

© Д.Д. Норенко¹, В.Ю. Кухар¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЩІТКОВОГО ОЧИЩУВАЧА СІТЧАСТОГО ФІЛЬТРА ТЕХНІЧНОЇ ВОДИ

© D. Norenko¹, V. Kukhar¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

AN EXPERIMENTAL JUSTIFICATION OF INDUSTRIAL WATER STRAINER BRUSH CLEANER PROPERTIES

Мета. Теоретичний розрахунок опору тертя щіткового очисника по сітчастому фільтроелементу фільтра ФРУ-190-2 для технічної води. Експериментальне визначення жорсткості однієї щетинки щіткового очисника. Експериментальне дослідження опору переміщення щіткового очисника по сітчастому фільтроелементу. Фільтри з сітчастим фільтроелементом використовуються на підприємствах важкої промисловості для першого етапу водопідготовки. Для проектування та розрахунку параметрів щіткового очисника необхідно визначити геометричні характеристики щітки й зусилля опору тертя при переміщенні щіткового очисника по сітці фільтроелементу. Для підтвердження результатів теоретичного розрахунку зусилля опору тертя щіткового очисника, виконаних методами опору матеріалів, необхідно провести експериментальне дослідження визначення жорсткості однієї щетинки щіткового очисника та опору переміщення щетинок щіткового очисника по сітці фільтроелемента.

Методика дослідження полягає в теоретичному розрахунку методами опору матеріалів зусилля опору тертя щітки по поверхні сітчастого фільтроелементу фільтра ФРУ-190-2 для технічної води, розробці методики проведення експерименту, підтвердженні отриманих аналітичних результатів теоретичних розрахунків експериментальними дослідженнями.

Результати дослідження. Для визначення зусилля опору переміщення щіткового очисника розроблено аналітичні рішення, які враховують вплив фізичних та геометричних параметрів щетинки. Отримано експериментальне підтвердження теоретичних розрахунків.

Наукова новизна полягає у встановленні й доведенні кубічної залежності зусилля на одній проволочі щіткового очисника від її прогину. Виявлені аналітичні залежності розрахунку зусилля переміщення щітки від її геометричних параметрів.

Практичне значення. Розроблена методика проектування і результати розрахунків та експериментальних досліджень, надають можливість на етапі проектування обґрунтувати геометричні та фізичні параметри щіткового очисника сітчастого фільтру технічної води.

Ключові слова: *фільтр технічної води, щітковий очисник, сітчастий фільтроелемент, зусилля переміщення, довжина щетинки.*

Вступ. Фільтр технічної води з сітчастим фільтроелементом являється ефективним обладнанням першого етапу водопідготовки на підприємствах важкої індустрії. На цьому етапі водопідготовки з потоку технічної води виконується видалення відносно крупних (більше 500 мкм) частин забруднень. Забруднення уловлюються й накопичуються на поверхні сітчастого циліндричного фільтро-

елемента (далі ФЕ). Періодичне видалення накопичених забруднень й встановлення прозорості ФЕ здійснюється промивкою зворотнім потоком води при обертінні щіткового очисника (далі – щітки) (рис. 1), котрий інтенсифікує відділення застряглих у чарунки сітки частин забруднень.

Основна частина. Одним із прикладів щіткових фільтрів для технічної води є фільтр ФРУ-190-2 фірми Океанмашенерго, м. Дніпро [1]. Очистка ФЕ виконується зворотнім потоком води й обертаючим щітковим очисником. У комплектації ФРУ-190-2 два фільтровальних блока, кожен із яких має циліндричний сітчастий фільтроелемент й щітковий очисник (рис. 1).

Щітки (рис. 2) встановлені під деяким кутом відносно сітки. При обертанні валу (1) щіткового очисника, обертається при цьому щітка (2) зі щетинками (5) ковзає по сітці, розташованій між кільцями (3,4) й знімає з неї накопичений на ній тверді забруднення. Суспензія твердих забруднень потоком води виводиться із внутрішньої порожнини фільтру, через відчинений зливний клапан на злив.

