

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

РОМАНЮК ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 532.137

ДИСЕРТАЦІЯ

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕХАНІЧНИХ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ
КОНЦЕНТРАЦІЇ ПАПЕРОВОЇ ПУЛЬПИ**

05.11.13 Прилади та методи контролю і визначення складу речовин
(шифр і назва спеціальності)

15 Автоматизація та приладобудування
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

О.М. Романюк

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

Пістун Євген Павлович, д.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Львів - 2020

АНОТАЦІЯ

Романюк О.М. Вдосконалення механічних методів вимірювання концентрації паперової пульпи. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади та методи контролю і визначення складу речовин. – Національний університет “Львівська політехніка”. – Львів, 2020.

Дисертація присвячена питанням забезпечення інваріантності механічних концентратомірів паперової пульпи до наявних неінформативних параметрів шляхом управління рухом чутливих елементів механічних концентратомірів так, щоб усунути вплив неінформативних параметрів та покращити метрологічні характеристики концентратомірів, що дозволить підвищити точність вимірювання.

Запропоновано вимірювати момент сил зсуву, який діє на чутливий елемент концентратоміра при його обертанні по черзі на двох попередньо заданих частотах, з повторенням вимірювань при зміні напрямку обертання чутливого елемента на зворотний, автоматизовану систему реєстрації та опрацювання результатів вимірювань та систему керування рухом чутливого елемента.

Запропоновано спосіб керування лопатковим концентратоміром із активною лопаткою та автоматизовану систему керування рухом лопатки, яка забезпечує сталу швидкість зсуву паперової пульпи. Це дозволяє використати калібрувальні графіки та поправки, які компенсують вплив зміни температури, тиску і типу паперової пульпи ідентичні до використовуваних при роботі ротаційних концентратомірів, та зменшити вплив швидкості течії паперової пульпи на визначене значення її концентрації. Запропоновано алгоритми опрацювання отриманих результатів, які забезпечують зменшення похибок при вимірюванні концентрації паперової пульпи.

У першому розділі проаналізовано інформацію про принципи роботи сучасних концентратомірів паперової пульпи. Показано, що найбільш придатним для вимірювання концентрації паперової пульпи з домішками забарвлюючих речовин, електропровідних солей та твердих дрібнодисперсних абразивних частинок є механічний метод, різновиди якого – ротаційний та лопатковий –

потребують вдосконалення з метою покращення метрологічних та експлуатаційних характеристик, уніфікації градууювальних характеристик та зменшення чутливості до зміни неінформативних параметрів.

Основним напрямом досліджень є покращення метрологічних та експлуатаційних параметрів приладів для вимірювання концентрації паперової маси шляхом модифікації процесу вимірювання її в'язкості з подальшим алгоритмічним опрацюванням результатів вимірювання.

Другий розділ присвячено дослідженню ротаційного концентратоміра паперової пульпи і розробці вдосконаленого алгоритму проведення вимірювань, який забезпечить підвищену інваріантність результатів вимірювання до неоднорідності розподілу швидкості течії паперової пульпи у околі чутливого елемента концентратоміра, до моментів сил тертя в ущільненнях та підшипниках осі концентратоміра.

Показано можливість усунути вплив моментів сил тертя в ущільненні та у підшипниках осі чутливого елемента концентратоміра, змінюючи частоту обертання пропелера у процесі вимірювань так, щоб періодично наближатися до частоти обертання диска $f_{\text{вим.}}$, на якій проводяться вимірювання, зі сторони нижчих та потім зі сторони вищих частот.

Показано можливість усунути вплив асиметрії розподілу швидкості течії паперової пульпи поблизу чутливого елемента концентратоміра на вимірне значення параметрів паперової пульпи шляхом проведення вимірювань при почерговій зміні напрямку обертання пропелера концентратоміра.

Досліджено модель ротаційного концентратоміра з одним чутливим елементом у формі диска радіусом R , який обертається у потоці паперової пульпи. Проаналізовано можливості мінімізувати вплив паразитних моментів сил в ущільненні осі M_s , та у підшипниках осі чутливого елемента M_B не вдається, їх треба мінімізувати. Запропоновано застосувати магнітоелектричний, або електромагнітний компенсатор моменту сили в'язкого тертя, який діє на чутливий

елемент, завдяки якому при роботі компенсатора еластичне ущільнення чутливої осі перебуває у недеформованому стані, і, не створює додаткового моменту сил M_s .

Третій розділ присвячено дослідженню лопаткового концентратоміра паперової пульпи і розробці вдосконаленого процесу вимірювання та алгоритмічного опрацювання результатів вимірювань, які забезпечують підвищену інваріантність результатів вимірювання концентрації паперової пульпи до зміни швидкості течії паперової пульпи в околі лопатки концентратоміра та забезпечують роботу чутливого елемента концентратоміра при постійній швидкості зсуву паперової пульпи. Підтримання постійної швидкості зсуву паперової пульпи дозволяє уніфікувати калібрувальні та компенсаційні залежності для ротаційних та лопаткових концентратомірів.

Четвертий розділ присвячено вдосконаленню та експериментальному дослідженню ротаційних концентратомірів паперової пульпи із компенсатором моменту сили в'язкого тертя, створенню компенсатора моменту сили в'язкого тертя із лінійною залежністю між створеним моментом сили та силою струму, що живить компенсатор, та підвищенню точності вимірювання концентрації паперової пульпи ротаційним концентратоміром.

У висновках проаналізовано основні результати дисертаційних досліджень.

Ключові слова: нььютонівські рідини, вимірювання в'язкості, коефіцієнт консистенції, індекс течії, ефективна в'язкість, вимірювання концентрації паперової пульпи, вимірювання в'язкості, ротаційний концентратомір, лопатковий концентратомір.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Oleksandr Romaniuk, Bohdan Kril', Oleksandr Kril'. Algorithmic Method of Precision Enhancement of the Paper Pulp Blade Consistometer // ENERGY ENGINEERING AND CONTROL SYSTEMS. 2016. Vol.2. № 1. P.25 – 31.

2. Романюк О.М., Кріль Б.А., Кріль О.В. Алгоритмічний метод підвищення точності лопаткових концентратомірів паперової маси // *Методи та прилади контролю якості*. Івано-Франківськ. 2017. №1 (38), С.28-33. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. (входить до переліку наукових фахових видань України № 1-05/5 від 18.11.2009р.)
3. Romaniuk O.M., Kril B.A., Kril O.V., Krykh H.B. Rotational paper pulp viscometer with measurement at two shear speeds. // *Scientific Bulletin of UNFU*. 2017. Vol. 27. № 6. P. 172 – 177. (входить до наукометричної бази Index Copernicus) DOI: 10.15421/40270635
4. Романюк О. М., Крих Г.Б., Кріль Б. А., Кріль О. В. Удосконалення ротаційного віскозиметра для вимірювання концентрації паперової маси // *Методи та прилади контролю якості*. 2017. №2 (39). С.47-54. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. (Журнал входить до переліку наукових фахових видань України (№ 1-05/5 від 18.11.2009р., галузь науки, спеціальність – технічні)
5. Y. Pistun, B. Kril, O. Romaniuk, O. Kril. Investigation of sensor for measurement of rotation angle of sensitive element in rotational paper pulp consistometer // *Energy Engineering and Control Systems*. 2017. Vol.3. № 2. P.73–80. URL: <https://doi.org/10.23939/jeeecs2017.02.073>
6. Романюк О.М., Кріль Б.А. Розробка ротаційного віскозиметра для вимірювання концентрації паперової маси // 5-а науково-практична конференція студентів і молодих вчених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (24–25 листопада 2015р. Івано-Франківськ). Збірник тез доповідей. Івано-Франківськ, 2015. С. 172–174.
7. Romaniuk O., Kril' B. Development of Analyzer for Paper Stock Concentration Measurement // *Proceeding of 5-th International academic conference “Electric Power Engineering & Control Systems 2015” (EPECS-2015)*. (November 26-28, 2015, Lviv). Lviv. 2015. P.168-169.
8. Романюк О.М., Кріль Б.А. Підвищення точності ротаційних віскозиметрів алгоритмічним шляхом // *Матеріали II Міжнародної науково-технічної Internet-*

конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (25 листопада 2015р.) [Електронний ресурс] НУХТ. Київ. 2015 р. С.71–72.

9. Романюк О. М., Кріль Б. А., Кріль О. В. Поточкові концентратоміри паперової маси з компенсацією впливу швидкості середовища // XV Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (17–18 травня 2016 р., Київ). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», ПБФ. Київ, 2016. С.112.

10. Романюк О. М., Кріль Б. А., Кріль О. В., Кокошко Р.В. Підвищення точності вимірювання лопаткових концентратомірів паперової пульпи алгоритмічним методом // Матеріали III Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне, та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (23 листопада 2016р.) [Електронний ресурс] НУХТ. Київ. 2016. С.80-81.

11. Oleksandr Romaniuk, Bohdan Kril' Danylo Kril', Roman Kokoshko. Algorithmic Method of Precision Enhancement of Paper Blade Consistometer // Proceedings of 6-th International Academic Conference "Electric Power Engineering & Control Systems 2016" (EPECS-2016). (November 24-26, 2016, Lviv). Lviv. 2016. P.205–206.

12. Романюк О. М., Кріль Б. А., Кріль О. В. Лопатковий концентратомір паперової пульпи із зменшеним впливом швидкості на процес вимірювання // IV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології 2017 (АКІТ – 2017)» (19-20 квітня 2017р., Київ). Матеріали конференції. НТУУ «КПІ». 2017. С.162–163.

13. Романюк О. М., Кріль Б. А., Кріль О. В. Зменшення впливу швидкості потоку паперової пульпи на процес вимірювання концентрації лопатковими концентратомірами // XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (16–17 травня 2017 р., Київ). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», ПБФ. Київ, 2017. С.99 – 100.

14. Романюк О.М., Кріль Б.А., Кріль О.В. Вдосконалення механічних концентратомірів паперової пульпи // IV міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017)» (31

жовтня – 02 листопада 2017 р., Вінниця). Матеріали конференції. Вінниця, 2017. С.114–115.

15. Romaniuk O., Kril' B., Kril' O. Improvement of the Mechanical Consistometers for Paper pulp // Proceedings of 7-th International Academic Conference “Electric Power Engineering & Control Systems 2017” (EPECS-2017). (November 23-25, 2017, Lviv). Lviv. 2017. P.186-187.

16. Романюк О.М., Кріль Б.А., Кріль О.В. Дослідження ротаційного концентратоміра паперової пульпи з магнітоелектричною компенсацією // 8-ма науково-технічна конференція "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання". (14 – 16 листопада 2017р. Івано-Франківськ). ІФНТУНГ. Івано-Франківськ. 2017. С.173–175.

17. Романюк О.М., Кріль Б.А., Кріль О.В. Дослідження оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», (22 листопада 2017р.) [Електронний ресурс] НУХТ. Київ. 2017р. С.82–83.

18. Пат. на винахід №119899 Україна, МПК G01 N 11/10, G01 N 15/06, G01 N 33/34, G05 D 24/02. Пристрій для вимірювання концентрації паперової маси/ Кріль Б.А., Кріль О.В., Романюк О.М.; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка». - №a201708172; заявл. 07.08.2017; опубліковано 27.08.2019, Бюл. № 16. - 4 с.: іл.

ABSTRACT

Romaniuk O.M. The improvement of the mechanical method of the paper pulp consistency measurements. – On rights of a manuscript.

Candidate of Engineering Science (PhD) thesis in speciality 05.11.13 – “Devices and Methods of Control and Determination of Substance Composition” – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2020.

The thesis is devoted to the problem of the enhancement of the paper pulp consistency measurements precision by rotational and active blade-type consistometers.

It has been proved that accuracy of the paper pulp consistency measurements in case of rotational consistometer can be increased by measuring of the share stress torque at two predetermined frequencies of the sensitive element rotation, and following repeating of the share stress torque measurements for alternative rotation direction. By averaging of the share stress torque values measured at one frequency of the sensitive element rotation in clockwise and anticlockwise directions, and following algorithmic processing of the obtained data it is possible to eliminate the effect of the asymmetry of the paper pulp flow velocity distribution in the vicinity of consistometer rotating sensitive element.

Modern paper pulp rotational consistometers use compensation-measuring method, where the share stress torque is compensated by the torque, produced by electromagnetic transducer, controlled by electric current, or by specially designed electric motor.

We proposed to use the magnetoelectric transducer of the share stress torque instead of the electromagnetic transducer because it has a linear relationship between the current and the torque produced. Another important property of the developed magnetoelectric transducer consists in the fact that it can operate at any rotation direction of sensitive element, while available electromagnetic transducers can operate only for one rotation direction and do not support rotation in the opposite one.

As information parameter serves the strength of current in the magnetoelectric transducer winding in the moment, when the frequency of the sensitive element rotation come up to one of the two predetermined values f_1 or f_2 in turn from the side of the lower frequencies and from the side of the higher frequencies.

The standard optical mount for the torque compensation monitoring is connected with designed equipment for precision output signal processing providing higher precision and repeatability of the paper pulp consistency measurements. Signals are processed by programmable logic controller Siemens Simatic S7.

The method of the active blade control in the paper pulp consistometer, and the automatic control system for supplying blade motion in the paper pulp flow providing constant share rate are presented.

The application of the modified (improved) active blade consistometer allows to use the calibration and temperature, pressure, and paper pulp type corrections identical to those used for rotational consistometers, and to reduce the influence of the paper pulp flow velocity on the measured value of paper pulp consistency.

The analysis of the factors affecting on the formation of the stored error of the paper pulp consistency measurement by rotational and active blade consistometers is done. The measurement process arrangement and the algorithm of obtained data processing are proposed, providing the reducing of the error of the paper pulp consistency measurement.

In the Chapter 1 the information on the operation principles of the modern paper pulp consistometers is analyzed. It is done the conclusion, that mechanical method of the paper pulp concentration measurement is the most reliable for paper pulp, including impurities. Mechanical paper pulp consistometers of rotational and blade – type can be improved with the purpose of enhancement of their metrological and performance characteristics, unification of their calibration curves, and decrease their sensitivity to variation of undescriptive parameters.

The purpose and objectives of research. The main purpose of research is the enhancement of metrological and performance characteristics of rotational-type and blade-type paper pulp consistometers by modification of the paper pulp viscosity measurement process followed by algorithmic processing of results of the measurements.

Chapter 2 is devoted to research investigation of the rotational-type paper pulp consistometer and development of the improved algorithm of execution of measurements to achieve the increased invariance of the measured consistency on the flow rate distribution asymmetry in the vicinity of the sensitive element of consistometer, friction torques in sensitive shaft sealing and bearings.

It is established that it is possible to eliminate the influence of the friction torques in sensitive shaft sealing and bearings by variation sensitive element rotation frequency to approach to selected for measurements rotation frequency $f_{BHM.}$, alternately from the side

of lower and higher frequencies, and followed algorithmic processing of results of the measurements..

It is established that it is possible to eliminate the influence of the pulp flow rate distribution asymmetry in the vicinity of the sensitive element of consistometer on the measured pulp consistency value by carrying out measurements for alternately changed clockwise and anticlockwise sensitive element rotation direction, and followed algorithmic processing of results of the measurements.

The model of rotational-type consistometer with the sensitive element in the form of one disk is investigated. In this consistometer design it is impossible to eliminate the influence of the friction torques in sensitive shaft sealing M_s and bearings M_B . To minimize their influence on the measured paper pulp concentration we use electromagnetic compensator of viscous friction produced torque, acting on rotating sensitive element. If compensator operates, the consumed current strength gives the information on paper pulp consistency. At the same time elastic sealing of the sensitive shaft is not twisted, and torque M_B is equal to zero, and do not distort results of consistency measurements.

Chapter 3 is devoted to the investigation of the blade paper pulp consistometer and development of advanced measuring procedure and algorithmic processing of results of the measurements, providing advanced invariance of the measured paper pulp consistency on the variations of the pulp flow rate in the vicinity of the sensitive blade of consistometer and providing the operation of the sensitive blade on the constant share rate. Supporting constant share rate provides the possibility to use unified calibration and compensating functional relations as for rotational-type, as for blade-type paper pulp consistometers.

Chapter 4 is devoted to proposed improvement and research investigation of the rotation-type paper type consistometers with compensator of the viscous friction torque, acting on sensitive element. The magnetoelectric torque compensator with linear relationship of torque-vs-current strength curve is designed and tested. Designed

rotational-type consistometer has higher pulp measurement precision in comparison with prototype.

Conclusions summarize the main results of theoretical and experimental research accomplished in these theses.

Keywords: paper pulp, non-Newtonian liquids, paper pulp consistency measurements, rotational viscometer, rotational consistometer, active blade consistometer, flow consistency index, flow behavior index, apparent viscosity.

ЗМІСТ

	стор.
АНОТАЦІЯ	2
ABSTRACT	7
ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ПАПЕРОВОЇ ПУЛЬПИ	24
1.1. Технологічні процеси виготовлення санітарно- гігієнічного паперу	24
1.1.1. Процеси виготовлення основних волокнистих напівфабрикатів	24
1.1.2. Особливості переробки макулатури в паперову пульпу	27
1.2. Методи вимірювання концентрації паперової пульпи та обґрунтування напрямків вдосконалення механічних концентратомірів паперової пульпи	31
1.2.1. Лабораторні концентратоміри ротаційного типу	31
1.2.2. Ротаційні концентратоміри для промислового використання	34
1.2.3. Концентратоміри з лопатками	44
1.2.3.1. Концентратоміри з нерухомою лопаткою	46
1.2.3.2. Концентратомір з нерухомою лопаткою без еластомерного ущільнення	47
1.2.3.3. Концентратоміри з рухомою лопаткою, яка коливається у площині симетрії потоку паперової пульпи	48
1.2.3.4. Концентратомір із рухомою лопаткою, яка коливається на осі, паралельній до осі потоку паперової пульпи	50
1.2.4. Оптичні, мікрохвильові, та ультразвукові концентратоміри паперової пульпи	54

1.3.	Реологічні властивості паперової пульпи та фактори, які впливають на в'язкість	56
1.3.1.	Загальні характеристики поведінки в'язкої рідини	56
1.3.2.	Залежність в'язкості від градієнта швидкості течії	58
1.4.	Висновки до розділу 1	60
РОЗДІЛ 2.	ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ РОТАЦІЙНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ПАПЕРОВОЇ ПУЛЬПИ	64
2.1.	Аналіз впливу неінформативних параметрів на процес вимірювання концентрації паперової пульпи з допомогою ротаційних концентратомірів	64
2.1.1.	Дослідження залежності в'язкості від температури	64
2.1.2.	Оцінка впливу температури на в'язкість паперової пульпи	68
2.1.3.	Дослідження залежності в'язкості від тиску паперової пульпи	70
2.1.4.	Залежність в'язкості від концентрації суспензії	71
2.1.5.	Фактори, які впливають на в'язкість паперової пульпи	71
2.2.	Розробка ротаційного концентратоміра паперової пульпи з покращеними функціональними можливостями	72
2.2.1.	Обґрунтування можливості вимірювання коефіцієнта консистенції K , індексу поведінки течії n , та видимої в'язкості неньютонівської рідини μ ротаційним концентратоміром з двома заданими швидкостями обертання чутливого елемента	72
2.2.2.	Зменшення впливу небажаних моментів сил тертя на вимірне значення в'язкості та консистенції паперової пульпи	74
2.2.3.	Вдосконалення робочого циклу концентратоміра шляхом почергової зміни напрямку обертання чутливих елементів	77

2.2.4.	Дослідження ротаційного концентратоміра паперової пульпи та його вдосконалення	79
2.2.4.1.	Модель ротаційного концентратоміра	79
2.2.4.2.	Вдосконалення конструкції вимірювальної установки	83
2.2.4.3.	Запропонований узагальнений алгоритм визначення параметрів рідини	84
2.2.4.4.	Зменшення впливу моменту сил тертя в ущільненні осі чутливого елемента на результати вимірювань концентрації паперової пульпи за в'язкістю	85
2.2.4.5.	Пропоновані алгоритми зміни частоти обертання чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи за в'язкістю	88
2.3.	Висновки до розділу 2	91
РОЗДІЛ 3.	ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОПАТКОВОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ПАПЕРОВОЇ ПУЛЬПИ.	93
3.1.	Аналіз впливу швидкості потоку на процес вимірювання концентрації паперової пульпи з допомогою лопаткових концентратомірів.	93
3.2.	Розробка лопаткового концентратоміра паперової пульпи з покращеними функціональними властивостями	97
3.2.1.	Розроблення принципової схеми лопаткового концентратоміра паперової пульпи з коливаннями лопатки з важелем у площині симетрії потоку паперової пульпи з компенсацією впливу швидкості потоку	100
3.2.2.	Розроблення принципової схеми лопаткового концентратоміра з поперечним рухом лопатки відносно осі приводу	102
3.2.3.	Дослідження роботи запропонованих лопаткових концентратомірів паперової пульпи з компенсацією впливу швидкості потоку	104
3.3.	Висновки до розділу 3	110

РОЗДІЛ 4.	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВДОСКОНАЛЕНИХ МЕХАНІЧНИХ КОНЦЕНТРАТОМІРІВ ПАПЕРОВОЇ ПУЛЬПИ.	112
4.1.	Дослідження магнітоелектричного компенсатора в'язкісного тертя.	112
4.1.1.	Дослідження торсійного елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи	112
4.1.2.	Дослідження статичної характеристики ротаційного концентратоміра з магнітоелектричним компенсаційним механізмом	115
4.2.	Дослідження давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента.	120
4.2.1.	Удосконалена конструкція концентратоміра паперової пульпи, для якої проводились дослідження пристрою для вимірювання кута повороту чутливого елемента	122
4.2.2.	Обґрунтування конструкції давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи	126
4.2.3.	Опис структурної схеми запропонованого пристрою для опрацювання сигналу від оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи відносно ведучої осі, установки для дослідження, методики досліджень	127
4.2.4.	Аналіз результатів дослідження давача кута повороту	129
4.3.	Розрахунок градувальних характеристик концентратоміра паперової пульпи з магнітоелектричною компенсацією та порівняння з експериментальними даними	137
4.4.	Висновки до розділу 4.	142
	ВИСНОВКИ	143
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	146

ВСТУП

Актуальність теми. На сучасному етапі розвитку промисловості України целюлозно-паперова промисловість є однією із перспективних галузей промислового виробництва, що забезпечує стабільний розвиток економіки.

В нашій країні історія виробництва паперу починається ще з першої половини XVI століття. На сьогоднішній день в Україні у паперовій галузі працює близько 40 підприємств [1], які виготовили у 2013 році більше 1,1 млн. тон картонно-паперової продукції. Лідерами вітчизняної паперової галузі є ВАТ «Київський КПК», ВАТ «Корюківська ФТП», ПАТ Кохавинська ПФ».

Сучасне виробництво паперу та картону є високотехнологічним і наукоємним процесом. Паперова галузь є також одною із найбільш капітало- та енергоємних галузей, займаючи третє місце після металургії та хімічної промисловості. У 2013 році в Україні один житель споживав у середньому 32,2 кг картону та паперу на рік, за середньосвітового рівня споживання більшого за 70 кг на рік.

За прогнозом , у 2020 році обсяг виробництва картонно-паперової продукції зросте до рівня 2,0 – 2,2 млн тон, що вимагатиме капіталовкладень близько 20 млрд. гривень [2].

Основною сировиною для вітчизняних підприємств галузі сьогодні є макулатура. Рівень регенерації вторинного волокна в Україні становить 49-50 %, тоді як у багатьох європейських країнах цей показник дорівнює 65- 70 %.Збільшення обсягів споживання паперу і картону та підвищення рівня регенерації мають стати результатом задоволення потреб споживачів макулатури як вторинної сировини для виробництва паперу і картону [3].

В індустріально розвинених країнах в першу чергу виробляється різноманітне упакування, яке легко утилізується шляхом багаторазового перероблення з одержанням такої ж повноцінної продукції, як із початкової сировини [4].

Технологічні процеси переробки макулатурної маси можна реалізовувати як на великих і потужних технологічних лініях, так і в відносно невеликих масштабах.

При цьому це теж буде достатньо економічно ефективним, оскільки знижуються затрати на перевезення сировини і готової продукції та зменшується техногенне навантаження на довкілля. Важливим технологічним параметром в усіх згаданих технологічних процесах є концентрація паперової маси [5].

Цей параметр вимірюють за в'язкістю паперової пульпи і це один з небагатьох прикладів вимірювання концентрації середовища за в'язкістю [6, 7].

Є й інші принципи побудови приладів вимірювання концентрації, але всі вони не можуть бути застосовані.

Метрологічні і експлуатаційні параметри приладів, які розробляються для вимірювання концентрації паперової пульпи, можна покращити шляхом модифікації процесу вимірювання з подальшим алгоритмічним опрацюванням результатів вимірювання.

Застосування більш точних вимірювальних приладів для вимірювання концентрації паперової пульпи дозволить покращити самі технологічні процеси.

Роботи, спрямовані на покращення технологічного процесу виробництва паперу та вдосконалення систем керування цим процесом, є актуальними і економічно доцільними, враховуючи, що папероробна промисловість за вартістю основних виробничих фондів та енергомісткістю перебуває на третьому місці після металургії та хімічної промисловості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась згідно з планом науково-дослідної роботи кафедри «Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій» Національного університету «Львівська політехніка» і носить науково-прикладний характер. Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри «Прилади та методи контролю та визначення складу речовин».

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є покращення метрологічних та експлуатаційних параметрів приладів для вимірювання концентрації паперової пульпи шляхом модифікації процесу вимірювання її в'язкості з подальшим алгоритмічним опрацюванням результатів вимірювання.

Для реалізації цієї мети потрібно вирішити наступні завдання:

- 1) провести аналіз конструкцій та функціонування концентратомірів паперової маси, та вивчити можливості покращення їх метрологічних властивостей;
- 2) розробити порядок проведення вимірювань концентрації паперової пульпи за допомогою ротаційних та лопаткових концентратомірів;
- 3) розробити алгоритми опрацювання отриманої інформації, які суттєво зменшують вплив швидкості течії паперової пульпи у трубопроводі на результат вимірювання її концентрації;
- 4) провести експериментальні дослідження вдосконалених концентратомірів паперової пульпи;
- 5) здійснити математичне моделювання впливу неінформативних параметрів та експериментально перевірити найважливіші висновки з цього моделювання;
- 6) розробити вимірювальну схему ротаційного та лопаткового концентратомірів;
- 7) провести її математичне моделювання та експериментальне дослідження.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання концентрації паперової пульпи ротаційними та лопатковими концентратомірами паперової пульпи в технологічному процесі виробництва паперу.

Предметом дослідження є методи та засоби підвищення точності вимірювання концентрації паперової пульпи, інваріантної щодо впливу зміни умов вимірювання, за допомогою ротаційного та лопаткового концентратомірів у паперовій промисловості.

Методи дослідження базуються на використанні теорії вимірювань; теорії реологічної поведінки неньютонівських рідин; теорії ймовірностей та математичної статистики; методів обробки сигналів; математичного та комп'ютерного моделювання, методів алгоритмізації та програмування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Запропонована методологія забезпечення інваріантності механічних концентратомірів паперової пульпи до наявних неінформативних параметрів шляхом управління рухом чутливих елементів механічних концентратомірів так, щоб зменшити вплив неінформативних параметрів та покращити метрологічні характеристики концентратомірів, що дозволить підвищити точність вимірювання.

2. Вперше запропоновано керувати рухом чутливого елемента лопаткового концентратоміра паперової пульпи за сигналом від генератора імпульсів трикутної форми, що дозволяє забезпечити постійну швидкість зсуву при вимірюванні і тим самим підвищити точність вимірювання в'язкості та концентрації паперової пульпи за вимірним моментом сили в'язкісного тертя.

3. Запропоновано метод компенсації впливу неінформативних параметрів на вимірне ротаційним концентратоміром значення концентрації паперової пульпи шляхом знакоперемінного обертання чутливого елемента ротаційного концентратоміра та алгоритмічного опрацювання результатів вимірювання моменту в'язкісного тертя, що зменшує вплив несиметричного розподілу швидкості течії пульпи на результат вимірювання.

4. Запропоновано застосовувати магнітоелектричний метод компенсації моменту в'язкісного тертя в ротаційних концентратомірах паперової маси, який має кращу відтворюваність статичної характеристики, що дозволяє підвищити точність вимірювання на початку діапазону вимірювання і мінімізувати вплив ущільнення валу з чутливим елементом на результат вимірювання.

5. Запропоновані нові схеми побудови ротаційних та лопаткових концентратомірів паперової пульпи з кращими метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

1. Запропоновано новий порядок проведення вимірювань концентрації паперової маси за допомогою ротаційного концентратоміра із проведенням вимірювань по черзі на двох різних частотах обертання чутливого елемента із

наближенням до них зі сторони нижчих та вищих частот обертання, та повторенням вимірювань при зміні напрямку обертання ротора.

2. Розроблено алгоритм опрацювання результатів вимірювань, який дозволяє зменшити вплив моментів сил тертя в ущільненнях та у підшипниках вимірювальної осі ротаційного концентратоміра на отримане значення концентрації паперової маси.

3. Запропоновано та реалізовано новий порядок проведення вимірювань концентрації паперової маси за допомогою лопаткового концентратоміра з активною лопаткою із проведенням вимірювання моменту сили зсуву при постійному програмно встановлюваному значенні швидкості зсуву.

4. Розроблено алгоритм визначення концентрації паперової маси на його основі, який зменшує вплив швидкості течії паперової маси на визначене значення її концентрації; Використання запропонованих методів дозволяє підвищити точність вимірювання концентрації паперової маси без внесення змін у механічну частину досліджених концентратомірів.

5. Розроблено нову електронну частину блоку обробки інформації у концентратомірах та програми для обробки інформації за допомогою програмованих логічних контролерів Siemens Simatic S7-300.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені у навчальний процес кафедри «Автоматизація і комп'ютерно інтегровані технології» (АВКТ) при викладанні курсу «Метрологія, технологічні вимірювання та прилади, частина 2».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертації отримані автором особисто, на основі власних ідей і розробок, а окремі досягнуті у співавторстві з науковим керівником та працівниками за місцем роботи. У публікаціях, в яких викладено результати досліджень і які написані у співавторстві, дисертанту належать:

- обґрунтування застосування лопаткового концентратоміра для вимірювання концентрації паперової маси [8, 9];

- обґрунтування застосування ротаційного концентратоміра для вимірювання концентрації паперової маси [10, 11, 12, 13, 14, 15, 21, 22];

- розробка алгоритмічного методу підвищення точності лопаткових концентратомірів [8, 9, 17, 18, 19, 20, 21, 22];

- розробка способу проведення вимірювання концентрації паперової пульпи за допомогою ротаційного віскозиметра [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 21, 22, 23, 24, 25].

