання різниці (перепаду) тисків, що виражені в метрах стовпа рідини, що налита.

У просторі, який заповнено рідиною, що покоїться, завжди можна знайти поверхню, на протязі якої гідростатичний тиск не змінюється. Такі поверхні називають поверхнями рівного тиску або

поверхнями рівня. Поверхні рівня не перетинаються між собою і розташовані нормально до напрямку масових сил. Так у рідині, що знаходиться у спокої, під дією сили тяжіння, поверхня рівня – горизонтальна плоскість.

Опис лабораторної установки

Схема установка подана на рисунку 1.1.

За допомогою насоса (рис. 1.1) 1 в обмеженому об'ємі 2 створюється відповідний тиск, який фіксується манометром 3, а також двома п'єзометрами 4, що заповнені: лівий – водою, правий – рідиною із невизначеною щільністю.

За манометром 3 встановлюють тиск із заданим викладачем кроком його зміни і далі знімають показання диференційних п'єзометрів. Ці значення підставляють у рівняння (1.3) та обчислюють ціну ділення манометра 3 і щільність рідини в правому п'єзометрі.

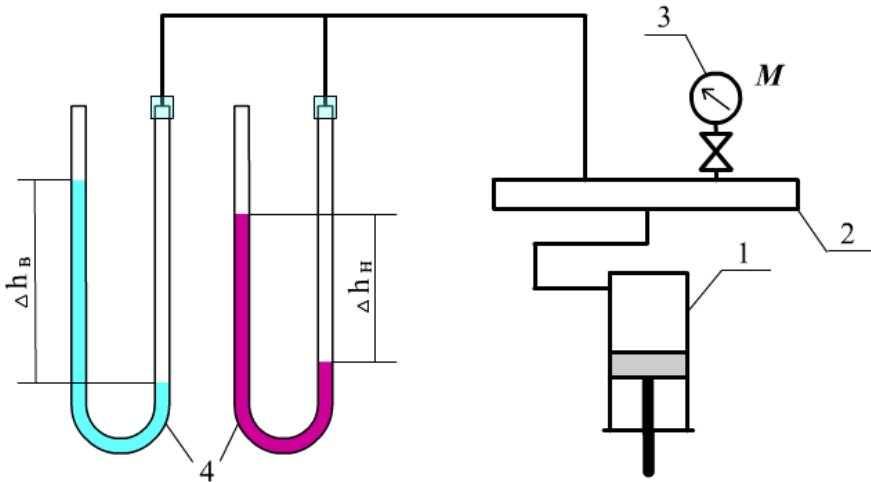


Рисунок 1.1 – Схема лабораторної установки

За допомогою програми Internet Explorer завантажити файл “test1”. Відповісти на запитання, обираючи привільні відповіді шляхом наведення курсору на кнопки «1» або «2» (рис 1.2).

За умови правильної відповіді на всі запитання Ви отримуєте залік з теорії і можете перейти до виконання лабораторної роботи, натискаючи клавішу “Переход к выполнению работы”.



Тестирующая программа
к лабораторной работе № 1

Вопрос № 3

Единица измерения гидростатического давления:

Ответ:

Варианты ответа:

1

2

Ответы:

1.

Правильно!	5
------------	---
2.

Правильно!	5
------------	---
3.

--	--
4.

--	--
5.

--	--

Оценка:

5
5

Общий балл:

10

Рисунок 1.2 – Комп'ютерне тестування з теоретичного матеріалу



Тестирующая программа
к лабораторной работе № 1

Вопросов больше нет.

Ответ:

Варианты ответа:

1

2

Ответы:

1.

Правильно!	5
------------	---
2.

Правильно!	5
------------	---
3.

Правильно!	5
------------	---
4.

Правильно!	5
------------	---
5.

Правильно!	5
------------	---

Оценка:

5
5
5
5
5

Общий балл:

+25

Варианты ответа:

1

2

Переход к выполнению работы

Рисунок 1.3 – Отримання «заліку» з теоретичного матеріалу та перехід до виконання лабораторної роботи

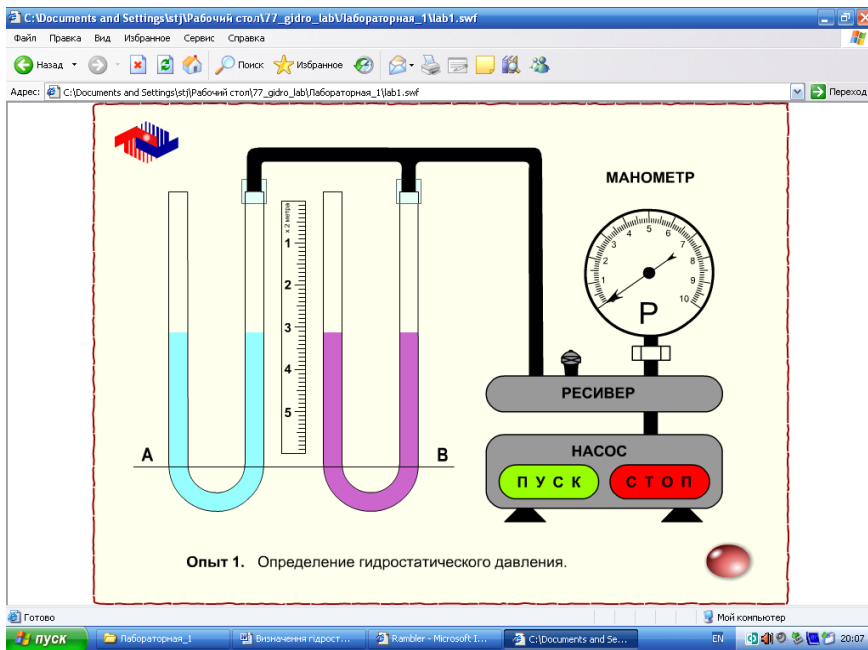


Рисунок 1.4 – Віртуальний лабораторний стенд

Порядок виконання роботи

Для початку роботи повітряного насоса достатньо натиснути кнопку «Пуск» або клавішу «р». Зупинити його можна у будь-який момент кнопкою «Стоп» або клавішею «S». Вимірювання висоти стовпчиків рідини у диференційних п'єзометрах виконують за допомогою вимірювальної лінійки. І плоскість, і лінійка пересуваються по екрану за допомогою лівої кнопки миші. Крім того, лінійка може пересуватися клавішами зі стрілками, що розташовані на кейборді.

Зверніть увагу на ціну ділення вимірювальної – $\times 2$ метра. Це означає, що загальна її довжина складає $6 \times 2 = 12$ метрів.

В процесі роботи, для підвищення точності відліку показів лінійки і стрілки манометра Ви можете вільно збільшувати масштаб екрану і пересувати його зміст за допомогою лівої кнопки миші. Для цього на будь-якому місці екрана правою кнопкою миші викличе відповідне меню і оберіть пункт “Увеличить масштаб”. Повернутися у звичайний режим можна знову, якщо викликати то саме меню і обрати пункт “Показать все” або “Уменьшить масштаб”.

Для підвищення точності розрахунків досліди треба повторити не менш трьох разів на кожному кроці зміни тиску і вивести середнє значення ціни ділення і щільності. Привести віртуальний лабораторний стенд у початковий стан потрібно за допомогою кнопки «Сброс».

Виконують три цикли вимірів і розрахунків. Дані вимірювання і розрахунків заносять до таблиці.

Таблиця 1.1 – Показання п'езометрів і манометру

№ досліду	№ виміру	Лівий п'езометр	Правий п'езометр	Стрілочний манометр	Щільність рідини
1	1				
	2				
	3				
	:				
	10				
2	1				
	2				
	3				
	:				
	10				
3	1				
	2				
	3				
	:				
	10				
Середні значення	1				
	2				
	3				
	:				
	10				

Знаходять середні значення для кожного виміру за трьома дослідами, а також математичне очікування щільності рідини та дисперсію за всіма дослідними даними.

Оформлюють звіт по роботі. У звіті вказують мету і завдання досліджень, наводять схему дослідної установки, розрахункові формули для переведення значень тиску в атмосферах до значень тиску в Па, обчислення щільності рідини в правому манометрі і формули для обробки результатів досліджень, математичного очікування, роблять висновки.

Контрольні питання

- 1 Що таке гідростатичний тиск і які його властивості?
- 2 Поясніть, що таке абсолютний і надлишковий гідростатичний тиск і який зв'язок між ними?
- 3 Поясніть, що розуміють під термінами: «зовнішній тиск» і «ваговий тиск»?
- 4 Напишіть і поясніть основне рівняння гідростатики.
- 5 Сформулюйте закон Паскаля.
- 6 Назвіть прилади для виміру надлишкового гідростатичного тиску й поясніть принцип їх дії.
- 7 Поясніть, що таке п'єзометрична висота?
- 8 У чому полягає різниця між тиском і напором?

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМУ РУХУ РІДИНИ

Мета роботи: спостереження за різними режимами руху рідини в трубі та визначення числа Рейнольдса.

Теоретичний довідковий матеріал

При течії рідини можливі два режими руху: ламінарний і турбулентний. Наявність того або іншого режиму обумовлюється співвідношенням сил, що діють у рідині, що рухається, а саме, сил інерції й сил внутрішнього тертя (в'язкості). Якщо в потоці переважають сили внутрішнього тертя, то встановлюється ламінарний режим. Відношення сил інерції до сил внутрішнього тертя характеризується так званим критерієм режиму руху (число Рейнольдса), який для напірного руху визначається співвідношенням

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (2.1)$$

де d - внутрішній діаметр труби, м;

v – середня швидкість руху рідини в потоці, м/с;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, м²/с.

Кожному режиму руху відповідає певна область значень чисел Рейнольдса, яка не залежить від властивостей рідини.

Зміна режиму (перехід ламінарного режиму в турбулентний або, навпаки, турбулентного в ламінарний) пов'язана із критичною величиною цього числа, що позначають $Re_{кр}$.

Для напірного руху в трубах (для так званої внутрішньої задачі) нижнє критичне число Рейнольдса $Re_{кр.н}$, відповідне до переходу турбулентного режиму в ламінарний, слід вважати рівним 2000. Верхнє критичне число Рейнольдса $Re_{кр.в}$, що відповідає переходу ламінарного режиму в турбулентний, не є настільки визначеним, як нижнє критичне число Рейнольдса; чисельне значення його можна прийняти приблизно рівним 13000... 14000. Практично вважають, що для $Re < Re_{кр.н}$ має місце ламінарний режим, а для

$Re > Re_{кр.в}$ – турбулентний режим. В інтервалі чисел Рейнольдса можливе існування того або іншого режимів. Зокрема, якщо в потоці існував турбулентний режим, то він буде існувати до значення $Re = Re_{кр.н}$. Якщо ж існував ламінарний режим, то він буде мати місце до $Re = Re_{кр.в}$.

Часто середнє значення між $Re_{кр.н}$ і $Re_{кр.в}$ в приймають за критичне число Рейнольдса $Re_{кр}$; по деяким дослідним даним $Re_{кр}$ можна вважати рівним 2320, але при цьому потрібно завжди пам'ятати про існування області зміни режиму, характеристика якої недостатньо визначена.