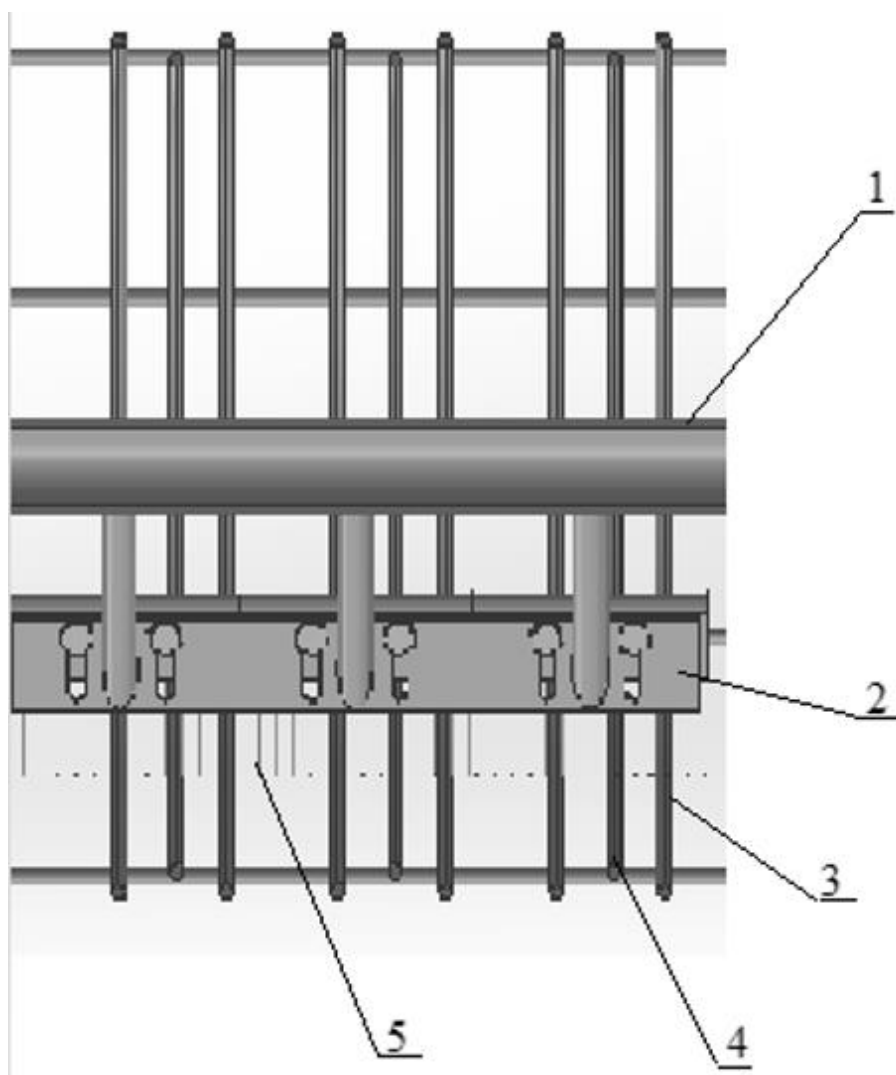


Рис. 1. 3Д модель фільтроелементу зі щіткою очисника (фрагмент): 1 – основа щітки (труба); 2 – вставка чищення щітки; 3 – зовнішні кільця; 4 – внутрішні кільця; 5 – ворс щітки

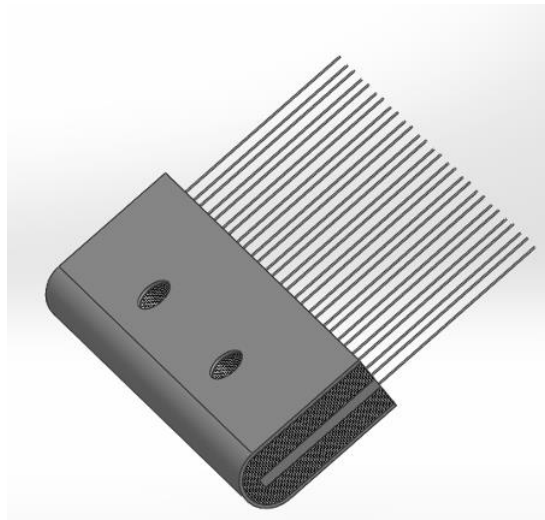


Рис. 2. 3Д модель вставки чищення

Для того, щоб щітка виконувала свої функції по інтенсифікації видалення лежачих на сітці частин і при цьому не втрачала свою геометричну форму, при проектуванні щітки необхідно знати:

- матеріал і діаметр проволочи;
- механічні властивості матеріалу проволочи щетинок;
- довжину консолі щетинок;
- кількість щетинок у вставці чищення;
- зусилля, виникаючі в щітці при її русі по сітці фільтроелементу.

Розрахунок щіткового очищення передбачує визначення геометричних параметрів і зусилля опору його переміщенню при русі по сітці ФЕ.

Для вирішення цих двох задач задаємо наступні вхідні умови й данні. Очевидно, що при русі по сітці, щетинки будуть згинатися у протилежну руху сторону. При цьому, для тривалої ефективної роботи щітки, напруга згинання у щетинках не повинні перевищувати межу текучості матеріалу проволочи для зберігання форми щетинок. З іншого боку, чим більше прогин щетинки - тим більше зусилля на застряглу частинку в сітці може надати проволочка (пучок проволочок). Тому, доцільно визначити максимально допустимий прогин проволочи у залежності від її параметрів (діаметр, марка матеріалу, довжина консолі проволочи).

Для теоретичного й експериментального рішення поставленої задачі задаємо вхідні данні (табл. 1).

Таблиця 1

Відомі значення

$d_{пр}$, мм	0,35	Діаметр щетинки
L, мм	40, 45, 50, 55, 60, 65, 70	Довжина щетинки
P1, Н	0,0098; 0,0196; 0,0294; 0,049; 0,098	Сила діюча на консольну закріплену дротинку
Матеріал (E, МПа)	Сталь 20Х2Н4А ($2,1 \times 10^5$)	Марка сталі, (модуль Юнга)

Для розрахунку щетинки будемо використовувати формули опору матеріалів. Представимо, щетинку як консольно закріплену балку довжиною L , під дією сили P щетинка отримує прогин (рис. 3). При цьому, вільний кінець B переміщується у точку C на величину X . Щетинка вигинається по кривій, яку представимо радіусом кола R . Враховуючи відносно невелику величину прогину f , така заміна J не вносить значну похибку для вирішення задачі.