Апробація результатів дисертації. Дисертаційна робота обговорювалась на наукових семінарах кафедри “Автоматизації та комп’ютерно-інтегрованих технологій ” Національного університету “Львівська політехніка”. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на конференціях: 5-а науково-практична конференція студентів і молодих вчених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2015); 5-th International Academic Conference of Young Scientists “Electric Power Engineering & Control Systems 2015” (EPECS-2015, Lviv, Ukraine); II Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (Національний університет харчових технологій, м. Київ, 2015); XV Міжнародна науково-технічна конференція «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи», (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, 2016); III Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні методи, інформаційне, програмне, та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (Національний університет харчових технологій, м. Київ, 2016); 6-th International Academic Conference of Young Scientists “Electric Power Engineering & Control Systems 2016” (EPECS-2016, Lviv, Ukraine); IV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «АКІТ – 2017» (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, 2017); XVI

Міжнародна науково-технічна конференція «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи» (Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, 2017), IV міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах» (ВКДТС-2017): (Вінницький Національний технічний університет, м. Вінниця, 2017), International Youth Science Forum “Litteris et Artibus”, 23-25 November 2017, Lviv, Ukraine.

Публікації. Основні результати дисертації опубліковані у 18 наукових працях: 5 статей у фахових наукових виданнях України, 12 публікацій у збірниках доповідей міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій, та патент України на винахід №119899. Робота виконувалась в Національному університеті «Львівська політехніка» з 2014 р. по 2017 р.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, та переліку джерел інформації. Дисертація викладена на 157 сторінках. Крім того, робота проілюстрована 46 рисунками, містить 9 таблиць та список використаних джерел із 105 найменувань на 12 сторінках.

У вступі дано загальну характеристику дисертаційної роботи. Розкрито суть та стан науково-технічної проблеми вимірювання концентрації паперової маси у процесах виробництва паперової продукції. Обґрунтовано актуальність теми, на підставі чого сформульовані мета та основні задачі дослідження. Висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, подано відомості про особистий внесок здобувача та апробацію роботи.

В першому розділі розглянуто методи та прилади для вимірювання концентрації паперової маси та технологічний процес виробництва паперової продукції.

Другий розділ присвячено дослідженню ротаційного концентратоміра паперової пульпи і розробці вдосконаленого алгоритму проведення вимірювань, який забезпечить підвищену інваріантність результатів вимірювання до

неоднорідності розподілу швидкості течії паперової пульпи у околі чутливого елемента концентратоміра, до моментів сил тертя в ущільненнях та підшипниках осі концентратоміра.

Третій розділ присвячено дослідженню лопаткового концентратоміра паперової пульпи і розробці вдосконаленого процесу вимірювання та алгоритмічного опрацювання результатів вимірювань, які забезпечують підвищену інваріантність результатів вимірювання концентрації паперової пульпи до зміни швидкості течії паперової пульпи в околі лопатки концентратоміра та забезпечують роботу чутливого елемента концентратоміра при постійній швидкості зсуву паперової пульпи. Підтримання постійної швидкості зсуву паперової пульпи дозволяє уніфікувати калібрувальні та компенсаційні залежності для ротаційних та лопаткових концентратомірів.

Четвертий розділ присвячено вдосконаленню та експериментальному дослідженню ротаційних концентратомірів паперової пульпи із компенсатором моменту сили в'язкого тертя, створенню компенсатора моменту сили в'язкого тертя із лінійною залежністю між створеним моментом сили та силою струму, що живить компенсатор, та підвищенню точності вимірювання концентрації паперової пульпи ротаційним концентратоміром.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ПАПЕРОВОЇ ПУЛЬПИ

Вимірювання концентрації (консистенції, (consistency)) водно – паперової пульпи у паперовій промисловості є питанням особливої ваги. У англійській літературі її часто називають консистенцією (consistency), а реально під нею розуміють масову частку паперової пульпи у водно – целюлозних суспензіях [26]. Найточніше вона вимірюється лабораторним методом, коли відфільтровану паперову пульпу висушують, зважують, та встановлюють відношення маси сухого волокнистого матеріалу до початкової маси досліджуваного зразка пульпи [27]. У випадку реального виробничого процесу інформація про концентрацію пульпи необхідна безпосередньо у режимі реального часу, тому вона отримується шляхом непрямих вимірювань, і її значення розраховуються за результатами вимірювання в'язкості, оптичних, радіочастотних, ультразвукових, та навіть вимірювань ослаблення гама – випромінювання потоком паперової пульпи.

1.1. Технологічні процеси виготовлення санітарно-гігієнічного паперу

1.1.1. Процеси виготовлення основних волокнистих напівфабрикатів

Папір — волокнистий матеріал, що представляє собою тонкий шар переплетених і зчеплених між собою волокон, що пройшли спеціальну механічну і хімічну обробку [28-31, 103-105].

Основними компонентами паперу є целюлоза та деревна маса. Їх іноді називають волокнистими напівфабрикатами. Для надання паперу певних оптичних і технологічних властивостей до основної маси додають різноманітні домішки (дрібно розмолоті мінеральні суміші, проклеювачі, барвники, наповнювачі тощо).

На сьогодні основними волокнистими напівфабрикатами є: клітковина сульфатна з хвойних і листяних порід деревини, клітковина сульфатна, деревна маса, напівцелюлоза, макулатура, ганчірна напівмаса, клітковина вдосконалена, та інші види волокон (синтетичні, штучні, мінеральні, вовняні).

Клітковину сульфатну одержують варінням подрібненої рослинної сировини в розчині в котлах періодичної або неперервної дії при температурі 160-180°C і

тиску 0,7-1,2 МПа. Цей спосіб дозволяє переробляти будь-яку рослинну сировину і одержувати найбільш тривкі волокнисті напівфабрикати. Сульфатна клітковина після варіння має темний колір, тому в невибіленому вигляді застосовується, в основному, для технічних видів паперу і картонів високої міцності, наприклад, електроізоляційних, пакувальних тощо.

Клітковину сульфітну одержують головним чином з деревини малосмолистих хвойних порід дією сульфітного варильного розчину, основними компонентами якого є водний розчин сульфітів і бісульфітів кальцію, магнію, натрію або амонію. Сульфітне варіння здійснюється сьогодні в основному в котлах періодичної дії при температурі 130-145°C і тиску 0,6-1,2 МПа.

При виробництві сульфітної клітковини досягається більш високий, ніж при сульфатному варінні, вихід клітковини з деревини, а з відпрацьованих розчинів одержують етиловий спирт, білкові кормові дріжджі, ливарні концентрати, дубильні речовини та інші цінні продукти.

Макулатура являє собою вторинну сировину, тобто вживані папір і картон, а також промислові відходи від їх переробки. Вона є повноцінним замінником свіжих волокнистих напівфабрикатів при виробництві багатьох видів картону, а також паперу. Використання макулатури має величезне народногосподарське значення, бо підприємства по переробці макулатури коштують приблизно в 2-3 рази дешевше і менше забруднюють довкілля, ніж підприємства по виробництву напівфабрикатів з рослинної сировини. Використання макулатури дозволяє економити 3,0-4,5 м³ деревини, або близько 15 дорослих дерев, на одну тонну паперу. В залежності від композиції і виду макулатура поділяється на 12 марок, від МС-1 до МС-12.

Виробництво паперу трудомісткий процес, який передбачає виготовлення паперової пульпи, відливання паперу на папероробній машині та його обробку.

Паперова пульпа це сильно розведена водяна суміш волокнистих і неволокнистих складників паперу (наповнювач, клейкі речовини та барвники).

Виготовлення паперової пульпи складається з кількох технологічних операцій:

- розмел волокон целюлози;
- добір певних волокнистих напівфабрикатів, введення наповнювача, клейких речовин, барвників;
- відливання паперу на папероробній машині.

На всіх стадіях підготовки паперової пульпи до виробництва паперу здійснюється контроль концентрації целюлозної пульпи. Спрощена функціональна схема типового контуру регулювання концентрації паперової пульпи зображена на рис.1.1.

Паперова, деревна і целюлозна пульпи – являють собою водні суспензії волоконних матеріалів. Основною їх характеристикою є концентрація, тобто, вміст у них абсолютно сухого волокна в масових відсотках. При розмелюванні згущеної суспензії при виробництві деревної пульпи із трісок на сучасних розмелювальних установках концентрація становить – 15-30%; при процесах дозування і створення композиції – 2-3,5%; при процесах сортування й подачі пульпи на плоскіткові й круглосіткові машини – 2%; при освітленні оборотних вод – 0,04-1,5%; при очищенні оборотних вод – 0,03-0,15%.

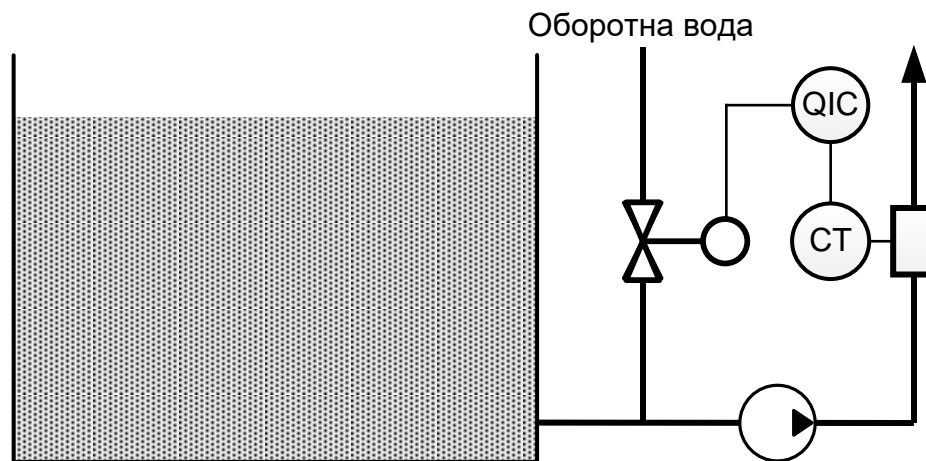


Рис. 1.1. Спрощена ФСА типового контуру регулювання концентрації паперової пульпи

Таким чином, у різних технологічних процесах потрібно контролювати концентрації в межах від 0,03% до 30%.

Як відомо, безпосереднє вимірювання концентрації можливе тільки в лабораторних умовах, і вимагає значного часу, щоби відфільтрувати, висушити та зважити сухе волокно, отримане із досліджуваної проби паперової пульпи. Це обмежує застосування методу контролем концентрації паперової пульпи при калібруванні використовуваних концентратомірів.

Для неперервного вимірювання концентрації паперової пульпи у режимі реального часу застосовують давачі, принцип дії яких ґрунтується на непрямих методах вимірювання, які мають суттєві обмеження стосовно меж вимірювання концентрації волоконної суспензії.

1.1.2. Особливості переробки макулатури в паперову пульпу

Технологічний процес переробки макулатури в паперову пульпу включає декілька технологічних стадій.

1 - Розпуск макулатури - це перша технологічна стадія в системі переробки макулатури в паперову пульпу на паперових та картонних фабриках.

На цій стадії вирішується ряд важливих завдань:

- змішування макулатури з водою і поділ її на волокна для отримання волокнистої суспензії (паперової пульпи);
- максимально можливе видалення з макулатурної пульпи великих фракцій забруднень;
- часткове відділення дрібних забруднень, пов'язаних з окремими волокнами;
- при потребі, змішування з отриманою паперовою пульпою технологічних хімічних реагентів

Розрізняють розпуск при високих (12-20%), середніх (6-12%) і низьких (3-6%) концентраціях. Нижче наводиться класифікація режимів і устаткування для розпуску, що зустрічаються на практиці (рис. 1.2).

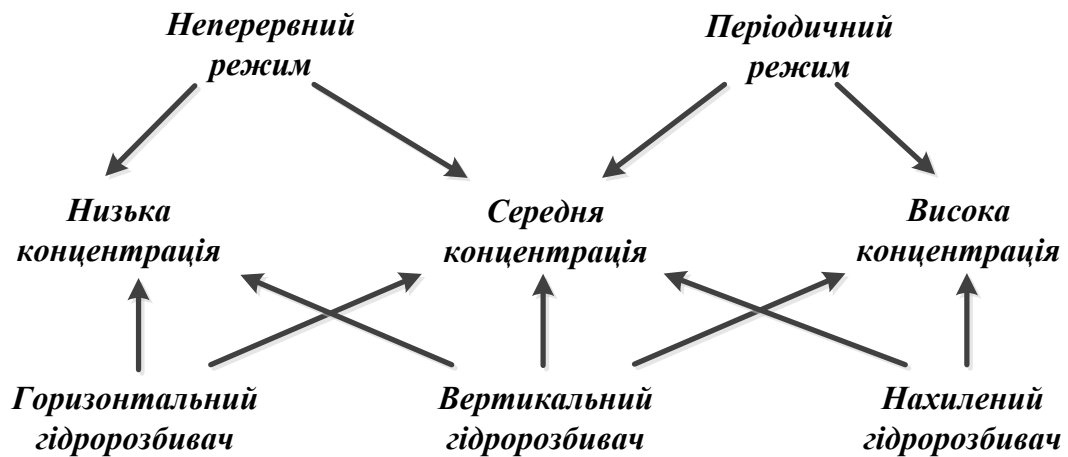


Рис. 1.2. Класифікація режимів і обладнання для розпуску

Встановлено, що інтенсивне розволокнення макулатури при будь-яких концентраціях маси відбувається зазвичай в перші 5-7 хв. процесу. Потім швидкість розволокнення різко знижується, продуктивність зменшується, а питома

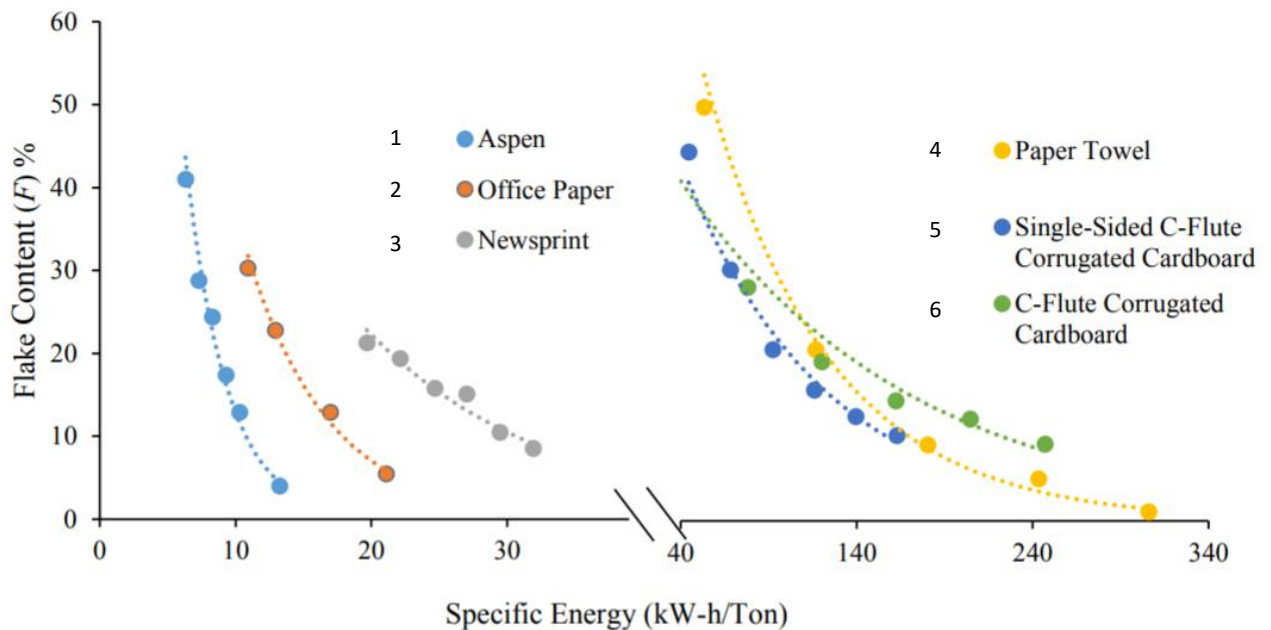


Рис. 1.3. Питома витрата енергії у кВт · год/тонну, необхідна для розволокнення різних типів паперової сировини для досягнення концентрації паперової пульпи 5% при температурі 20°C. Сировина: 1 – крафт целюлоза із листяних порід дерева, 2 – канцелярський папір, 3 – газетний папір, 4 – паперові салфетки чи рушники, 5 – односторонній гофрований картон, 6 – двосторонній гофрокартон. По осі ОУ – вміст нерозпущеної паперової сировини у % [32].

витрата енергії зростає пропорційно збільшенню тривалості процесу розволокнення макулатури (рис.1.3).

У роботі [32] показано вплив виду сировини на питому витрату енергії при розпуску паперової сировини

Оптимальне керування роботою системи розволокнення макулатури в гідророзбивачі можливе при автоматизації процесу, що дозволяє фіксувати і регулювати такі показники:

- масу вихідної макулатури, яка подається в систему розпуску;
- вологість макулатури, яка подається;
- концентрацію пульпи під час розпуску;
- тривалість окремих етапів розволокнення (при періодичному режимі роботи);
- рівень пульпи у ванні.

Серед технологічних факторів, що дозволяють інтенсифікувати процес розволокнення, в першу чергу слід відзначити концентрацію пульпи, яку розпускають. Збільшення концентрації маси в гідророзбивачі з традиційних 4,0% до 7,0-8,0% дозволяє знизити споживання енергії на 30-40% і забезпечити підвищення продуктивності в два рази.

2 - Технологічний процес очищення паперової пульпи

Зазвичай сортування макулатурної пульпи проводять у чотири стадії:

- очистка на вихрових очисниках з метою вилучення сторонніх включень абразивного характеру (пісок, камінці, метал, скло, та ін.).
- попереднє сортування пульпи у процесі розволокнення макулатури, що здійснюється за допомогою традиційних гідророзбивачів, оснащених перфорованою плитою, барабанних гідророзбивачів, оснащених сортувальною секцією, чи інших окремих пристроїв. Тут застосовують переважно сортувальні елементи із круглими отворами.
- грубе сортування макулатурної пульпи середньої концентрації (менше 4,5%) у сортувальних установках, оснащених ситами з круглими, або шліцевими

отворами. На цій стадії відокремлюють грубодисперсні частинки відходів до рівня, який дозволяє перейти до сит із меншими розмірами отворів.

- тонке сортування макулатурної пульпи низької концентрації (менше 1,5%) у сортувальних установках, оснащених, як правило, ситами зі шліцевими отворами.

Використання високої (3...5%) концентрації волокнистої суспензії із кількістю відходів 5...10 % від маси, що поступає на сортування, може на 40...50 % зменшити вартість необхідного обладнання (зменшується об'єм фільтрованої пульпи, діаметри трубопроводів, об'єми баків для зберігання пульпи, витрата енергії, розміри виробничих приміщень).

Однак, підвищення концентрації пульпи приводить до більш значної взаємодії між окремими волокнами всередині отворів сита, і це приводить до необхідності підвищувати перепад тисків, щоби «протиснути» волокна через отвори сита, а це приведе до більших затрат енергії при роботі живильної помпи. Тому вибір оптимальної робочої концентрації макулатурної пульпи не є однозначним, і вимагає врахування особливостей сировини, допустимих режимів експлуатації обладнання, та вимог до кінцевого ступеня очистки сировини.

Отже, вимірювання концентрації макулатурної пульпи при виробництві паперу, або картону, застосовують у наступних основних випадках:

1. Вимірювання концентрації целюлозної паперової пульпи у ванні гідророзбивача. Необхідне для отримання маси бажаної концентрації перед перемелюванням, та кращого дотримання товщини отриманого паперового полотна.

2. При роботі системи керування розведенням маси високої концентрації обіговою водою та отримання розбавленої пульпи необхідної концентрації, яка подається на виробництво.

3. При роботі системи керування приготуванням та дозуванням розчинів для відбілювання деревної маси.

4. Перед сортувальними машинами, які очищають та готують паперову пульпу.
5. На лініях подачі пульпи у змішувальний басейн.
6. На виході змішувального басейну.
7. На лінії подачі очищеної пульпи після накопичувального бака.

1.2. Методи вимірювання концентрації паперової пульпи та обґрунтування напрямків вдосконалення механічних концентратомірів паперової пульпи

1.2.1. Лабораторні концентратоміри ротаційного типу

Вказані прилади для вимірювання в'язкості використовують конструкцію із вертикально розташованою віссю, до якої приєднаний чутливий елемент у формі диска або конуса (геометрія диск – диск, або конус – диск), циліндра (геометрія циліндр – циліндр), циліндра із рифленою поверхнею, або у формі (vane) ротора з декількома крильцями (крильчатки), у формі лопатки, або у формі прапорця [33]. Для проведення вимірювання чутливий елемент занурюють вертикально у ванну з досліджуваною рідиною, та вимірюють момент сили зсуву, який діє на чутливий елемент при його обертанні у рідині. Залежно від конструкції віскозиметра, вимірюють або кут закручування торсійного елемента, до якого приєднаний чутливий елемент [34, 35], або силу струму, чи потужність, яку споживає двигун віскозиметра при обертанні із заданою частотою [36].

У окремих конструкціях лабораторних вимірювачів в'язкості блок вимірювання моменту сили зсуву виконано нерухомим, а обертається із заданою частотою контейнер із досліджуваною рідиною. Приклад такої конструкції віскозиметра наведено у [37] (рис. 1.4).

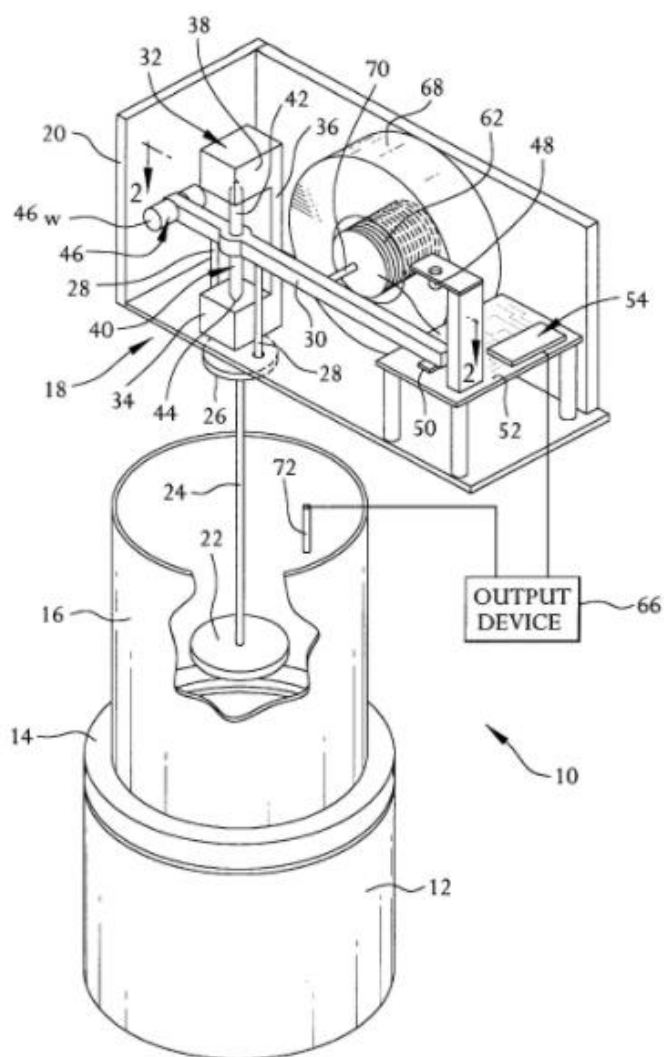


Рис. 1.4. Ізометричний вигляд ротаційного віскозиметра із контейнером для рідини, що обертається [37].

12 – мотор, 14 – поворотна платформа, 16 – контейнер для рідини, 22 – вимірювальний диск, 24 – вісь, 26 – підтримуючий блок, 28 – вісь зміщення, 30 – вимірювальний важіль, 32 – несучий блок, 40 – вертикальна поворотна вісь, 46 – противага, 48 – світлодіод, 50 – фотоприймачі, 54 – вимірювальна схема, 62 – (зрівноважувальна) балансувальна котушка, 66 – вихідний блок, 68 – постійний магніт, 70 – тяга.

Описаний ротаційний віскозиметр містить чутливий елемент у формі диска, розташований у потоці рідини, яка обертається разом із посудиною за допомогою столика із вмонтованим двигуном. Диск зв'язаний за допомогою вимірювальної осі з вимірювальним важелем, змонтованим всередині корпусу. Всередині корпусу

змонтоване також джерело світла, пучок світла від якого попадає на два розташовані поруч приймачі світла. Сигнал на виході приймачів світла визначається кількістю падаючого на них світла. Кінець вимірювального важеля переміщується між джерелом світла та приймачами світла. Повертання вимірювального важеля визначає інтенсивність світла, що попадає на приймачі світла (рис. 1.5).

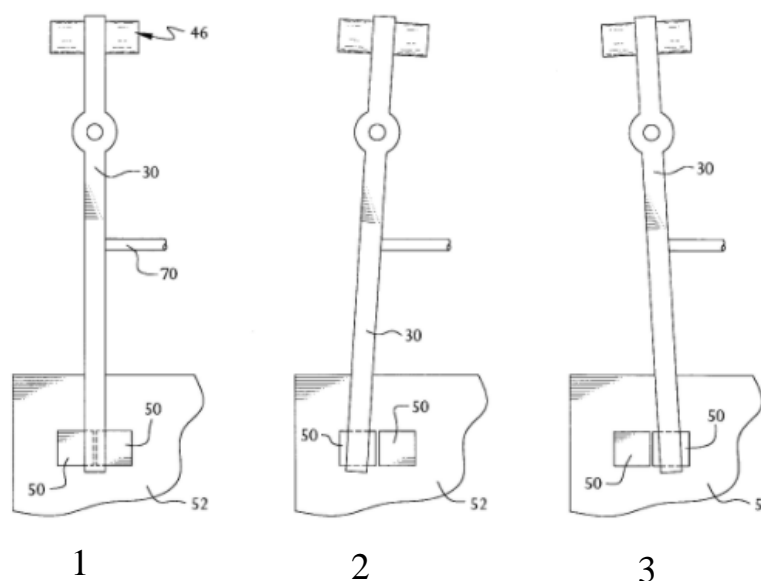


Рис 1.5. Варіанти положень вимірювального важеля [37].

- 1 – вимірювальний важіль у рівноважному (нульовому) положенні (обидва фотоприймачі 50 затінені важелем однаково). 2 – вимірювальний важіль відхилений у перший стан (лівий фотоприймач 50 затінений важелем 30 більше). 3 – вимірювальний важіль відхилений у другий стан (правий фотоприймач 50 затінений важелем 30 більше).

Вихідні сигнали із приймачів світла поступають на процесор обробки сигналів, який на їх основі формує струмовий сигнал на балансувальну котушку, розташовану у полі постійного магніту. Балансувальна котушка за допомогою тяги сполучена із вимірювальним важелем. При протіканні струму через балансувальну котушку вона взаємодіє з магнітом з силою, пропорційною до сили струму, що протікає у котушці, і за допомогою тяги повертає вимірювальне плече у напрямі, протилежному до напрямку його повертання під дією сили в'язкого тертя, яка діє з

боку рідини на вимірювальний диск, та повертає чутливу частину віскозиметра його у початкове (рівноважне) положення.

При цьому вихідний пристрій вимірює силу струму через балансувальну котушку, та обчислює за її значенням в'язкість або концентрацію рідини.

Як підсумок, у згаданій конструкції концентратоміра чутливий елемент у формі диска опускають на вертикальній осі у досліджувану рідину, налиту у циліндричний контейнер, встановлений на платформі, яка обертається за допомогою мотора із постійною швидкістю. Слідкуюча система виявляє поворот осі з чутливим диском під дією сили зсуву з боку рідини, та компенсує його, змінюючи силу струму через балансувальну котушку доти, доки вона не поверне вісь із чутливим диском у початкове (нульове) положення. Сила струму через компенсаційну котушку при поверненні чутливого диска у нульове положення є інформаційним параметром, та служить для визначення в'язкості досліджуваної рідини.

Лабораторні вимірювачі в'язкості, чи концентрації мають високу точність, та не мають проблеми із моментом сил тертя в ущільненні осі чутливого елемента, оскільки вісь занурюється у рідину із повітря, і відповідне ущільнення непотрібне. Проблему зменшення моменту сили тертя у підшипниках можна мінімізувати використовуючи магнітну підвіску ротора вимірювача [34].

Однак, безпосереднє використання таких віскозиметрів при виробництві паперу ускладнює необхідність відбору проб паперової маси із трубопроводу, тривалість процесу фільтрування та висушування взятої проби, та зважування сухого волокна, що обумовлює значну часову затримку між початком циклу вимірювання, та моментом отримання результату та його введенням у автоматизовану систему керування виробничим процесом.


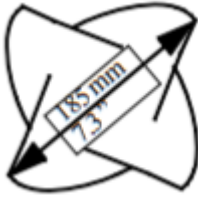

1.2.2. Ротаційні концентратоміри для промислового використання

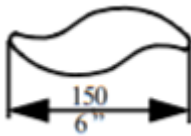

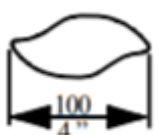



Як у лабораторних ротаційних віскозиметрах, так і в промислових ротаційних віскозиметрах, призначених для встановлення безпосередньо у трубопроводах

паперової маси на виробництві, вимірюють момент сили зсуву, який діє на чутливий елемент у формі диска, чи тіла складнішої форми із віссю симетрії, яке обертається за допомогою осі всередині потоку паперової маси у трубопроводі. Форма та розміри окремих промислових чутливих елементів компанії BTG наведені у таблиці 1.1. [38].

Таблиця 1.1

Форма, розміри, та діапазони вимірювання концентрації паперової маси окремих типів промислових чутливих елементів компанії BTG для концентратомірів JCT-1100 Smart Rotating Consistency Transmitter [38].