Швидкість руху рідини, при якій відбувається зміна режимів, називається критичною швидкістю. На відміну від критичного значення числа Рейнольдса, однакового для потоку будь-якої рідини в трубопроводі будь-якого діаметра, критична швидкість для кожної рідини має своє визначене значення, що залежить від діаметра трубопроводу та коефіцієнта в'язкості рідини.

$$v_{кр} = Re_{кр} = 2320 \frac{v}{d}. \quad (2.2)$$

Характер руху часток при ламінарному і турбулентному режимах є різним. При ламінарному режимі частки переміщуються як би шарами по траєкторіях, що паралельні між собою. При турбулентному режимі траєкторія руху часток є криволінійною і складною. Рухливі частки зіштовхуються між собою, і відбувається досить інтенсивний процес переміщування. Рух часток можна зробити видимим, якщо фарбувати потік. Таким чином, установити режим руху можна двома методами: визначенням числа Рейнольдса і візуальним методом, якщо спостерігати за рухом часток у підфарбованому потоці.

Якщо фарба, що додається до потоку, розташовується в ньому у вигляді прямого струмка, який чітко видно на всьому протязі, то це свідчить про паралельне переміщення часток рідини, або про наявність ламінарного режиму руху. При цьому число Рейнольдса виявляється менше критичного значення, тобто менше 2320.

Якщо струмок фарби розмивається потоком і рівномірно фарбую його, це свідчить про рух часток по складних траєкторіях, що приводить до перемішування, або про наявність турбулентного режиму. При цьому число Рейнольдса – більше критичного, тобто більше 2320.

Опис лабораторної установки

Лабораторна робота з визначення режиму руху проводиться на установці, яка схематично зображена на рис. 2.1. Водопровідна вода надходить у напірний бак з деяким надлишком і протікає в скляну трубу із внутрішнім діаметром 26 мм, а потім у прийомний бак, звідки йде в каналізацію.

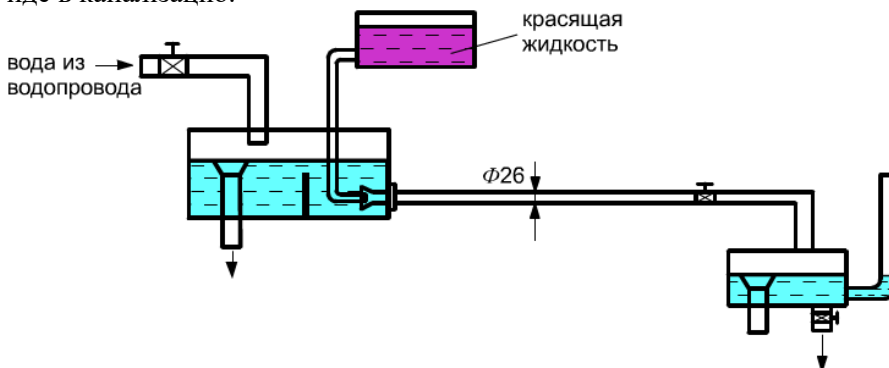


Рисунок 2.1 – Схема лабораторної установки

У напірному баку встановлена переливна лійка і заспокійлива перегородка. Над напірним баком розташована ємність, з якої фарба по тонкій трубці надходить у скляну трубку.

Дослідження характеру руху проводиться при рівномірному русі. Як відомо, рівномірним рухом рідини називають усталений рух у трубопроводі, по довжині якого середня швидкість руху залишається постійною.

Усталений рух рідини є можливим в умовах постійного напору і незмінних гідравлічних опорів системи. У цьому випадку об'ємна витрата рідини залишається постійною за часом. Сталість напору в установці забезпечується незмінним положенням вільної поверхні в напірному баку, що збігається з верхньою кромкою переливної лійки. Напір у цьому випадку визначається вертикальною відстанню від

верхньої кромки переливної лійки до вихідного перетину трубопроводу. Сталість гідравлічного опору досягається незмінним ступенем відкриття вентиля на кінці трубопроводу під час досліду.

При проведенні роботи необхідно, по можливості, виключити побічні явища, що викликають турбулізацію. Так перегородка, що заспокоює, призначена для локалізації збурень, які виникають у напірному баку при заповненні водою. Для початку роботи необхідно установку наповнити водою і створити рух рідини в трубопроводі, що здійснюється певним ступенем відкриття запірною крана. Зміна швидкості руху в скляній трубці досягається різним ступенем відкриття вентиля. Якщо установити малий ступінь відкриття крана (при великому опорі), то одержимо малу швидкість руху. Одночасно з візуальним спостереженням за потоком визначається критерій режиму руху або число Рейнольдса. Для визначення числа Рейнольдса необхідно виміряти внутрішній діаметр скляної трубки та обчислити середню швидкість потоку. Середню швидкість рідини знаходять із рівняння нерозривності потоку. Для цього необхідно визначити витрату рідини, наприклад, об'ємним методом:

$$Q = \frac{V}{\tau}, \quad (2.3)$$

де V – об'єм рідини, що набрана в мірну посудину, м^3 ;

τ – час, с.

Звідки

$$v = \frac{Q}{S}, \quad (2.4)$$

де Q – об'ємна розхід, або об'єм рідини, що протікає через площу живого перетину в одиницю часу, $\text{м}^3/\text{с}$;

S – живий перетин потоку, тобто перетин, розташований нормально до напрямку руху, м^2 ;

V – середня швидкість руху рідини, $\text{м}/\text{с}$.

Якщо на початку досліду встановлено ламінарний режим, то подальші випробування проводять, збільшуючи швидкість руху (зменшуючи опір) до критичного її значення, а далі до понад критичного, при якому існує турбулентний режим руху. Число Рейнольдса визначають за рівнянням (2.1). Кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини знаходять по табл. 2.1 відповідно до t рідини.

Значення критичної швидкості розраховують по рівнянню (2.2).
Результати випробувань і остаточні розрахунки зводять в табл. 2.2.

Таблиця 2.1 – Температурна залежність кінематичної в'язкості води

$t, ^\circ\text{C}$	0	5	10	15	20	30	40	50
$\nu, \text{см}^2/\text{с}$	0.0178	0.0152	0.0131	0.0114	0.0101	0.0081	0.0066	0.0055

Таблиця 2.2 – Результати досліджень

№ досліджу	Результати спостережень					Обчислені дані					
	Режим	$d, \text{м}$	$V, \text{м}^3$	$\tau, \text{с}$	$t, ^\circ\text{C}$	$S, \text{м}^2$	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$v, \text{м}/\text{с}$	$\nu, \text{м}^2/\text{с}$	Re	$v_{кр}, \text{м}/\text{с}$

Порядок виконання роботи

За допомогою програми Internet Explorer завантажити файл “test7”.

Відповісти на запитання, обираючи привільні відповіді шляхом наведення курсору на кнопки «1» або «2».

За умови правильної відповіді на всі запитання Ви отримуєте залік з теорії і можете перейти до виконання лабораторної роботи, натискаючи клавішу “Переход к выполнению работы”.

Відповісти на запитання, обираючи привільні відповіді шляхом наведення курсору на кнопки «1» або «2».

За умови правильної відповіді на всі запитання Ви отримуєте залік з теорії і можете перейти до виконання лабораторної роботи, натискаючи клавішу “Переход к выполнению работы”.

За допомогою програми Internet Explorer завантажити файл “lab7” для подальшого виконання лабораторної роботи.

Кнопкою "Пуск води" (рис. 2.2) починають заповнення напірного бака і прозорі горизонтальної трубки водою. Після наповнення напірного бака до верхнього рівня переливної лійки, відкривають головний вентиль. Керувати вентилем можна, як безпосередньо одиночними клацаннями лівою кнопкою миші, так і клавішею кейборда зі стрілкою "вправо". Керуючи ступенем відкриття вентилля, Ви зможете тільки збільшувати швидкість протікання води. Зменшувати потік у цій лабораторній роботі не можна з технічних причин демонстраційного ролика. Якщо знадобиться повернутися до

меншої швидкості течії води, то доведеться скористатися кнопкою "Сброс", повторити процес наповнення бака водою і знову встановити потрібну швидкість.

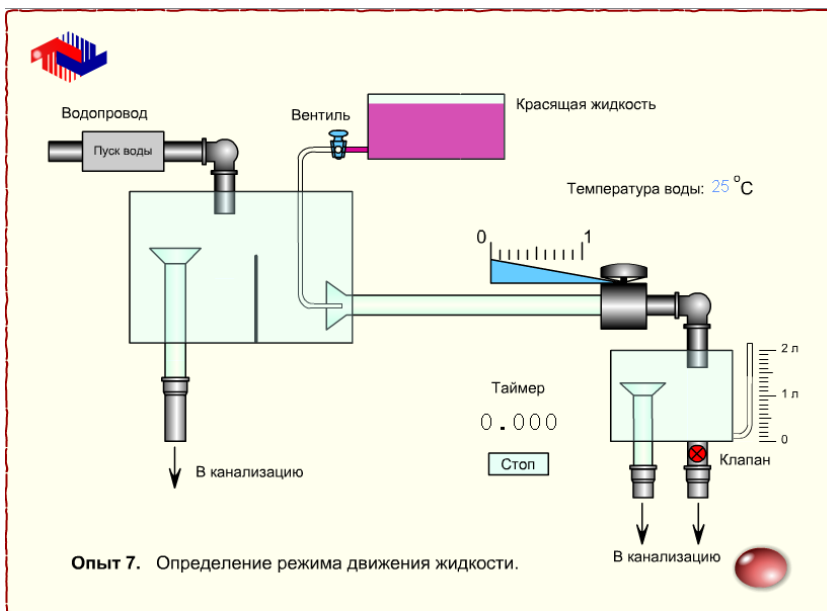


Рисунок 2.2 – Віртуальний лабораторний стенд

Кнопкою "Пуск воды" (рис. 2.2) починають заповнення напірного бака і прозорої горизонтальної трубки водою. Після наповнення напірного бака до верхнього рівня переливної лійки, відкривають головний вентиль. Керувати вентилем можна, як безпосередньо одиночними клацаннями лівою кнопкою миші, так і клавішею кейборда зі стрілкою "вправо". Керуючи ступенем відкриття вентилу, Ви зможете тільки збільшувати швидкість протікання води. Зменшувати потік у цій лабораторній роботі не можна з технічних причин демонстраційного ролика. Якщо знадобиться повернутися до меншої швидкості течії води, то доведеться скористатися кнопкою "Сброс", повторити процес наповнення бака водою і знову встановити потрібну швидкість.

Для візуалізації режиму течії в трубі необхідно відкрити вентиль, який перекриває барвну рідину, для чого необхідно кликнути

по ньому лівою кнопкою миші. Цей клапан відкриється тільки в тому випадку, якщо головний клапан буде відкритий хоча б на один поділ. Відкривши клапан барвної рідини, можна буде спостерігати режим руху рідини в прозорій горизонтальній трубі.

Залежно від ступеня відкриття головного клапана, можна буде спостерігати спочатку ламінарний потік рідини, що поступово переходить у турбулентний. При цьому, ламінарним режимом потрібно вважати тільки той, при якому струмінь барвної рідини в спільному потоці абсолютно не спотворюється, а турбулентним – той, при якому струмінь фарби повністю розмивається.