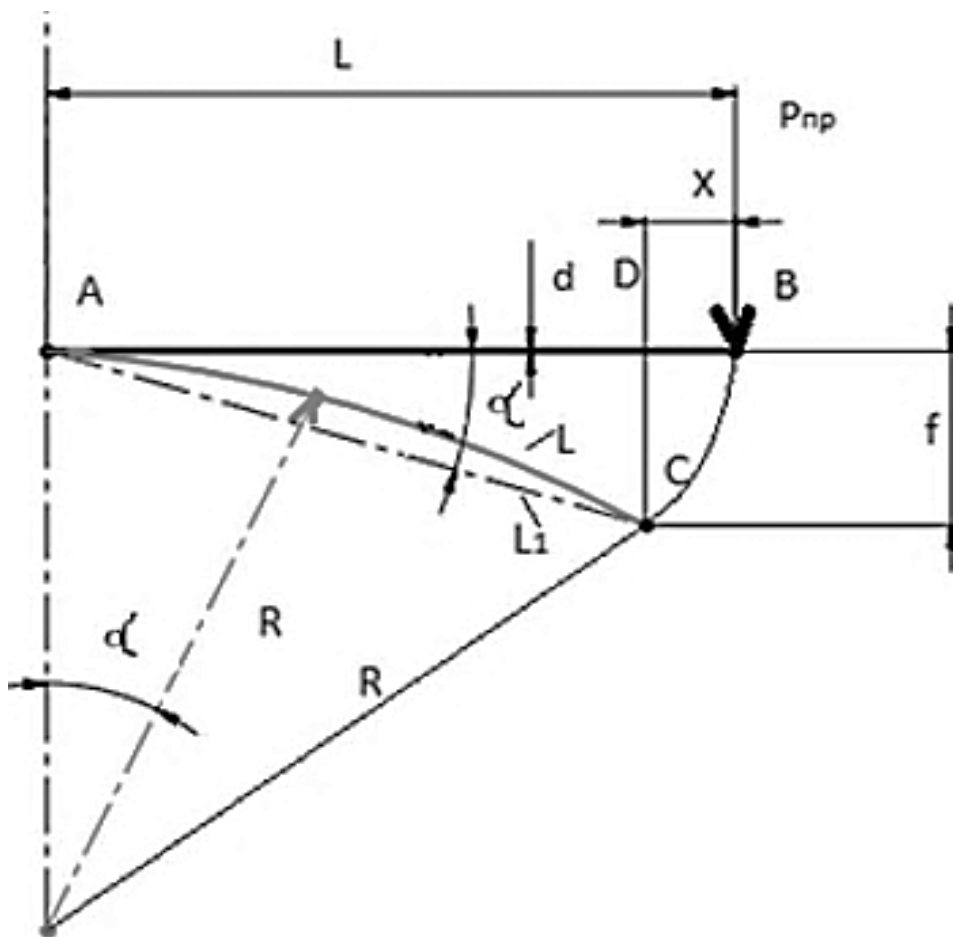


Рис. 3. Схема прогину щетинки

Момент опору круглого перерізу проволочи:

$$J = \frac{\pi d_{\text{пр}}^4}{64}, \text{мм}^4 \quad (1)$$

Через задану змінну величину згинаючого навантаження на кінець проволочи, розраховуємо вигин за формулою:

$$f_1(P_1) = \frac{P_1 L^3}{3EJ}, \text{мм} \quad (2)$$

Підставив відомі данні у (2), отримаємо величини прогину щетинки (таблиця 2, рис. 4).

Таблиця 2

Залежність прогину консолі проволочки від її довжини

Вигинаюче навантаження P1, Н	Довжина консолі L, мм						
	40	45	50	55	60	65	70
0,0098	1	2	3	3	4	4	7
0,0196	2	3	5	6	9	12	15
0,0294	3	4	6	7	11	13	18
0,0490	7	9	12	16	22	25	32
0,0980	14	18	22	28	34	40	48
	f1(P1)	f2(P1)	f3(P1)	f4(P1)	f5(P1)	f6(P1)	f7(P1)