Тип сенсора	Характеристики (форма та розміри)	Тип волокон	Діапазон вимірюваних концентрацій, %	
			мін.	макс.
А		Довгі L	0,8	2,5
		Короткі S	0,8	2,5
		Шлам (відходи)	1,5-2	10-15
В		Довгі L	1,0	5,0
		Короткі S	1,0	6,5
С		Довгі L	1,5	8,5
		Короткі S	2,0	10,0

G		Довгі L	5	10
		Короткі S	6	11
H		Довгі L	7	12
		Короткі S	8	13
I		Довгі L	9	14
		Короткі S	10	15
J		Довгі L	11	18
		Короткі S	12	18
K		Довгі L	0,1	1,5
		Короткі S	0,1	2
		Дуже короткі VS	0,1	2,5
L		Довгі L	0,5	2,5
		Короткі S	0,7	3,5

Вимірюють або момент сили зсуву, який діє на чутливий елемент з боку потоку паперової маси при його обертанні з відомою частотою, або потужність, яку споживає електричний двигун, який обертає чутливий елемент віскозиметра із

наперед заданою частотою. Момент сили визначають або вимірюючи кут закручування пружного чутливого торсіону, або зрівноважуючи його за допомогою слідкуючої автоматичної системи, яка повертає чутливий елемент у початкове положення за допомогою магнітоелектричного перетворювача.

Разом із тим, при роботі таких концентратомірів виникають додаткові проблеми: вісь, яка обертає чутливий елемент, мусить проходити через непроникне для паперової маси рухоме ущільнення, виконане переважно у формі еластичної кільцевої прокладки, яке не повинно створювати значного моменту сили тертя на вимірювальній осі. Ущільнення має запобігти проникненню паперової маси під тиском із трубопроводу всередину сухого відсіку корпусу концентратоміра, у якому розташований електричний двигун, необхідний давач величини моменту сили, давач частоти обертання вимірювальної осі, та електронні блоки концентратоміра. Ущільнення повинне забезпечити тривале обертання вимірювальної осі без порушення герметичності та з мінімальним моментом сили тертя. Тому у ряді промислових конструкцій концентратомірів паперової маси ущільнення постійно зволожується та охолоджується за допомогою подавання чистої води під тиском.

Отже, у промислових *in-line* вимірювачах концентрації паперової маси у трубопроводі папероробної лінії, у якому макулатурна маса перебуває під досить значним надлишковим тиском, вісь чутливого елемента (імпелера) пропускають через ущільнення, яке захищає вимірювальний блок віскозиметра від проникнення у нього паперової маси, яка заблокує роботу механічної частини сенсора, та закоротить і виведе з ладу електричну частину [36, 39].

Таке вимушене рішення спричиняє появу додаткового моменту сил тертя M_s , який діє на вал імпелера з боку ущільнення, та додається до вимірюваного значення моменту сили в'язкого тертя, який діє на імпелер з боку досліджуваної рідини. Отже, застосування ущільнення осі імпелера приводить до зміни значення моменту сили, який передається від імпелера за допомогою осі на вимірювальний пристрій, а, отже, спотворює результати вимірювань.

Для виправлення внесеної похибки необхідно усунути вплив моменту сил тертя в ущільненні M_s на результат вимірювання. Цього можна досягнути наступними способами:

1) Використати імпелер достатньо великих розмірів для того, щоб величина моменту сили в'язкого тертя M була набагато більшою, ніж момент сил тертя в ущільненні M_s , і тоді можна було б знехтувати його впливом. Можливості даного способу обмежують реальні діаметри застосовуваних трубопроводів, всередині яких повинен обертатися імпелер.

2) Виміряти експериментально залежність M_s від режиму обертання імпелера, та ввести відповідну поправку при обчисленні значення в'язкості паперової маси. Такий спосіб вимагає інформації про зміни значення M_s залежно від тривалості та режимів експлуатації ущільнення (частота обертання осі, надлишковий тиск, температура, склад паперової маси) та базується на припущенні, що процес зміни моменту сил тертя в ущільненні для всіх однотипних ущільнюючих прокладок буде співпадати.

3) Застосувати ущільнення, яке буде одночасно виконувати роль пружного елемента, і за кутом його закручування під дією моменту сил зсуву, які діють на імпелер, визначати діючий на імпелер момент сили в'язкого тертя M . Проблема полягає у тому, що пружні властивості полімерних ущільнюючих прокладок змінюються з часом у процесі старіння, і, отже, чутливість віскозиметра також буде змінюватися з часом.

4) Застосувати автоматичну слідкуючу систему, котра буде повертати допоміжний трубчастий вал, всередині якого через пружне ущільнення проходить вісь імпелера, щоби підтримувати незакручений стан ущільнення (вісь повертає пружний вимірювач моменту сили, а слідкуюча система повертає їх відносно трубчастої осі так, щоби відновити початкове взаємне розташування осі імпелера відносно трубчастої осі). У цьому випадку пружне ущільнення осі імпелера під час роботи буде постійно перебувати у незакрученому (ненапруженому) стані, а значить, створюватиме нульовий момент сили тертя $M_s = 0$. Тому на

вимірювальний елемент у даному пристрої передається момент сили, рівний моментіві сили в'язкого тертя M [36].

5) Застосувати конструкцію вимірювального вузла, у котрій ущільнення забезпечує герметичне нерухоме з'єднання осі імелера із системою приводу через пружну тонкостінну трубку, кут закручування якої несе інформацію про момент сили в'язкого тертя, що діє на імелер [39, 40]. Вказана конструкція є герметичною і без ущільнюючої прокладки, однак при роботі з паперовою масою проміжок між вимірювальною трубкою та зовнішньою трубкою – привідною віссю – необхідно захистити від дії паперової маси за допомогою кільцевої ущільнюючої прокладки, щоби уникнути відкладення твердих часток та солей, та абразивного впливу макулатурної маси на вимірювальну трубку.

б) Використати конструкцію ротаційного концентратоміра, у якій момент сил тертя в ущільненні осі сенсора мінімізується за шляхом пропускання осі сенсора через отвір корпусу, діаметр якого на десяти міліметра перевищує діаметр осі сенсора. Отже, безпосереднього механічного контакту між віссю та корпусом немає. Для запобігання просочуванню паперової маси із трубопроводу всередину сухого відсіку корпусу через простір між віссю та корпусом концентратоміра всередину останнього подають повітря під тиском, який перевищує тиск паперової маси. Конструкція концентратоміра передбачає наявність автоматизованої системи регулювання тиску повітря всередині сухого корпусу, а також надягнену на вісь концентратоміра еластичну манжету, яка у випадку аварійного припинення постачання стисненого повітря під тиском паперової маси прилягає до полірованої поверхні корпусу, та заблоковує протікання паперової маси з трубопроводу всередину концентратоміра.

Отже, в усіх перерахованих способах, придатних для вимірювання в'язкості паперової маси всередині трубопроводу, застосовують ущільнення чутливої обертової осі за допомогою еластичного полімерного кільця. Тому мінімізація або повне усунення впливу моменту тертя в ущільненні на результат вимірювання

в'язкості паперової маси має важливе значення для підвищення точності вимірювань за допомогою ротаційних віскозиметрів.

В літературі описані ротаційні концентратоміри паперової маси, конструкція яких мінімізує вплив моменту сил в ущільненні осі чутливого елемента на точність вимірювань концентрації паперової маси.

Відомий пристрій з двома моторами для вимірювання моменту сили зсуву у вимірювачах в'язкості, або концентрації рідин або суспензій. [36].

Пристрій придатний для вимірювання моменту сили для вимірювання в'язкості, сили зсуву, чи концентрації рідин або суспензій. Пристрій містить у своєму складі дві пружно з'єднані концентричні осі у вигляді зовнішньої трубчастої осі, всередині якої розташована внутрішня вимірювальна вісь, до лівого кінця якої жорстко прикріплений чутливий елемент, до якого прикладений створений досліджуваною рідиною момент сили зсуву. Кожна із осей приводиться в рух своїм електродвигуном, незалежно від іншої. Обидва двигуни працюють так, що осі обертаються у робочому режимі синхронно, з однаковою швидкістю, при чому контролюється різниця кутів повороту обидвох осей незалежно від частоти обертання та прикладеного до вимірювальної осі моменту сили. Величину прикладеного до вимірювальної (внутрішньої) осі моменту сили визначають за ступенем навантаження двигуна, який обертає внутрішню вісь (за споживаною двигуном потужністю). Споживана двигуном потужність служить інформативним параметром пристрою.

Даний винахід стосується принципу побудови пристрою для вимірювання моменту сили, чи первинного вимірювального перетворювача для вимірювання, наприклад, концентрації паперової маси, в'язкості, вмісту сухої речовини, та реологічних характеристик, який працює на основі принципу рівноваги моментів сил.

Детальний опис винаходу із рисунком та принципом дії наведено нижче.

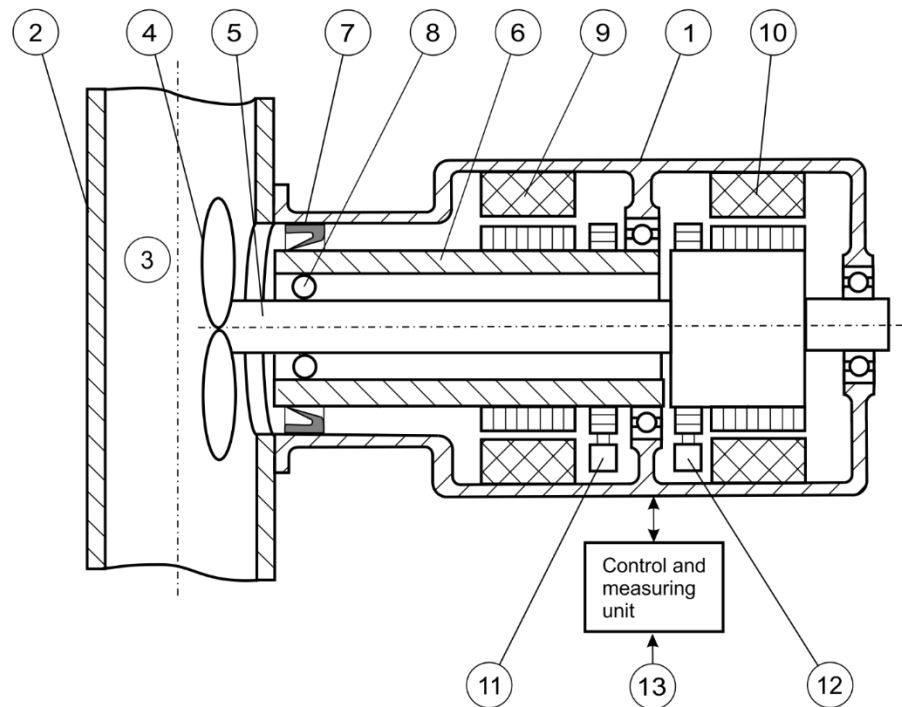


Рис. 1.6. Поперечний переріз пристрою для вимірювання моменту сили з двома електричними моторами [36].

На рис. 1.6. зображено схему перерізу пристрою 1 для вимірювання моменту сили зсуву, що діє на сенсор з боку потоку паперової пульпи, який змонтований на трубопроводі 2, по якому тече досліджувана рідина 3, проходячи біля чутливого елемента 4. Згаданий чутливий елемент 4 зафіксований на вимірювальній осі 5, яка входить у склад коаксіальної двовісної системи, яка окрім вимірювальної осі 5 також включає у себе трубчасту вісь 6, яка ізолює пристрій 1, що вимірює момент сили, від досліджуваного середовища 3 за допомогою ущільнюючої прокладки 7. Пружне з'єднання 8 трубчастої осі 6 та вимірювальної осі 5 дозволяє обидвом осям 5 та 6 повертатися одна відносно одної на деякий кут у випадку зміни моменту сили, з яким діє середовище 3 на чутливий елемент 4.

Обидві осі 5 та 6 обертаються незалежно одна від одної, кожна за допомогою власного електричного двигуна 9 та 10 відповідно. Електричний двигун 9 обертає зовнішню трубчасту вісь 6, а електричний мотор 10 приводить у рух внутрішню вісь, тобто, вимірювальну вісь 5. Одним із електричних моторів 9, або 10, керують так, щоби забезпечити сталу швидкість обертання осі, оптимальну для конкретних

умов вимірювання (властивості рідини та чутливого елемента), тоді, як іншим електричним мотором 10, чи 9, керують так, щоби різниця кутів повороту осей 5 та 6 завжди залишалася сталою, а точніше – щоби відповідала нульовому куту повороту між осями 5 та 6, тобто, положенню, у якому еластичне ущільнення 8 не деформоване, та не створює додаткового моменту сили, прикладеного між осями 5 та 6, і не спотворює значення моменту сили, яка діє на чутливий елемент 4 з боку досліджуваної рідини.

Кут повороту осей 5 та 6 одна відносно одної вимірюється за допомогою чутливих елементів 11 та 12. Наведений варіант здійснення винаходу вимагає, щоби хоч би один із електричних моторів 10 був сконструйований так, щоби він створював постійне, або ж хоч би відоме для даних конкретних умов співвідношення між створюваним моментом сили, та рівнем навантаження, чи споживаною електричною потужністю, з метою їх наступного перетворення у стандартний вихідний сигнал.

Вимірювач концентрації паперової маси дуже подібної конструкції випускає серійно компанія BTG [41]

Ротаційний концентратомір (рис. 1.7) [40] представляє собою модифікацію ротаційного концентратоміра, у якому звичне ущільнення у вигляді кільця еластомеру між вимірювальною віссю та нерухомим корпусом концентратоміра поділене на дві частини. Перша – 21 ущільнює простір між вимірювальною віссю 26 та розташованою симетрично відносно вимірювальної осі трубкоподібною привідною віссю 19, а друга – 22 - між привідною віссю і нерухомим корпусом концентратоміра 13.

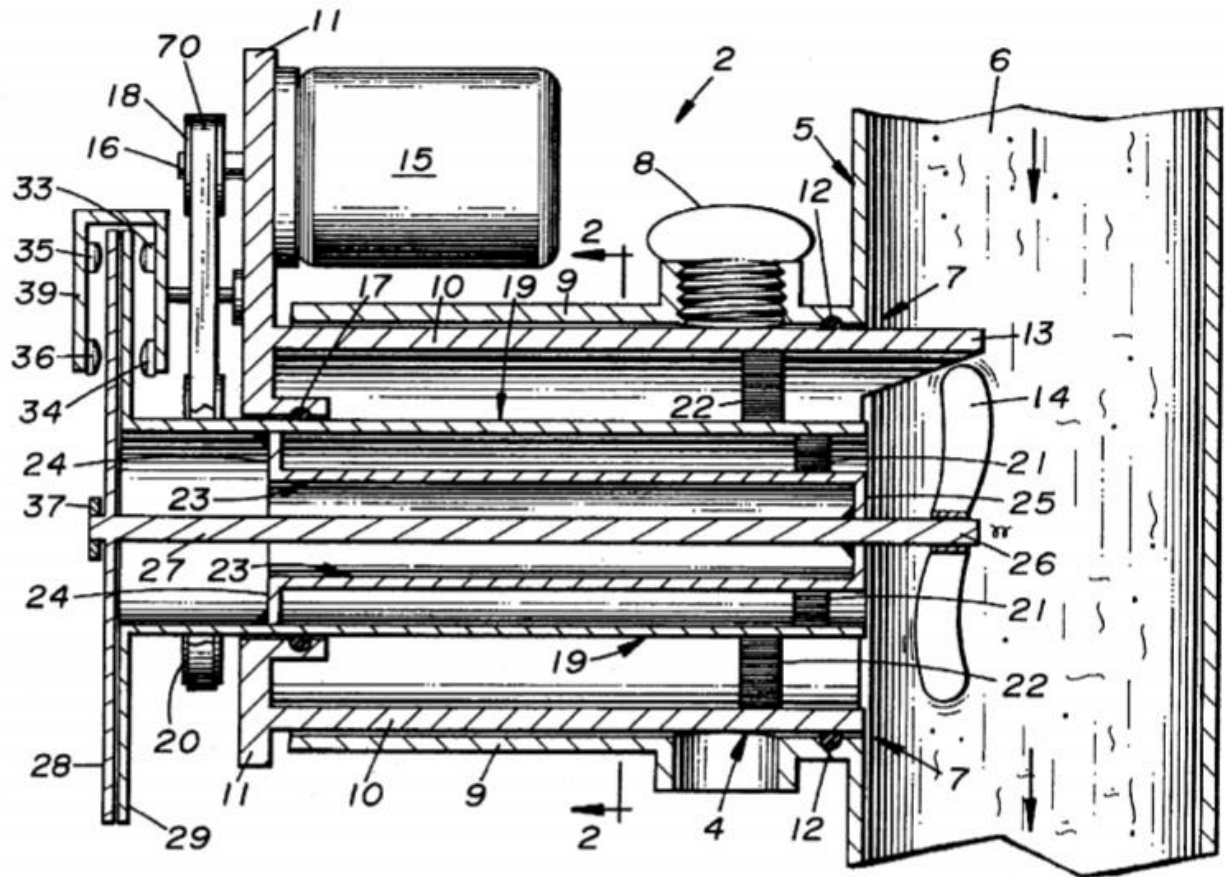


Рис. 1.7. Поперечний переріз ротаційного концентратоміра паперової маси згідно із [40].

Вимірювальна та привідна осі з'єднані між собою за допомогою тонкостінної пружної трубки 23 з фланцями так, що пружна трубка закручується під дією моменту сили зсуву, що діє на сенсор з боку паперової маси на кут, пропорційний до моменту сили зсуву. Дана конструкція має перевагу у тому, що у робочому режимі пружна трубка закручується на кут величиною до кутового градуса, а отже, момент сили, який виникає при цьому у відповідному ущільнюючому кільці 21 є незначним, і не вносить помітних похибок в результати вимірювання. Ущільнення між привідною віссю та корпусом концентратоміра при вимірюванні обертається із постійною швидкістю, і при цьому створює скінченний момент сили тертя, який, однак, не прикладений до вимірювальної осі, та не впливає на результат вимірювання в'язкості. Зауважимо, що запропонована конструкція осі

концентратоміра сама по собі герметична між вимірювальною та привідною віссю, і ущільнення між ними має метою лише запобігти проникненню паперової маси у простір між осями.

Ротаційні концентратоміри паперової маси широко представлені у лінійках промислових концентратомірів різних виробників [41, 42, 43, 44].

Недоліками описаних ротаційних концентратомірів є:

1) наявність більших, чи менших моментів сил тертя M_S , які діють із сторони закрученого ущільнення вимірювальної осі, та алгебраїчно додаються до моменту сили зсуву, що діє на чутливий елемент концентратоміра при його обертанні у досліджуваній рідині, спотворюючи значення моменту, котре передається на вимірювальну частину концентратоміра;

2) наявність моментів сил тертя у підшипниках чутливої осі концентратоміра M_B ;

3) наявність моменту сил зсуву M_V , який виникає за умови розташування осі концентратоміра не у площині симетрії розподілу швидкості течії паперової пульпи у трубопроводі. Такий момент сили виникатиме під час течії паперової пульпи у трубопроводі, а його величина буде залежати від швидкості течії пульпи.

1.2.3. Концентратоміри з лопатками

На відміну від концентратомірів із чутливим елементом, який постійно обертається із сталою швидкістю у потоці хімічно агресивної паперової маси, і потребує ущільнення вимірювальної осі, яка обертається із високою частотою і працює в умовах підвищеного тиску та температури досліджуваної маси, та обертається за допомогою електричного двигуна з потужністю декілька сотень ват, запропоновано як варіант лопаткові концентратоміри паперової маси, у яких ущільнення чутливої осі при інших однакових умовах експлуатації (середовище, тиск, температура), зазнають набагато менших деформацій, а також не вимагають ковзання матеріалу ущільнення по поверхні вимірювальної осі, що різко підвищує тривалість роботи еластичних елементів ущільнень. Конструкція таких

концентратомірів простіша у виготовленні та використовується у випадках, у яких до точності вимірювання концентрації паперової маси ставлять нижчі вимоги, ніж для концентратомірів з сенсорами, які обертаються.

Загалом, вимірювачі концентрації даної конструкції на даний момент ділять на три групи.

До першої відносяться вимірювальні перетворювачі концентрації із статичною (нерухомою, *static blade-type concentration measurement transmitters*) лопаткою. Прийнято вважати, що ці перетворювачі мають гірші характеристики, ніж перетворювачі наступних груп. Однак, у целюлозній промисловості є сфери застосування із різними вимогами до точності вимірювань, відтворюваності результатів, чутливості до низьких температур, та тиску. Тому перетворювачі концентрації з нерухомою лопаткою становлять на ринку відносно велику групу, оскільки вони виконують вимірювання у менш відповідальних місцях, та дешевші порівняно із іншими типами вимірювальних перетворювачів із чутливою лопаткою. На сучасному ринку концентратомірів паперової маси лопаткові концентратоміри випускають близько десяти виробників, зокрема BTG [45], Valmet [46], Metso Automation Inc. [47]. Лопаткові концентратоміри мають меншу ефективність, ніж концентратоміри інших конструкцій. Вони частіше, ніж концентратоміри інших систем, виходять з ладу, що приводить до великих втрат через вимушені зупинки виробничих потужностей. Крім того, згадані концентратоміри мають високу чутливість до тиску, температури, швидкості течії паперової маси, та інших виробничих факторів, що теж є недоліком на виробництві. Прикладом таких концентратомірів може служити [45].

До другої групи належать лопаткові концентратоміри, у яких чутлива лопатка періодично за допомогою магнітоелектричного перетворювача повертається всередині потоку паперової маси на невеликий кут у межах орієнтовно до $\pm 5^\circ$ відносно середнього положення за течією та назустріч течії потоку маси. Площина, у якій повертається лопатка, паралельна до осі труби. Час, за який здійснюється повертання лопатки на попередньо визначений кут, однозначно зв'язаний із

в'язкістю, а отже, і концентрацією паперової маси. Концентратоміри вказаної конструкції самі задають швидкість руху лопатки відносно потоку паперової маси, і, якщо вона більша за швидкість течії рідини, остання майже не впливає на величину моменту сили в'язкого тертя, який діє на лопатку, та на визначене значення концентрації паперової маси. Прикладом таких концентратомірів може служити [47, 48, 49].

У концентратомірах третьої групи теж вимірюється час повертання лопатки у паперовій масі, але лопатка повертається навколо осі, паралельної до напрямку течії паперової маси.

Розглянемо та проаналізуємо типові конструкції таких концентратомірів детальніше.

1.2.3.1. Концентратоміри з нерухомою лопаткою

Типова конструкція концентратоміра з нерухомою лопаткою описана в [50]. Запропонований перетворювач для вимірювання концентрації із статичною (нерухомою) лопаткою, закріпленою всередині потоку досліджуваної рідини на осі, яка передає момент сили зсуву, що діє на лопатку з боку досліджуваної рідини за допомогою осі на вимірювальний перетворювач, розташований всередині герметичного корпусу концентратоміра. Вісь входить всередину корпусу через герметичну прохідну втулку, яка дозволяє повертання осі на деякий кут, що необхідно для вимірювання моменту сили зсуву, що діє на лопатку з боку потоку контрольованої рідини, і не впливає на його значення. У всіх варіантах такого концентратоміра система автоматичного регулювання реагує на повертання важеля лопатки під дією моменту сили в'язкого тертя, який діє на лопатку з боку рідини, та за допомогою магнітоелектричного перетворювача повертає важіль у вихідне положення. При цьому момент сили в'язкого тертя зрівноважується моментом сили, створеним магнітоелектричним перетворювачем, і сила струму через його навитку однозначно пов'язана з концентрацією паперової маси.

1.2.3.2. Концентратомір з нерухомою лопаткою без еластомерного ущільнення

Конструкція типового вимірювача (перетворювача) лопаткового типу з нерухомою лопаткою показана на рис. 1.8 [51]. Занурена у потік рідини лопатка за допомогою конічного з'єднання орієнтується вздовж течії. Інший край конуса вкручений на різьбі у Н – подібний у перерізі ущільнюючий та одночасно деформований при повороті лопатки елемент – його горизонтальна частина служить деформованою діафрагмою. Посередині останньої зроблено циліндричний виступ, у якому і з боку рідини, і з боку вимірювального відсіку є отвори з різьбою, у котру вкручена внутрішня (алюмінієва) частина коромисла.

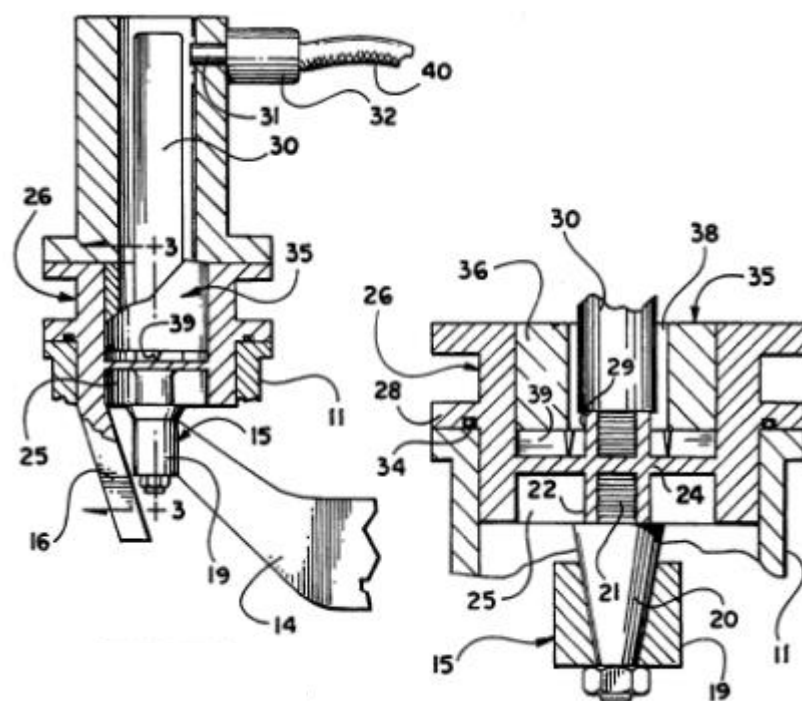


Рис. 1.8. Приклад використання інтегрованої у фланець прохідної втулки з пружною мембраною та з відсутністю наскрізних отворів і герметизуючих еластомерних прокладок при передачі моменту сили зсуву з лопатки на вимірювальну частину концентратоміра [51].

Розміщена на її кінці феромагнітна частина розташована біля циліндричного трансформатора, і служить рухомою частиною його магнітопроводу. Сигнал із вторинної обмотки трансформатора дає інформацію про кут закручування плеча

лопатки потоком контрольованої рідини. Отвори для прикручування плеча лопатки, та внутрішнього плеча до плоскої частини (діафрагми) не є наскрізними, що виключає протікання рідини вздовж плеча лопатки при тривалому використанні сенсора (перетворювача).

1.2.3.3. Концентратоміри з рухомою лопаткою, яка коливається у площині симетрії потоку паперової пульпи

Відомий пристрій для вимірювання концентрації волокнистої суспензії з активною лопаткою, що складається із лопатки із захисним екраном, встановленої у трубі з потоком паперової маси на поворотному важелі, з'єднаному з навиткою магнітоелектричного активатора, з можливістю обертання навколо підшипника, закріпленого на корпусі, та з'єданого із реєстратором повертання лопатки, з можливістю розташування площини лопатки у площині симетрії потоку паперової маси [52].

У пристрої для вимірювання концентрації волокнистої суспензії з активною лопаткою, показаному на рис. 1.9, вимірюється час, на протязі якого важіль підвіски лопатки, приведений у дію магнітною системою, поверне підвішену у потоці волокнистої суспензії лопатку на наперед заданий кут. Час повороту пов'язаний із в'язкістю та концентрацією суспензії, оскільки момент сили в'язкого тертя, який діє на лопатку з боку суспензії у процесі повертання, пропорційний до в'язкості останньої, сповільнює повертання лопатки, та збільшує час повертання лопатки на попередньо встановлений фіксований кут. Повертання важеля відбувається під дією різниці моменту сили зсуву, що діє на лопатку з боку паперової маси, який залежить від швидкості зсуву, та змінюється зі зміною швидкості руху лопатки, і постійного моменту сили з боку магнітоелектричного активатора. Тому рух лопатки у неньютонівській рідині, якою є паперова маса, відбувається зі змінним прискоренням, оскільки в'язкість неньютонівської рідини залежить від швидкості зсуву, чи у кінцевому підсумку від миттєвого значення швидкості руху лопатки. Це ускладнює обробку результатів вимірювання, та знижує точність визначення концентрації паперової маси. Крім того, вимірювання

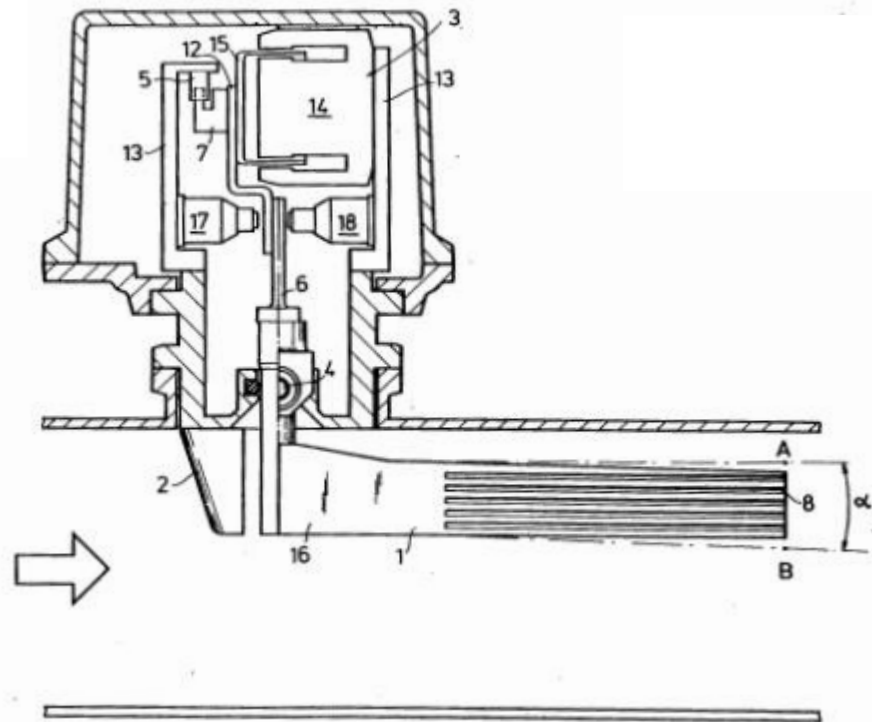


Рис. 1.9. Принципова схема пристрою для вимірювання концентрації паперової маси з компенсацією впливу швидкості потоку паперової пульпи [52]. 1 – трубопровід, в якому протікає паперова пульпа; 2 – захисний екран для захисту лопатки від ударів твердих включень, 3 – рухома лопатка; 4 – корпус приладу; 5 – підшипник, на якому повертається важіль, 6 – важіль, пропущений через герметичне ущільнення з еластомеру у трубопровід, з одного боку на якому закріплена лопатка 3, а з другого – навитка 8 магнітоелектричного активатора; 7 – магнітна система магнітоелектричного активатора; 9 – приймальний перетворювач переміщення важеля; 10 – генератор імпульсів трикутної форми; 11 – диференційний підсилювач; 12 – підсилювач потужності; 13 – опір для вимірювання сили струму через навитку магнітоелектричного активатора; 14 – мікроконтролерна система для обробки інформації і зв'язку з системою відображення результатів вимірювання, та системою керування технологічним процесом.