Для вимірювання швидкості потоку достатньо клікнути лівою кнопкою миші по спусковому клапану, після чого спорожниться мірна судина та автоматично запуститься таймер. Як тільки в мірній судині набереться достатня кількість води, зупиніть таймер і занесіть у таблицю 2.2 вимірюваний об'єм води V і час таймера τ . Крім того в таблицю необхідно також внести температуру води t і діаметр d прозорої горизонтальної труби. Вимірювання повторюють як мінімум для двох режимів – ламінарного і турбулентного.

Далі переходьте до обчислень і заповніть необхідні місця в таблиці 2.2.

По завершенні студенти оформлюють звіт по роботі.

У звіті вказують мету і завдання досліджень, наводять схему дослідної установки, розрахункові формули для обробки результатів досліджень, роблять висновки.

Контрольні питання

- 1 Режими руху рідини.
- 2 Фізичний зміст критерію Рейнольдса.
- 3 Гіпотеза Ньютона про внутрішню тертя в рідині.
- 4 Кінематичний і динамічний коефіцієнти в'язкості; їх фізичний зміст і взаємозв'язок.
- 5 Поняття середньої швидкості витікання рідини.
- 6 Критичні значення критерію Рейнольдса; поняття критичної швидкості.
- 7 Поняття еквівалентного діаметра потоку; розрахунки еквівалентного діаметра для різних рукавів (приклад).

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ВИПРОБУВАННЯ ТРУБОПРОВОДУ

Мета роботи: побудова напірної і п'єзометричної ліній для трубопроводу опору. Визначення коефіцієнтів місцевих опорів і коефіцієнтів тертя по довжині.

Завдання роботи:

- визначення дослідним шляхом втрат напору на подолання опору по довжині трубопроводу і на ділянках з місцевими опорами;
- розрахунок коефіцієнтів місцевих втрат і коефіцієнтів Дарсі;
- побудова напірної і п'єзометричної лінії.

Теоретичний довідковий матеріал

Для усталеного потоку повна питома енергія рідини в даному перерізі (напір) визначається сумою питомих кінетичної і потенційної енергій:

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g}. \quad (3.1)$$

де z – питома енергія положення (може бути представлена відстанню від площини порівняння до осі потоку), м;

$p/(\rho g)$ – питома енергія тиску – висота підняття рідини в п'єзометр (п'єзометричний напір), м;

$v^2/(2g)$ – питома кінетична енергія (швидкісний напір), м.

Відомо, що під час руху в'язкої рідини її напір зменшується вниз за течією, тому що частина потенційної енергії витрачається на її подолання. Якщо питома потенційна енергія, витрачена рідиною на подолання опорів між першим і другим перерізами, дорівнює $h_{тр}$, то рівняння Бернуллі, що зв'язує питомі повні енергії у цих двох перетинах, буде мати вигляд:

$$z_1 + \alpha_1 \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \alpha_2 \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{тр}, \quad (3.2)$$

де 1 і 2 – індекси параметрів відповідно початку і кінця потоку;

$h_{тр}$ – напір, витрачений на подолання місцевих опорів і опорів по довжині.

Місцеві втрати енергії і втрати енергії по довжині залежать від величини кінетичної енергії. Так,

$$h_{\text{дл}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (3.3)$$

$$h_{\text{м}} = \xi_{\text{м}} \frac{v^2}{2g}. \quad (3.4)$$

де λ – коефіцієнт опору тертя по довжині, або коефіцієнт Дарсі;

l – довжина потоку, м;

d – діаметр трубопроводу, м;

$\xi_{\text{м}}$ – коефіцієнт місцевих втрат.

Питома кінетична і потенційна енергії потоку пов'язані між собою. Зокрема, якщо кінетична енергія рідини зменшується, що проявляється у зменшенні швидкості руху, то потенційна енергія збільшується, це призводить до відповідного збільшення тиску.

Зміна питомої енергії рідини можна зобразити графічно, відкладаючи в масштабі для спостережуваних перетинів величини питомої енергії положення, енергії тиску і кінетичної енергії.

Лінія, що з'єднує точки, що відповідають значенням суми всіх видів енергії, називається лінією повної питомої енергії, або напірної лінією. Лінія, що з'єднує точки, що відповідають значенням потенційної енергії, називається лінією питомої потенційної енергії, або п'єзометричною лінією (рис. 3.1).

Визначення п'єзометричної висоти $h = p/(\rho g)$ проводиться за допомогою п'єзометра; вона дорівнює висоті підняття стовпа рідини в п'єзометрі. Для розглянутого трубопроводу площа порівняння збігається з віссю горизонтальної частини трубопроводу, тому величина у всіх перетинах буде дорівнювати 0.

Визначення середньої швидкості рідини здійснюється за формулою:

$$v = \frac{Q}{S}. \quad (3.5)$$

Витрата визначається за допомогою витратомірного приладу – ротаметра.

Розглядаючи рис. 3.1, можна побачити, як змінюється повна питома енергія потоку, а, отже, швидкість і тиск залежно від зміни перетину трубопроводу. Зокрема, при раптовому розширенні тиск у потоці збільшується, що пояснюється зменшенням швидкості руху.

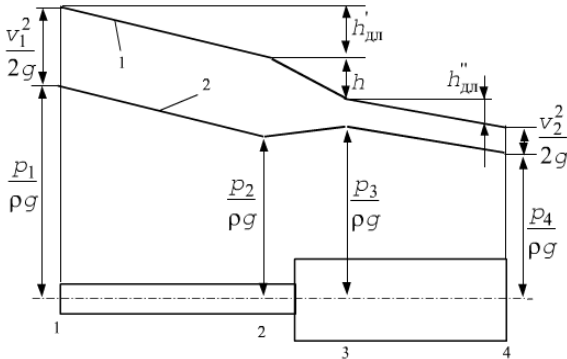


Рисунок 3.1 – Приклад побудови напірної й п'єзометричної ліній

Питома енергія, витрачена на подолання опору в будь-якому місцевому опорі, може бути визначена як різниця повної питомої енергії до і після опору, наприклад, для ділянки 2-3:

$$h_m = \left(\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} \right) - \left(\frac{v_3^2}{2g} + \frac{p_3}{\rho g} \right). \quad (3.6)$$

Питома енергія, витрачена на подолання опору тертя по довжині, може бути визначена по різниці показань п'єзометрів, оскільки кінетична енергія протягом трубопроводу вважається постійною.

Так, для перетинів 1 і 2:

$$h_{ол} = \left(\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(\frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} \right) = \frac{p_1 - p_2}{\rho g}. \quad (3.7)$$

Таким чином, для визначення λ і ξ_m по рівняннях (3.3) та (3.4) необхідно знати величини $h_{ол}$ і h_m для відповідних ділянок. Ці величини знаходимо з рівнянь (3.6) та (3.7), використовуючи результати вимірів. Слід зазначити, що при визначенні по рівнянню (3.4) кінетична енергія розраховується за швидкістю, якою володіє

потік за місцевим опором, тобто при визначенні на ділянці 2 – 3 у формулу (3.4) підставляється швидкість на ділянці 3.

Опис лабораторної установки

Схематичне зображення трубопроводу опору показано на рис. 3.2.

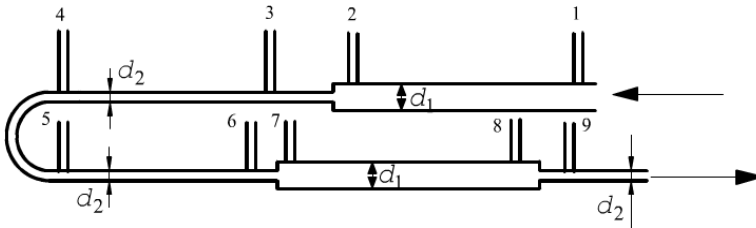


Рисунок 3.2 – Схема трубопроводу опору

Вода з напірного бака надходить в трубопровід опору, протікаючи через який зливається в каналізацію.

Трубопровід опору виконаний з труб діаметрами $d_1 = 26 \cdot 10^{-3}$, м і $d_2 = 16 \cdot 10^{-3}$, м і складається з 8 ділянок (Рис. 3.2).

Вимірювання тисків проводиться п'єзометрами у вказаних на схемі перетинах. Витрата рідини через трубопровід вимірюють за допомогою ротаметр і регулюють вентилем. Дослідні дані заносять в таблицю 3.1. Результати розрахунків швидкостей, втрат усіх видів і коефіцієнтів – в таблицю 3.2.

Побудова напірної і п'єзометричної ліній проводиться на окремому аркуші паперу (обов'язково із застосуванням масштабу). По осі абсцис у масштабі зображується витягнута в одну лінію схема трубопроводу опору. На трубопроводі мають бути показані місця, в яких визначається натиск. Ці місця відповідають положенням п'єзометрів на трубопроводі і позначаються прямими вертикальними штрих пунктирними лініями, проведеними від осі трубопроводу до п'єзометричної лінії.

По осі ординат, також у масштабі, відкладається значення повної питомої енергії (напору). Масштаб для п'єзометричної висоти і швидкісного напору повинен бути однаковим.

Побудова п'єзометричної лінії проводиться нанесенням на координатну площину точок, що відповідають питомої енергії тиску в розглянутих перетинах трубопроводу, і з'єднанням сусідніх точок прямими лініями. Розташування точки визначається, з одного боку,

перетином трубопроводу, для якого потрібно зобразити напірну лінію, з іншого боку, енергією тиску потоку. Якщо площа порівняння збігається з віссю трубопроводу, то для знаходження точки потрібно від осі трубопроводу відкласти вертикально вгору показання п'єзометра. Для побудови лінії питомої повної енергії (напірної лінії) необхідно відкласти вертикально вгору від п'єзометричної лінії в тому ж масштабі значення швидкісного напору, відповідного даному перетину. Отримані точки необхідно з'єднати прямими лініями.

Таблиця 3.1 – Дослідні дані

Параметри	Номер перерізу								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Показання п'єзометра $h = \frac{p}{\rho g}$, м									
Q , м ³ /с									
v , м/с									
$v^2/2g$, м									

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків швидкостей

Параметри	Номер перерізу							
	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9
L , м	1.07	-	0.64	-	0.44	-	1.17	-
$d \cdot 10^{-3}$, м	26	26>16	16	16	16	26>16	26	26>16
$h_{ол}$, м								
h_m , м								
λ								
ξ_m , м								

П'єзометрична лінія, що показує зміну питомої потенційної енергії потоку на всій його довжині, може мати нахил, спрямований, як убік збільшення, так і убік зменшення. Кут і напрямок нахилу визначається початковим тиском і його зміною. Лінія повної питомої енергії на відміну від п'єзометричної лінії має нахил, завжди

спрямований у бік зниження питомої енергії потоку, що пов'язано з витрачанням напору на подолання опорів.

Порядок виконання роботи

Кнопкою "Пуск води" запустить процес заповнення напірного бака і труб водою. Після наповнення напірного бака до верхнього рівня переливної лійки, приступайте до відкривання вентиля. Керувати вентилям можна, як безпосередньо лівою кнопкою миші, так і клавішами кейборду зі стрілками "вгору" і "вниз". Керуючи вентилям, необхідно добитися заданого викладачем показання ротаметра, відлік проводиться по верхній кромці його поплавка. Наведення курсору на поплавок викличе тарувальний графік і визначте по ньому витрату води.