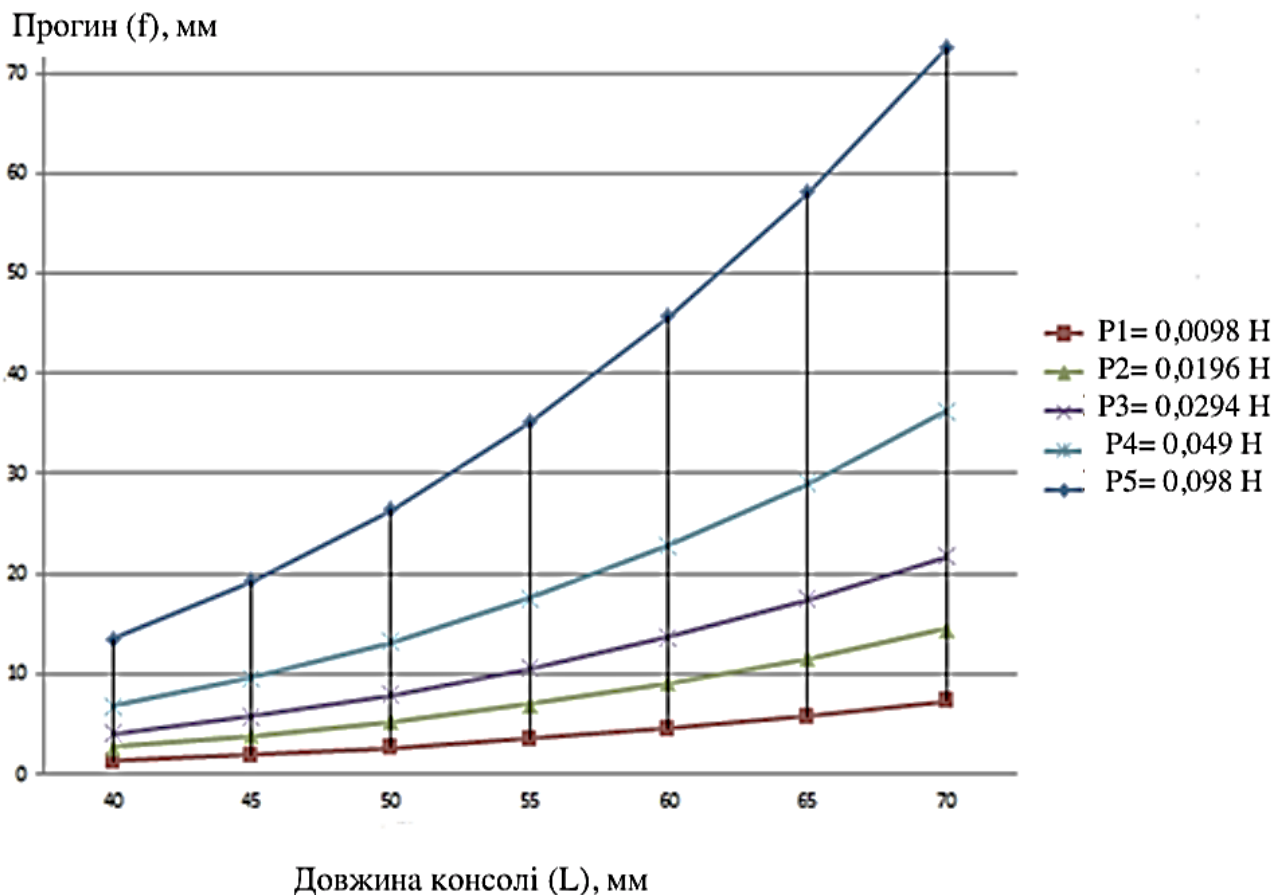


Рис. 4. Графіки характеристики залежності зусилля на щітці від прогину її щетинок

Із конструкції ФРУ-190-2 відомо, що кількість щетинок у пучку на щітці складає 56 штук. Рахуємо сторону квадрату (ширину та висоту пучка) за формулою:

$$b_{\text{пуч}} = d_{\text{пр}} \sqrt{n_{\text{пр}}} \quad (3)$$

Вірність теоретичних досліджень підтвердимо експериментом.

Для його проведення була побудована експериментальна установка (рис. 5), складена зі столу, проволочки, вантажі 1 г, 2 г, 3 г, 5 г, 10 г, лінійки, клею, міліметрівки. На консольно закріпленій відрізок проволочки (1) по черзі підвішували вантаж (2). Для запобігання зриву вантажу з консолі її кінець підігнули в гору (3). Лінійкою відрахунку прогибу стала зафіксована клеєм лінійка (4), відносно якої вимірявся виліт відрізка проволочки, котра була також консольно закріплена паралельно проволочці. На задньому плані була встановлена мілімітровка завдяки якій виконувалися заміряли прогину проволочки. Проведення кожного заміру фіксувалося фотоспособом.

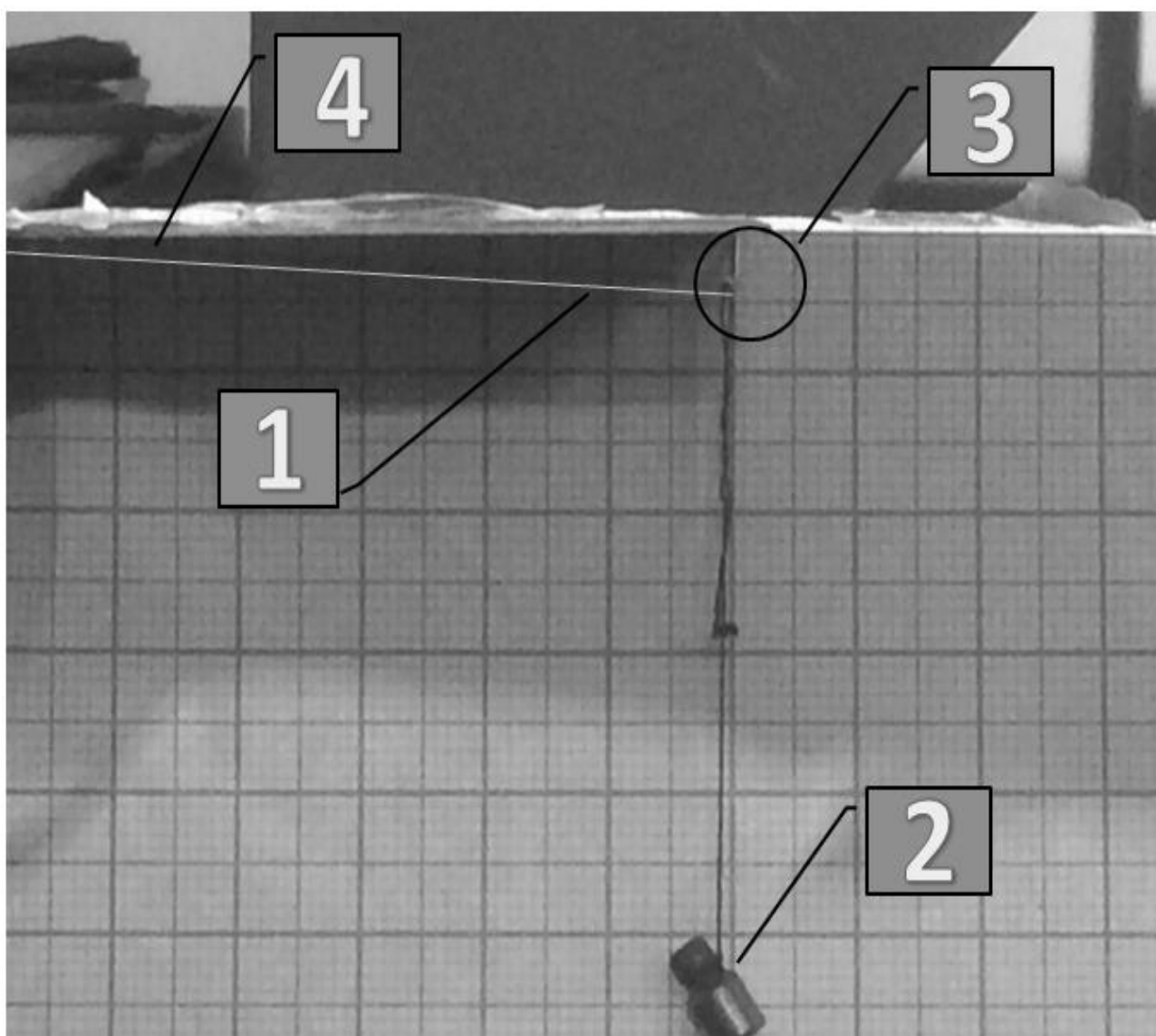


Рис. 5. Фото прогину проволочки f при $L=70$ мм, $P_1=0,0098$ Н:
1 – проволочка; 2 – вантаж; 3 – кінець проволочки; 4 – лінійка

Отримані числові значення приведені у таблиці 3, графічне зображення результатів теоретичних і експериментальних досліджень приведені на рис. 6.