часу повертання лопатки здійснюється за допомогою жорстко з'єданого із важелем підвіски оптичного переривника, котрий перекриває контрольний пучок

світла на час проходження лопаткою попередньо встановленого кута повертання. Оскільки ширина оптичного переривника в описаному пристрої становить 2 – 3 мм, а ширина оптичного пучка не може бути істотно меншою, ніж 0,1 – 0,2 мм, то у гіршому випадку похибка при вимірюванні часу повороту важеля може наближатися до 5 – 10%. Вказані фактори обмежують точність вимірювання концентрації волокнистої маси даним пристроєм. Крім того, усі описані у доступній літературі промислові лопаткові вимірювачі концентрації із активною (рухомою) лопаткою мають достатньо вузький інтервал допустимих швидкостей течії суспензії, за межами якого вплив швидкості течії на виміряне значення концентрації суспензії стає неприйнятно великим, а точність вимірювань не задовольняє вимог автоматизованого керування виробництвом.

1.2.3.4. Концентратомір із рухомою лопаткою, яка коливається на осі, паралельній до осі потоку паперової пульпи

Концентратомір [53] відноситься до приладів, які вимірюють в'язкість середовища за допомогою лопатки (2), шарнірно (поворотно) закріпленої так, що вона може коливатися між двома боковими стінками (3,4) у зоні проведення вимірювань (рис. 1.10). Лопатка (2) періодично коливається під дією сталої сили, що діє на неї з боку електромагнітної системи (9), та втяжної котушки (20) між двома фіксованими стінками (3,4), розташованими паралельно до площини лопатки. При такому періодичному русі лопатка виштовхує контрольоване середовище, яке стоїть на шляху її руху між нею і стінкою, та одночасно засмоктує його у звільнений за нею простір. При цьому час руху лопатки від крайнього положення А до крайнього положення В, та у зворотному напрямку до положення А - залежить від сили зсуву, яка діє на лопатку при її русі у досліджуваній речовині, а отже, і є функцією в'язкості середовища.

У даному приладі для вимірювання в'язкості запропоновано рішення, які зменшують обмеження та недоліки комерційних вимірювачів (перетворювачів) в'язкості. Запропонований метод дозволяє на відміну від інших успішно

вимірювати в'язкість тиксотропних рідин, завдяки застосуванню мінімального впливу на досліджуване середовище вимірювального перетворювача, який має повторно – короткочасний режим роботи, та є неактивним майже 90% загального часу робочого циклу. Завдяки використанню зворотно-поступального періодично повторюваного руху лопатки, зменшується її дія на досліджувану рідину, і вона має час відновити свої властивості за час між наступними рухами лопатки. Добре відомо, що тиксотропні середовища змінюють свою в'язкість залежно від ступеня механічного впливу на них (перемішування). Повторно-короткочасний режим роботи приводить до того, що вимірювання проводяться репрезентативній пробі середовища, яке завжди перебуває у зоні вимірювання. Перетворювач має широкий діапазон вимірювання в'язкості, який легко змінити зміною розмірів та товщини лопатки, робочого ходу та швидкості лопатки, та сили струму у котушці, яка приводить лопатку в рух. На відміну від ротаційних віскозиметрів, які часто мають складне ущільнення осі, у даній конструкції використовується статичне

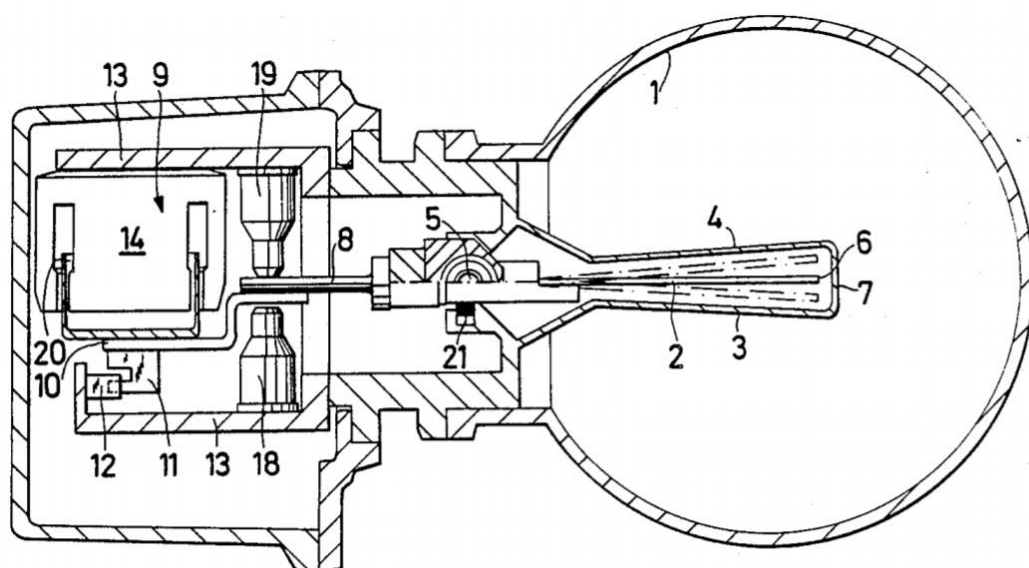


Рис. 1.10. Поперечний переріз віскозиметра, змонтованого на трубі [53].

1 – труба, 2 – лопатка перетворювача, 3 та 4 – обмежуючі стінки, 5 – шарнірна опора кріплення лопатки, 6 – вільний кінець лопатки, 7 – перемичка, 8 – стержень, 14 – магніт, 20 – тягова котушка.

ущільнення у формі еластичного кільця, що є технічно набагато простішим, і особливо важливо при роботі з абразивними та агресивними середовищами. Конструкцію згаданого віскозиметра зображено на рис. 1.10.

Лопатка перетворювача 2 шарнірно закріплена всередині потоку вимірюваної рідини. Лопатка змонтована так, що може повертатися між обмежувачами стінками 3 та 4, які з'єднані перемичкою 7. Силовий привід складається із електромагнітної системи 9 і тягової котушки 20, які забезпечують постійне значення сили, яка періодично прикладається до рухомої лопатки через шарнірно закріплений стержень 8, так, що лопатка 2 повертається відносно шарнірної опори 5. Час, за який вільний кінець лопатки 6 проходить відстань А-В чи В-А вимірюється, залежить від величини сил зсуву між рідиною та лопаткою, і отже, є функцією в'язкості контрольованого середовища. При своєму русі лопатка витісняє досліджувану рідину із простору перед собою (у напрямі руху), та засмоктує рідину у простір між собою та стінкою, від якої вона рухається. Лопатка має плоску поверхню, паралельну до осі обертання. Бокові стінки, які обмежують об'єм вимірювальної зони, паралельні до площини лопатки у положеннях її максимального відхилення. Електромагнітна система 9, яка заставляє лопатку рухатися, утворена магнітом 14 та тяговою котушкою 20. Коли через тягову котушку протікає постійний струм, виникає постійна сила, що повертає лопатку 2 навколо точки підвіски 5. Після сигналу, що поворот лопатки у даному напрямку виконаний повністю, лопатка заданий час залишається нерухомою, після чого напрям струму у котушці змінюється на протилежний, і лопатка повертається у початкове положення, у якому теж зупиняється на протязі заданого часу. Лопатка 2 рухається зі періодичністю від 1 коливання на секунду (1,0 Гц) до одного коливання на 5 секунд (0,2 Гц). Блок електроніки вимірює час повертання лопатки з початкового положення А у протилежне положення В, або із положення В у А за допомогою оптичної відлікової вилки 12, на якій розташовані навпроти один одного інфрачервоний світловипромінюючий діод 16, та фотоприймач 17. У проміжку між ними переміщається заслінка 11, прикріплена до осі 8, на якій

змонтована також вимірювальна лопатка та тягова котушка. Конструкція детально зображена на рис.1.11.

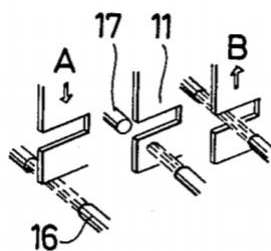


Рис. 1.11. Конструкція оптичного зчитувача інформації про переміщення вимірювальної лопатки [53].

11 – заслінка, 16 – інфрачервоний світло випромінюючий діод, 17 – фотоприймач.

Електронний блок сумує значення тривалості, наприклад, п'яти виконаних підряд коливань, та обчислює середню тривалість одного коливання лопатки. Для кожного наступного коливання із отриманої суми тривалостей попередніх п'яти коливань віднімають тривалість першого із серії п'яти коливань, та додають тривалість нового виміряного коливання. Після цього знову обчислюють середнє значення тривалості одного коливання на основі оновленого списку п'яти останніх значень тривалості коливання лопатки. Так отримують середнє значення тривалості одного коливання лопатки на основі усереднення тривалості останніх п'яти коливань лопатки – після кожного нового робочого ходу лопатки. Система 9 установлена поблизу вільного кінця 10 підвішеної осі 8, і складається із електромагніту 14 у формі соленоїда, змонтованого на корпусі 13 для взаємодії із тяговою котушкою 20, змонтованою на вільному кінці важеля 8 так, що вона може забезпечити коливний рух лопатки 2 із повертанням навколо підвіски 5. Оптична вилка 12 для фіксування моментів завершення руху лопатки у одному напрямку, теж прикріплена до корпусу 13, біля вільного кінця важеля 10. Між віссю обертання 5 та вільним кінцем важеля 10 закріплені механічні обмежувачі 18, 19, які обмежують обертальний рух важеля 8. Проведення повторних вимірювань дає можливість усереднювати час робочого ходу лопатки. Сигнал на виході електронного блоку подається у стандартизованому вигляді, тобто може змінюватися або у межах або 0 - 2.0 мА або 4 - 20 мА.

Вимірювання часу повертання лопатки насправді виконують лише для частини її повороту, заслінка 11, яка перериває пучок світла, має ширину, яка відповідає приблизно 60% повного ходу лопатки. Початкова та завершальна частини повного кута повороту лопатки, таким чином, не враховуються при вимірюваннях. Таким способом, на шляху проведення вимірювань виключаються можливі впливи механічних згинів, та пружної деформації механічних обмежувачів руху лопатки 18 та 19. У пропонуваній конструкції лопатка 2 має довжину, виміряну від осі підвіски 5 близько 100 мм, та ширину 65мм. У околі вузла підвіски 5 важіль 8 проходить через ущільнення за допомогою нерухомого кільця з еластомеру 21 для захисту «сухого» відсіку перетворювача від проникнення контрольованої рідини.

Паперова пульпа містить абразивні та агресивні хімічні компоненти. Для захисту чутливих елементів від корозії та механічного зношування запропоновано наносити на чутливі елементи алмазні [54], керамічні, керметові, та «м'які» покриття [55].

1.2.4. Оптичні, мікрохвильові, та ультразвукові концентратоміри паперової пульпи

Створення світловипромінювальних діодів з високою інтенсивністю свічення дозволило розвинути оптичні сенсори концентрації. Ці засоби вимірювань, що використовують явища розсіювання, або поглинання світла, дозволяють вимірювати концентрації паперової пульпи до 4% [56, 57].

У наш час оптичні концентратоміри випускає ряд провідних спеціалізованих компаній, як для роботи у основних пульпопроводах, [58 - 64], так і для роботи у тонких трубопроводах для контролю внесення необхідних реактивів [65 - 56].

З різними ступенями успіху були випробувані також і інші підходи до вимірювання в'язкості.

Пристрої з реєстрацією ослаблення гама – випромінювання вимірюють консистенцію, користуючись її впливом на густину паперової маси. Сучасні досягнення у технології виготовлення пластикових сцинтиляційних детекторів

різко покращили їх чутливість та стабільність характеристик [68]. Це дуже важливо, оскільки різниця густини води та волокон вимагає саме високої чутливості сенсорів. На жаль, наповнювачі мають велику густину, і якщо вони з'являться у складі пульпи, це буде помилково сприйняте таким сенсором, як вища концентрація паперової пульпи. З іншого боку, поява у пульпі бульбашок повітря зменшить поглинання гама випромінювання, що викличе появу на виході помилкових занижених даних про консистенцію (концентрацію) паперової пульпи. Недоліком таких концентратомірів є постійне гама-випромінювання, та природне зменшення активності радіоактивного джерела з часом.

Мікрохвильові технології вимірювання дають результати вимірювань, незалежні від типу пульпи, довжини волокон, ступеня білизни, кольору, та швидкості потоку пульпи. Найбільш поширені методи вимірювання швидкості поширення хвиль v

$$v = C/\sqrt{\varepsilon}, \quad (1.2)$$

або часу проходження хвиль t через шар паперової пульпи товщиною l між передаючою та приймальною антенами

$$t = l/v = l \cdot \sqrt{\varepsilon}/C, \quad (1.3)$$

які є функціями відносної діелектричної проникності матеріалу ε . (тут літерою C позначена швидкість світла у вакуумі). Через те, що відносна діелектрична проникність води та волокон дерева відрізняються майже у десять разів, швидкість поширення хвиль у пульпі різко залежить від консистенції. Такі мікрохвильові прилади реагують як на волокна, так і на наповнювач, а тому має бути введена компенсація з урахуванням кількості та типу наповнювача. На кінець, даний метод виявляється чутливим до вмісту повітря, провідності, та температури паперової маси, а отже, вимагає додаткового вимірювання цих величин та введення поправок на них.

Розглянемо типові метрологічні характеристики промислових приладів для вимірювання консистенції паперової пульпи. Зокрема, прилади Valmet SP на основі

вимірювання сили зсуву згідно із специфікаціями мають діапазон вимірювання консистенції паперової пульпи до 16% Cs, із чутливістю та повторюваністю 0,005 - 0.01% Cs для консистенції 3% Cs (залежно від складу пульпи та типу чутливого елемента) при швидкості потоку паперової пульпи від 0,5 до 5 м/с [69]. Аналогічні характеристики концентратомірів на основі вимірювання сили зсуву у концентратомірів корпорації BTG [70].

Мікрохвильові прилади із вимірюванням різниці часу проходження хвилею шляху між передаючою та приймальною антенами у чистій воді та у паперовій пульпі [71] міряють консистенцію у діапазоні від 0 до 16% Cs (згідно з [72], 1% Cs = 10 г/літр) та забезпечують відтворюваність результатів вимірювання 0,01% Cs та роздільну здатність від 0,001% Cs для відстані між антенами більшої 80мм, та 0,002% Cs для відстані між антенами меншої 50мм. З метою усунення впливу бульбашок повітря на результати вимірювання консистенції паперової пульпи, останню слід подавати під тиском, вищим 1,5 бар, що приводить до повного розчинення бульбашок повітря у паперовій пульпі.

Концентратомір рекомендовано встановлювати біля виходу відцентрового насоса, завдяки чому мінімізується розшарування пульпи, чи осідання твердого осаду на сенсорі.

Мікрохвильові консистометри паперової пульпи випускає ряд провідних фірм [71, 73, 74, 75].

1.3. Реологічні властивості паперової пульпи та фактори, які впливають на в'язкість

1.3.1. Загальні характеристики поведінки в'язкої рідини

У багатьох використовуваних на практиці для визначення в'язкості речовини пристроях створюють умови, у яких деформація рідини відбувається у одному напрямі, а отже, опис поведінки рідини різко спрощується.

Коли рідина перебуває у спокої, на поверхнях будь-якого об'єму рідини існує лише нормальна складова механічних напруг - гідростатичний тиск p :

$$p = \frac{F_n}{S} \quad (1.4)$$

Тут F_n - сила, що діє перпендикулярно до поверхні рідини, та S – площа поверхні. При русі рідини виникають також механічні напруги, обумовлені силами, котрі спрямовані по дотичній до поверхні (F_t) – дотичні, чи тангенціальні напруги σ , або τ , які характеризують сили внутрішнього тертя [76]:

$$\sigma = \tau = \frac{F_t}{S} \quad (1.5)$$

Розглянемо стаціонарний рух рідини у просторі між двома нескінченними паралельними поверхнями, одна з котрих нерухома, а інша – рухається з постійною швидкістю v у додатному напрямі осі OX . Допускаємо що рідина прилипає до пластин. Тоді швидкість рідини на межі з рухомою пластиною дорівнює v , а на нерухомій – дорівнює нулю. Між пластинами встановлюється ламінарний режим течії з лінійним профілем швидкості, зображеним на рис. 1.12.

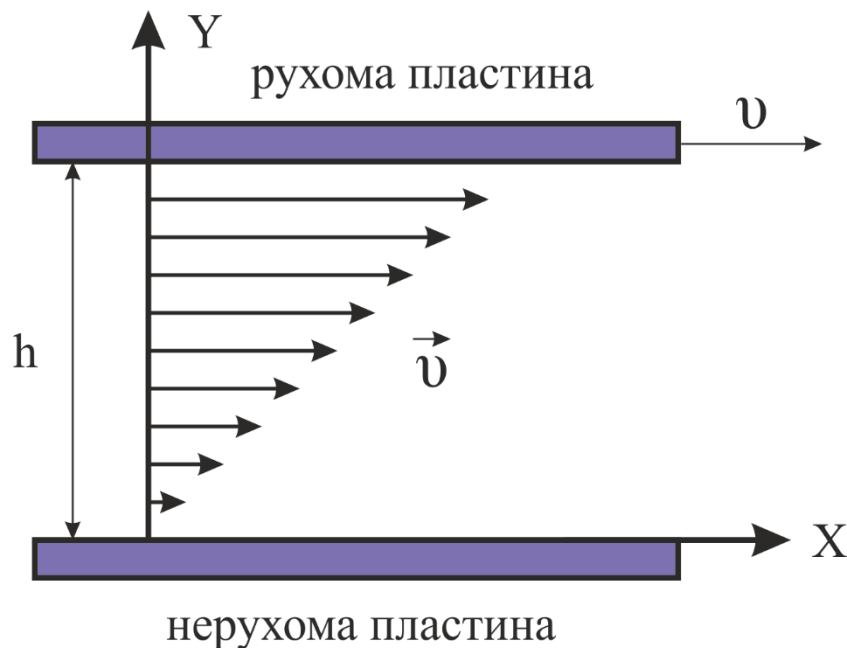


Рис. 1.12. Профіль швидкості ламінарної течії рідини між двома паралельними пластинами.

Рух передається від одного шару рідини до іншого у напрямі, перпендикулярному до напрямку руху, завдяки силам тертя – силам в'язкості.

В описаному випадку для ньютонівських рідин течія описується законом Ньютона

$$\tau = \eta \frac{\partial v_x}{\partial y} = \eta \dot{\gamma} \quad (1.6)$$

Коефіцієнт пропорційності η називається коефіцієнтом в'язкості, або скорочено – в'язкістю рідини, а величина $\dot{\gamma}$

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial v_x}{\partial y} = \frac{v}{h} \quad (1.7)$$

характеризує величину деформації рідини, і називається швидкістю деформації, або швидкістю зсуву. У СІ в'язкість вимірюють у Н·с/м², або Па·с. Швидкість зсуву вимірюють у с⁻¹.

Також використовують коефіцієнт кінематичної в'язкості ν

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1.8)$$

де ρ - густина рідини. Коефіцієнт кінематичної в'язкості ν вимірюють у м²/с. [76].

Рідини, в'язкість яких незалежна від градієнту швидкості течії, називаються ідеально в'язкими або ньютонівськими рідинами. Ньютонівські рідини характеризуються лінійною зміною в'язкості при зміні температур: наявністю лінійної реограми – залежності градієнту швидкості течії рідини від напруження зсуву.

В'язкість неньютонівських рідин залежить від градієнту швидкості течії. рідини та від тривалості дії напруження зсуву.

На в'язкість впливають: природа речовини, швидкість потоку, температура, тиск, рН [77].

1.3.2. Залежність в'язкості від градієнта швидкості течії

Залежно від характеру текучості неньютонівські рідини поділяють на:

- псевдопластичні, які характеризуються зменшенням в'язкості при зростанні напруження зсуву. Приклад: паперова маса.

- пластичні (Бінгама), які характеризуються тим, що при досягненні деякого значення напруження зсуву речовина стає текучою. Приклад: жири, суспензії з високим вмістом твердих частинок.

- дилатантні, які характеризуються підвищенням в'язкості при зростанні градієнту швидкості течії. Приклад: середовища з великим вмістом осідаючих твердих частинок – пульпи;

- тиксотропні – пластичні середовища з структурою, що випрямляється під дією сили зсуву. Приклад: віск, клеї, лаки.

- реопексні, в'язкість яких при постійній силі зсуву з часом зростає.

Залежності градієнту швидкості течії рідини від напруження зсуву для неньютонівських рідин і ньютонівської рідини наведені на рис. 1.13.

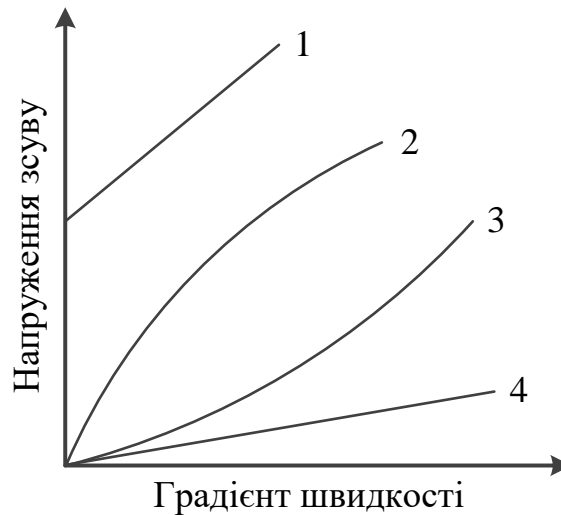


Рис.1.13 Залежності градієнту швидкості течії рідини від напруження зсуву для неньютонівських рідин (1-3) і ньютонівської рідини (4)

1 – пластична (Бінгама) рідина; 2 – псевдопластична рідина; 3 – дилатантна рідина; 4 – ньютонівська рідина;

Паперова пульпа належить до неньютонівських рідин, для яких зв'язок між напругою зсуву $\sigma = \frac{F_t}{S}$ та швидкістю зсуву (градієнтом швидкості течії рідини) $\dot{\gamma} = \frac{dv_x}{dy}$ є нелінійним, та описується степеневим законом Оствальда де Веле [76].

$$\sigma = K(\dot{\gamma})^n, \quad (1.9)$$

де K – коефіцієнт консистенції, n – індекс поведінки течії, значення якого для псевдопластичних рідин, до яких належить макулатурна маса, лежить у межах $0,7 < n < 1$.

1.4. ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Обґрунтовано, що рециклічні технології переробки макулатурної маси є перспективними в Україні.

Контроль концентрації паперової пульпи у паперовій промисловості зменшує собівартість продукції, та підвищує її якість. На даний момент використовують у промислових масштабах механічні концентратоміри (ротаційного та лопаткового типів з вимірюванням в'язкості паперової пульпи), оптичні концентратоміри (із вимірюванням інтенсивності світла, яке проходить через паперову пульпу, або відбивається нею, а також контролюючи зміну поляризації пучка світла при проходженні через потік паперової пульпи), а також мікрохвильові концентратоміри (які вимірюють час проходження мікрохвилями відомої відстані між передаючою та приймальною антенами). Два останні згадані типи концентратомірів працюють переважно із достатньо вузькими пучками випромінювання, аналізуючи концентрацію паперової пульпи в обмеженій частині потоку пульпи.

Оптичні концентратоміри мають наступні недоліки:

1) відчують наявність у паперовій пульпі барвників, клеючих речовин та наповнювачів, вміст яких при додаванні вторинної сировини буде випадковим чином змінюватися з часом;

2) на результати вимірювань буде впливати стан оптичних вікон, через які оптичне випромінювання проникає у потік паперової пульпи, та проходить до приймача світлового випромінювання. Наявність у потоці паперової пульпи твердих включень приведе до виникнення з часом на поверхні оптичних вікон окремих точкових, чи лінійних дефектів, які будуть змінювати площу перерізу

пучка світла, за допомогою якого визначають концентрацію паперової пульпи, а також розсіювати його. Це приведе до необхідності проводити періодичне калібрування концентратоміра, та заміну його оптичних вікон.

3) у випадку осідання включень паперової пульпи на оптичні вікна змінюється площа перерізу пучка світла у паперовій пульпі, що приведе до зміни інтенсивності прийнятого світла, не зв'язаного зі зміною концентрації пульпи.

4) відсутня можливість самоочищення оптичних вікон концентратоміра, які закріплені у потоці пульпи у фіксованому положенні.

5) оптичні концентратоміри працюють із достатньо вузькими пучками випромінювання (порядку сантиметра у перерізі), аналізуючи концентрацію паперової пульпи в обмеженій частині потоку пульпи.

Мікрохвильові концентратоміри використовують радіохвилі сантиметрового діапазону, довжина яких набагато перевищує довжину хвилі світла, та розміри нерівностей (дефектів) на поверхнях діелектричних вікон, через які проходять радіохвилі на шляху від передавальної до приймальної антени. Тому пошкодження поверхні діелектричних вікон, через які випромінюється короткий радіоімпульс у потік паперової пульпи, або повертається до прийомної антени, не буде мати помітного впливу на час проходження хвилями шару паперової пульпи.

Недоліком таких концентратомірів є:

1) залежність швидкості поширення НВЧ хвиль від вмісту та концентрації клеїв, наповнювачів, та барвників, концентрація яких у пульпі при використанні вторинної сировини буде неперервно та непередбачено змінюватися, що повинно впливати на результати вимірювання концентрації паперової пульпи.

2) мікрохвильові концентратоміри працюють із достатньо вузькими пучками випромінювання (порядку сантиметра у перерізі), аналізуючи концентрацію паперової маси в обмеженій частині потоку паперової пульпи.

Тому найбільш придатним для вимірювання концентрації паперової пульпи з домішками барвників, електропровідних солей та твердих дрібнодисперсних абразивних частинок є механічний метод.

Механічний метод передбачає вимірювання моменту сили зсуву, який створює потік паперової пульпи, діючи на статичну чи рухому лопатку лопаткового концентратоміра, або на сенсор ротаційного концентратоміра, та визначення на основі виміряного значення моменту сили за допомогою калібрувальних графіків концентрації паперової пульпи.

При цьому виникає проблема усунення впливу додаткових моментів сил тертя, що діють на вісь чутливого елемента концентратоміра, а саме:

1) моменту сил тертя в герметичному рухомому ущільненні осі, яке захищає сухий відсік концентратоміра від впливу паперової пульпи,

2) моменту сил тертя у підшипниках осі,

3) та у випадку ротаційних концентратомірів – моменту сил тертя, що виникає через несиметричне розташування сенсора відносно площини симетрії профілю розподілу швидкості течії паперової пульпи всередині трубопроводу. Різновиди механічного методу вимірювання концентрації паперової пульпи – ротаційний та лопатковий – потребують вдосконалення з метою покращення метрологічних та експлуатаційних характеристик, та уніфікації градуювальних характеристик.