Пересуваючи за допомогою миші вимірювальну горизонтальну лінійку та поєднуючи її з верхньою кромкою рівня води в кожному п'єзометрі, визначте за відповідною шкалою показання всіх 9-ти п'єзометрів. Для збільшення точності відліку, правою кнопкою миші викличте меню, що випадає і збільшить загальний масштаб "Zoom In". Прагнучи до необхідної точності відліку, цю операцію можна повторити кілька разів. Повернутися в звичайний режим можна буде через те ж меню по команді "Show All". Показання п'єзометрів відображаються також у цифровому вигляді. Порівняйте їх з отриманими вимірами. Занесіть виміряні дані в таблицю 3.1 і приступайте до розрахунків.

Контрольні питання

- 1 Рівняння Д. Бернуллі для ідеальної й реальної рідини; геометричний і енергетичний зміст рівняння Д. Бернуллі.
- 2 Види втрат напору.
- 3 Формула Дарсі-Вейсбаха.
- 4 Коефіцієнт гідравлічного тертя, від чого залежить його значення?
- 5 Поняття гладкого, доквадратичного й квадратичного тертя.
- 6 Профіль швидкостей по перетину русла. Поняття середньої швидкості.
- 7 Об'ємний спосіб виміру середніх швидкостей руху рідини.

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ВИПРОБУВАННЯ ВІДЦЕНТРОВОГО ВЕНТИЛЯТОРА

Мета роботи: придбання навичок експериментального визначення характеристик вентилятора.

Теоретичний довідковий матеріал

Вентилятор – відцентрова машина, що призначена для переміщення газів. Відцентрові вентилятори умовно діляться на вентилятори низького тиску ($p < 10^3$, Па), середнього тиску ($10^3 < p < 3 \cdot 10^3$, Па) й високого тиску ($3 \cdot 10^3 < p < 4 \cdot 10^3$, Па).

Основним елементом відцентрового насоса (рис. 4.1) є робоче колесо 1, що полягає із двох дисків, з'єднаних вигнутими лопатами. Рідина по підведенню 2 надходить у центральну частину робочого колеса, стрімко відкидається до периферії, попадає в слимакоподібний спіральний канал, який кільцем охоплює робоче колесо. Що збільшується до вихідного патрубка - відводу 3 – поперечний переріз спірального каналу приводить до плавного зниження великої швидкості, отриманою рідиною на виході з робочого колеса, до нормальної швидкості у відводі 3 і далі в нагнітальному трубопроводі.

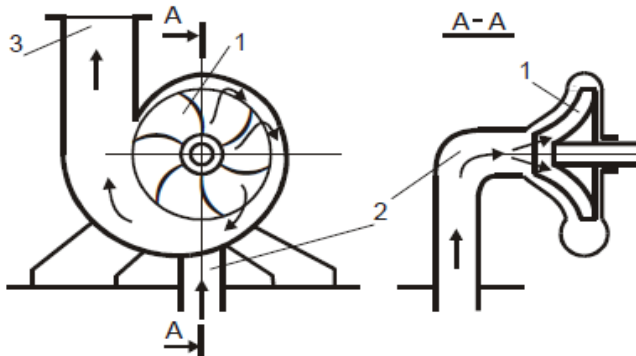


Рисунок 4.1 – Одноступінчастий відцентровий насос

При цьому частина кінетичної енергії рідини переходить у потенційну, що супроводжується збільшенням тиску (напору) рідини.

Усередині корпуса відцентрового насоса може бути встановлене одне або кілька робочих коліс. Відповідно, відцентрові насоси

діляться на одно- і багатоступінчасті. У багатоступінчастих насосах для підвищення напору рідина, що виходить із першого робочого колеса, надходить на друге робоче колесо, потім на третє і т.д. Загальний напір, створюваний багатоступінчастим насосом, приблизно дорівнює сумі напорів, придбаних рідиною в кожному робочім колесі.

Особливістю експлуатації відцентрових насосів є те, що перед пуском їх необхідно заливати рідиною, що перекачується.

Характеристики вентилятора слугують для дослідження їх роботи в різних умовах і для підбора вентиляторів при проектуванні вентиляційних установок.

Робочий режим установлюється по точці перетинання характеристики вентилятора з характеристикою мережі. Суміщення характеристики мережі й вентилятора дає робочу точку; вона відповідає найбільшій продуктивності вентилятора при його роботі на дану мережу.

Робочими характеристиками вентилятора називаються функціональні залежності $H = f_1(Q)$, $N = f_2(Q)$, $\eta = f_3(Q)$, що отримані при постійному числі обертів робочого колеса.

Об'ємна подача вентилятора Q м³/с, визначається об'ємом повітря, яке необхідно подавати вентилятором у нагнітальний патрубок в одиницю часу.

Напір H , м, характеризує питому енергію, яка надається вентилятором одиниці ваги переміщуваного повітря.

Корисна потужність N , Вт, що затрачена вентилятором на надання повітрю енергії тиску, яка дорівнює:

$$N = \rho_B \cdot g \cdot Q \cdot H^1 = Q \cdot p, \quad (4.1)$$

де ρ_B – щільність поданого повітря, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с²; Q – об'ємна подача вентилятора, м³/с; H^1 – повний напір у м. стовпа перекачаного повітря; p – створений вентилятором повний тиск, Па, що дорівнює різниці повних тисків на нагнітаючому та всмоктувальному боках повітряного тракту.

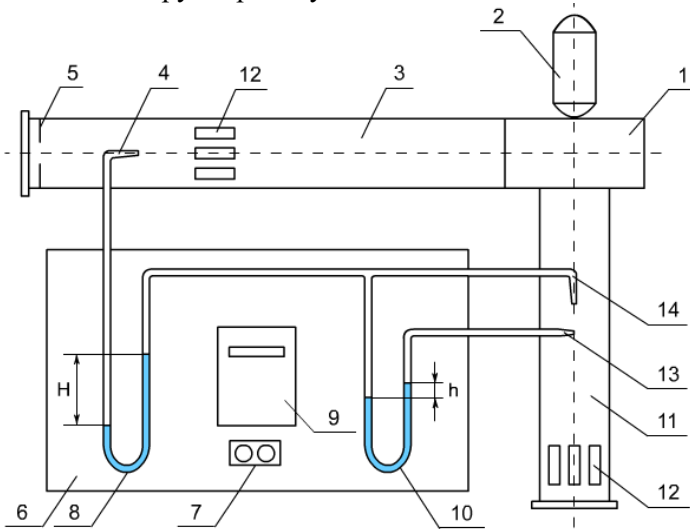
Потужність N_B , Вт, приводу вентилятора:

$$N_B = \frac{N}{\eta}, \quad (4.2)$$

де η – ККД вентилятора, рівний 0.5 – 0.95 залежно від типу і об'ємної подачі вентилятора.

Опис лабораторної установки

Установка (рис. 4.2) складається з відцентрового вентилятора 1, який змонтованого на одному валу з електродвигуном 2. До вентилятора приєднані труби: всмоктувальна 11 і нагнітальна 3 однакових діаметрів ($d = 0,150$ м.). У вихідному отворі нагнітальної труби можна встановлювати діафрагми 5 різного перетину, що дозволяють змінювати площу вихідного отвору і, отже, змінювати опір нагнітального трубопроводу.



- 1 - відцентровий вентилятор, 2 - електродвигун, 3 - нагнітальний трубопровід, 4 - трубка повного напору в нагнітальному трубопроводі, 5 - діафрагма, 6 - щит керування, 7 - пускова кнопка, 8 - дифманометр повного напору, 9 - лічильник електроенергії, 10 - дифманометр швидкісного напору, 11 - усмоктувальний трубопровід, 12 - ґрати, що спрямовують потік повітря, 13 - трубка статичного напору в усмоктувальному трубопроводі, 14 - трубка повного напору в усмоктувальному трубопроводі

Рисунок 4.2 – Схема лабораторної установки

При випробуванні трубопроводу заміряють об'ємну подачу, розвинутий натиск і споживану потужність. Об'ємну подачу і натиск

заміряють за допомогою швидкісної пневмометричної трубки (рис. 4.3), потужність – електrolічильником 9 (рис. 4.2).

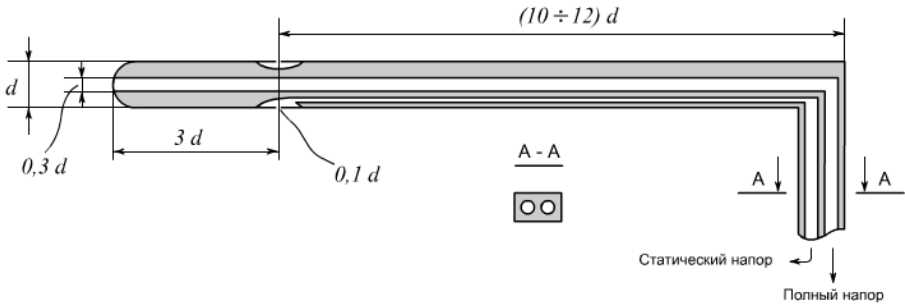


Рисунок 4.3 – Схема швидкісної трубки

На рис. 4.3 наведено схему швидкісної (пневмометричної) трубки Піто-Прандтля.

Порядок виконання роботи

Включити вентилятор, натиснувши пускову кнопку 7. На виході з нагнітального трубопроводу або на вході в усмоктувальний трубопровід установити послідовно діафрагми (рис. 4.1), які, дроселюють потік повітря, змінюють режим роботи установки. Можна дроселювати вхід.

Для кожного режиму роботи установки необхідно записати показання U -подібних дифманометрів, що фіксують повний H і швидкісний h напори вентилятора. За допомогою секундоміра визначити частоту обертання диска електrolічильника ν , с^{-1} .

Усі виміри треба виконувати "на ходу", не виключаючи вентилятор при заміні діафрагм. Всі виміри необхідно провести не менш ніж для сімох режимів роботи вентилятора (для шістьох діафрагм і без діафрагми).

Результати роботи занести в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати роботи

№ діафрагми	H , м	h , м	n , об	τ , с	$\nu = n/\tau$, с^{-1}

Обробка результатів експерименту

Об'ємну подачу вентилятора Q , $\text{м}^3/\text{с}$, розраховують за формулою:

$$Q = \omega \cdot S, \quad (4.3)$$

де ω – середня швидкість руху повітря в трубопроводі, $\text{м}/\text{с}$,

$$\omega = 0.9 \sqrt{2g \frac{\rho}{\rho_0} h}. \quad (4.4)$$

де $\rho = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ – щільність води, що заповнює дифманометри; $\rho_0 = 1.29 \text{ кг}/\text{м}^3$ – щільність повітря при нормальних умовах; h – швидкісний напір, м ; g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; S – площа перетину повітроводу, м^2 (діаметр повітроводу, рівний 0.15 м).

Потужність, яку затрачено вентилятором, тобто потужність електродвигуна, обчислюють по формулі:

$$N_e = \eta_{el} \frac{3600}{450} \nu, \quad (4.5)$$

де ν – частота обертання диска лічильника, с^{-1} ; η_{el} – ККД електродвигуна $\eta_{el} = 0.95$ (450 – число обертів лічильника, яке відповідає $1 \text{ кВт} \cdot \text{час}$).