Таблиця 3

Результати експериментального визначення прогину консолі проволочки від її довжини

Вигинаюче навантаження P1, Н	Довжина консолі						
	40	45	50	55	60	65	70
0,0098	1	2	3	3	4	4	7
0,0196	2	3	5	6	9	12	15
0,0294	3	4	6	7	11	13	18
0,0490	7	9	12	16	22	25	32
0,0980	14	18	22	28	34	40	48
	f1(P1)	f2(P1)	f3(P1)	f4(P1)	f5(P1)	f6(P1)	f7(P1)

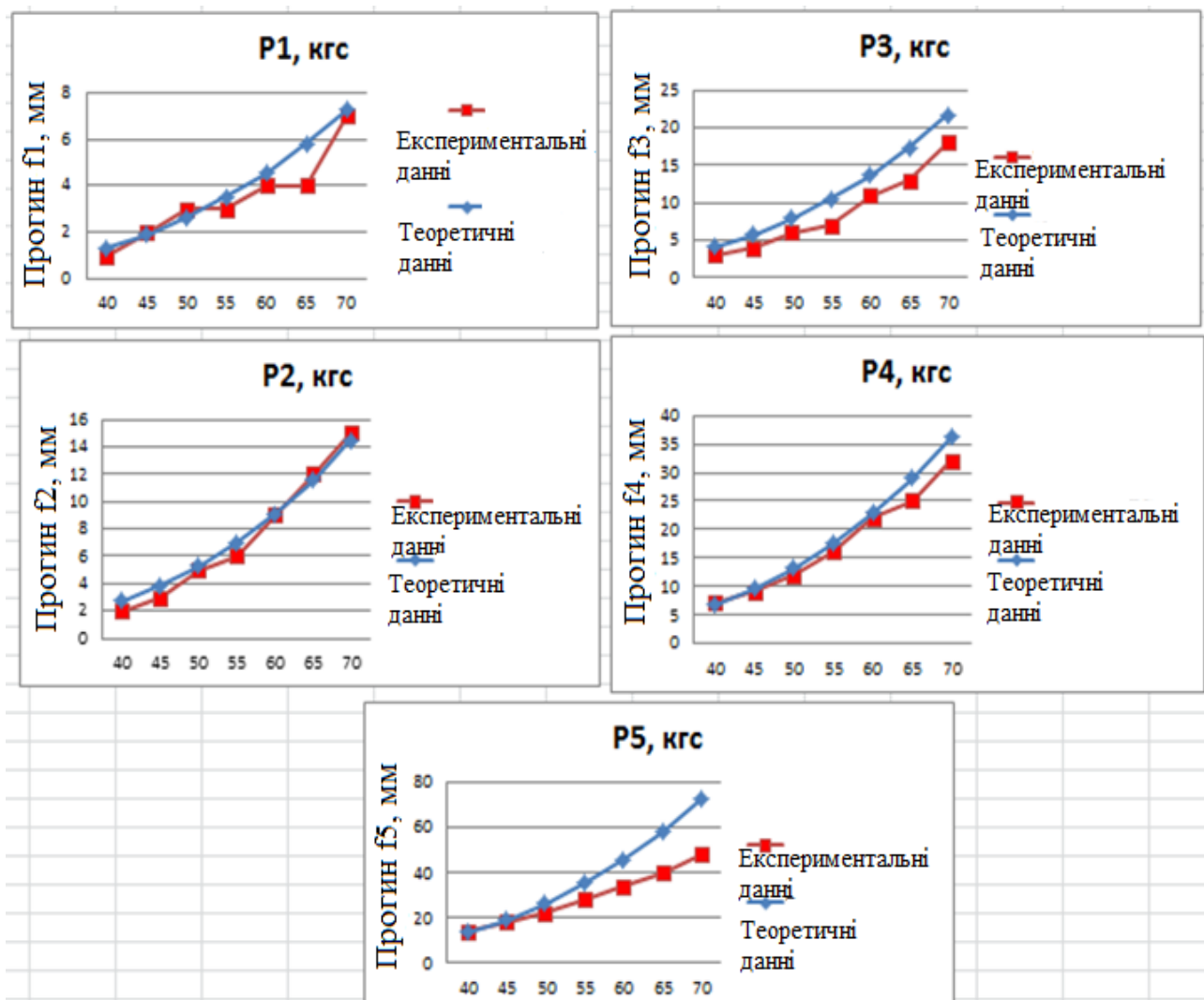


Рис. 6. Графік прогину проволочки під дією різних вантажів за результатами експериментальних і теоретичних даних

Була розрахована відносна похибка експерименту, яка складала 11,06%, так як вона менше 20%, похибка не є надмірною.

Допустимо, що щетинки в щітці працюють як набір окремих щетинок. Для підтвердження цього допущення, проведемо експериментальний дослід.

Ціль експерименту визначити зусилля, які створює щітка в різних режимах роботи (різна довжина й орієнтація відносно сітки), та виявити зусилля, які створює одна щетинка. Якщо, добуток зусиль однієї щетинки на кількість щетинок у пучку дасть значення зусиль, рівне зусиллю всього пучка проволочок, отже допущення доведено.