На основі проведеного аналізу визначено такі задачі дослідження:

вдосконалити вимірювальні прилади для вимірювання концентрації паперової пульпи;

- провести аналіз конструкцій та функціонування концентратомірів паперової пульпи;

- вивчити можливості покращення метрологічних властивостей концентратомірів;

- розробити процедуру проведення вимірювань концентрації паперової пульпи за допомогою ротаційних та лопаткових концентратомірів;
- розробити способи зменшення впливу швидкості течії паперової пульпи у трубопроводі на результат вимірювання її концентрації;
- здійснити математичне моделювання впливу неінформативних параметрів та експериментально перевірити найважливіші висновки з цього моделювання;
- розробити нові вимірювальні схеми ротаційного та лопаткового концентратомірів;
- провести математичне моделювання та експериментальне дослідження вдосконалених концентратомірів;
- провести експериментальні дослідження вдосконалених концентратомірів паперової пульпи.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ РОТАЦІЙНОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ПАПЕРОВОЇ ПУЛЬПИ

2.1. Аналіз впливу неінформативних параметрів на процес вимірювання концентрації паперової пульпи з допомогою ротаційних концентратомірів

2.1.1. Дослідження залежності в'язкості від температури

В'язкість паперової пульпи зменшується із ростом температури. Для опису її температурної залежності можна застосувати рівняння Арреніуса (2.1) [77]:

$$\mu = A \exp(\Delta U / kT), \quad (2.1)$$

прологарифмувавши яке одержимо:

$$\ln \mu = \ln A + \frac{\Delta U}{k} \cdot \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

Тут A – передекспоненційний множник, величина якого мало залежить від напруги зсуву та температури, ΔU – енергія активації в'язкої течії, віднесена до однієї кінетичної одиниці. Вона залежить не тільки від структури системи, але й

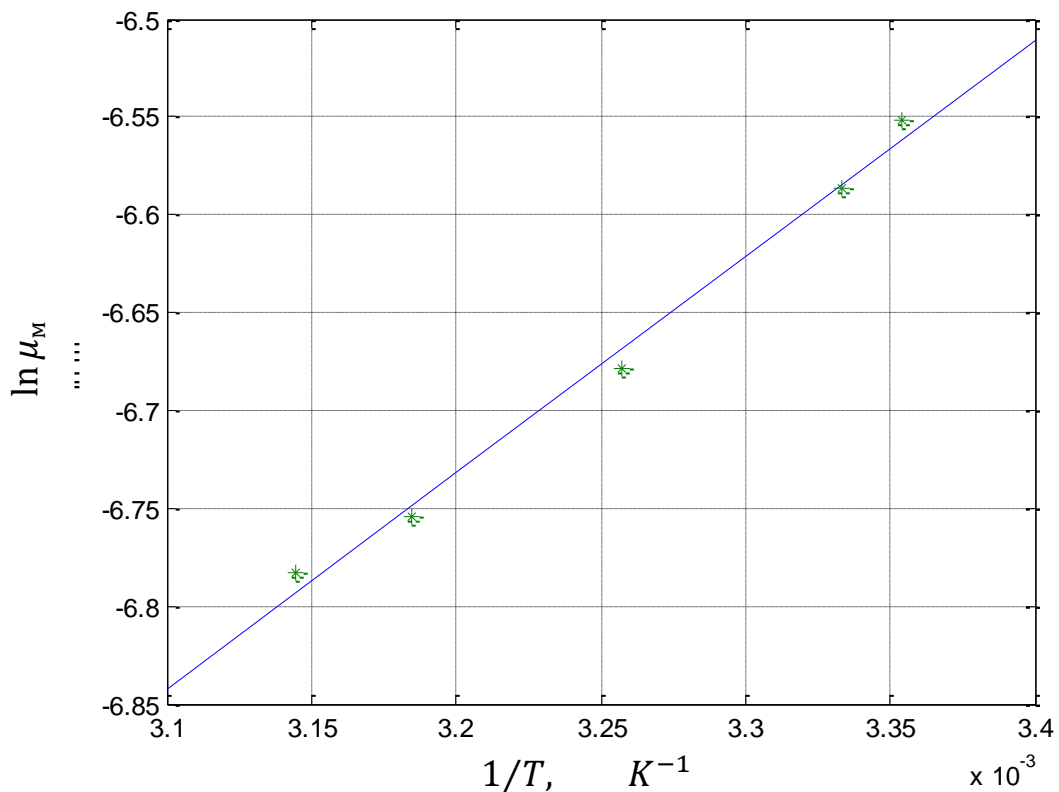


Рис.2.1. Залежність логарифму в'язкості волокнистої суспензії макулатури $\ln \mu_m$ ($C=0,5\%$) від оберненої температури.

від дії напруги і швидкості деформації зсуву. k – стала Больцмана. $k = 1,3806488(13) \times 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$.

В роботі [78] наведені графіки залежності коефіцієнту динамічної в'язкості волокнистих суспензій макулатури і целюлози від температури. За цими даними нами побудовано графіки залежності $\ln \mu$ від $1/T$ (рис. 2.1 та 2.3)

За графіком (рис.2.1.) за величиною тангенса кута нахилу прямої до осі абсцис нами обчислено значення енергії активації в'язкої течії, що віднесене до однієї кінетичної одиниці, для суспензії макулатури

$$\Delta U_M = 1,526 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$$

Логарифм передекспоненційного множника визначають, як відрізок, який графік залежності логарифму в'язкості волокнистої суспензії макулатури від оберненої температури відтинає на осі ординат при $\lim 1/T \rightarrow 0$

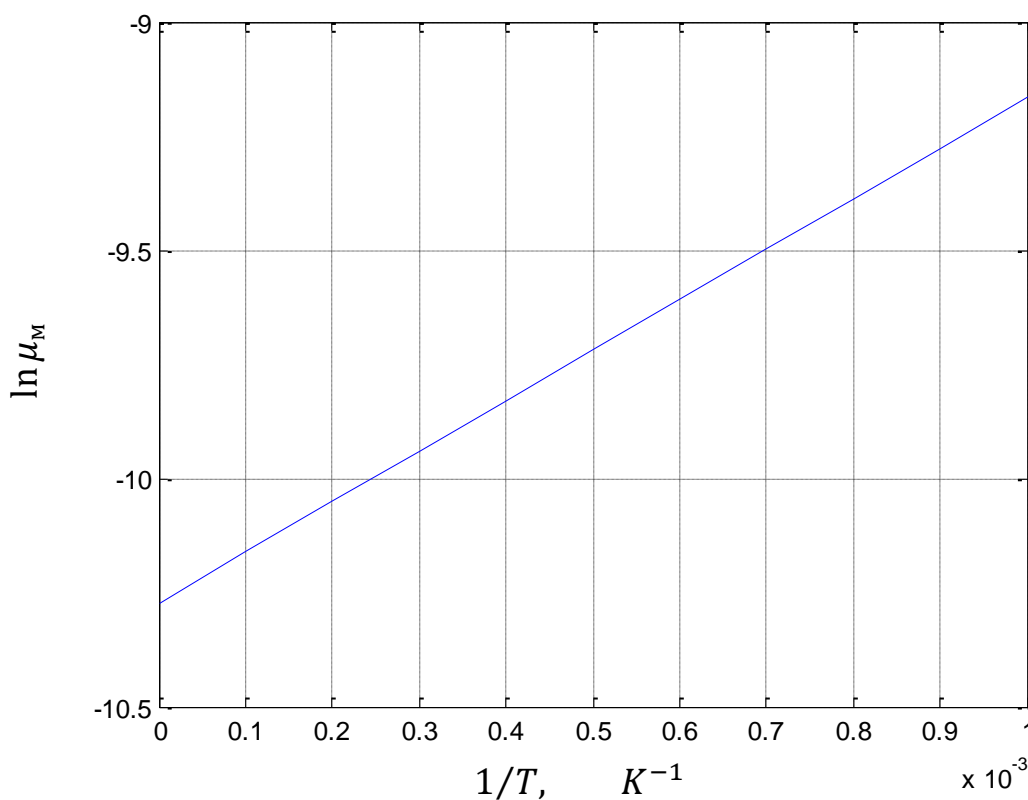


Рис.2.2. Графічне визначення передекспоненційного множника A_M для волокнистої суспензії макулатури.

З рис.2.2. отримуємо, що, $\ln A_M = -10.272$, тоді $A_M = 3,458 \cdot 10^{-5}$ Па · с.

У цьому випадку залежність в'язкості суспензії макулатури від температури матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \mu_M &= 3,458 \cdot 10^{-5} \exp(1,526 \cdot 10^{-20} / (1,380 \cdot 10^{-23} \cdot T)) = \\ &= 3,458 \cdot 10^{-5} \exp(1105,8/T) \text{ Па} \cdot \text{с} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Аналогічний розрахунок проведено для суспензії целюлози.

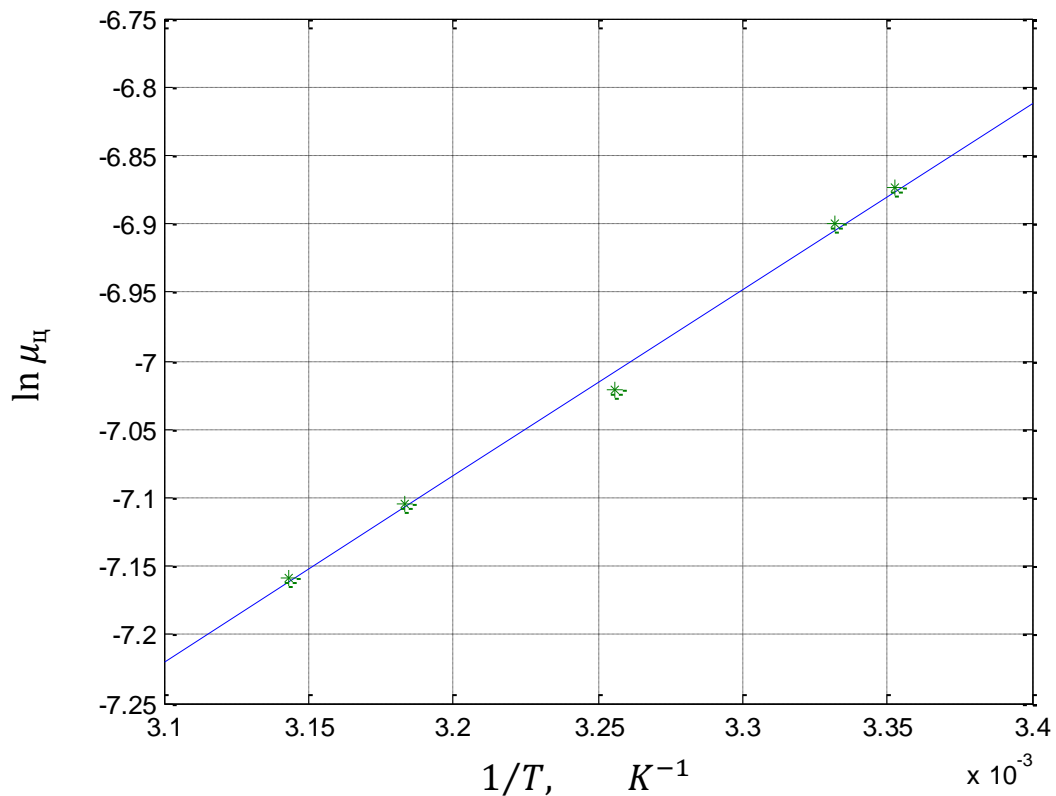


Рис.2.3. Залежність логарифму в'язкості волокнистої суспензії целюлози $\ln \mu_{ц}$ ($C=0,5\%$) від оберненої температури.

Визначене за рис.2.3. значення енергії активації становить

$$\Delta U_{ц} = 1,880 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}$$

На рис.2.4. показано графічне визначення передекспоненційного множника A

$$\ln A_{ц} = -11.443, \quad A_{ц} = 1,071 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$$

Залежність в'язкості суспензії целюлози від температури матиме вигляд:

$$\begin{aligned} \mu_{ц} &= 1,071 \cdot 10^{-5} \exp(1,880 \cdot 10^{-20} / (1,380 \cdot 10^{-23} \cdot T)) = \\ &= 1,071 \cdot 10^{-5} \exp(1362,3/T) \text{ Па} \cdot \text{с} \end{aligned} \quad (2.4)$$

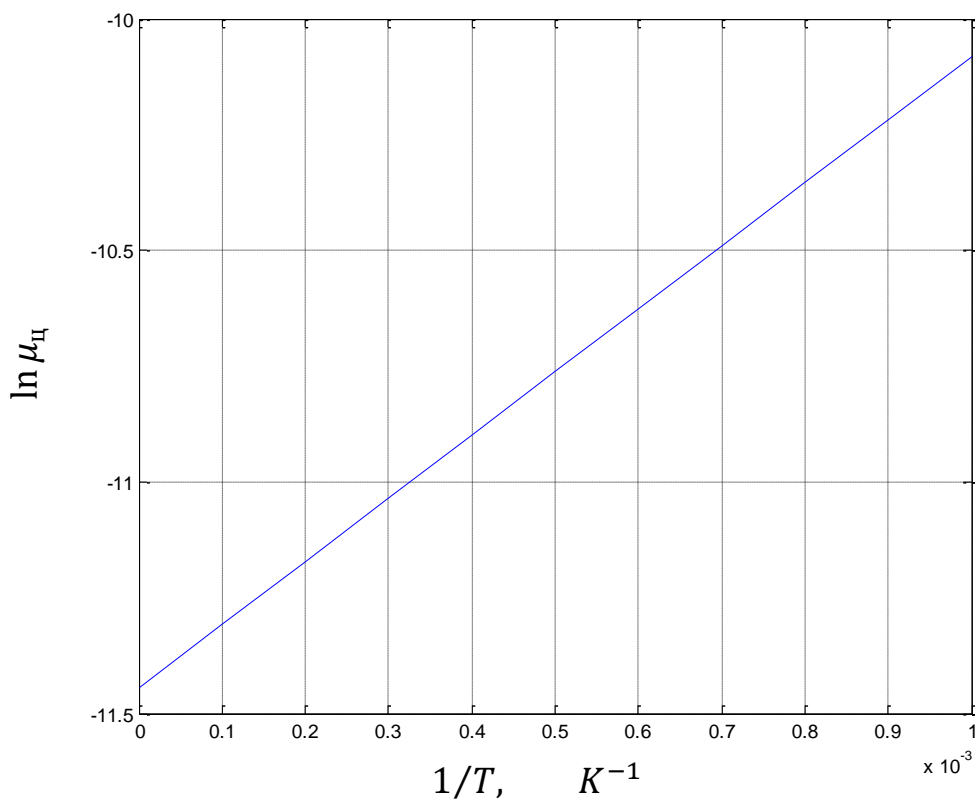


Рис.2.4. Графічне визначення передекспоненційного множника $A_{ц}$ для волокнистої суспензії целюлози. ($C=0,5\%$)

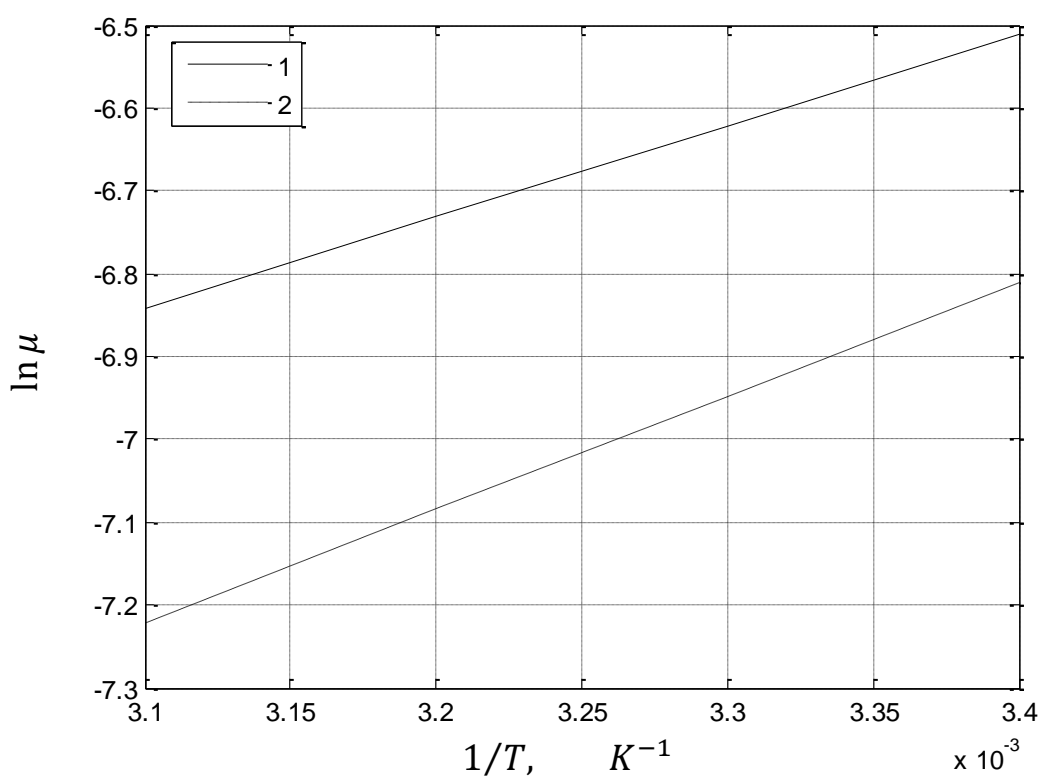


Рис.2.5. Порівняння залежності логарифму в'язкості волокнистої суспензії макулатури (1) та целюлози (2) від оберненої температури.

Отже, вплив температури на величину в'язкості можна врахувати, застосовуючи рівняння (2.1). Величини ΔU і A слід визначати для кожного виду паперової пульпи експериментально.

2.1.2. Оцінка впливу температури на в'язкість паперової пульпи

Розглянемо вплив температури паперової пульпи на її в'язкість. Для цього звернемося до рівняння Арреніуса (2.1) [77] для опису температурної залежності паперової пульпи:

$$\mu = A \exp(\Delta U/kT). \quad (2.1)$$

Продиференціюємо рівняння (2.1) по температурі:

$$\frac{\partial \mu}{\partial T} = A \frac{\partial}{\partial T} \left\{ \exp\left(\frac{\Delta U}{kT}\right) \right\} = A \frac{\Delta U}{k} \exp\left(\frac{\Delta U}{kT}\right) \frac{dT^{-1}}{dT}. \quad (2.5)$$

Звідси

$$\frac{\partial \mu}{\partial T} = A \frac{\Delta U}{k} \exp\left(\frac{\Delta U}{kT}\right) \frac{-1}{T^2} = -\mu \frac{\Delta U}{kT^2}. \quad (2.6)$$

Відносна похибка визначення в'язкості пульпи

$$\delta \mu = \frac{d\mu}{\mu} = - \frac{\Delta U}{kT^2} dT = - \frac{\Delta U}{kT} \frac{dT}{T} = - \frac{\Delta U}{kT} \delta T. \quad (2.7)$$

Тут $\delta T = dT/T$ – відносна зміна температури паперової пульпи (температура у шкалі Кельвіна). Знак мінус значить, що при зростанні температури паперової пульпи її в'язкість зменшується.

Якщо підставити у (2.7) числові значення ΔU для волокнистої суспензії макулатури (1) та целюлози, отримуємо відносну зміну в'язкості паперової пульпи за умови приросту температури на 1 К:

$$\begin{aligned} \delta \mu_m &= - \frac{1,526 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}}{1,380 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 293 \text{ К}} \frac{1 \text{ К}}{293 \text{ К}} = \\ \delta \mu_m &= - 1,288 \frac{\%}{\text{К}} = - 3,774 \delta T. \end{aligned} \quad (2.7.1)$$

Отже, за температури суспензії макулатури 293 К зростання температури на 1 К приводить до зменшення в'язкості суспензії на 1,288 %/К.

Обчислення для волокнистої суспензії целюлози дає наступні результати:

$$\delta\mu_{\text{ц}} = - \frac{1,880 \cdot 10^{-20} \text{ Дж}}{1,380 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \cdot 293\text{К}} \frac{1\text{К}}{293\text{К}} =$$

$$\delta\mu_{\text{ц}} = - 1,587 \frac{\%}{\text{К}} = - 4,650 \delta T .$$
(2.7.2)

Отже, за температури суспензії целюлози 293 К зростання температури на 1 К приводить до зменшення в'язкості суспензії на 1,587 %/К.

На рис. 2.6. наведено результати обчислень температурного ходу в'язкості описаних суспензій при зростанні температури на 5 К з використанням формул (2.3) та (2.4) Отримані результати узгоджуються з результатами обчислень за формулами (2.7.1) та (2.7.2.).

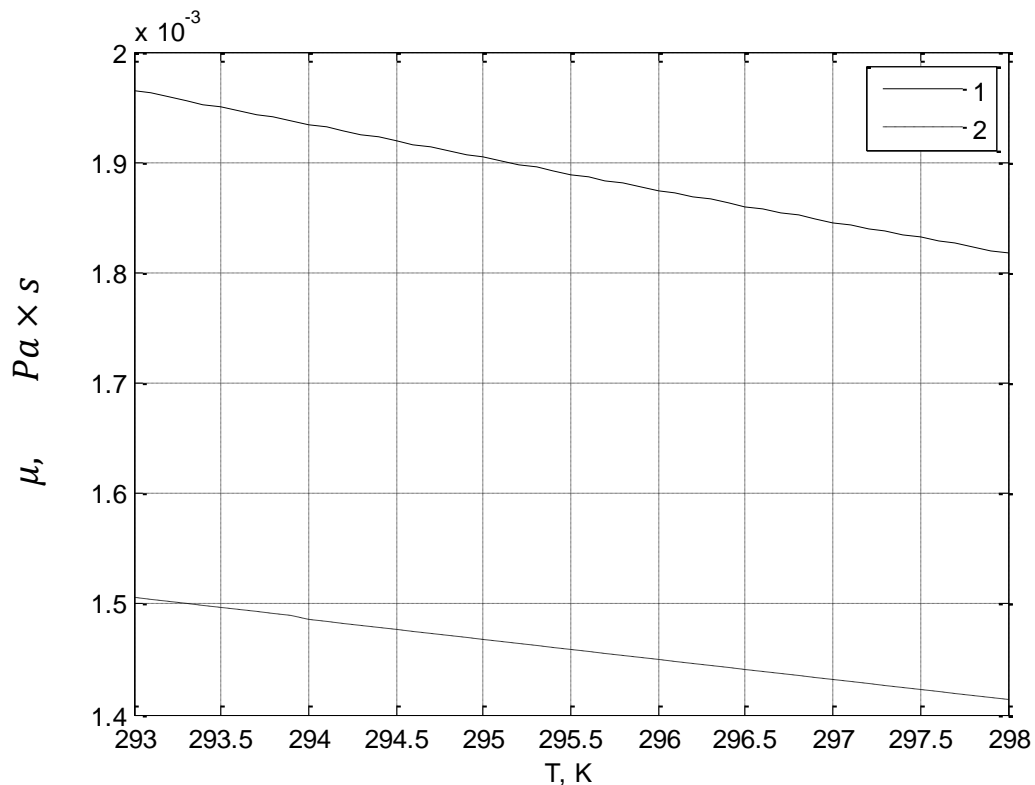


Рис.2.6. Зміна в'язкості волокнистої суспензії макулатури (1) та целюлози (2) при збільшенні температури на 5 К. $\mu, 10^{-3} \text{ Па} \times \text{с}$

Із результатів обчислень бачимо, що автоматичне введення поправки на температуру пульпи у концентратомірах, робота яких ґрунтується на контролі в'язкості пульпи, є обов'язковим, оскільки зміни температури контрольованої пульпи у технологічному процесі може змінюватися у межах 10 – 20 К, що для

розглянутих видів паперової пульпи може викликати похибку вимірювання в'язкості, і далі – концентрації – у межах до 15 – 30%.

2.1.3. Дослідження залежності в'язкості від тиску паперової пульпи

Для дослідження використаємо формулу [79, 80]:

$$\mu_p = \mu_1 \exp[a \cdot (p - p_1)], \quad (2.8)$$

де $\mu_1 = \mu(p_1)$ - в'язкість паперової пульпи при атмосферному тиску $p_1 = 1$ бар, а – п'єзоефіцієнт в'язкості (набуває значень кількох тисячних 1/бар, і помітно зростає із ростом температури).

Перепишемо формулу (2.8) у вигляді

$$\frac{\mu_p}{\mu_1} = \exp[a \cdot (p - p_1)] \quad (2.9)$$

Розглянемо зміну в'язкості $\frac{\mu_p}{\mu_1}$ при зміні тиску суспензії на 2 Бар.

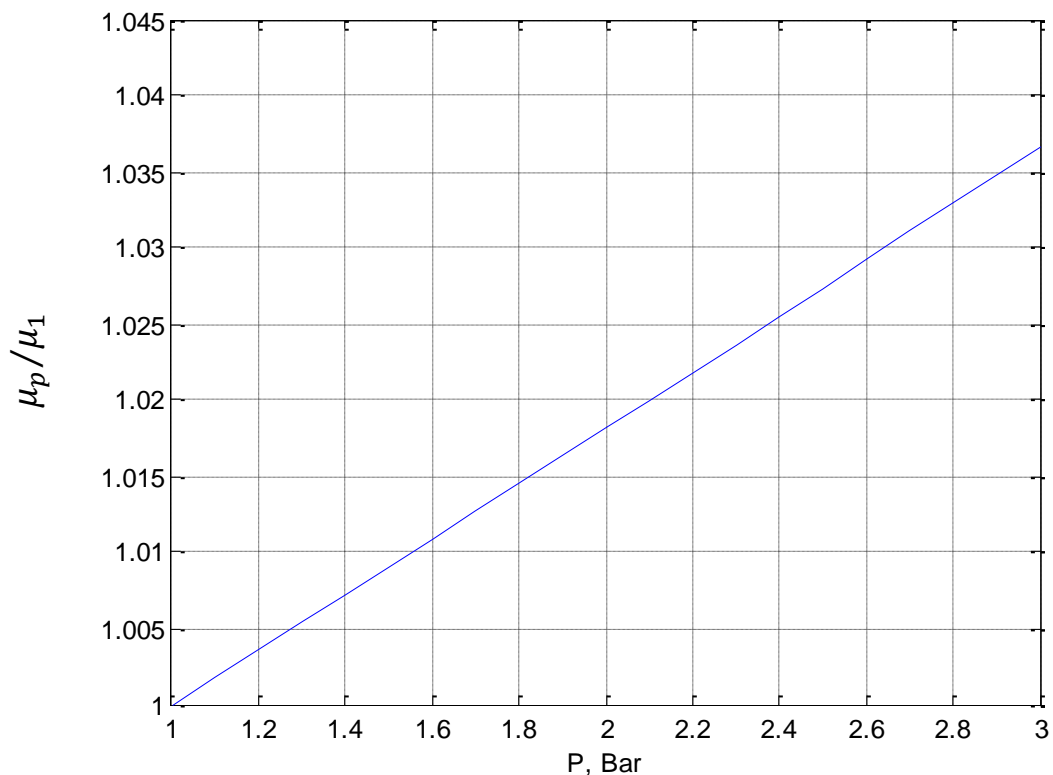


Рис.2.7. Зміна в'язкості волокнистої суспензії при збільшенні тиску на 2 Бар.

Отже, у діапазоні 1-3 бар зростання тиску на 1 Бар приводить до зростання в'язкості паперової пульпи на 1,85%.

2.1.4. Залежність в'язкості від концентрації суспензії

Динамічний коефіцієнт в'язкості розбавлених суспензій μ_c залежить від концентрації твердої фази і може бути розрахований за формулами [81] :

при концентрації твердої фази менше 10% (об'ємних)

$$\mu_c = \mu_p(1 + 2,5\varphi) \quad (2.10)$$

при концентрації твердої фази до 30% (об'ємн.)

$$\mu_c = \mu_p \frac{0,59}{(0,77 - \varphi)^2}, \quad (2.11)$$

де μ_p - динамічний коефіцієнт в'язкості чистої рідини,
 φ - об'ємна частка твердої фази в суспензії.

2.1.5. Фактори, які впливають на в'язкість паперової пульпи

При дослідженні поведінки паперової пульпи встановлено, що цю суспензію не можна розглядати як суцільне середовище, тому що волокна і флокули великі щодо розміру поля течії. Наприклад, типові волокна деревної пульпи являють собою тонкі порожнисті трубочки діаметром 15 – 30 мкм, та довжиною 1 – 3 мм, утворені спіралью скрученими фібрилами целюлози. [82] Разом із тим, розглядають також мікрофібрильовану целюлозу (MFC) із діаметрами частинок 5 – 30 нм і довжиною 100 – 1000 нм, та нанокристалічну целюлозу (NCC) із довжиною частинок 20 – 200 нм. Останні два типи волокнистих частинок попадають у Броунівський діапазон, та ведуть себе, як колоїдні суспензії (у розведених розчинах), або як гелі у концентрованих розчинах. Пристінкові збіднені волокнами шари ускладнюють реологічні виміри [83, 84, 85, 86, 87]

В роботах [82, 88, 89, 90] показано, що в'язкість підвищується з ростом концентрації, причому за низьких концентрацій ця залежність лінійна. а при

концентрації $C > 1\%$ залежність в'язкості від концентрації описується рівнянням $\mu = 1,5 \cdot 10^{-3} C^3$. В'язкість залежить також від довжини волокон та рН суспензії.

На точність вимірювання в'язкості, і пов'язаної з нею концентрації паперової пульпи впливають: тип пульпи (довговолокнуна відбілена маса, коротковолокниста відбілена маса, коротковолокниста невідбілена деревна маса), швидкість потоку пульпи, температура, ступінь помелу, тиск, зольність, рН [102].

2.2. Розробка ротаційного концентратоміра паперової пульпи з покращеними функціональними можливостями

2.2.1. Обґрунтування можливості вимірювання коефіцієнта консистенції K , індексу поведінки течії n , та видимої в'язкості неньютонівської рідини μ ротаційним концентратоміром з двома заданими швидкостями обертання чутливого елемента

Для сумісного вимірювання реологічних характеристик паперової пульпи використаємо як модельний об'єкт концентратомір з паралельними дисками.

Паперова пульпа належить до неньютонівських рідин. Для них зв'язок між напругою зсуву σ та швидкістю зсуву $\dot{\gamma}$ описується степеневим законом Оствальда де Веле (рівняння 1.9) [76]

$$\sigma = K(\dot{\gamma})^n, \quad (1.9)$$

де K – коефіцієнт консистенції, n – індекс поведінки течії.

Згідно з літературними даними [91], найточніші вимірювання в'язкості рідин забезпечує використання віскозиметрів ротаційного типу із чутливими елементами у формі двох паралельних дисків, один з яких – пропелер – обертається, викликаючи обертальний рух рідини, а інший (імпелер) використовується для вимірювання моменту сил в'язкого тертя з боку досліджуваної рідини.

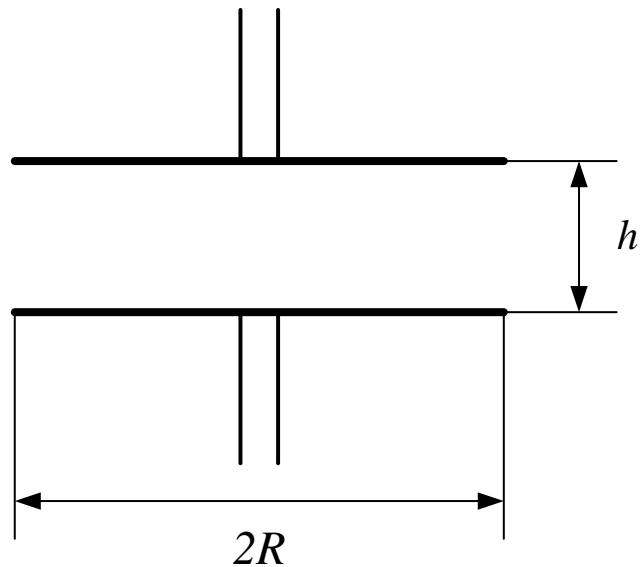


Рис. 2.8. Чутливі елементи консистометра у формі паралельних дисків.

Розглянемо пропелер та імпелер, які мають форму двох паралельних дисків із однаковими радіусами R та відстанню між їх площинами h (рис.2.8).