Корисну потужність, тобто потужність, яка надається потоку повітря, визначають із рівняння:

$$N = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{1000}, \quad (4.6)$$

де Q – об'ємна подача вентилятора, $\text{м}^3/\text{с}$; H – повний напір, м ; ρ – щільність води, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Необхідно пам'ятати, що:

$$\square p = \rho_B \cdot g \cdot H^1 = \rho \cdot g \cdot H.$$

Коефіцієнт корисної дії η , %, вентилятора знаходять по формулі:

$$\eta = \frac{N \cdot 100}{N_e}. \quad (4.7)$$

Результати розрахунків заносять у табл.4.2.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунків

№ досліду	H , м	N , кВт	Q , м ³ /с	η , %

За експериментальними даними необхідно побудувати характеристики відцентрового вентилятора. По осі абсцис відкладають об'ємну подачу. По осі ординат – напір, корисну потужність і ККД. Графіки будуються на міліметровому папері з обов'язковим нанесенням розрахункових точок.

Порядок виконання роботи

Для запуску електродвигуна, що приводить у дію лопаті повітряного вентилятора, достатньо натиснути червону кнопку "Пуск". Натискання проводиться лівою кнопкою миші при наведенні на неї курсору.

Зміна положення діафрагми на вході всмоктувального трубопроводу також проводиться натисканням лівої кнопки миші при наведенні курсору на активну область ручки діафрагми червоного кольору та одночасним переміщенням самої миші вліво або вправо.

Аналогічно пересувається вимірювальна лінія для зняття значень тиску в диференційних манометрах, переміщенням миші нагору - униз.

Час, за який диск електrolічильника зробить, наприклад, два оберти, вимірюється тільки за допомогою віртуального секундоміра, включеного до складу ролика. Користуватися будь-якими іншими секундомірами не можна. Для вмикання секундоміра необхідно натиснути кнопку "Пуск". Скинути показання можна лівою кнопкою миші при наведенні курсору на активну область показань. Крім того, керувати секундоміром можна за допомогою клавіш кейборда: клавіша "P" – пуск, клавіша "S" – стоп, клавіша "O" – обнулити.

Контрольні питання

- 1 Конструкція і принцип дії відцентрового насоса.
- 2 Основні параметри роботи насоса.
- 3 Коефіцієнт корисної дії насоса й насосної установки.
- 4 Особливості пуску в роботу відцентрового насоса.
- 5 Робоча характеристика відцентрового насоса.

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

РУХ ГАЗУ В КАНАЛІ ЗМІННОЇ ПЛОЩІ ЖИВОГО ПЕРЕТИНУ

Мета роботи: вивчення зміни параметрів газового потоку в соплі Лавалю, а саме: вимір розподілу тиску уздовж стінки сопла, розрахунок зміни основних параметрів течії і порівняння отриманих експериментальних результатів з результатом теоретичного розрахунку.

Теоретичний довідковий матеріал

Дану роботу слід розглядати, в першу чергу, як ілюстрацію закономірностей одновимірного сталого руху газу. Такий рух добре відтворюється в соплі Лавалю. Соплом Лавалю називають насадок із змінною площею поперечного перетину: частина сопла, що звужується, – конфузор, частина сопла, що розширюється, – дифузор. Він розраховується таким чином, що дозвукова швидкість на вході стає надзвуковою на виході.

При розв'язанні поставленої задачі передбачається, що газ є нев'язким, нетеплопровідним, рух є сталим, одновимірним, теплообмін з довкіллям відсутній. В цьому випадку рух газу описується системою рівнянь:

$$Q = \rho v F = \text{const}, \quad (5.1)$$

$$\rho v dv = -d\rho, \quad (5.2)$$

$$\frac{\rho}{\rho^k} = \mathcal{G} = \text{const}, \quad (5.3)$$

$$p = \rho \cdot R \cdot T, \quad (5.4)$$

$$\frac{dT}{T} = -(k-1) M^2 \frac{dv}{v}, \quad (5.5)$$

$$\frac{dM}{M} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right) \frac{dv}{v}. \quad (5.6)$$

На рис. 5.1 зображено характер зміни параметрів газу уздовж сопла.

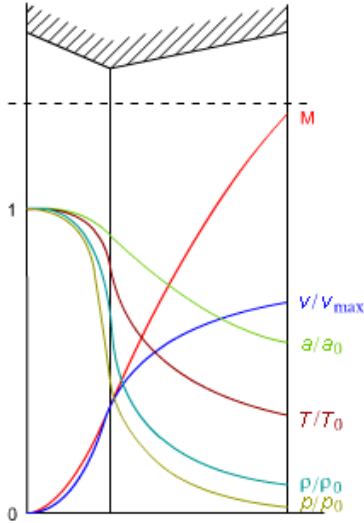


Рисунок 5.1 – Характер зміни параметрів газу уздовж сопла

Для розрахунку параметрів по довжині сопла зручно скористатися наведеними вище ізоентропічними формулами. При цьому схема розрахунку може бути представлена наступним чином.

Для вибраного поперечного перетину по співвідношенню площ

$\frac{F_{kp}}{F}$ визначається число Маху по формулі:

$$q(M) = M \frac{(k+1)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}}{\left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}} = \frac{F_{kp}}{F}. \quad (5.7)$$

Далі, застосовуючи отримане число Маху, можна знайти безрозмірні співвідношення газодинамічних параметрів:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{-\frac{k}{k-1}} = \pi(M), \quad (5.8)$$

$$\frac{p}{p_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2\right)^{-\frac{1}{k-1}} = \varepsilon(M), \quad (5.9)$$

$$\frac{T}{T_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{-1} = \tau(M). \quad (5.10)$$

$$\frac{a}{a_0} = \left(1 + \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{-\frac{1}{2}} = \sqrt{\tau(M)}, \quad (5.11)$$

$$\frac{v}{v_{\max}} = \left(\frac{\frac{k-1}{2} M^2}{1 + \frac{k-1}{2} M^2} \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (5.12)$$

Тут індексом «0» позначені параметри гальмування (у камері згорання, в ресивері аеродинамічної труби), а величина $v_{\max}$ визначається формулою:

$$v_{\max} = \sqrt{2c_p T_0} \quad (5.13)$$

Розглянута схема розрахунку справедлива, коли за критичним перетином газ продовжує безперервно прискорюватися, досягаючи максимальної швидкості v_a і мінімального тиску p_a у вихідному перетині сопла. Безвідривна течія, що прискорюється, реалізується, якщо тиск p_a не менше тиску в довкіллі p_n . Як впливає з експериментів, при тиску p_a декілька меншому p_n (режим малого пере розширення) також можлива безвідривна течія. Для помірних чисел Маху на зрізі сопла безвідривні режими течії обмежені відношенням:

$$\frac{p_a}{p_n} > (0,3 - 0,4).$$

Представляють інтерес сумарні характеристики сопла: витрата газу через сопло Q і реактивна сила R , що створюється соплом

Витрата газу через сопло може бути визначена по формулі:

$$Q = \frac{f(k, R) p_0 F_{kp}}{\sqrt{T_0}}. \quad (5.14)$$

Реактивна сила для випадку безвідривного виділення

$$R = Qv_a + (p_a - p_n)F_a, \quad (5.15)$$

де індекс "a" відповідає вихідному перетину сопла. Якщо скористатися приведеними вище виразами, то:

$$Qv_a = (\rho_a v_a F_a) v_a \frac{kp_a}{kp_a} = kp_a \frac{v_a^2}{kp_a} F_a = kp_a M_a^2 F_a =$$

$$= kp_0 M_a^2 \left(1 + \frac{k-1}{2} M_a^2 \right)^{-\frac{k}{k-1}} F_a = kp_0 M_a^2 \pi(M_a) F_a.$$

Тоді

$$R = p_0 F_a \left[(k M_a^2 + 1) \pi(M_a) - \frac{p_n}{p_a} \right] \quad (5.16)$$

Опис лабораторної установки

Схема установки представлена на рис. 5.2.

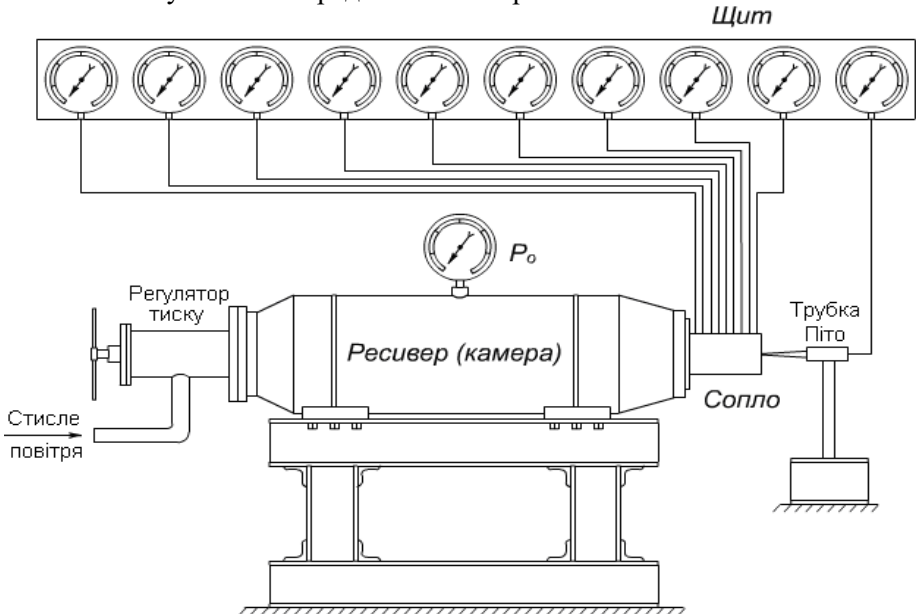


Рисунок 5.2 – Схема лабораторної установки

Сопло з'єднується з ресивером (камерою), в якому підтримується постійний тиск p_0 . Необхідна величина p_0

забезпечується відповідною подачею повітря в ресивер. Кількість повітря, що подається, можна змінювати за допомогою регулювальника тиску, відповідно збільшується або зменшується величина тиску p_0 . Для виміру статичного тиску уздовж стінки сопла зроблені приймальні отвори (рис. 5.3), тиск через яких подається на манометри, змонтовані на одному щиті

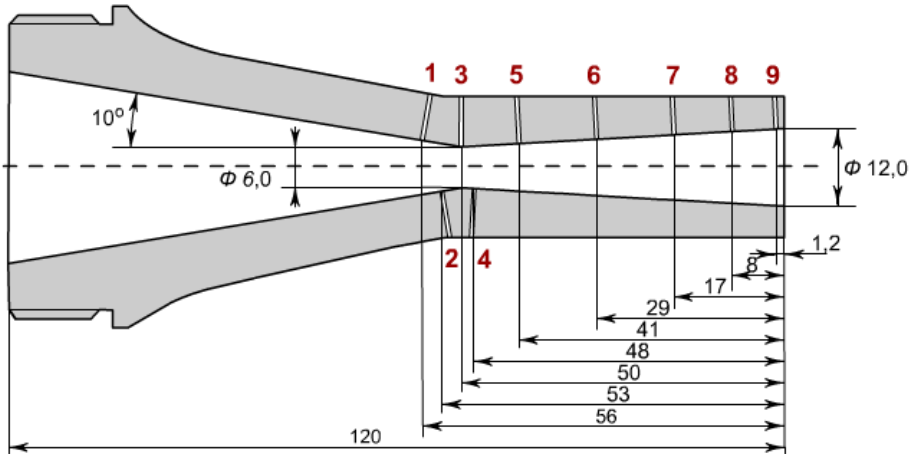


Рисунок 5.3 – Вимір статичного тиску уздовж стінки сопла

Порядок виконання роботи

За допомогою регулювальника тиску (головного вентиля) встановлюється необхідний тиск в ресивері p_0 .