Для виконання експерименту була створена експериментальна установка (рис. 7). Зігнута за радіусом металева сітка (1) була підвішена за кути на нитях (2), при чому радіус згину сітки прийнят рівним довжені ниток підвісу. Над сіткою консольно закріплен струбцинами(4) важіль до якого прікріплена щітка (3). Регулюємо відстань щітки від сітки й величину проникання щетинок у чарунки сітки, зміненням довжини ниток підвісу, довжину ниток виміряли рулеткою (рис. 8), величину заглиблення щетинок у чарунки сітки замиряли штангенциркулем. Сітку з однієї сторони конструкції за допомогою закріпленого на ній динамометра протягивали з постійною швидкістю уздовж нерухомої щітки й знімали показники з динамометра. Отримані значення вносили до таблиці. Таким чином, виконали серію з 5 замірів.

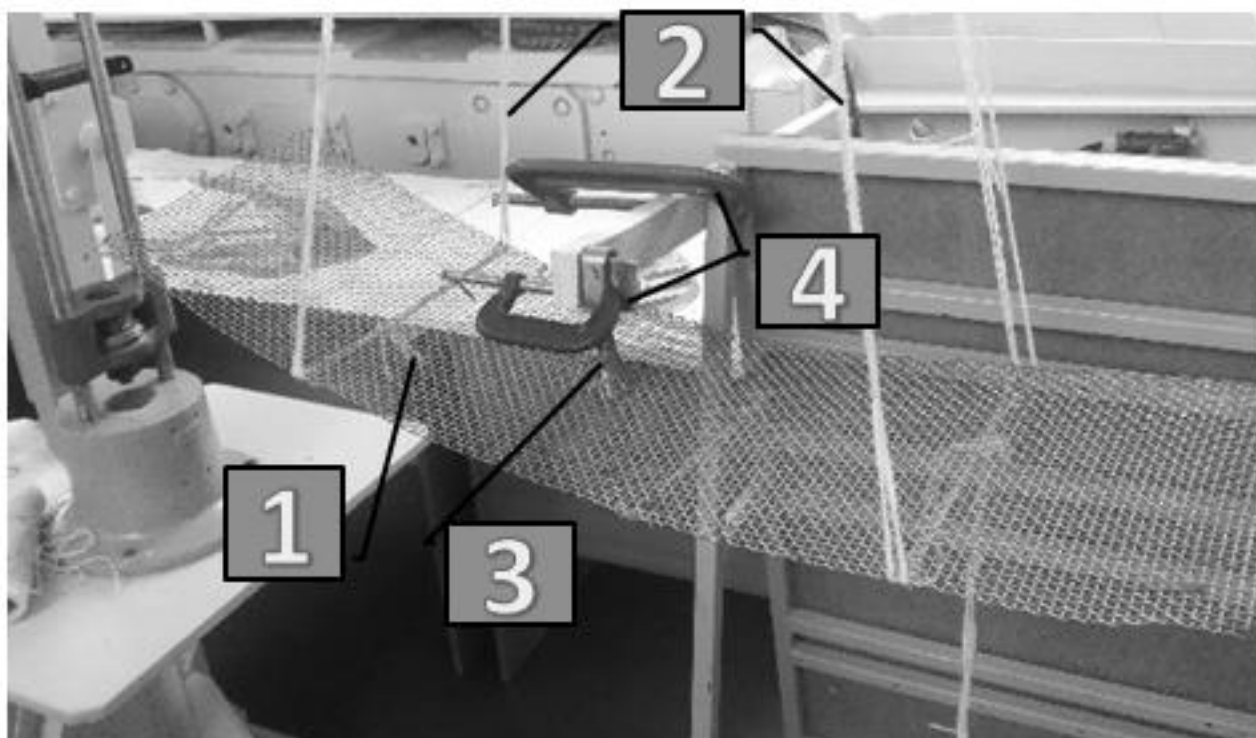


Рис. 7. Фото конструкції для проведення експериментальної роботи: 1 – сітка; 2 – капронова нитка; 3 – фрагмент щітки; 4 – струбцини



Рис. 8. Фото виміру відстані щетинок від сітки

Далі змінювали заглиблення щітки у чарунки сітки й проводили наступну серію вимірів. Виміри виконані у трьох положеннях щітки відносно до сітки:

- щетинки розміщені перпендикулярно до сітки та довгою стороною щітки перпендикулярно напрямку руху сітки;
- щетинки розміщені перпендикулярно до сітки та короткою стороною щітки перпендикулярно напрямку руху сітки;
- щетинки розміщені перпендикулярно до сітки та вигін щетинок направлен у праву сторону відносно ширини сітки;
- довжина консолі щетинок – 45; 50; 55; 60 мм.

Отримані значення переводилися з кілограм-сили [кгс] в Ньютон [Н], та розраховувалось середнє значення з отриманих результатів, та середнє зусилля на 1 щетинку. Результати отримані під час експериментального дослідження вносилися в таблицю 4.