Відомо, що момент сили в'язкого тертя M , який діє на нерухомий імпелер у формі плоского диска, поруч з яким обертається пропелер у формі плоского диска, у в'язкій неньютонівській рідині, поведінка якої описується степеневим законом, визначається за формулою (2.12) [76]:

$$\frac{M(3+n)}{2\pi R^3} = K \left(\frac{\Omega R}{h} \right)^n = K (\dot{\gamma}_R)^n \quad (2.12)$$

Тут $\Omega = 2\pi f$ – кутова швидкість обертання пропелера, f – частота його обертання, n – індекс поведінки течії, K – сталий множник, який іноді називають в'язкістю, та $\dot{\gamma}_R$ – швидкість зсуву рідини на краю диска (на відстані R від геометричної осі обертання), та h – відстань між площинами дисків.

Зрозуміло, що одночасне визначення двох невідомих величин K та n при проведенні вимірювань у одному режимі неможливе, і для отримання обидвох сталих слід провести вимірювання хоча би у двох різних режимах.

Проведемо вимірювання моменту сил в'язкості при двох різних кутових швидкостях обертання пропелера Ω_1 та Ω_2 . Тоді, використовуючи формулу (2.12), отримаємо рівняння:

$$M_2 \frac{(3+n)}{2\pi R^3} = K \left(\frac{\Omega_2 R}{h} \right)^n \quad (2.13)$$

та

$$M_1 \frac{(3+n)}{2\pi R^3} = K \left(\frac{\Omega_1 R}{h} \right)^n \quad (2.14)$$

Поділивши окремо ліву та праву частини рівняння (2.14) на відповідні частини рівняння (2.13), отримаємо:

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2} \right)^n \quad (2.15)$$

звідки легко отримуємо значення індексу поведінки течії:

$$n = \frac{\ln(M_1/M_2)}{\ln(\Omega_1/\Omega_2)} \quad (2.16)$$

На завершення знаходимо величину K :

$$K = M_1 \cdot \frac{(3+n)}{2\pi R^3} \cdot \left(\frac{h}{\Omega_1 R} \right)^n, \quad (2.17.1)$$

або

$$K = M_2 \cdot \frac{(3+n)}{2\pi R^3} \cdot \left(\frac{h}{\Omega_2 R} \right)^n. \quad (2.17.2)$$

Отже, нами встановлено, що при застосуванні ротаційного концентратоміра з двома заданими швидкостями обертання чутливого елемента Ω_1 та Ω_2 можливо виміряти коефіцієнт консистенції K , індекс поведінки течії n , та видиму в'язкість неньютонівської рідини μ .

Видиму в'язкість (apparent viscosity) неньютонівської рідини знаходимо за формулою [76]:

$$\mu = f(\dot{\gamma}) = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} = K(\dot{\gamma})^{n-1}. \quad (2.18)$$

2.2.2. Зменшення впливу небажаних моментів сил тертя на вимірне значення в'язкості та консистенції паперової пульпи

Розглянемо можливість зменшення впливу небажаних моментів сил тертя в конструкціях ротаційних концентратомірів на вимірне значення в'язкості та визначеної на її основі консистенції паперової пульпи.

Ротаційні консистометри вимірюють момент сили в'язкого тертя, з яким діє на чутливий елемент потік паперової пульпи, та за градувальними залежностями визначають концентрацію паперової пульпи.

Під час передавання вимірюваного моменту сили в'язкого тертя від чутливого елемента до вимірювального перетворювача моменту сили, на вісь ротаційного концентратоміра діють небажані моменти сили:

1. момент сили тертя в рухомому ущільненні осі чутливого елемента M_S ;
2. момент сил тертя у підшипниках осі M_B ;
3. додатковий момент сили в'язкого тертя M_V , який діє на чутливий елемент консистометра внаслідок несиметричності розподілу швидкості течії паперової пульпи відносно осі консистометра.

Для зменшення впливу небажаних моментів сил тертя на вимірне значення реологічних характеристик рідини, у тому числі в'язкості, змінюємо частоту обертання диска так, щоб періодично наближатися до частоти обертання диска $f_{\text{вим.}}$, на якій проводяться вимірювання зі сторони нижчих, та потім зі сторони вищих частот. Позначимо діючі моменти сил: $M_{\uparrow}^{\text{в'язк.}}$ та $M_{\downarrow}^{\text{в'язк.}}$ – момент сил в'язкого тертя, що діє на чутливий диск завдяки обертанню паперової пульпи при наближенні частоти обертання пропелера до частоти вимірювань з області нижчих та вищих частот відповідно, M_S – момент сили тертя в ущільненні осі (*sealing* – ущільнення), M_B – момент сили тертя у підшипниках осі (*bearing* – підшипник), M_V – момент сили тертя, що діє на сенсор через несиметричний розподіл швидкості течії рідини всередині трубопроводу, $M_{T\uparrow}$ та $M_{T\downarrow}$ – момент сили, з яким діє на вісь вимірювальний перетворювач моменту сили при наближенні частоти обертання пропелера до частоти вимірювань з області нижчих та вищих частот.

Для полегшення запису рівнянь приймемо, що чутливий елемент обертається за напрямом обертання годинникової стрілки (додатний напрям, нижній індекс +). Відповідно, прикладений до чутливого елемента момент сили вважаємо додатним

(+), якщо він викликає обертання чутливого елемента за напрямом руху годинникової стрілки, та від'ємним (-), якщо намагається обертати чутливий елемент у протилежному напрямі. Прийmemo також, що момент сили M_V , який діє на чутливий елемент, повертає чутливий елемент у додатному напрямі. У цьому випадку можна записати основне рівняння динаміки обертального руху, якщо частота зростає до обраної (\uparrow):

$$(\uparrow) + \quad M_{\uparrow+}^{\text{в'язк.}} - M_S - M_B + M_V - M_{T\uparrow+} = J\varepsilon \quad (2.19)$$

якщо частота зменшується до обраної (\downarrow), чутливий елемент повертається проти руху годинникової стрілки, і моменти сил тертя в ущільненні його осі M_S , та в її підшипниках M_B будуть заважати такому повертанню, тобто, змінять знак мінус на плюс; знак моменту сили, M_V не змінить свого знаку, бо напрям течії паперової пульпи не змінився:

$$(\downarrow) + \quad + M_{\downarrow+}^{\text{в'язк.}} + M_S + M_B + M_V - M_{T\downarrow+} = J\varepsilon \quad (2.20)$$

Підставимо значення кутового прискорення, рівне нулю $\varepsilon = 0$, яке реалізується, коли частота обертання сенсора стабілізується, тобто стане рівною обраній для вимірювань частоті обертання диска: $f = f_{\text{вим.}}$. Звідси

$$(\uparrow) + \quad + M_{\uparrow+}^{\text{в'язк.}} - M_S - M_B + M_V = M_{T\uparrow+} \quad (2.21)$$

та

$$(\downarrow) + \quad + M_{\downarrow+}^{\text{в'язк.}} + M_S + M_B + M_V = M_{T\downarrow+} \quad (2.22)$$

Додавши окремо ліві та праві частини рівнянь (2.21) і (2.22) та поділивши отриманий результат на 2, отримуємо, що середнє значення моменту сили, виміряне перетворювачем моменту сили, дорівнює середньому значенню моменту сили в'язкого тертя, який діє на сенсор, який обертається у паперовій пульпі внаслідок обертання, плюс значення моменту сили M_V , який виникає через асиметрію потоку пульпи біля сенсора концентратоміра:

$$M_{T.\text{сер.}+} = \frac{M_{T\uparrow+} + M_{T\downarrow+}}{2}, \quad (2.23)$$

або

$$M_{T, \text{сер.}+} = \frac{M_{\uparrow+}^{\text{ВЯЗК.}} + M_{\downarrow+}^{\text{ВЯЗК.}} + 2M_V}{2}$$

Отже, використання періодично змінюваної частоти обертання сенсора, із наближенням до робочої частоти проведення вимірювань почергово то з області нижчих частот, то з області вищих частот, із усередненням результату вимірювання моменту сили вимірювальним перетворювачем моменту сили, дозволяє усунути вплив небажаних моментів сил тертя в ущільненні осі M_S та у підшипниках M_B на результат вимірювання в'язкості та концентрації паперової пульпи, але не дозволяє усунути впливу асиметрії розподілу швидкості течії паперової пульпи поблизу чутливого елемента концентратоміра, та усунути вплив зумовленого ним моменту сил M_V .

2.2.3. Вдосконалення робочого циклу концентратоміра шляхом почергової зміни напрямку обертання чутливих елементів

Тепер розглянемо аналогічні рівняння у випадку, що обертання пропелера (диска, який збуджує обертання паперової пульпи між дисками концентратоміра) у напрямі, протилежному до напрямку руху годинникової стрілки (позначимо відповідні моменти сил нижнім індексом $-$). Використаємо попередній підхід до вибору знаків моментів сили. Легко переконатися, що у цьому випадку знаки усіх моментів сил, окрім M_V зміняться на протилежні. Знак M_V залишається попереднім, оскільки напрям течії пульпи у трубопроводі не змінився. Тому після проведення усіх використаних вище перетворень, отримаємо, що при зміні напрямку обертання пропелера на протилежний (нижній індекс $-$)

$$(\uparrow) - \quad - M_{\uparrow-}^{\text{ВЯЗК.}} + M_S + M_B + M_V = - M_{T\uparrow-} \quad (2.24)$$

та

$$(\downarrow) - \quad - M_{\downarrow-}^{\text{ВЯЗК.}} - M_S - M_B + M_V = - M_{T\downarrow-} \quad (2.25)$$

Додавши окремо ліві та праві частини рівнянь (2.24) і (2.25), та поділивши результат на 2, отримуємо, що середнє значення моменту сили, виміряне перетворювачем моменту сили, дорівнює середньому значенню моменту сили

в'язкого тертя, який діє на сенсор, що обертається у паперовій пульпі, мінус значення моменту сили M_V , який виникає через асиметрію потоку пульпи біля сенсора концентратоміра:

$$M_{T.сер.-} = \frac{M_{T\uparrow-} + M_{T\downarrow-}}{2},$$

або

$$M_{T.сер.-} = \frac{M_{\uparrow-}^{ВЯЗК.} + M_{\downarrow-}^{ВЯЗК.} - 2M_V}{2}$$
(2.26)

Тепер знайдемо середнє значення моментів закручування торсіона чутливого елемента при наближенні частоти обертання пропелера до робочої знизу та зверху при обертанні пропелера у напрямі руху годинникової стрілки (+) та у протилежному напрямі (-):

$$M_{T.сер.} = \frac{M_{T\uparrow+} + M_{T\downarrow+} + M_{T\uparrow-} + M_{T\downarrow-}}{4}. \quad (2.27)$$

Після перетворень отримаємо:

$$M_{T.сер.} = \frac{1}{2}M_{T.сер.+} + \frac{1}{2}M_{T.сер.-} \quad (2.28)$$

Підставивши вирази $M_{T.сер.+}$ (2.23), та $M_{T.сер.-}$ (2.26), отримуємо

$$M_{T.сер.} = \frac{1}{2} \frac{M_{\uparrow+}^{ВЯЗК.} + M_{\downarrow+}^{ВЯЗК.} + 2M_V}{2} +$$

$$+ \frac{1}{2} \frac{M_{\uparrow-}^{ВЯЗК.} + M_{\downarrow-}^{ВЯЗК.} - 2M_V}{2}. \quad (2.29)$$

Доданки із $2M_V$ та $-2M_V$ скорочуються, і отримуємо:

$$M_{T.сер.} = \frac{M_{\uparrow+}^{ВЯЗК.} + M_{\downarrow+}^{ВЯЗК.} + M_{\uparrow-}^{ВЯЗК.} + M_{\downarrow-}^{ВЯЗК.}}{4}. \quad (2.30)$$

Отже, при усередненні абсолютних значень моментів сили, які діють на чутливий елемент концентратоміра при наближенні частоти обертання пропелера до попередньо обраної для проведення вимірювань частоти обертання пропелера з боку вищих та нижчих частот при обертанні пропелера по черзі у прямому та зворотному напрямках відбувається компенсація моментів сил тертя в ущільненні

осі чутливого елемента M_S , підшипниках осі чутливого елемента M_B , та моменту сили, який діє на чутливий елемент концентратоміра внаслідок несиметричного розподілу швидкості течії у околі чутливого елемента концентратоміра M_V , та усувається їх вплив на результати вимірювання в'язкості та концентрації паперової пульпи.

2.2.4. Дослідження ротаційного концентратоміра паперової пульпи та його вдосконалення

2.2.4.1. Модель ротаційного концентратоміра

Для визначення коефіцієнту консистенції K ; індексу течії n , та ефективної в'язкості μ слід провести вимірювання щонайменше у двох різних режимах.

За літературними даними [74], найточніші вимірювання в'язкості рідин у промислових умовах забезпечуються при використанні ротаційних віскозиметрів із чутливими елементами у формі двох паралельних дисків; один з яких – пропелер – обертається. Однак ця конструкція непридатна для паперової пульпи, оскільки віддаль між дисками для вимірювання моменту в'язкого тертя має бути малою (до 1–2 мм), і цей проміжок заб'ється волокнами паперової пульпи. Тому для паперової пульпи найчастіше застосовують один дископодібний чутливий елемент або ротор з лопатками різної форми, який захоплює паперову пульпу і по поверхні такого плоского або об'ємного ядра, яке обертається, формується шар, в якому виникає в'язке тертя. Обтічна форма і відсутність вузьких проміжків робить такі конструкції чутливих елементів придатними для вимірювання в рідинах з включеннями волокон.

Розглянемо чутливий елемент концентратоміра паперової пульпи, який має форму диска з радіусом R , на поверхні якого виникає шар з в'язким тертям з середньою товщиною h (рис. 2.9).

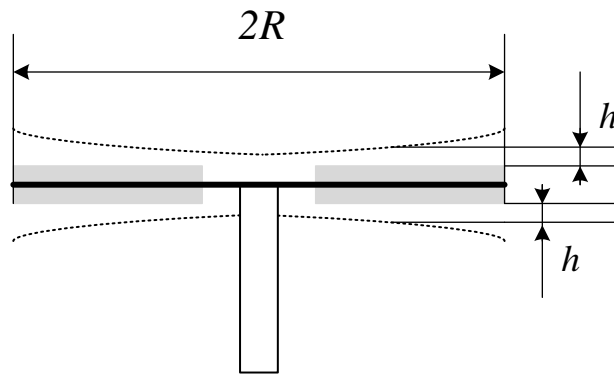


Рис. 2.9. Чутливий елемент концентратоміра у формі диска з радіусом R , на поверхні якого виникає шар з в'язким тертям з середньою товщиною h

Використаємо залежність для визначення моменту сили в'язкого тертя для двох дисків у в'язкому середовищі (формула 2.12 [76]). Врахувавши, що при обертанні чутливого елемента у формі диска у потоці паперової пульпи, сила в'язкого тертя діє на обидві його плоскі поверхні, та підставивши усереднене (ефективне) значення товщини шару паперової пульпи із в'язким тертям h , отримаємо вираз:

$$\frac{M(3+n)}{4\pi R^3} = K \left(\frac{\Omega R}{h} \right)^n = K (\dot{\gamma}_R)^n \quad (2.31)$$

Тут M – момент сили в'язкого тертя, який діє на плоский диск, який обертається у в'язкій неньютонівській рідині, поведінка якої описується степеневим законом, $\Omega = 2\pi f$ – кутова швидкість обертання диска, f – частота його обертання, n – індекс течії, K – коефіцієнт консистенції та $\dot{\gamma}_R$ – швидкість зсуву рідини на ободі диска (на відстані R від геометричної осі обертання). Усереднене (ефективне) значення товщини шару паперової пульпи із в'язким тертям h можна визначити експериментально.

При роботі віскозиметрів ротаційного типу вимірюють момент сили в'язкого тертя M , який виникає між рухомим та нерухомим шарами досліджуваної рідини, причому рухомий шар безпосередньо захоплюється і рухається синхронно з чутливим елементом дископодібної форми, що обертається у об'ємі досліджуваної в'язкої рідини з відомою частотою f . Для усунення впливу розшарування паперової пульпи на поверхні чутливого елемента на ньому роблять виступи або в

нашому випадку радіальні ребра. Товщина чутливого елемента з ребрами разом з товщиною двох шарів паперової пульпи, в яких проходить в'язке тертя, стає значною (до 10-15 мм). При опрацюванні вимірюваного значення моменту сили в'язкого тертя, що діє на сенсор з боку паперової пульпи, використовуємо формулу (2.31) і не враховуємо в'язке тертя по ободу чутливого елемента.

Крім моменту сил в'язкого тертя, на вісь чутливого елемента діють також момент сил тертя у підшипниках M_B та момент сил тертя в ущільненні осі M_S , яке захищає вимірювальний блок віскозиметра від проникнення у нього досліджуваної рідини. Ці моменти додаються до вимірюваного моменту сил в'язкості M та спотворюють його значення. Тому виникає проблема зменшення або усунення впливу згаданих моментів сил на результати вимірювання в'язкості досліджуваної рідини. Розглянемо нижче це детальніше.

В приладах лабораторного призначення найчастіше відсутнє ущільнення осі чутливого елемента, оскільки закріплений на осі чутливий елемент занурений у досліджувану рідину зверху. Вісь, на якій обертається чутливий елемент, просто виходить з поверхні рідини у повітря. Досліджувана рідина перебуває у відкритій комірці віскозиметра під атмосферним тиском і утримується від потрапляння у вимірювальний блок віскозиметра силою тяжіння [34].

Тому проблема усунення моменту сил тертя M_S в ущільненні осі чутливого елемента в таких конструкціях не виникає.

Такий вимірювач в'язкості непридатний для роботи безпосередньо у трубопроводі папероробної лінії, у якому паперова пульпа перебуває під досить значним надлишковим тиском. У цьому випадку необхідно пропустити вісь чутливого елемента через ущільнення, яке захистить вимірювальний блок віскозиметра від проникнення у нього паперової пульпи [39].

Таке вимушене рішення спричиняє появу додаткового моменту сил тертя M_S , який діє на вал чутливого елемента з боку ущільнення, та додається до вимірюваного значення моменту сили в'язкого тертя, який діє на чутливий елемент з боку досліджуваної рідини. Отже, застосування ущільнення осі чутливого елемента призводить до зміни значення моменту сили, який передається від

чутливого елемента на вимірювальний перетворювач моменту сили, і спотворює результати вимірювань.

Для зменшення цієї похибки необхідно усунути вплив моменту сил тертя в ущільненні M_S на результат вимірювання. Цього можна досягнути такими способами:

1) Застосувати чутливий елемент достатньо великих розмірів для того, щоб величина моменту сил и в'язкого тертя M була набагато більшою, ніж момент сил тертя в ущільненні M_S . Тоді можна було б знехтувати його впливом. Можливості даного способу обмежують реальні діаметри трубопроводів для подачі паперової пульпи, на яких має встановлюватися прилад.

2) Виміряти експериментально залежність M_S від режиму обертання чутливого елемента та ввести відповідну поправку при обчисленні значення в'язкості паперової пульпи. Такий спосіб також потребує інформації про зміни значення M_S залежно від тривалості та режимів експлуатації ущільнення.

3) Застосувати ущільнення, яке буде одночасно виконувати роль пружного елемента, і за кутом закручування якого вимірювати діючий на чутливий елемент момент сили в'язкого тертя M . Проблема полягає у тому, що пружні властивості малих ущільнюючих торсіонів у вигляді поздовжньо гофрованої тонкостінної трубки і полімерних ущільнень для їх захисту від забивання змінюються з часом у процесі роботи і функція перетворення приладу також буде змінюватися з часом.

4) Застосувати автоматичну слідкуючу систему, котра буде обертати допоміжний трубчастий вал, всередині якого через еластичне ущільнення проходить вісь чутливого елемента, з такою самою кутовою швидкістю. Ущільнення валу чутливого елемента при цьому буде весь час в незакрученому стані, а споживана потужність сервоприводу чутливого елемента буде пропорційна до моменту в'язкого тертя M [36].

5) Застосувати конструкцію вимірювального вузла, у котрій ущільнення забезпечує герметичне нерухоме з'єднання чутливого елемента із системою приводу через пружну тонкостінну трубку, кут закручування якої несе інформацію про момент сили в'язкого тертя, що діє на чутливий елемент [40].

Вказана конструкція є герметичною без ущільнюючої прокладки, однак при роботі з паперовою пульпою проміжок між вимірювальною трубкою та зовнішньою трубкою – корпусом чутливого елемента необхідно захистити від попадання паперової пульпи за допомогою кільцевої ущільнюючої прокладки, щоби уникнути відкладення волокон пульпи, твердих часток та солей.

Отже, в усіх перерахованих способах, придатних для вимірювання в'язкості паперової пульпи всередині трубопроводу, застосовують ущільнення осі чутливого елемента за допомогою еластичного полімерного кільця, торсійні ущільнення на основі тонкої поздовжньо гофрованої трубки, підшипники для кріплення осі чутливого елемента. Тому мінімізація або усунення впливу моменту тертя в перерахованих елементах на результат вимірювання в'язкості паперової пульпи має важливе значення для підвищення точності вимірювань за допомогою ротаційних віскозиметрів.

2.2.4.2. Вдосконалення конструкції вимірювальної установки

Досліджувався прилад для вимірювання концентрації паперової пульпи за в'язкістю, який реалізує ротаційний метод з обертовим елементом дископодібної і симетричної відносно напрямку обертання форми (рис. 2.10) [22]. Основна порожниста вісь за допомогою двигуна, що живиться від частотного перетворювача, обертається із попередньо заданою частотою, і зумовлює обертальний рух паперової пульпи. В ній розміщена ще одна вісь, на якій закріплений чутливий елемент дископодібної форми. На чутливий елемент при обертанні в паперовій пульпі діє момент сил в'язкого тертя, котрий закручує зв'язаний з цим чутливим елементом пружний торсійний елемент на кут φ . Величина кута несе інформацію про в'язкість і пов'язану з нею концентрацію паперової пульпи.

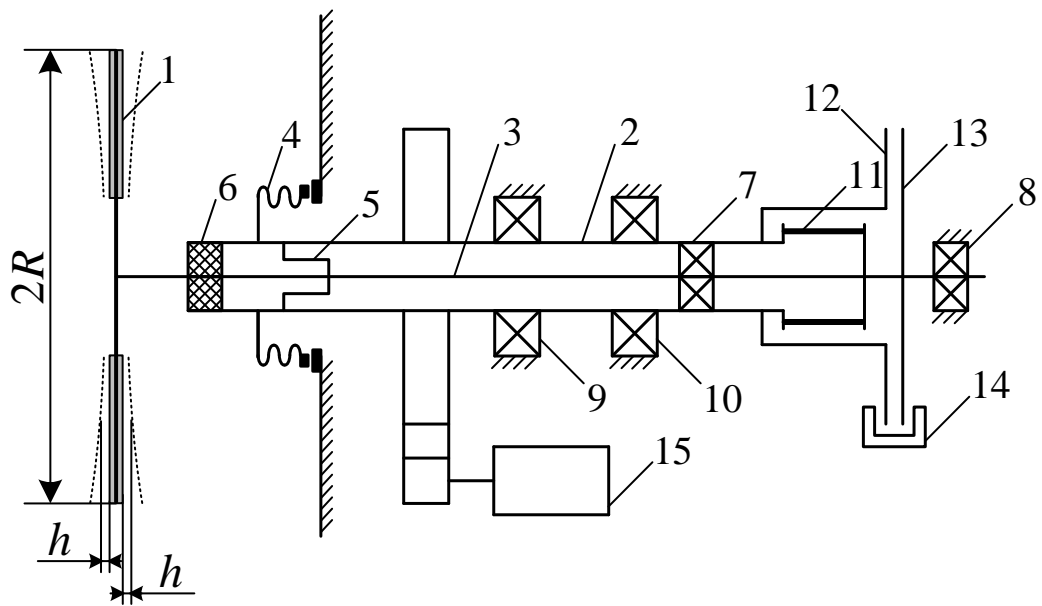


Рис.2.10. Конструкція механічної частини ротаційного вимірювача концентрації паперової пульпи за в'язкістю.

- 1 - чутливий елемент дископодібної форми; 2 – основна порожниста вісь приладу; 3 – вісь чутливого елемента; 4 – ущільнення основної порожнистої осі з сільфона і кільцевих вставок зі сплаву карбід вольфраму-кобальт;
- 5 – гнучке ущільнення з поздовжньо гофрованої тонкостінної трубки;
- 6 – еластичне ущільнення для захисту від забивання ущільнення 5;
- 7, 8 – підшипники осі чутливого елемента; 9, 10 – підшипники основної порожнистої осі; 11 – торсійна пружина з циліндричних стержнів по колу; 12 – диск з прорізами на основній порожнистій осі; 13 – диск з прорізами на осі чутливого елемента; 14 – оптичний давач кута зміщення дисків 12 і 13; 15 – двигун з живленням від частотного перетворювача.

2.2.4.3. Запропонований узагальнений алгоритм визначення параметрів рідини

Розглянемо чутливий елемент у формі диска радіусом R (можуть бути зроблені симетричні радіальні ребра по обох поверхнях диска). Нехай усереднене (ефективне) значення товщини шару паперової пульпи, у якому відбувається в'язкісне тертя, становить h . Тоді момент сили в'язкого тертя M , який діє на диск,

що обертається у в'язкій неньютонівській рідині, яка описується степеневим законом, визначається з виразу (2.31).

Для підвищення точності визначення концентрації паперової пульпи за в'язкістю пропонується провести вимірювання моменту сил в'язкості за двох різних кутових швидкостей обертання чутливого елемента Ω_1 та Ω_2 . У цьому випадку на основі формули (2.31) отримуємо наступні рівняння:

$$M_1 \frac{(3+n)}{4\pi R^3} = K \left(\frac{\Omega_1 R}{h} \right)^n, \quad (2.32)$$

$$M_2 \frac{(3+n)}{4\pi R^3} = K \left(\frac{\Omega_2 R}{h} \right)^n. \quad (2.33)$$

Поділивши рівняння (2.32) на рівняння (2.33), отримаємо вираз:

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{\Omega_1}{\Omega_2} \right)^n. \quad (2.34)$$

З нього отримуємо значення індексу течії:

$$n = \frac{\ln(M_1/M_2)}{\ln(\Omega_1/\Omega_2)}. \quad (2.35)$$

Далі знаходимо коефіцієнт консистенції K за формулою:

$$K = M_1 \cdot \frac{(3+n)}{4\pi R^3} \cdot \left(\frac{h}{\Omega_1 R} \right)^n, \quad (2.36.1)$$

або

$$K = M_2 \cdot \frac{(3+n)}{4\pi R^3} \cdot \left(\frac{h}{\Omega_2 R} \right)^n. \quad (2.36.2)$$

2.2.4.4. Зменшення впливу моменту сил тертя в ущільненні осі чутливого елемента на результати вимірювань концентрації паперової пульпи за в'язкістю

В ротаційних вимірювачах концентрації паперової пульпи за в'язкістю інформація отримується шляхом вимірювання моменту сил в'язкого тертя, який діє на чутливий елемент, що обертається із заданою частотою в шарі досліджуваної паперової пульпи. Момент сили в'язкого тертя, який діє на чутливий елемент,

передається за допомогою пропущеної через герметичне ущільнення осі на вимірювач моменту сили, який може бути побудований із застосуванням пружного елемента – торсіона, кут закручення якого φ буде пропорційним до моменту сил в'язкого тертя M :

$$\varphi = \frac{M}{\psi}, \quad (2.37)$$

де ψ - коефіцієнт закручування торсіона.

За відомим кутом закручування торсіона φ можна визначити момент сили в'язкого тертя і далі – коефіцієнт в'язкості, який залежить від концентрації паперової пульпи.

На роботу такого вимірювача концентрації паперової пульпи впливає той факт, що на чутливому елементі момент сили в'язкого тертя M зрівноважується не лише моментом сили закрученого торсіону M_t , але на нього діє і момент сил тертя в ущільненнях M_s та підшипниках M_B осі чутливого елемента. Оскільки у запропонованому способі вимірювання частота обертання чутливого елемента періодично змінюється, пропонується проводити вимірювання моменту сили, що закручує торсіон, при наближенні частоти обертання пропелера до робочої частоти обертання з боку нижчих частот обертання $M_{\uparrow t}$ (частота обертання чутливого елемента зростає до робочого значення Ω_1 чи Ω_2) та при наближенні до робочої частоти обертання з боку вищих частот $M_{\downarrow t}$ (частота обертання чутливого елемента зменшується до робочого значення Ω_1 чи Ω_2).

В динамічному режимі зміни кутової швидкості кутове прискорення обертального руху чутливого елемента та його осі ε пов'язане з моментом інерції J та іншими згаданими моментами сил виразом, який одержимо нижче.

Застосування описаного для дводискового концентратоміра алгоритму проведення вимірювань та опрацювання їх результатів у випадку однодискового концентратоміра залишається у силі. Однак, аналіз знаків доданків у рівняннях, які зв'язують момент сили торсіону M_t , момент сил в'язкого тертя M , який діє на чутливий елемент концентратоміра, момент сил тертя у підшипниках M_B , та момент сили з боку ущільнення чутливої осі M_s показує, що і при наближенні

частоти обертання чутливого елемента до вибраної для проведення вимірювань «знизу» (\uparrow), чи при наближенні «зверху» (\downarrow), знаки доданків для однодискового концентратоміра не змінюються (бо не змінюється напрям обертання чутливого елемента електричним приводом, а змінюється лише знак кутового прискорення).