У таблицю 5.1 записуються покази манометрів, що сполучені з прийомними отворами, які розташовані уздовж стінки сопла.

Виміри виконуються для декількох значень тиску p_0 в ресивері.

Обробка результатів експерименту

Порівняння з розрахунковими даними.

Знайти розподіл чисел М-кодом уздовж сопла. Розрахунок зробити у восьми перетинах: а) на виході; б) у критичному перетині сопла; в) три точки в дозвуковій частині сопла; г) три точки в надзвуковій частині сопла.

Таблиця 5.1 – Покази манометрів

p_0 , атм.	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_n

Користуючись газодинамічними функціями (5.8 - 5.12), визначити відношення $\frac{p}{p_0}, \frac{\rho}{\rho_0}, \frac{p}{p_0} \frac{T}{T_0}, \frac{a}{a_0}, \frac{V}{V_{\max}}$ у виділених перерізах

Побудувати графіки зміни чисел $\frac{V}{V_{\max}}, \frac{a}{a_0}, \frac{T}{T_0}, \frac{p}{p_0}, \frac{\rho}{\rho_0}$ уздовж

сопла.

На основі виміру даних побудувати графік розподілу тисків уздовж сопла. Провести порівняння експериментальних даних із результатами розрахунку. Звернути увагу, що значення виміру тиску подаються в абсолютних, а не у надлишкових одиницях. Порівняти на графіку отримані дані з результатами розрахунку.

Побудувати абсолютні значення швидкості і тиску уздовж стінки сопла.

Визначити величину витрати газу через сопло по формулі (5.14).

Визначити величину реактивної сили, що розвивається соплом по формулі (5.15) або (5.16).

Порядок виконання роботи

Для запуску лабораторної установки досить відкрити головний вентиль. Вентиль відкривається, як рухом миші, при наведенні курсору на червоний трикутний сектор і натисненні лівої кнопки, так і за допомогою клавіш кейборду із стрілками "вліво" і "вправо". Крім того, наведенням курсору на область сопла можна візуалізувати розріз самого сопла з дренажними отворами, до яких підключені відповідні манометри. При цьому натискання в області сопла викличе панель для виміру геометричних параметрів сопла і розташування отворів.

Геометричні виміри проводяться спеціальними вимірювальними лінійками по осі "Х" і "У". Лінійки переміщуються також за допомогою миші. Досить помістити курсор в область червоного кружечка і, натиснувши ліву кнопку, рухати мишу в потрібну сторону.

Для забезпечення точного відліку показів манометрів необхідно збільшувати масштаб зображення, для цього досить викликати правою кнопкою миші відповідне викидне меню і вибрати пункт "Zoom In".

Повернутися в нормальний режим можна буде через пункт "Show All".

Переміщати збільшене зображення по екрану можна за допомогою миші, натискаючи її ліву кнопку і пересуваючи в потрібну сторону зображення курсору у вигляді руки. Щоб дістати необхідну точність відліку, операцію збільшення масштабу зображення можна повторити кілька разів.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

ОСНОВНА

1. Башта, Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы: [учебник для машиностроительных вузов] / Т. М. Башта, С. С. Руднев и др. – М. : Машиностроение, 1982.
2. Некрасов, Б. Б. Спарочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам / Под общ. ред. Б. Б. Некрасова. – Мн. : Высш.шк., 1985.
3. Стесин, С. П. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод / С. П. Стесин– А : Академия., 2005 г.
4. Шейпак, А. А. Гидравлика и гидропневмопривод. Часть1: основы механики жидкости и газа/ А. А. Шейпак, [учеб. пособие] М. : МГИУ, 2003.
5. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – М. : Недра, 1982. – 224 с.

ДОДАТКОВА

6. Власенко Р. В. Аналіз енергетичних процесів в трифазному силовому активному фільтрі з використанням спектрального моделювання / Р. В. Власенко, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 12-18.
7. Міщенко Т. М. Перспективи схемотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів / Т. М. Міщенко // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 19-28.
8. Трушевський В. Е. Застосування автоматичних стрілок тролейбусу як детекторів в системах світлофорного авторегулювання / В. Е. Трушевський // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 29-31.
9. Ершов А. В. Конвективный и лучистый теплообмен при плавлении проволоки в струе дуговой плазмы / А. В. Ершов, Е. А. Зеленина // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 37-42.

10. Крисан Ю. О. Модернізація лабораторного стенда дослідження асинхронного електропривода / Ю. О. Крисан // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 49-54.

11. Ярымбаш Д. С. Повышение энергоэффективности электротехнического комплекса графитации при модернизации боковых шинных пакетов мощных печей графитации / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 132/2012. Серія: Механіка, енергетика, екологія. 2012. С. 93–100

12. Сивокобыленко В. Ф. Совершенствование пусковых органов бавр в системах электроснабжения с двигательной нагрузкой / В. Ф. Сивокобыленко, С. В. Деркачев // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 61-67.

13. Килимник И.М. Повышение эффективности обработки информации при регистрации контролируемых параметров в системах автоматического управления / И.М. Килимник, Д.С. Ярымбаш // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. 2007. – № 1. – С. 68 – 73

14. Ткаченко С. Н. Энергосистема будущего. Концепция smart grid. Специфика реализации на Украине / С. Н. Ткаченко // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 68-73.

15. Ярымбаш Д.С. Повышение эффективности управления режимами электрического обогрева при прессовании заготовок подовых блоков / Д.С. Ярымбаш, А.В. Тютюнник, О.Л. Загрунный // Електротехніка та електроенергетика. – Запоріжжє: ЗНТУ, 2006. – № 2. – С. 56 – 60.

16. Немудрый И. Ю. Повышение эффективности преобразования энергии в ветроэлектрических установках с аэродинамической мультипликацией / И. Ю. Немудрый // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 79-86.

17. Андриенко П.Д. Особенности моделирования температурного состояния технологической системы как объекта управления / П.Д. Андриенко, Д.С. Ярымбаш // Електромашинобудування та електрообладнання, 2006. №66 – С. 291–293.

18. Морозов Д. І. Вентильний двигун постійного струму на базі синхронної машини оберненої конструкції / Д. І. Морозов, І. С. Шевченко // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 6-12.

19. Власенко Р. В. Порівняння методів компенсації неактивної потужності трифазним силовим активним фільтром з адаптивним релейним регулятором струму / Р. В. Власенко, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 20-27.

20. Ярымбаш С. Т. Идентификация характеристик системы резистивно-индукционного нагрева для транспортировки хлора методами математического моделирования / С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, Д. С. Ярымбаш, Д. А. Литвинов // Материалы МНТК «ПАЭП. Теория и практика». – Харьков, 2010. – С. 320–324.

21. Михайленко В. В. Аналіз електромагнітних процесів у дванадцятипульсному напівпровідниковому перетворювачі з п'ятизонним регулюванням вихідної напруги / В. В. Михайленко, В. І. Чибеліс, Ю. П. Орлиця, О. Р. Трофименко // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 28-31.

22. Андриенко П. Д. Особенности непрерывного контроля характеристик влагосодержания изоляции маслонаполненного электрооборудования / П. Д. Андриенко, А. А. Сахно, С. П. Конограй, Л. С. Скрупская // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 32-40.

23. Ярымбаш Д. С. Анализ электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах Ачесона / Д. С. Ярымбаш // Энергозбереження. Енергетика. Енергоаудит, 2014. №6 – С. 11 – 21.

24. Задорожня И. Н. Анализ свойств систем автоматического управления двухмассовым электроприводом при синтезе параметров на основе стандартных характеристических полиномов / И. Н. Задорожня, Н. А. Задорожний // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 54-58.

25. Ярымбаш Д. С. Численно-полевой анализ электромагнитных и электротепловых процессов в шинных пакетах печей графитации / Д.С. Ярымбаш // Ползуновский вестник. – 2013. – №4-2. – С. 216–222

26. Тиховод С. М. Моделирование переходных процессов в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения / С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 59-68.

27. Кулинич Э. М. Уточнение модели автоматизированного управления двухкомпонентным дозированием технологического процесса приготовления газобетона / Э. М. Кулинич // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 69-76.

28. Волков В. А. Оценка возможности осуществления гидроаккумуляции на существующих гидроэлектростанциях днепровского каскада Украины / В. А. Волков // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 77-82.

29. Ярымбаш, Д.С. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока [Текст] / Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. №2. – С. 36 – 43.

30. Ярымбаш, Д.С. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш, С.Т. Ярымбаш, И.М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. – 2011. – №1. – С. 64 – 69.

31. Ярымбаш Д.С. Особенности измерения переменного тока в токоподводах печей графитации / Д.С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2005. - №1. – с. 74 – 76.

32. Ярымбаш, Д. С. *Исследование электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах графитации переменного и постоянного тока* / Д. С. Ярымбаш // Науковий вісник НГУ – 2015. – №3. – С.95–102.

33. Ярымбаш, Д.С. Повышение энергоэффективности бокового шинопакета печей графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш, С.Т. Ярымбаш // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Силова електроніка і енергоефективність. – 2011, С. 229 – 233.

34. Ярымбаш, Д. С. *Особенности моделирования электромагнитных процессов в индукторе калибра мундштука пресса* / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник // Вісник кременчуцького державного політехнічного університету. – 2007. – №4 (45) Частина 1. – С. 53–55.

35. Ярымбаш, Д. С. *Особливості розподілення магнітних потоків у режимі неробочого ходу силових трансформаторів* / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 5-12.

36. Ярымбаш Д. С. *Особливості визначення параметрів короткого замикання силових трансформаторів засобами польового моделювання* / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 1. - С. 12-17.

37. Yarymbash D.S. On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads / D.S.Yarymbash, A.M. Oleinikov // Russian Electrical Engineering, 2015, Vol.86, Issue 2, pp. 86 – 92.

38. Ярымбаш Д.С. *Моделирование температурных режимов электротехнологической системы «индукторы - мундштук» на подготовительном этапе тура прессования* / Д.С. Ярымбаш, А.В. Тютюнник, О.Л. Загрунный // *Электротехніка та електроенергетика*. 2006. № 1. - С. 56-60.

39. Коцур М.И. Оценка теплового состояния изоляции асинхронного двигателя с фазным ротором с модифицированной системой импульсного регулирования / М.И. Коцур, // *Электротехніка та електроенергетика*. – 2013 – №1 – С.31-36.