Таблиця 4

Отримані значення зусиль які створює щітка у різних режимах роботи (наведені в Ньютонах)

Кількість щетинок, шт; положення щітки	Довжина консолі	Отримані значення, Н					Середнє	Середнє на 1 щ.
106; довгою стороною щітки перпендикулярно напрямку руху сітки	45	3,53	3,09	3,29	4,41	3,73	3,60	0,034
	50	3,45	3,09	2,5	2,5	2,5	2,6	0,024
	55	2,01	1,62	1,81	1,37	2,06	1,78	0,016
	60	0,78	0,64	0,98	0,64	0,84	0,78	0,007
106; короткою стороною щітки перпендикулярно напрямку руху сітки	45	5,15	5,09	3,58	5,49	4,85	4,83	0,045
	50	4,36	3,29	4,12	4,85	5,1	4,34	0,04
	55	2,4	3,29	3,08	2,79	2,94	2,9	0,028
	60	0,88	0,49	0,29	0,74	0,74	0,87	0,005
106; вигін щетинок направлен у праву сторону відносно ширини сітки	45	4,12	5,79	5,39	4,70	5	5	0,049
	50	3,92	4,41	4,8	4,36	3,63	4,23	0,04
	55	1,52	1,28	0,93	0,83	0,93	1,07	0,009
	60	1,03	0,98	0,88	0,74	0,74	0,87	0,008
53; довгою стороною щітки перпендикулярно напрямку руху сітки	50	4,7	6,47	5,59	4,36	4,21	5,07	0,097
	55	1,47	1,23	1,52	1,23	1,61	1,41	0,026
	60	0,25	0,19	0,29	0,28	0,28	0,26	0,005
53; короткою стороною щітки перпендикулярно напрямку руху сітки	50	2,26	1,57	1,62	1,77	1,08	1,66	0,029
	55	1,13	0,98	1,08	1,18	0,98	1,07	0,02
	60	0,25	0,25	0,39	1,98	0,39	0,85	0,018
53; вигін щетинок направлен у праву сторону відносно ширини сітки	50	3,48	3,87	4,41	4,22	3,97	3,991	0,077
	55	3,43	3,73	3,53	3,78	2,45	3,38	0,063
	60	0,74	0,59	0,78	0,54	0,69	0,67	0,012

За отриманими даними були побудовані графіки характеристики зусилля, котрі створює щітка з різною кількістю щетинок у різних положеннях відносно сітки (рис. 9).

Частка від ділення зусилля опору для щетинок з 53 та 106 щетинок на число щетинок у щітці дають результат, рівний експериментальним значенням зусилля однієї проволочки.

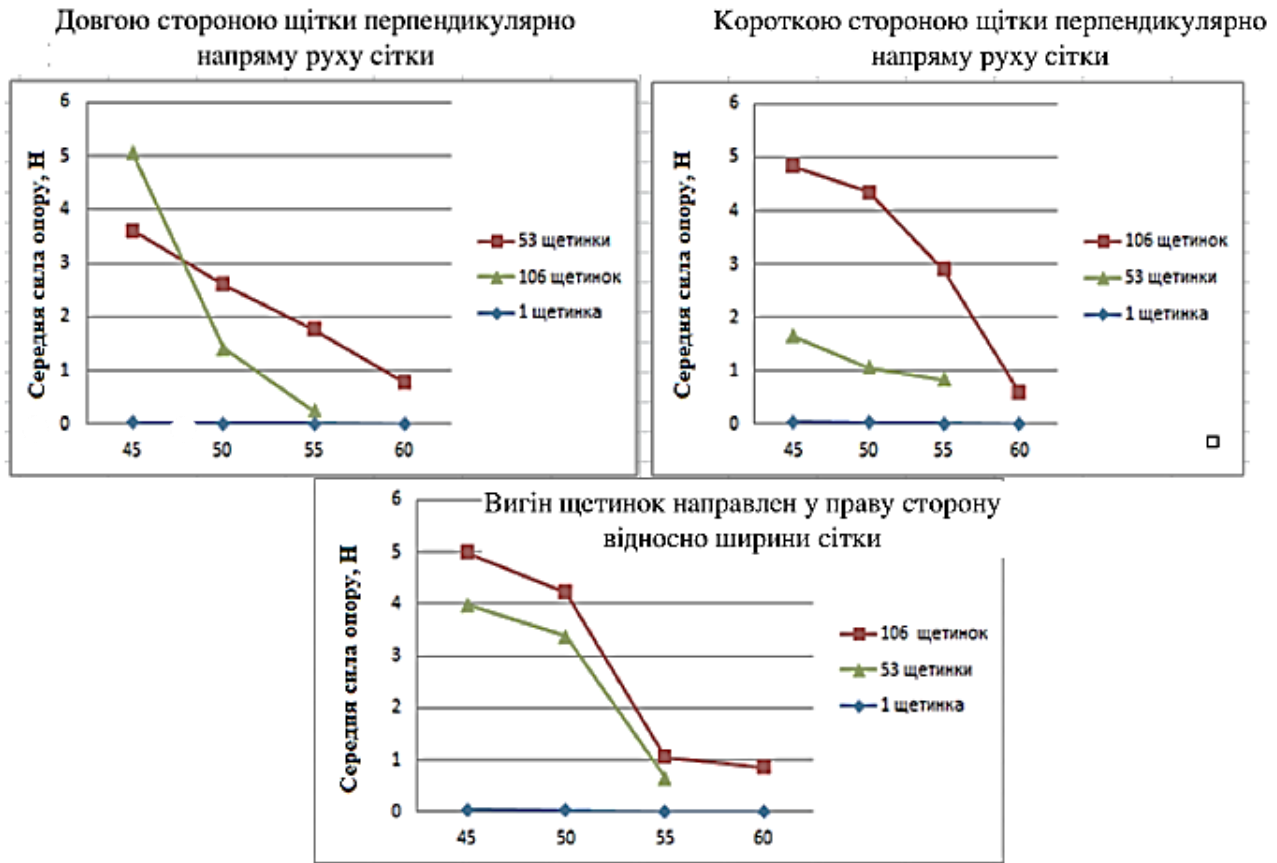


Рис. 9. Графіки характеристики зусилля, котрі створює щітка з різною кількістю щетинок в різних положеннях

Тому, можливо зробити висновок, що щетинки у щітці працюють не як ресора, а як набір незалежних один від одного щетинок.