Основне рівняння динаміки обертального руху чутливого елемента у описаному концентратомірі при наближенні до обраної частоти обертання зверху (\downarrow) та знизу (\uparrow), та обертанні за напрямком руху годинникової стрілки (нижній індекс +), та назустріч напрямкові руху годинникової стрілки (нижній індекс -) мають вигляд

$$(\uparrow) + \quad - M_{\uparrow+}^{\text{ВЯЗК.}} - M_S - M_B + M_V + M_{T\uparrow+} = J\varepsilon \quad (2.38)$$

$$(\downarrow) + \quad - M_{\downarrow+}^{\text{ВЯЗК.}} - M_S - M_B + M_V + M_{T\downarrow+} = J\varepsilon \quad (2.39)$$

$$(\uparrow) - \quad + M_{\uparrow-}^{\text{ВЯЗК.}} + M_S + M_B + M_V - M_{T\uparrow-} = J\varepsilon \quad (2.40)$$

та

$$(\downarrow) - \quad + M_{\downarrow-}^{\text{ВЯЗК.}} + M_S + M_B + M_V - M_{T\downarrow-} = J\varepsilon. \quad (2.41)$$

Прийнявши, що режим обертання чутливого елемента стабілізувався, тобто кутове прискорення $\varepsilon = 0$, із наведених рівнянь отримуємо:

$$\begin{aligned} M_{T.\text{сеп.}} &= \frac{M_{T\uparrow+} + M_{T\downarrow+} + M_{T\uparrow-} + M_{T\downarrow-}}{4} = \\ &= \frac{M_{\uparrow+}^{\text{ВЯЗК.}} + M_{\downarrow+}^{\text{ВЯЗК.}} + M_{\uparrow-}^{\text{ВЯЗК.}} + M_{\downarrow-}^{\text{ВЯЗК.}}}{4} + M_S + M_B. \end{aligned} \quad (2.42)$$

$$\text{Остаточню} \quad M_{T.\text{сеп.}} = M_{\text{сеп.}}^{\text{ВЯЗК.}} + M_S + M_B. \quad (2.43)$$

Отже, при усередненні результатів вимірювань, проведених для одної частоти обертання чутливого елемента концентратоміра з одним диском взаємна компенсація моментів сил тертя у підшипниках, та ущільненні осі чутливого елемента не відбувається. Однак, має зміст змінювати напрям обертання чутливого елемента концентратоміра на протилежний: при цьому момент сили, зв'язаний із несиметричністю розподілу швидкості течії паперової пульпи не змінить знаку, а

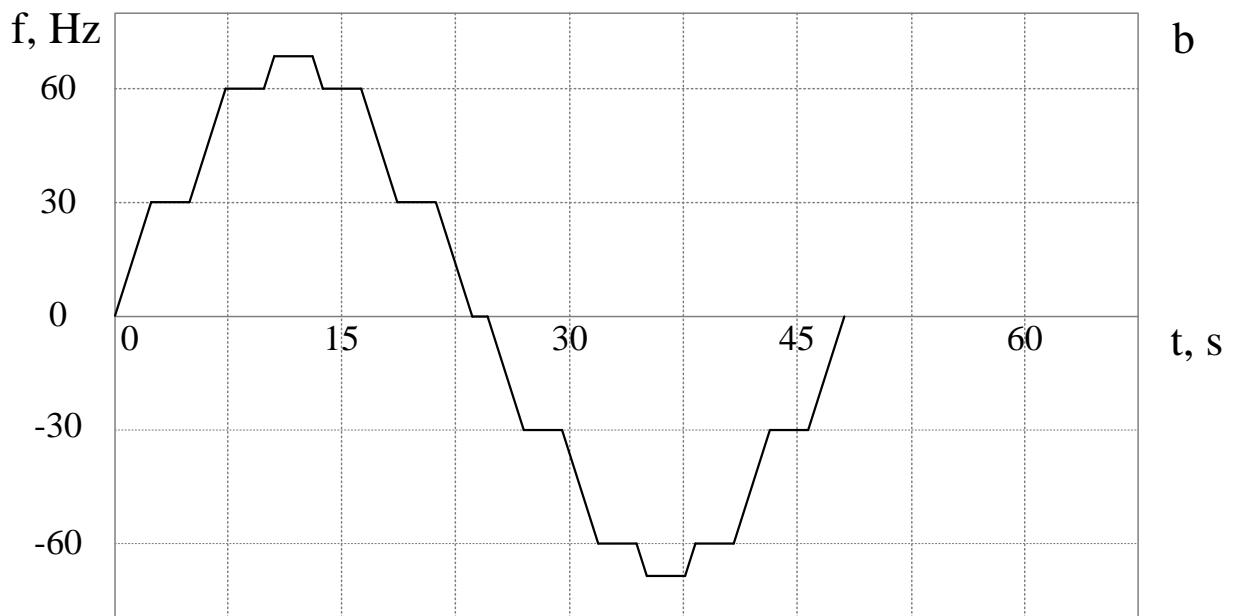
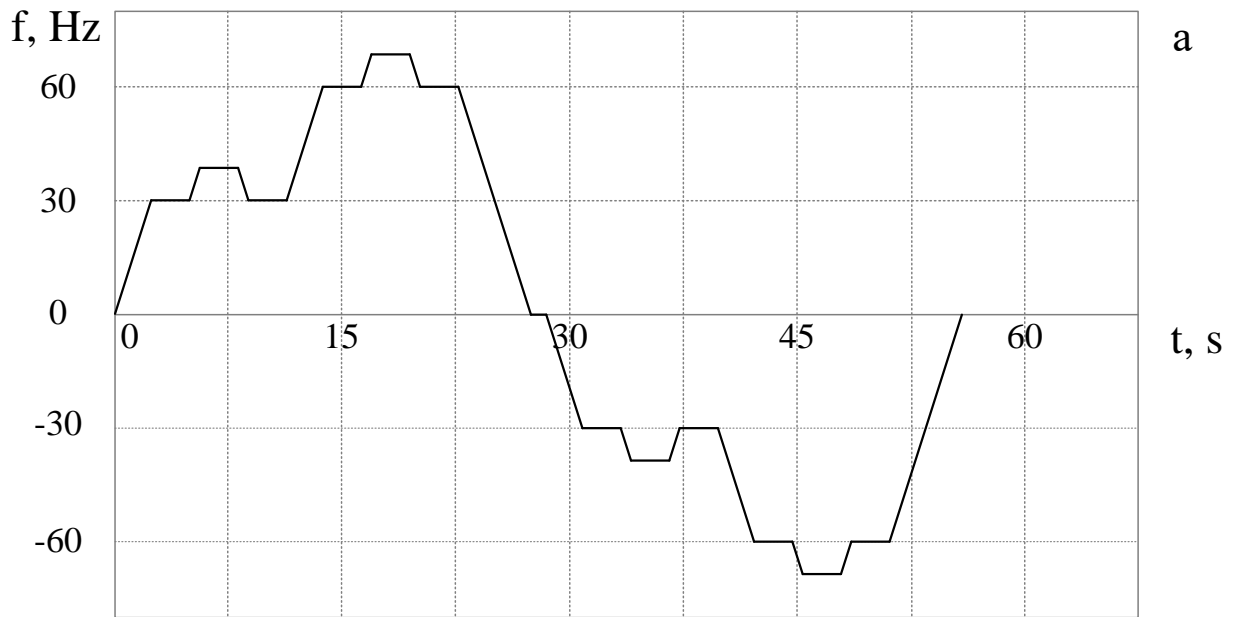
усі інші – поміняють знаки на протилежні – тому при усередненні таких результатів вимірювань – згаданий момент сили M_V - буде скомпенсований, і можна усунути вплив нерівномірного розподілу швидкості течії паперової пульпи в трубопроводі у околі чутливого елемента ротаційного концентратоміра з одним диском на результат вимірювання концентрації паперової пульпи.

2.2.4.5 Пропоновані алгоритми зміни частоти обертання чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи за в'язкістю

Для реалізації вимірювань концентрації паперової пульпи запропоновано декілька варіантів зміни частоти обертання чутливого елемента приладу в часі.

Загальною особливістю запропонованих вимірювальних циклів є проведення вимірювань моменту сили в'язкого тертя з плавним наближенням частоти обертання чутливого елемента до вибраних для вимірювань значень частот обертання. При зростанні частоти (наближення “знизу”) вимірюється $M_{\uparrow t}$, а при зменшенні частоти обертання чутливого елемента (наближення “зверху”) до обраної для вимірювань частоти обертання чутливого елемента вимірюється значення $M_{\downarrow t}$. Для цього після завершення вимірювання після підходу до частоти обертання Ω «знизу» частота обертання незначно підвищується, короткий час підтримується постійною; після чого знижується до того ж значення Ω і при цьому вимірюється значення моменту сили $M_{\downarrow t}$. Виміряні значення моментів сил запам'ятовуються мікропроцесором, та усереднюються за виразом (2.43). Виміряні при зміні напрямку обертання значення моментів сил в'язкого тертя, які отримані для двох різних частот обертання, усереднюють із результатами, які отримані при обертанні чутливого елемента у прямому напрямку, та використовують для визначення параметрів паперової пульпи n та K відповідно до рівнянь (2.35), (2.36.1) або (2.36.2) та наступного перерахунку значення в'язкості в одиниці концентрації паперової пульпи.

Пропоновані цикли зміни частоти обертання чутливого елемента при вимірюванні концентрації паперової пульпи можуть виглядати так, як це зображено на рис.2.11.



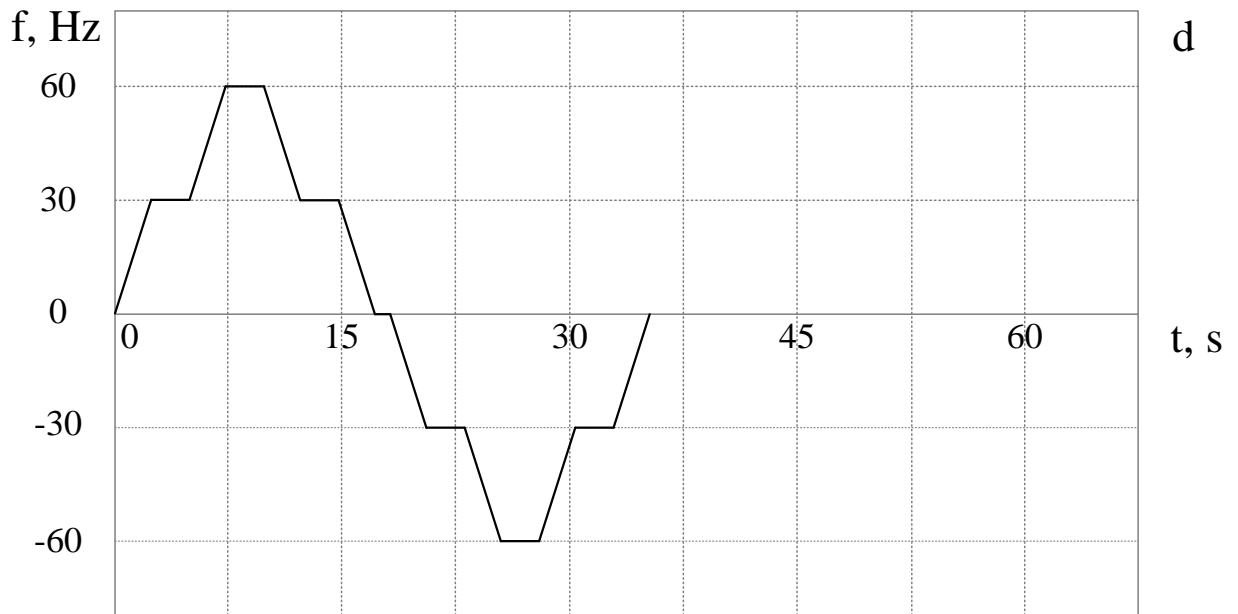
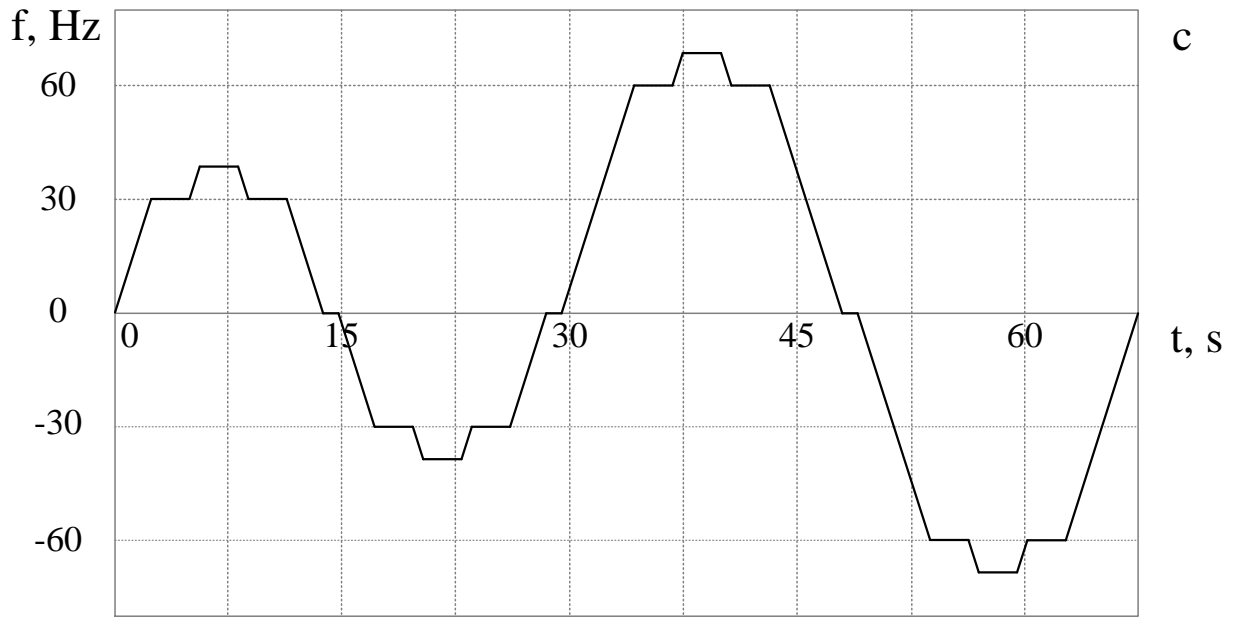


Рис. 2.11. Запропоновані цикли зміни частоти обертання чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи з часом. По осі ординат відображена частота напруги живлення двигуна приводу чутливого елемента f (1/с). Частота напруги живлення двигуна зі знаком мінус вжита для позначення напрямку обертання чутливого елемента в напрямі протилежному до прийнятого за додатний.

Отже, послідовність змін частот напруги живлення двигуна приводу чутливого елемента може бути такою:

а) вимірювання проводиться спершу при обертанні чутливого елемента в одному напрямі на нижчій та на вищій частотах обертання з підходами до заданих значень частот обертання “знизу” та “зверху” після деякого перевищення значення заданої частоти. Після цього частота обертання чутливого елемента переходить через нульове значення і далі вимірювання продовжується за тим же алгоритмом в протилежному напрямку обертання.

б) вимірювання проводить аналогічно до описаного в п. а), але не застосовується підхід “зверху” при вимірюванні моменту на нижчій заданій частоті.

в) спочатку проводиться вимірювання моменту сили в'язкого тертя при обертанні чутливого елемента на нижчій частоті обертання у прямому та зворотному напрямках. Далі такі ж вимірювання проводяться на вищій частоті обертання чутливого елемента при обертанні у прямому та зворотному напрямках.

г) вимірювання проводять без перевищення заданих частот обертання.

При порівнянні тривалості вимірювальних циклів видно, що найкоротшим є цикл, зображений на рис. 2.11.d. Для наведених графіків приймається, що на протязі циклу вимірювання концентрація паперової пульпи не змінюється і витрата її теж є постійною.

2.3. ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Вперше розроблено новий принцип вимірювання концентрації паперової пульпи, що полягає у вимірюванні ефективної в'язкості неньютонівської рідини за двох швидкостей обертання і за двох режимів роботи (прямо / реверс) чутливого елемента ротаційного концентратоміра та алгоритмічного опрацювання результатів вимірювання моменту в'язкісного тертя, що зменшує вплив швидкості потоку пульпи на результат вимірювання.

2. Сформовані напрямки подальшого розвитку механічного методу для побудови ротаційних концентратомірів паперової пульпи, які передбачають модифікацію керування рухом чутливих елементів, що дозволить компенсувати вплив неінформативних параметрів та покращити їх метрологічні характеристики.

3. Розроблено та досліджено математичну модель ротаційного концентратоміра паперової пульпи та його складових, створено методику перерахунку відомих експериментальних даних для корекції функції перетворення розробленого концентратоміра, що зменшує затрати на періодичне градуювання приладів у виробничих умовах.

4. Запропоновано нову схему побудови ротаційного концентратоміра паперової пульпи з кращими метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

5. Запропоновано новий порядок проведення вимірювань концентрації паперової пульпи за допомогою ротаційного концентратоміра із проведенням вимірювання по черзі на двох різних частотах обертання чутливого елемента із наближенням до них зі сторони нижчих та вищих частот обертання, та повторенням вимірювань при зміні напрямку обертання ротора.

6. Запропоновано алгоритм опрацювання результатів вимірювань, який дозволяє зменшити вплив моментів сил тертя в ущільненнях та у підшипниках вимірювальної осі концентратоміра на отримане значення концентрації паперової пульпи.

РОЗДІЛ 3. ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОПАТКОВОГО МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ПАПЕРОВОЇ ПУЛЬПИ

3.1. Аналіз впливу швидкості потоку на процес вимірювання концентрації паперової пульпи з допомогою лопаткових концентратомірів

Лопаткові концентратоміри, як правило, містять:

- 1) лопатку – чутливий елемент концентратоміра, розташований всередині потоку паперової пульпи, на який діє сила в'язкого тертя, зумовлена переміщенням паперової пульпи відносно лопатки;
- 2) важіль, на якому закріплено лопатку у потоці паперової пульпи;
- 3) герметичне поворотне кріплення, яке дозволяє важелю повертатися навколо осі на невеликий кут (близько 2 градусів);
- 4) навитку магнітоелектричного перетворювача, яка закріплена на нижньому кінці важеля у «сухому» відсіку концентратоміра;
- 5) магнітну систему магнітоелектричного перетворювача (активатора), у постійному магнітному полі котрої перебуває навитка магнітоелектричного перетворювача (рис. 3.1).

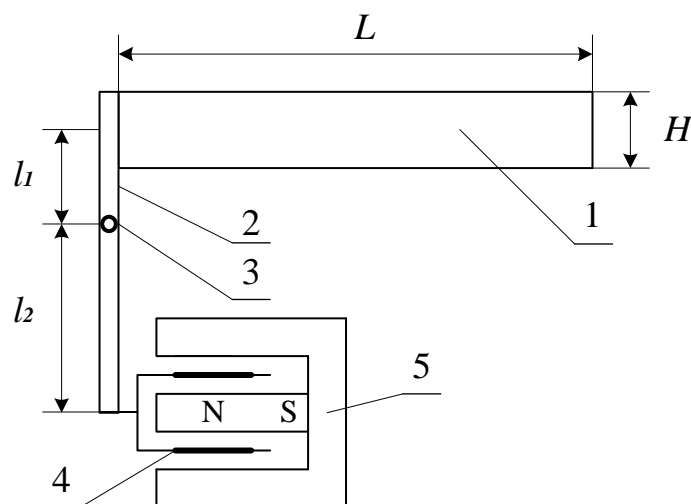


Рис. 3.1 Схема конструкції лопаткового концентратоміра паперової маси.

1 – лопатка; 2 – важіль; 3 – вісь обертання важеля; 4 - навитка магнітоелектричного перетворювача; 5 - магнітна система магнітоелектричного перетворювача

У конструкціях з нерухомою лопаткою на лопатку діє сила зсуву, спричинена потоком рухомої паперової пульпи, котра створює момент сили в'язкості M_1 , який намагається повернути лопатку вздовж напрямку течії.

$$M_1 = F_1 \cdot l_1 = \mu \frac{dV}{dz} S \cdot l_1 = \mu \frac{V}{D/2} 2LH \cdot l_1, \quad (3.1)$$

де F_1 – діюча на лопатку сила в'язкого тертя; μ – видима в'язкість рідини; V – швидкість течії рідини у околі поверхні лопатки; D – діаметр трубопроводу; L – довжина лопатки; H – висота лопатки; l_1 – відстань від осі кріплення важеля до середини висоти лопатки, $S = 2LH$ – сумарна площа обидвох бокових поверхонь лопатки, на яку діє сила в'язкого тертя з боку потоку паперової пульпи. Автоматична слідкуюча система у відповідь на повертання важеля з лопаткою збільшує струм I через навитку магнітоелектричного активатора доти, доки створений магнітоелектричним активатором момент сили M_2 не зрівноважить момент сили в'язкого тертя M_1 , що приведе до повернення важеля концентратоміра у початковий стан, який він займав до початку руху паперової пульпи. Положення важеля контролюють за допомогою оптичного, або індукційного сенсора.

$$M_2 = F_2 \cdot l_2 = BIl \sin(90^\circ) \cdot l_2 = BIl l_2. \quad (3.2)$$

Тут F_2 – сила Ампера, яка діє на провід навитки активатора [92]; B – індукція магнітного поля у околі витків навитки; I – сила струму у навитці; l – загальна довжина проводу у навитці; l_2 – відстань від осі кріплення важеля до центра навитки. Завдяки осьовій симетрії магнітного поля у області знаходження витків циліндричної навитки магнітоелектричного активатора, силові лінії магнітного поля перпендикулярні до провідника навитки у будь – якій точці провідника, а тому кут між силовими лініями магнітного поля та елементом струму у провіднику навитки завжди прямий, і $\sin(90^\circ) = 1$ [92].

Сила струму у навитці активатора при зрівноваженому моменті сили в'язкого тертя, що діє на лопатку, служить інформаційним параметром, за величиною якого обчислюється в'язкість μ :

$$\mu = \frac{B \cdot l \cdot l_2 \cdot D}{4 \cdot V \cdot L \cdot H \cdot l_1} \cdot I \quad (3.3)$$

та концентрація паперової пульпи.

Із формули (3.3) видно, що результат вимірювання залежить від швидкості течії паперової пульпи у трубопроводі V , а отже, використання даної конструкції обмежене випадками, коли швидкість течії паперової пульпи підтримується сталою, або ж змінюється у вузькому інтервалі швидкостей.

Тому лопаткові концентратоміри із нерухомою лопаткою мають обмежену область застосування, відносно низьку точність вимірювань та істотну залежність результатів вимірювання від швидкості течії паперової пульпи.

Для підвищення точності вимірювання концентрації паперової пульпи за допомогою лопаткового концентратоміра використовують конструкцію концентратоміра із рухомою лопаткою. Вона передбачає періодично повторювані швидкі рухи лопатки назустріч та за течією рідини, здійснювані за допомогою магнітоелектричного активатора, через навитку якого пропускають короткі імпульси струму заданої виробником форми. При цьому лопатка повертається на невеликий кут (близько кількох градусів) відносно середнього положення і, отже, забезпечує свій рух відносно рідини із певною швидкістю. Оскільки процес повертання на визначений кут триває у межах від 2 до 20 мілісекунд, то вільний край лопатки може розвивати помітну швидкість відносно потоку рідини, рухаючись перпендикулярно до напрямку течії.

Таке повертання обумовлює появу додаткового моменту сил, що діє на лопатку у потоці паперової маси. Тому сили в'язкого тертя, пов'язані із поступальним рухом паперової пульпи, та поступальною складовою руху лопатки, спрямовані паралельно до осі потоку паперової пульпи, а зв'язані з обертовим рухом – перпендикулярно до осі потоку. Тому у першому наближенні можемо поділити момент сили M_d , який діє на лопатку внаслідок її взаємодії з паперовою пульпою на дві складові:

$$M_{\text{л}} = M_{\text{пост.}} + M_{\text{об.}}, \quad (3.4)$$

де $M_{\text{пост.}}$ – момент сили, пов'язаний із поступальним рухом лопатки; $M_{\text{об.}}$ – момент сили, пов'язаний із обертальним рухом лопатки.

Оцінимо величини вказаних моментів.

У випадку ньютонівської рідини можна обчислити силу в'язкого тертя, з якою паперова пульпа буде діяти на лопатку завдяки поступальному рухові:

$$F_{\text{пост.}} = \mu \frac{dV}{dz} S = \mu \frac{(V_{\text{л}} - V_{\text{р}})}{D/2} 2LH = 4\mu \frac{(V_{\text{л}} - V_{\text{р}})}{D} LH, \quad (3.5)$$

де $F_{\text{пост.}}$ – сила в'язкого тертя, що діє на лопатку внаслідок поступального руху; μ – динамічна в'язкість рідини; $V_{\text{л}}$ – лінійна швидкість руху лопатки за напрямком течії рідини; $V_{\text{р}}$ – швидкість течії рідини у околі поверхні лопатки; D – внутрішній діаметр трубопроводу; L – довжина лопатки; H – висота лопатки.

Лінійну швидкість руху лопатки оцінимо, як швидкість руху її середньої точки зліва:

$$V_{\text{л}} = \omega R = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \cdot l_1. \quad (3.6)$$

Підставляючи параметри концентратоміра із [52] ($l_1 = 0,05$ м, $\Delta\varphi = 0,02$ рад, $\Delta t = 2 - 20$ мілісекунд), одержимо значення кутової швидкості повертання лопатки у діапазоні 1 – 10 рад/с, та лінійну швидкість руху лопатки у межах 0,05 – 0,5 м/с.

Момент сили в'язкого тертя, який діє на нерухомий плоский диск у рідині, яка описується степеневим законом Оствальда – де Веле, завдяки обертанню з кутовою швидкістю Ω розташованого паралельно до нього на відстані h диску такого ж радіуса R можна описати формулою [76]:

$$M = \frac{2\pi R^3 K}{3 + n} \left(\frac{\Omega R}{h} \right)^n \quad (3.7)$$

Якщо перейти до ньютонівських рідин ($n = 1$, $K = \mu$) [76], формула зводиться до вигляду

$$M = \frac{\pi R^3 \mu}{2} \cdot \frac{\Omega R}{h}. \quad (3.8)$$

У випадку, коли у нерухомій рідині обертається один досліджуваний диск, то момент сили в'язкого тертя прикладений до обидвох його плоских поверхонь, і момент сили, визначений із рівнянь (3.7) чи (3.8) слід помножити на два:

$$M_{\text{диска}} = 2M. \quad (3.9)$$

У цьому випадку h означатиме відстань від площини диска до стінок об'єму з рідиною. На завершення, допустимо, що лопатка схожа на сектор диска із довжиною дуги l . З огляду на симетрію, на вказаний сектор буде діяти момент сил в'язкого тертя у стільки разів менший, у скільки площа лопатки менша від площі диска:

$$\frac{M_{\text{лопатки}}}{M_{\text{диска}}} \approx \frac{M_{\text{сектора}}}{M_{\text{диска}}} = \frac{S_{\text{лопатки}}}{S_{\text{диска}}} = \frac{HR}{2\pi R^2} = \frac{H}{2\pi R} \quad (3.10)$$

Враховуючи формули (3.7 – 3.9), отримуємо для лопатки у рідині, яка описується степеневим законом Оствальда – де Веле

$$M_{\text{лопатки}} \approx M_{\text{диска}} \cdot \frac{H}{2\pi R} = \frac{4\pi R^3 K}{3+n} \cdot \frac{H}{2\pi R} \cdot \left(\frac{\Omega R}{h}\right)^n \quad (3.11)$$

Для ньютонівської рідини (3.11) набуде вигляду

$$M_{\text{лопатки}} \approx M_{\text{диска}} \cdot \frac{H}{2\pi R} = \frac{\mu R^2 H}{2} \cdot \frac{\Omega R}{h} \quad (3.12)$$

3.2. Розробка лопаткового концентратоміра паперової пульпи з покращеними функціональними властивостями

Існує декілька технічних реалізацій лопаткових концентратомірів паперової пульпи, які придатні для промислового застосування. Найбільш відомі з них: конструкція з лопаткою без активатора [47, 93, 94] та конструкція з лопаткою з активатором [48, 53].

В цій конструкції лопатка розміщується вздовж рухомого потоку паперової пульпи і концентрація паперової пульпи визначається за значенням сили, яка діє на лопатку за рахунок в'язкісного тертя. Значення сили, яка діє на лопатку, міняється приблизно в межах від 0 до 30 Н при зміні концентрації паперової пульпи від 0 до 16 % Cs.

Для різних діапазонів вимірювання і різної структури паперових або целюлозних волокон застосовуються лопатки різної конструкції. Калібрування приладів індивідуальне за результатами лабораторних вимірювань для кожного конкретного застосування. Тому для приладів нормують параметри вимірювання зусилля, яке діє на лопатку, і в сумі всі складові похибки вимірювання зусилля (нелінійність, гістерезис, вплив статичного тиску середовища) не перевищують 1 %. Проте визначальними є умови встановлення приладів. Щоб досягти максимальної точності, потрібно усунути турбулізацію потоку, можливість утворення повітряних мішків, розшарування пульпи у околі лопатки консистометра. З урахуванням перерахованих чинників і процедури калібрування прийнятною вважають відносну зведену похибку на рівні 5 % [93].

Лопаткові концентратоміри цієї конструкції мають обмеження на значення допустимих змін швидкості потоку паперової пульпи. В [93] наведені діаграми для різних конструкцій лопаток з допустимими діапазонами швидкостей паперової пульпи і діапазонами вимірювання концентрації паперової пульпи. Якщо швидкість потоку паперової пульпи виходить за межі рекомендованого діапазону, у виміряне значення концентрації необхідно вносити поправку.

В такому концентратомірі лопатка періодично приводиться в рух магнітоелектричним перетворювачем (активатором). Мікропроцесорний пристрій вимірює час, за який лопатка проходить певний шлях від обмежувача до оптичного давача положення. За значенням цього часу мікропроцесорний пристрій розраховує значення концентрації паперової пульпи. В цій конструкції лопаткового концентратоміра штучно збільшується швидкість зсуву паперової пульпи у околі лопатки, при якій проводиться вимірювання в'язкості і, відповідно, концентрації пульпи. Очевидно, що вплив швидкості потоку паперової пульпи на результат вимірювання концентрації лопатковим концентратоміром описаної тут конструкції з періодично переміщуваною лопаткою буде меншим, ніж вище описаним концентратоміром з статичною лопаткою. Основні джерела похибок ті ж самі, що і в попередній конструкції лопаткового концентратоміра. Важливим є місце встановлення концентратоміра. Поблизу лопатки консистометра не повинні

виникати повітряні мішки, відбуватися розшарування пульпи, випадати осади. Слід мінімізувати пульсації тиску пульпи спричинені роботою насосів, які перекачують пульпу. Процедура калібрування приладів для різних типів паперової пульпи проводиться аналогічно до процедури калібрування лопаткових концентратомірів без активатора.

Для обох конструкцій концентратомірів у ідеальних умовах вимірювання в'язкості паперової пульпи забезпечується з достатньо високою точністю. Щоб за величиною в'язкості визначати концентрацію паперової пульпи, потрібно виконати ряд умов: зменшити вплив неінформативних параметрів на процес вимірювання, забезпечити коректне калібрування приладів з нелінійною статичною характеристикою.