40. Коцур, М. И. Особенности ударного теплового воздействия на асинхронный двигатель с модифицированной системой импульсного регулирования в условиях частых пусков / М. И. Коцур, // *Электротехніка та електроенергетика*. – 2014 – №1 – С. 32 – 36.

41. Коцур М. И. Повышение эффективности режима торможения противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором / М. И. Коцур, И. М. Коцур, А. В. Близняков // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. –2015. – №1/8(73). – С.27-30.

42. Андриенко П.Д. Применение методов математического моделирования для определения параметров индуктора / П.Д. Андриенко, И.М. Коцур, Д.С. Ярымбаш // *Вестник СевНТУ – Севастополь*, 2008. – Вып. 88. – С. 117 – 120.

43. Коцур, М. И. Повышение эффективности электропривода вентиляторных установок / М. И. Коцур, И. М. Коцур, Н. С. Иваницкий, Д. А. Кравченко, В. Г. Савельев // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2017. №25(101) – С. 9 – 16.

44. Ярымбаш Д. С. Применение адаптированных схемных моделей для расчета токов короткой сети мощных электротехнических комплексов / Д. С. Ярымбаш // *Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит*. – 2012. №2. – С. 72–76.

45. Kotsur, M.I. Converter for frequency-current slip-power recovery scheme / M.I. Kotsur, P.D. Andrienko, I. M. Kotsur, O.V Bliznyakov // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. - №4 – С. 49-54.

46. Ярымбаш, Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // *Электротехника та електроенергетика* – 2016. – №2 – С. 43 – 50.

47. Ярымбаш Д.С. Особенности идентификации интенсивности солнечной радиации при проектировании солнечных электростанций / Д. С. *Ярымбаш*, Ю.В. *Даяс* // *Электротехника та електроенергетика*. - 2014 - № 1 - С. 74-78.

48. Yarymbash, D., Kotsur, M., Subbotin, S., Oliinyk, A. A New Simulation Approach of the Electromagnetic Fields in Electrical Machines. IEEE: The International Conference on Information and Digital Technologies, July 5th - 7th, Zilina, 2017, Catalog Number CFP17CDT-USB, pp. 452-457.

49. Ярымбаш, Д. С. Особенности определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя для режима короткого замыкания / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // *Электротехника та електроенергетика* – 2017. – №1– С. 24 – 30.

50. Дивчук, Т. Э. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами / Т. Э. Дивчук, Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, И. М. Коцур, Ю. С. Безверхняя // *Электротехника та електроенергетика*. – 2017. – № 2. - С. 56-66.

51. Kotsur, M. A New Approach of the Induction Motor Parameters Determination in Short-Circuit Mode by 3D Electromagnetic Field Simulation [Text] / M. Kotsur, D. Yarymbash, S. Yarymbash, I. Kotsur // International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), October 17th - 20th, Lviv, Ukraine, 2017, pp. 207-210

52. Kotsur, M. I. Increasing of Thermal Reliability of a Regulated Induction Motor in Non-Standard Cycle Time Conditions [Text] / M. I. Kotsur, I.M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, D. Andrienko // IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2017, pp. 88-91

53. Ярымбаш Д. С. Идентификация электрических параметров шихтованных шинных пакетов мощных коротких сетей / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // *Электротехника та електроенергетика*. – 2012. – № 2. – С. 55 – 61.

54. Yarymbash D. Features of Defining Three-Phase Transformer No-Load Parameters by 3D Modeling Methods [Text] / D. Yarymbash, S.

Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk, D. Litvinov // IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2017, pp. 132-135.

55. Kotsur, M. Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, Yu. Bezverkhnia // IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2018.

56. Yarymbash, D. An Application of Scheme and Field Models for Simulation of Electromagnetic Processes of Power Transformers [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk // IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2018.

57. Дивчук, Т.Е. Особенности определения параметров силовых трансформаторов методами схемно-полевого моделирования / Дивчук, Т.Е., Д. К. Мимоход, С. А. Кутилин, А. Е. Кузнецов, Ю. В. Гуразда, И. С. Сирых // *Электротехника и электроэнергетика*. – 2017. – № 1. – С. 61-70.

58. Ярымбаш, Д.С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации / Д.С. Ярымбаш // «Электротехника и электромеханика». – 2012. №1. – С. 49 – 54.

59. Ярымбаш, Д.С. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока / Ярымбаш Д.С., Ярымбаш С.Т., Тютюнник О.В. // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. – 2006, Вип. 3/2006(38), – С. 53 – 55.

60. Малюшевская А.П. Дослідження впливу підвищених температур на експлуатаційні властивості трансформаторного масла Т-1500 в плівкових ізоляційних системах / АП Малюшевская, АЯ Дмитришин, СО Топоров // *Електротехніка та електроенергетика* – 2015. - №1. – С. 21-25.

61. Верещаго Е.Н. Модель электрической дуги в MATLAB/SIMULINK / Е.Н. Верещаго, В.И. Костюченко // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2013. - №2. – С. 40-46.

62. Ярымбаш Д. С. Анализ энергоэффективности конструкции торцевых соединений боковых шинных пакетов и токоподводов печей

графітації / Д. С. Ярымбаш, А. М. Олейников // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 26-34.

63. Иванков В. Ф. Электротепловые расчетные модели элементов конструкции трансформаторного оборудования / В. Ф. Иванков, А. В. Басова, Н. В. Шульга // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 41-53

64. Ярымбаш Д.С. Особенности расчета электродинамической стойкости шихтованных шинных пакетов короткой сети печи графитации / Д.С. Ярымбаш // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 146/2014. Серія: Механіка. Енергетика. Екологія. 2014. – С. 131 – 136.

65. Ярымбаш Д. С. Влияние расположения заготовок электродов на распределение удельной мощности в керне печи Ачесона / Д. С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 5-11

66. Ivankov V. F. Calculation of CFD-thermal models of oil-cooled transformer equipment / V. F. Ivankov, A. V. Basova // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 19-32.

67. Циценков Д. В. Методи та засоби зниження технічних втрат електроенергії в елементах систем електропостачання / Д. В. Циценков, П. Ю. Красовський // Електротехніка та електроенергетика. 2015. № 1. С. 77–82.

68. Костін М. О. Енергетичні спектри випадкових процесів тягових напруг і струмів електротранспорту / М. О. Костін // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 71-80

69. Літвінов Д. О. Схемно-польове моделювання теплових процесів в асинхронних двигунах / Д. О. Літвінов, О. О. Шлянін, Т. В. Бондарчук, О. В. Стремідловська, Ріхам Матар // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 71-78

70. Остренко М. В. Расчет потерь в элементах конструкции силовых трансформаторов и реакторов методом конечных элементов с граничными условиями импедансного типа / М. В. Остренко, С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 33-42.

71. Курись Л. В. Схема тягового електротехнічного комплексу транспортного засобу з накопичувачем енергії / Л. В. Курись, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. № 1. - С. 4–10.

72. Лебедев В. А. Электропривод малой мощности для сварочного оборудования / В. А. Лебедев // Электротехника та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 11–16.

73. Волкова О. Г. Методика определения температуры поверхности силовых разрывных контактов в процессе коммутации / О. Г. Волкова // Электротехника та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 17–20.

74. Мельников В. О. Компенсація впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигуна у системах векторного керування / В. О. Мельников, А. П. Калінов, І. М. Кочуров // Электротехника та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 26–33.

75. Остренко В. С. Оцінка часу експлуатації IGBT4 модулів в режимі циклічного навантаження / В. С. Остренко // Электротехника та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 34–38.

76. Yarymbash, D. S. Computer simulation of electromagnetic field with application the frequency adaptation method / D. S. Yarymbash, S. T. Yarymbash, M. I. Kotsur, D. O. Litvinov // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2018. – № 1. – P. 65-74.

77. Курись Л. В. Схема тягового электротехнического комплекса транспортного засоба з накопичувачем енергії / Л. В. Курись, О. В. Бялобржеський // Электротехника та електроенергетика. - 2015. № 1. - С. 4–10.

78. Ярымбаш Д.С. Анализ энергоэффективности торцевых соединений боковых шинных пакетов и токоподводов печей графитации / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // Электротехника та електроенергетика. – 2013. – № 2. – С. 23 – 30.

79. Лебедев В. А. Электропривод малой мощности для сварочного оборудования / В. А. Лебедев // Электротехника та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 11–16.

80. Волкова О. Г. Методика определения температуры поверхности силовых разрывных контактов в процессе коммутации / О. Г. Волкова // Электротехника та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 17–20.

81. Мельников В. О. Компенсація впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигуна у системах векторного керування / В. О. Мельников, А. П. Калінов, І. М. Кочуров // Электротехника та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 26–33.

82. Остренко В. С. Оцінка часу експлуатації IGBT4 модулів в режимі циклічного навантаження / В. С. Остренко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 34–38.

83. Тиховод С. М. Усовершенствование итерационных методов решения систем нелинейных уравнений / С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 46–49.

84. Шкрабець Ф. П. Техніко-економічна оцінка оптимального рівня напруги для електроживлення робочих горизонтів глибоких шахт / Ф. П. Шкрабець, О. В. Остапчук, А. В. Кожевников, А. В. Акулов // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 50–54.

85. Волков В. А. Совершенствование частотного пуска гидроагрегата гидроаккумулирующей электростанции в насосном режиме / В. А. Волков, Д. В. Довбишук // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 55–61.

86. Літвінов В. В. Удосконалення методу оцінювання надійності схем релейного захисту / В. В. Літвінов, Я. С. Саченко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 62–69.

87. Дьяченко В. В. Формирование программы энергосбережения для систем электроснабжения / В. В. Дьяченко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 70–76.

88. Тиховод С. М. Расчет переходных процессов в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения с использованием полиномов Чебышёва / С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 5-14.

89. Коваленко М. А. Автономный экспериментальный стенд для випробування уніполярного крокового двигуна на базі мікроконтролера / М. А. Коваленко, Д. С. Мацюк // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 15-20.

90. Дівчук, Т.Є. Уточнючий підхід до визначення функціональних залежностей відносних магнітних проникностей анізотропних холоднокатаних електротехнічних сталей / Т.Є. Дівчук, Д.С. Яримбаш, С.Т. Яримбаш, І.М. Килимник, М.І. Коцур, Ю.С. Безверхня // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2018. – N 2. - С. 6-15.

91. Іванков В. Ф. Верифікація методів електротеплових розрахунків електричних реакторів без сталі / В. Ф. Іванков, А. В.

Басова, Н. В. Шульга // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 26-34

92. Токмаков И. В. Моделирование электромеханических переходных процессов в асинхронных двигателях на основе использования полиномов чебышёва / И. В. Токмаков // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 35-41.

93. Сидорец В. Н. Особенности анализа распределения тока высокой частоты в осесимметричных электродах электрохирургических инструментов / В. Н. Сидорец, А. Г. Дубко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 42-47.

94. Тиховод С. М. Метод ускоренного численного расчета переходных процессов в электрических цепях на основе аппроксимации решения алгебраическими полиномами / С. М. Тиховод, Т. М. Корнус, Д. Г. Паталах // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 48-54.

95. Андриенко П.Д. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве мундштука прессы / П.Д. Андриенко, Д.С. Ярымбаш // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог, 2008. – Вып. 92. – С. 163 – 167.