При відомій кількості щетинок та щіток, можемо обчислити момент опору тертя щіткового очищувача по циліндричному сітчастому фільтроелементу за формулою:

$$M = n_{щ} r f, Нм \quad (4)$$

де $n_{щ}$ – кількість щетинок; r – радіус фільтровального блоку у циліндрі; f – зусилля створене однією щетинкою;

Теоретичними й експериментальними дослідженнями розроблена методика розрахунку зусилля, створюваного проволокою при русі по сітці. Для обчислення зусилля створеного однією щетинкою, необхідно провести розрахунок по формулі:

$$p = \frac{3 f E \pi d_{np}^4}{64 L^3}, Н \quad (5)$$

де L – довжина щетинки; f – прогин щетинки; E – модуль Юнга матеріалу з якого виготовлена щетинка; d_{np} – діаметр щетинки.

Для розрахунку середнього зусилля опору щітки, необхідно помножити кількість щетинок на отримане значення з формули 5.

Висновки. Підтверджено, що методами опору матеріалів можна розрахувати жорсткість проволочки й визначити характеристику залежності зусилля на щітці від прогину її щетинок.

Теоретичними дослідженнями встановлена й експериментально підтверджена кубічна залежність зусилля на одиничній проволочці щітки від її прогину.

При довірчій ймовірності 95%, відносна похибка складає 11%, яка є допустимою. Експериментально доведено, що щетинки в щітці працюють при русі по сітці, як набір окремих щетинок, незалежних один від одного.

Розроблені аналітичні залежності розрахунку зусилля переміщення щітки від її геометричних параметрів, котрі дозволяють обґрунтовано виконувати проектування щіткового очисника сітчастого фільтру технічної води.

Перелік посилань

1. *Промислові фільтри ФРУ для технічної води* (n.d.). офіц. веб-сайт / ТОВ «Океанмашергеро»: <http://www.oceanmas.dp.ua/others/fru.html>,

АННОТАЦІЯ

Цель. Теоретический расчет сопротивления трения щеточного очистителя по сетчатому фильтроэлементу фильтра ФРУ-190-2 для технической воды. Экспериментальное определение жесткости одной щетинки щеточного очистителя. Экспериментальные исследования сопротивления перемещению щеточного очистителя по сетчатому фильтроэлементу. Фильтры с сетчатым фильтроэлементом используются на предприятиях тяжелой промышленности для первого этапа водоподготовки. Для проектирования и расчета параметров щеточного очистителя необходимо определить геометрические характеристики щетки и усилия сопротивления трению при перемещении щеточного очистителя по сетке фильтроэлемента. Для подтверждения результатов теоретического расчета усилия сопротивления трения щеточного очистителя, выполненных методами сопротивления материалов, необходимо провести экспериментальные исследования определения жесткости одной щетинки щеточного очистителя и сопротивления перемещению щетинок щеточного очистителя по сетке фильтроэлемента.

Методика исследований заключается в теоретическом расчете методами сопротивления материалов усилия трения щетки по поверхности фильтроэлемента фильтра ФРУ-190-2 для технической воды, разработке методики проведения эксперимента, подтверждении полученных аналитических результатов теоретических расчетов экспериментальными исследованиями.

Результаты исследования. Для определения усилия сопротивления перемещению щеточного очистителя разработаны аналитические решения, которые учитывают влияние физических и геометрических параметров щетинки. Получено экспериментальное подтверждение теоретических расчетов.

Научная новизна заключается в установлении и доказательстве кубической зависимости усилия на одной проволоке щеточного очистителя от её прогиба. Определены аналитические зависимости расчета усилия перемещения щетки от её геометрических параметров.

Практическое значение. Разработана методика проектирования, результаты расчета и экспериментальных исследований, дают возможность на этапе проектирования обосновать геометрические и физические параметры щеточного очистителя фильтра технической воды.

Ключевые слова: *фильтр технической воды, щеточный очиститель, сетчатый фильтроэлемент, усилие перемещения, длина щетинки.*

ABSTRACT

Purpose. Theoretical calculation of the friction resistance of the brush cleaner on the mesh screen of the strainer filter FRU-190-2 for industrial water. Experimental determination of the stiffness of one bristle of a brush cleaner. Experimental study of the resistance to movement of the brush cleaner on the strainer filter mesh screen. The purpose of writing this article is the theoretical calculation of the friction resistance of the brush cleaner on the strainer filter mesh screen of the industrial water strainer filter. Filters with a mesh screen are used in heavy industry for the first stage of water treatment. To design and calculate the properties of the brush cleaner, it is necessary to determine the geometric characteristics of the brush cleaner and the frictional resistance force when moving the brush cleaner on the strainer filter mesh screen. To confirm the results of the theoretical calculation of the frictional resistance of the brush cleaner, performed by methods of strength of materials, it is necessary to conduct an experimental study to determine the stiffness of one bristle of the brush cleaner and the resistance to movement of the brush cleaner bristles on the filter element.

The methodology of research consists in theoretical calculation by methods of strength of materials of friction resistance of a brush on a surface of a mesh filter element of the FRU-190-2 filter for industrial water, development of a technique of carrying out experiment, confirmation of the received analytical results of theoretical calculations by experimental researches.

Findings. To determine the drag force of the brush cleaner, analytical solutions have been developed that take into account the influence of physical and geometric parameters of the bristles. Experimental confirmation of theoretical calculations is obtained.

Scientific novelty is to establish and prove the cubic dependence of the force on one wire of the brush cleaner on its deflection. Analytical dependences of calculation of effort of movement of a brush on its geometrical parameters are revealed.

Practical implications. The developed design technique and the results of calculations and experimental researches provide an possibility at the design stage to justification the geometric and physical properties of the brush cleaner of the strainer filter of industrial water.

Keywords: *industrial water strainer filter, brush cleaner, filter mesh screen, movement force, one bristle length, wire length.*