96. Ярымбаш Д.С. Особенности моделирования электромагнитного поля в зоне подключения боковых шинных пакетов к токоподводам печи графитации / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // Електротехніка. – М.: Знак. – №2. 2015. – С. 44 – 50.

97. Ярымбаш Д. С. Динамическая адаптация схемных моделей короткой сети / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 65-70.

98. Міщенко Т. М. Геометричне трактування реактивної потужності та його зв'язок зі спектральним складом тягових напруги та струму швидкісних електровозів / Т. М. Міщенко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 81-86.

99. Скалько Ю. С. Удосконалення групового регулювання гідроагрегатів дніпровської гес за допомогою нечіткої логіки / Ю. С. Скалько // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 95-99.

100. Коцур М. И. Определение оптимальной частоты коммутации вентилей преобразователя по схеме частотно-токового асинхронно-вентильного каскада / М. И. Коцур, И. М. Коцур, А. А. Андриенко, Д.

С. Андриенко // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 1. - С. 5-11.

101. Дивчук, Т. Е. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами / Т. Е. Дивчук, Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, И. М. Коцур, Ю. С. Безверхняя // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2017. – № 2. - С. 56-66.

102. Малюшевська А. П. Вплив складу і морфології конденсаторних полімерних плівок на термостабільність їх короткочасної електричної міцності / А. П. Малюшевська, С. О. Топоров // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 1. - С. 18-24.

103. Yarymbash, D. Enhancing the effectiveness of calculation of parameters for short circuit of threephase transformers using field simulation methods / D. Yarymbash, S. Yarymbash, M. Kotsur, T. Divchuk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 4, № 5 (94). - P. 22-28.

104. Цабенко М. В. Системи антипомпажного керування відцентровим компресором / М. В. Цабенко // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 1. - С. 35-41.

105. Слободенюк Ю. О. Модель розрахунку миттєвих параметрів режиму системи тягового електропостачання при русі електровозу / Ю. О. Слободенюк, О. В. Бялобржеський // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 1. - С. 42-48.

106. Ярымбаш Д.С. Особенности обработки данных регистрации электрических параметров электротехнических комплексов графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*, 2014. №2 – С. 59 – 65.

107. Ярымбаш Д. С. Оценка погрешности сенсоров тока автоматизированной системы управления технологическим процессом графитации / Д.С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // «Електротехнічні та комп'ютерні системи». – № 03(79) – 2011

108. Чередник Н. Г. Дослідження режиму синхронного генератора когенераційної установки при паралельній та автономній роботі з урахуванням явища насичення магнітної системи генератора / Н. Г. Чередник, О. В. Бялобржеський // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 1. - С. 49-56.

109. Ярымбаш Д.С. Идентификация параметров электродинамической стойкости короткой сети мощных электротехнических комплексов графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. Вип. 3/2012 (19). – С. 487 – 490

110. Власенко Р. В. Корекція алгоритму визначення заданого струму силового активного фільтра на основі теорії фрізе в умовах несиметрії / Р. В. Власенко, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 1. - С. 57-63.

111. Ярымбаш Д.С. Особенности оптимизации электрических режимов графитации / Д.С. Ярымбаш // Электротехнические и компьютерные системы. – Одесса, 2014. – №15 (91). – С. 215 – 219.

112. Yarymbash, D. Analysis of inrush currents of the unloaded transformer using the circuitfield modelling methods / D. Yarymbash, S. Yarymbash, M. Kotsur, T. Divchuk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 3, № 5 (93). - P. 6-11.

113. Малюшевська А. П. Вплив морфологічних особливостей конденсаторних полімерних плівок на їх деформаційні властивості / А. П. Малюшевська, Г. М. Ющишина // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 13-18.

114. Ярымбаш Д.С. Идентификация электрических параметров торцевых ошиновок печей сопротивления прямого действия / Д.С. Ярымбаш, А. М.Олейников, С. Т.Ярымбаш, И.М. Килимник // Вестник НТУ «ХПИ», 2013. №36. –С. 466–470

115. Андрієнко П. Д. Дослідження динамічних режимів електродвигуна послідовного збудження з імпульсними схемами регулювання електроприводу / П. Д. Андрієнко, С. І. Шило, О. О. Каплієнко // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 51-58.

116. Золотаревский А. И. Исследование спектральной зависимости диэлектрической проницаемости некоторых полярных диэлектриков в диапазоне низких частот / А. И. Золотаревский, С. П. Луцин // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 6-11.

117. Малюшевська А. П. Довготривала електрична міцність полімерних плівок під дією електричного поля / А. П. Малюшевська, С. О. Топоров, В. І. Гунько // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 12-17.

118. Ярымбаш Д.С. Повышение эффективности использования фотопанелей на солнечных электростанциях / Д. С. Ярымбаш, Ю. В. Даус // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. - 2015. - № 1. - С. 22-28

119. Ярымбаш Д.С. Исследование электромагнитных и электротепловых процессов в области торцевых шинных пакетов печей графитации / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. №11. – С. 60–68.

120. Качан Ю. Г. Застосування просторових електричних полів задля створення теплових перешкод у камерних печах / Ю. Г. Качан, А. А. Візер, А. В. Сибір // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 18-23.

121. Василенко О. В. Модель крокового двигуна для дослідження систем автоматичного позиціонування в ECAD / О. В. Василенко, Є .Л. Жавжаров // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 31-38.

122. Ярымбаш Д.С. Особенности распределения электрической мощности нагрева в керне печи графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // Праці Інституту електродинаміки НАН України, 2013. – вип.. 37. – С. 94 – 100

123. Дзензерский В. А. Разработка алгоритма автоматизированного контроля электрохимических накопителей энергии / В. А. Дзензерский, Н. Е. Житник, С. В. Плаксин, В. В. Лисунова // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 39-47.

124. Ярымбаш Д.С. Идентификация температурных зависимостей удельных электрических сопротивлений керна в процессе графитации / Д.С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2014. №2. – С. 66 – 70.

125. Алексеевский Д. Г. Определение рабочей области иппн в составе электромеханической системы взу с переменной скоростью вращения / Д. Г. Алексеевский, П. Д. Андриенко, К. О. Турышев, О. О. Панкова // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 79-85.

126. Ярымбаш Д.С. Особенности расчета токов короткого замыкания мощных электротехнических комплексов графитации переменного тока / Д. С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. - 2012. - № 1. - С. 23-30

127. Зиновкин В. В. Влияние нестационарных электромагнитных процессов на электромеханические параметры в синхронном электроприводе / В. В. Зиновкин, Н. Л. Антонов, Ю.А. Крисан // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 6-17.

128. Zirka S. E. Topological transient models of three-phase five-limb transformer / S. E. Zirka, Y. I. Moroz, C. M. Arturi, D. Bonnman // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 18-25.

129. Ярымбаш Д.С. Метод частотной адаптации уравнений Максвелла для переменного тока к рекуррентным уравнениям в формулировках для постоянного тока / Д.С. Ярымбаш // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 146/2014. Серія: Автоматизація процесів та управління. – Севастороль. 2014. – С. 203 – 206

130. Мацуї А. М. Теоретичне і експериментальне дослідження магнітоелектричної системи, що сприймає крупність пісків односпірального класифікатора / А. М. Мацуї, В. О. Кондратець // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 38-49.

131. Ярымбаш Д.С. Выбор критерия энергоэффективности боковых шинных пакетов мощных печей графитации / Д.С. Ярымбаш // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Силова електроніка і енергоефективність – 2012.

132. Паталах Д. Г. Численный безытерационный метод моделирования электромеханических процессов в асинхронных двигателях / Д. Г. Паталах, С. М. Тиховод, Т. М. Корнус // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 50-55.

133. Ярымбаш Д.С. Особенности идентификации электрических параметров контура печи графитации переменного тока методами полевого моделирования и оптимизации / Д.С. Ярымбаш, А.М. Олейников // Оптимізація виробничих процесів: зб. наук. пр. Вип. 15/2014. – Севастороль. 2014. – С. 108 – 112.

134. Дивчук Т. Е. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами / Т. Е. Дивчук, Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, М. И. Коцур, Ю. Безверхняя // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 56-66.

135. Лаврич Ю. М. Методологічний підхід до побудови енергоощадної системи аварійного освітлення / Ю. М. Лаврич, Л. М. Погоріла, А. Ю. Подчасов // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 67-73.

136. Шутенко О. В. Анализ динамики изменения критериев, используемых для интерпретации результатов арг, в исправных высоковольтных трансформаторах негерметичного исполнения / О. В. Шутенко // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 74-83.

137. Лобов В. Й. Управління газоповітряною енергетичною установкою промислового підприємства / В. Й. Лобов, К. В. Лобова, А. В. Даць // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 84-95.

138. Милых В. И. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режимах холостого хода и короткого замыкания / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 5-13.

139. Китаев А. В. Схемы замещения электрических машин / А. В. Китаев, В. Л. Агбомассу, В. И. Глухова // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 14-26.

140. Верещаго Е. Н. Модель электрической дуги в MATLAB / SIMULINK / Е. Н. Верещаго, В. И. Костюченко // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 40-46.

141. Ершов А. В. Влияние магнитного поля проводника на течение металла на торце проволоки в дуговом разряде / А. В. Ершов, Е. А. Зеленина // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 62-65.

142. Пожуєв В. І. Визначення ефективності існуючих гідроенергетичних систем / В. І. Пожуєв, В. В. Радченко, Ф. П. Шкрабець, В. Г. Кучер, В. П. Кобець // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 71-76.

143. Олейников А.М. Математическая модель автономной безредукторной ветроэлектрической установки на генераторе с постоянными магнитами / А.М. Олейников, Л.Н. Канов, Ю.В. Матвеев, Е.И. Зарицкая // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. – № 2. – С.62 – 67

144. Гребеников В.В. *Исследование влияния конфигурации магнитной системы на моментные характеристики электродвигателей с постоянными магнитами* / В.В. Гребеников, М.В. Прыймак // Електротехніка та електроенергетика. – 2009. - №2. - С. 57-60.

145. Андриенко П. Д. *Преобразователи частоты для электропередачи железнодорожного электротранспорта* / П. Д. Андриенко, В. Д. Лобода, А. В. Мищенко // *Электротехника та електроенергетика*. – 2001. – № 1. – С. 55–58.

146. Канов Л. Н. *Схемное моделирование электроэнергетических систем переменного тока* / Л. Н. Канов // *Электротехника та електроенергетика*. – 2004. – № 1. – С. 5–9.

147. Лучко, А. Р. *Имитационное моделирование электромагнитных процессов в магнитосвязанных электрических цепях* [Текст] / А. Р. Лучко, Т. В. Попова // *Электротехника та електроенергетика*. - 2009. - № 1. - С. 16-22

148. Яримбаш Д. С. *Розрахунок параметрів головних шинних пакетів секцій печей графітації змінного струму* [Електронний ресурс]: навчальний посібник / Д. С. Яримбаш, С. Т. Яримбаш – Електрон. дані. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2017. ISBN 978-617-529-171-9 Режим доступу: <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/2682>

149. Килимник І. М. *Диференціальні рівняння : навчальний посібник* / І. М. Килимник, Д. С. Яримбаш. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. – 102 с. ISBN 978-617-529-197-9 Режим доступу: <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/3376>