Мінімальне утворення повітряних мішків, розшарування пульпи, максимальна репрезентативність проби будуть по центру трубопроводу, в якому протікає паперова пульпа. Але у цьому місці буде максимальна швидкість потоку. Тому перспективними є дослідження по зменшенню впливу швидкості потоку паперової пульпи на процес вимірювання концентрації з допомогою лопаткових концентратомірів.

Дослідження направлені на вдосконалення та розробку лопаткового концентратоміра паперової пульпи, в якому за рахунок вдосконалення процесу вимірювання та алгоритмічної обробки результатів цих вимірювань значно зменшується вплив швидкості паперової пульпи в трубопроводі на результат вимірювання концентрації.

3.2.1. Розроблення принципової схеми лопаткового концентратоміра паперової маси з коливаннями лопатки з важелем у площині симетрії потоку паперової пульпи з компенсацією впливу швидкості потоку

В модифікованій нами конструкції концентратоміра паперової пульпи рухома лопатка здійснює коливання з постійною швидкістю переміщення в обидва боки відносно середнього положення. При цьому вимірюється струм через навитку магнітоелектричного активатора, значення якого в усталеному режимі буде різним,

в залежності від напрямку руху лопатки по відношенню до напрямку руху паперової маси та від значення концентрації паперової пульпи.

Принцип дії такого концентратоміра пояснює структурна схема на рис. 3.2.

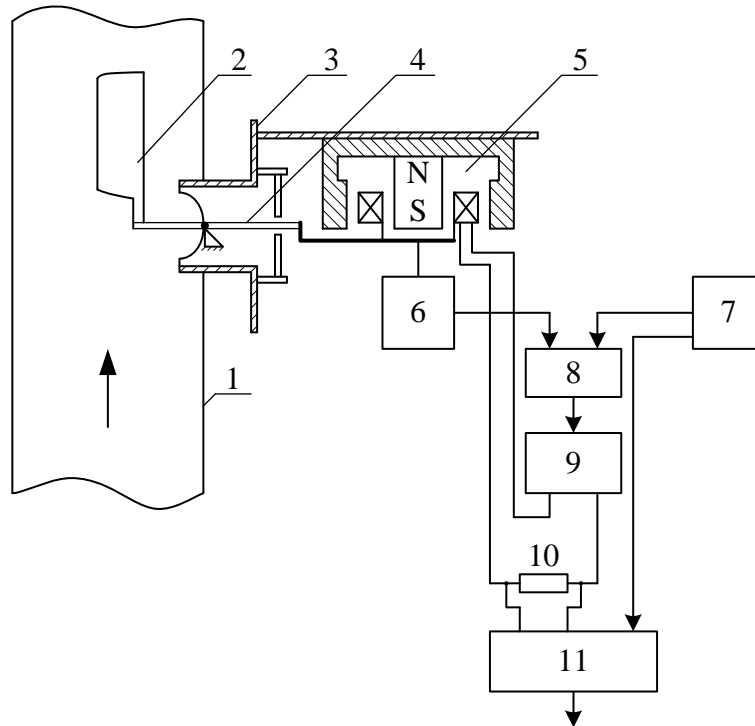


Рис.3.2. Принципова схема запропонованого лопаткового концентратоміра паперової маси з коливаннями лопатки з важелем у площині симетрії потоку паперової пульпи та компенсацією впливу швидкості потоку.

1 – трубопровід, в якому протікає паперова пульпа; 2 – рухома лопатка концентратоміра; 3 – корпус приладу; 4 – важіль, з одного боку на якому закріплена лопатка, а з другого через герметичне ущільнення - навитка магнітоелектричного перетворювача; 5 – магнітна система магнітоелектричного перетворювача; 6 – приймальний перетворювач переміщення важеля; 7 – генератор імпульсів трикутної форми; 8 – диференційний підсилювач; 9 – підсилювач потужності; 10 - опір для вимірювання сили струму через навитку магнітоелектричного перетворювача; 11 – мікроконтролерна система для обробки інформації і зв'язку з системою відображення та керування технологічним процесом.

В концентратомірі за новою схемою лопатка 2 здійснює коливання відносно середнього положення, яке зміщене на певний кут відносно осі трубопроводу 1 з постійною знакоперемінною швидкістю. Швидкість і амплітуда коливань лопатки вимірюються перетворювачем переміщення 6, а задаються генератором імпульсів трикутної форми 7. Слідкуюча пропорційна система, що складається з диференційного підсилювача 8 і підсилювача потужності 9, забезпечує максимальну наближеність амплітуди і швидкості переміщення лопатки 2 до форми імпульсів генератора 7. Рух лопатки забезпечує магнітоелектричний перетворювач, який складається з навитки і магнітної системи 5. Струм через навитку магнітоелектричного перетворювача вимірюється по спадку напруги на опорі 10. Цей струм буде пропорційним до величини зусилля, яке потрібне для переміщення лопатки в рухомому середовищі паперової маси з певним значенням концентрації. Після зміни напрямку руху лопатки значення струму через навитку магнітоелектричного перетворювача різко зростає і через деякий час зменшується до стабільного значення по мірі максимального наближення швидкості руху лопатки до заданого значення. В ці моменти часу це значення несе інформацію про концентрацію і швидкість руху потоку паперової пульпи. При русі лопатки за напрямком потоку значення струму буде меншим, а при русі лопатки проти потоку – значення струму буде більшим. Шляхом подальшої алгоритмічної обробки можна одержати корисний вихідний сигнал, в якому буде врахований вплив швидкості потоку паперової пульпи. Зауважимо, що питання температурної компенсації показів концентратоміра паперової пульпи тут розглядатись не будуть, тому на рис. 3.1 не показаний канал вимірювання температури паперової пульпи.

3.2.2. Розроблення принципової схеми лопаткового концентратоміра з поперечним рухом лопатки відносно осі приводу

Особливістю запропонованого нами лопаткового концентратоміра з поперечним рухом лопатки відносно осі приводу, який схематично зображений на рис. 3.3, є те, що лопатка 2 закріплена на осі 4, і коливається в потоці відносно середнього положення. Траєкторія руху лопатки задається від генератора імпульсів

трикутної форми 7 і підтримується слідкуючою системою, виконавчим механізмом якої є магнітоелектричний перетворювач 5. В положеннях лопатки, близьких до середнього, струм через навитку магнітоелектричного перетворювача буде пропорційним до в'язкості, і, відповідно, до концентрації паперової пульпи. Вибрана траєкторія руху лопатки на осі впоперек потоку також дозволяє врахувати алгоритмічним методом вплив швидкості потоку.

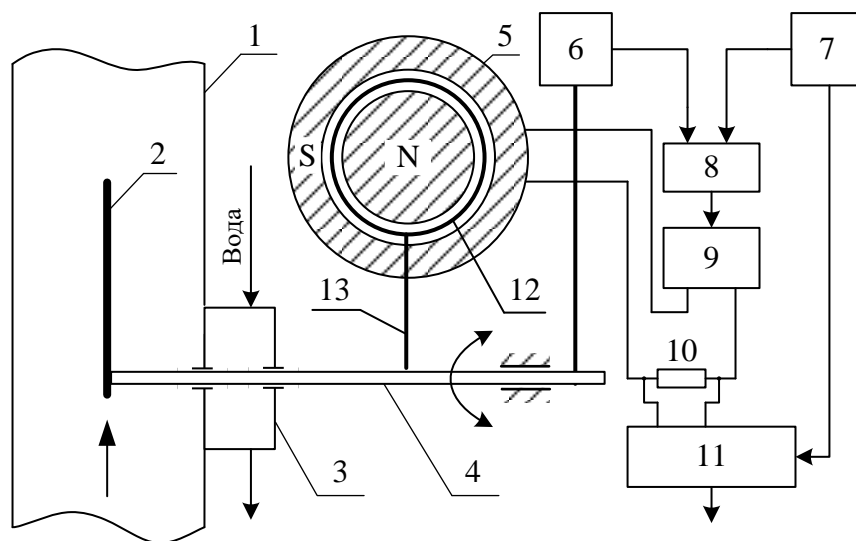


Рис. 3.3. Принципова схема запропонованого концентратоміра паперової маси з компенсацією впливу швидкості потоку з поперечним рухом лопатки відносно осі приводу.

1 – трубопровід, в якому протікає паперова пульпа; 2 – рухома лопатка концентратоміра; 3 – “мокре” ущільнення осі; 4 – вісь, з одного боку на якій закріплена лопатка 2, а з другого на важелі 13 - навитка 12 магнітоелектричного перетворювача; 5 – магнітна система магнітоелектричного перетворювача; 6 – приймальний перетворювач обертання осі; 7 – генератор імпульсів трикутної форми; 8 – диференційний підсилювач; 9 – підсилювач потужності; 10 - опір для вимірювання сили струму через навитку магнітоелектричного перетворювача; 11 – мікроконтролерна система для обробки інформації і зв’язку з системою відображення та керування технологічним процесом.

В розроблених конструкціях ротаційного, та лопаткових концентратомірів паперової пульпи спільним є те, що у них можна встановити однакові швидкості

зсуву, при яких проводиться вимірювання в'язкості неньютонівської рідини, якою є паперова пульпа. В результаті градувальні залежності в'язкості від концентрації та характеру волокон стають максимально наближеними, а також можна використати однакову залежність для температурної компенсації. Разом зі згаданими вище компенсаціями впливу швидкості потоку та моментів, зумовлених ущільненнями, це дозволяє підвищити точність вимірювання концентрації паперової пульпи, та користуватися однаковими калібрувальними залежностями для усіх розроблених концентратомірів лопаткового та ротаційного типів.

Розроблено математичний опис лопаткового концентратоміра

Момент сили в'язкого тертя, який діє на нерухомий плоский диск у рідині, яка описується степеневим законом Оствальда – де Веле завдяки обертанню з кутовою швидкістю Ω розташованого паралельно до нього на відстані h диску такого ж радіуса R можна описати формулою [76]:

$$M = \frac{2\pi R^3 K}{3+n} \left(\frac{\Omega R}{h}\right)^n \quad (3.7)$$

Коли у нерухомій рідині обертається один чутливий диск, то момент сили в'язкого тертя прикладений до обидвох його плоских поверхонь, і момент сили, визначений із рівнянь (3.7) чи (3.8) слід помножити на два:

$$M_{\text{диска}} = 2M. \quad (3.9)$$

У цьому випадку h означатиме відстань від площини диска до стінок об'єму з рідиною. На завершення, допустимо, що лопатка схожа на сектор диска із довжиною дуги l . З огляду на симетрію, на вказаний сектор буде діяти момент сил в'язкого тертя у стільки разів менший, у скільки площа лопатки менша від площі диска:

$$\frac{M_{\text{лопатки}}}{M_{\text{диска}}} \approx \frac{M_{\text{сектора}}}{M_{\text{диска}}} = \frac{S_{\text{лопатки}}}{S_{\text{диска}}} = \frac{HR}{2\pi R^2} = \frac{H}{2\pi R} \quad (3.10)$$

Тут H – максимальна ширина лопатки на її вільному краю.

Враховуючи формули (3.7 – 3.9), отримуємо для лопатки у рідині, яка описується степеневим законом Оствальда – де Веле

$$M_{\text{лопатки}} \approx M_{\text{диска}} \cdot \frac{H}{2\pi R} = \frac{4\pi R^3 K}{3+n} \cdot \frac{H}{2\pi R} \cdot \left(\frac{\Omega R}{h}\right)^n \quad (3.11)$$

Рівномірне повертання лопатки отримаємо, якщо момент сили, з яким діє на лопатку паперова пульпа $M_{\text{лопатки}}$, дорівнює моментів сили, який створює магнітоелектричний перетворювач M_2 :

$$M_{\text{лопатки}} = M_2.$$

При цьому

$$M_2 = F_2 \cdot l_2 = BIl \sin(90^\circ) \cdot l_2 = Bll_2, \quad (3.2)$$

де F_2 – сила Ампера, яка діє на провід навитки активатора [92]; B – індукція магнітного поля у околі витків навитки; I – сила струму у навитці; l – загальна довжина проводу у навитці; l_2 – відстань від осі кріплення важеля до центра навитки. Отримуємо, що коефіцієнт консистенції K прямо пропорційний до сили струму I через навитку магнітоелектричного перетворювача при рівномірному русі лопатки з кутовою швидкістю Ω

$$K = \frac{3+n}{2R^2H} \cdot \left(\frac{h}{\Omega R}\right)^n \cdot Bll_2 \cdot I$$

3.2.3. Дослідження роботи запропонованих лопаткових концентратомірів паперової пульпи з компенсацією впливу швидкості потоку

Роботу запропонованих схем концентратомірів паперової пульпи пояснюють графіки зміни напруг і струму в часі після основних складових схеми на рис. 3.4.

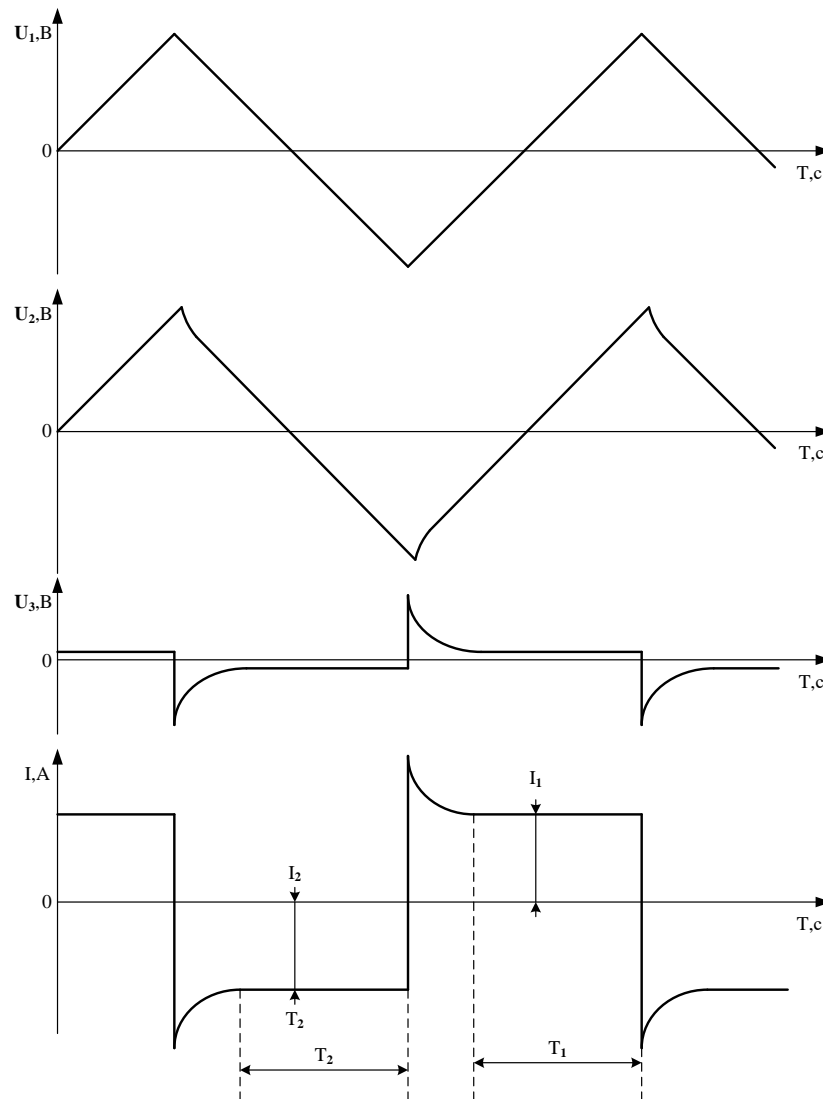


Рис. 3.4. Графіки зміни напруг та струму в часі після основних блоків запропонованого концентратоміра паперової пульпи з компенсацією впливу швидкості потоку паперової пульпи. Для спрощення графіки наведено для умови, коли швидкість руху паперової пульпи дорівнює нулю (паперова пульпа не тече), і концентрація паперової пульпи є сталою. 1 – зміна напруги на виході генератора імпульсів трикутної форми; 2 – зміна напруги після перетворювача переміщення рухомої лопатки концентратоміра; 3 - зміна напруги після диференційного підсилювача; 4 – зміна сили струму через навитку магнітоелектричного перетворювача.

На рис. 3.4 графік 1 – це імпульси правильної трикутної форми після генератора 7. За ними слідкуюча система з допомогою магнітоелектричного перетворювача переміщає рухому лопатку концентратоміра. Графік 2 – це форма

напруги після перетворювача переміщення рухомої лопатки. Це дещо спотворені імпульси трикутної форми, тому слідкуюча система не забезпечує руху рухомої лопатки по ідеальній траєкторії трикутної форми в перші моменти після зміни напрямку руху. Графік 3 – це різницевий сигнал між двома попередніми графіками, який виділяється диференціальним підсилювачем, і найбільше розузгодження є в моменти після зміни напрямку руху лопатки. Останній графік 4 – це форма струму через навитку магнітоелектричного перетворювача, який приводить в рух рухому лопатку. Власне, значення цього струму несе корисну інформацію про концентрацію паперової пульпи. Очевидно, що вимірювати значення струму потрібно через певні короткі проміжки часу після зміни напрямку руху лопатки на протилежний, після того як слідкуюча система забезпечить сталу швидкість переміщення лопатки в паперовій пульпі. Всі розглянуті графіки на рис. 3.4 для спрощення пояснення зображені при відсутності руху паперової пульпи.

Вигляд графіків, крім першого, при русі паперової пульпи зміниться, тому, що у цьому випадку швидкість пульпи відносно лопатки відрізнятиметься для руху лопатки за течією та проти течії. Якщо лопатка рухається за течією, швидкість пульпи відносно лопатки дорівнюватиме різниці швидкостей пульпи і лопатки, виміряних відносно трубопроводу. Якщо лопатка рухається проти течії, швидкість пульпи відносно лопатки дорівнюватиме сумі швидкостей пульпи і лопатки, виміряних відносно трубопроводу. Ось чому, коли лопатка рухається за течією, на неї діє менша сила в'язкості, ніж у нерухомій паперовій пульпі, і на неї діятиме більша сила в'язкості при русі проти течії. Цей процес пояснюють графіки на рис. 3.5.

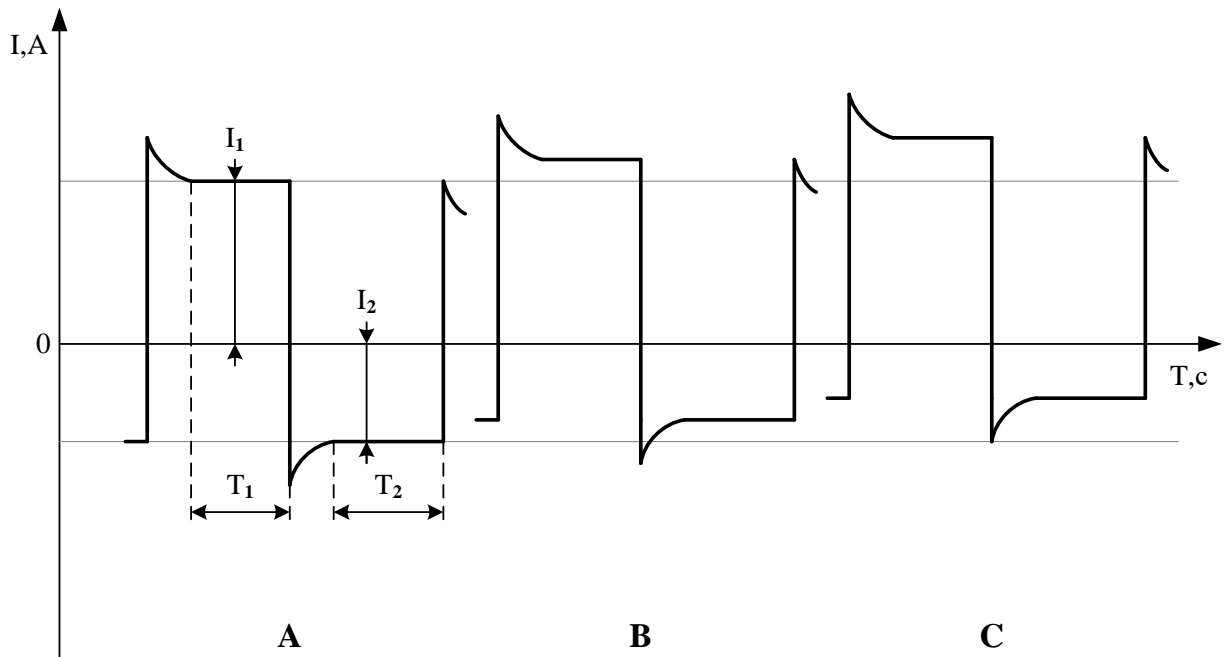


Рис. 3.5. Графіки зміни струму через навитку магнітоелектричного перетворювача концентратоміра паперової пульпи при трьох різних значеннях швидкості руху паперової пульпи ($V_A < V_B < V_C$) і постійному значенні концентрації паперової пульпи.

На рис. 3.5 зображені графіки зміни сили струму через навитку магнітоелектричного перетворювача при постійному значенні концентрації паперової пульпи для трьох різних швидкостей руху паперової пульпи у порядку їх зростання.

З рис. 3.5. видно, що амплітуди струму в уставлених режимах при русі лопатки за потоком і проти потоку відрізняються і ця різниця росте при збільшенні швидкості руху паперової пульпи. Але сума амплітуд струмів залишається постійною і незалежною від швидкості потоку паперової пульпи. Якщо за таким графіком побудувати алгоритм обробки корисного сигналу в концентратомірі паперової пульпи, то вдасться скомпенсувати вплив швидкості паперової пульпи на результат вимірювання концентрації.

Зміни струму через навитку магнітоелектричного перетворювача при зміні концентрації паперової пульпи і постійній швидкості руху паперової пульпи мають вигляд, як показано на рис. 3.6.

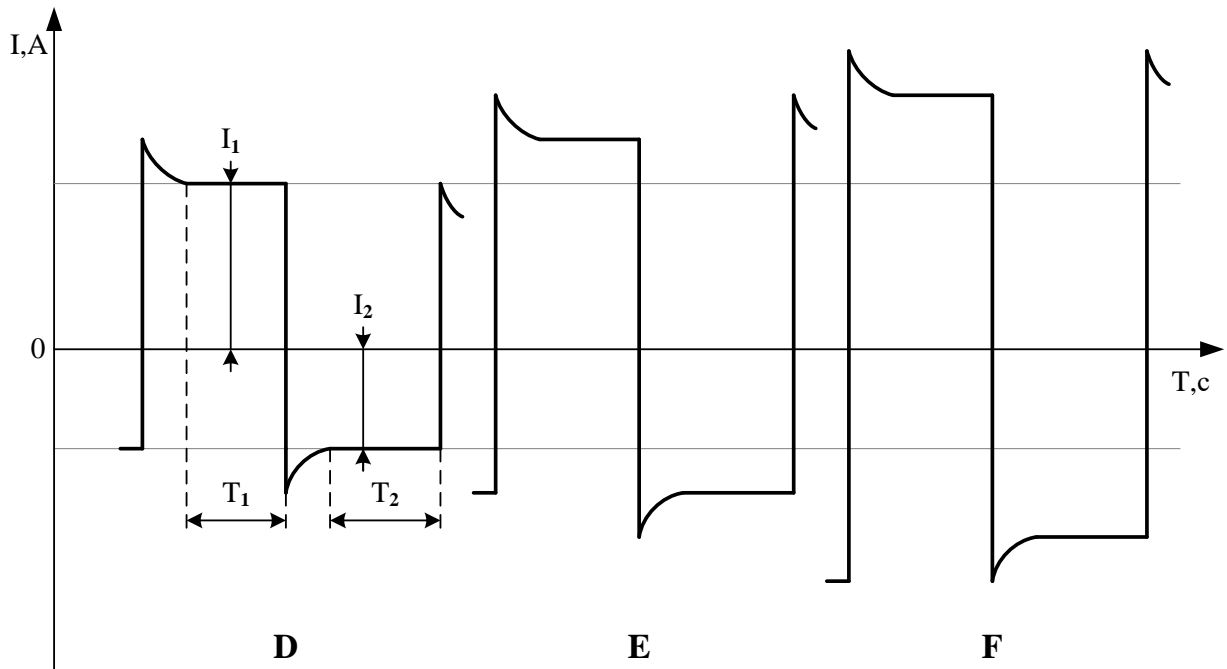


Рис. 3.6. Вигляд графіків зміни струму через навитку магнітоелектричного перетворювача концентратоміра паперової пульпи при трьох різних значеннях концентрації паперової пульпи ($C_D < C_E < C_F$) і постійному значенні швидкості руху паперової пульпи.

Три наведені графіки змін струму через навитку магнітоелектричного перетворювача концентратоміра, для трьох зростаючих значень концентрації паперової пульпи, відрізняються амплітудами струму в уставленому режимі при русі лопатки за потоком та проти потоку. Очевидно, що тут буде мультиплікативний характер впливу значення концентрації паперової пульпи на вигляд додатної та від'ємної амплітуд струму, який можна врахувати алгоритмічно.

При вимірюваннях в реальному технологічному процесі графік зміни струму через навитку магнітоелектричного перетворювача буде одночасно залежати і від швидкості потоку і від концентрації паперової пульпи, так як це викладено в коментарях до рис. 3.5 і 3.6.

Нижче більш детально зупинимося на реалізації складових концентратоміра паперової маси згідно з запропонованим принципом дії.

Конструкція первинного перетворювача з рухомою лопаткою не має особливих відмінностей від відомого аналога [48], за винятком того, що лопатка може рухатись з однаковим відхиленням в обидва боки відносно середнього положення, яке є зміщене на невеликий кут відносно осі трубопроводу паперової маси. Іншою відмінністю є менші розміри лопатки при збереженні такої ж точності вимірювання. Для реалізації запропонованого алгоритму вимірювання первинний перетворювач доповнений перетворювачем положення важеля з лопаткою. Для його реалізації можна застосувати три наступні принципи вимірювання переміщення: магніторезистивний, по принципу ефекту Холла та індукційний.

Магніторезистивні давачі застосовувались для перших експериментів. Їхнім недоліком, так само як і недоліком давачів Холла, є температурна залежність функції перетворення позиціонуючої системи. Можна обійтись без спеціальної температурної компенсації функції перетворення цих давачів і врахувати виникаючу систематичну похибку при температурній компенсації показів концентратоміра, але в подальших дослідженнях ми маємо намір застосовувати різновид індукційного давача – диференційно-трансформаторний, який працює на високій частоті. Незважаючи на нетехнологічність, цей давач має значно меншу температурну залежність функції перетворення. Важливим для механічної системи модифікованого лопаткового концентратоміра є статичне балансування рухомої механічної системи в робочому положенні приладу. Ця вимога була не критична для попередніх конструкцій, але в цій конструкції при балансуванні механічної системи можна уникнути процедури врахування механічних мас при алгоритмічній обробці.

Схемотехнічна реалізація електронних вузлів вимірювальної схеми не має специфічних особливостей. Генератор імпульсів трикутної форми може видавати одне постійне значення частоти вихідної напруги, або для розширення функціональних можливостей - два або три значення частоти з перемиканням від

мікроконтролера. Два значення частоти вихідної напруги застосовуються для розширення діапазону вимірювання, а ще одне значно вище значення – для сервісної операції – періодичного струшування лопатки від можливих налипань на неї довгих волокнистих домішок.

Всю алгоритмічну обробку доцільно проводити з допомогою серійного малопотужного мікроконтролера. Автори мають ряд реалізацій технологічних вимірювальних приладів з застосуванням малопотужних вільнопрограмованих мікроконтролерів серій S7-200 та S7-1200 виробництва фірми Siemens [8, 9, 16, 17, 18, 19].

Їхні програмні та мережеві можливості значно скорочують час та затрати на розробку та технічну реалізацію дрібносерійних або одиночних технологічних вимірювальних приладів та систем.

3.3. ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Вперше запропоновано керувати рухом чутливого елемента лопаткового концентратоміра паперової пульпи за сигналом від генератора імпульсів трикутної форми, що дозволяє забезпечити задану швидкість зсуву паперової пульпи при вимірюванні і тим самим підвищити точність вимірювання моменту в'язкого тертя.

2. Запропоновано метод компенсації впливу неінформативних параметрів механічних концентратомірів паперової пульпи шляхом знакоперемінного обертання чутливого елемента лопаткового концентратоміра з постійною швидкістю та алгоритмічного опрацювання результатів вимірювання моменту в'язкісного тертя, що зменшує вплив швидкості потоку пульпи на результат вимірювання.

3. Розроблено та досліджено математичну модель лопаткового концентратоміра паперової пульпи та створено методику перерахунку відомих експериментальних даних для корекції функції перетворення розробленого

концентратоміра, що зменшує затрати на періодичне градування приладів у виробничих умовах.

4. Запропоновано нову схему побудови лопаткового концентратоміра паперової пульпи з кращими метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

5. Запропоновано новий порядок проведення вимірювань концентрації паперової пульпи за допомогою лопаткового концентратоміра з активною лопаткою із проведенням вимірювання моменту сили зсуву при постійному програмно встановлюваному значенні швидкості зсуву, та алгоритм визначення концентрації паперової пульпи на його основі, який зменшує вплив швидкості течії паперової пульпи на визначене значення її концентрації.

РОЗДІЛ 4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВДОСКОНАЛЕНИХ МЕХАНІЧНИХ КОНЦЕНТРАТОМІРІВ ПАПЕРОВОЇ ПУЛЬПИ

4.1. Дослідження магнітоелектричного компенсатора в'язкісного тертя

4.1.1. Дослідження торсійного елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи.

Для дослідження торсійного елемента було зібрано стенд (рис. 4.1, рис. 4.3), який складається з ротаційного концентратоміра паперової пульпи з досліджуваним магнітоелектричним компенсатором 1, на горизонтально розташованій осі 2 якого зафіксовано важіль 3. Перед початком вимірювань важіль 3 був виставлений горизонтально. Початкове горизонтальне положення важеля 3 реєстрували за допомогою мікрометра годинникового типу 4, чутливий елемент якого торкається до важеля 3. До правого або лівого плеча важеля 3 на нитці 5, 6 у ході вимірювань по черзі прикріплювали вантаж 7, 8 з відомою масою m . Основний порожнистий вал ротаційного концентратоміра був зафіксований у нерухомому положенні (рис 4.2). Такий алгоритм дав змогу дослідити статичну характеристику торсійного елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи.

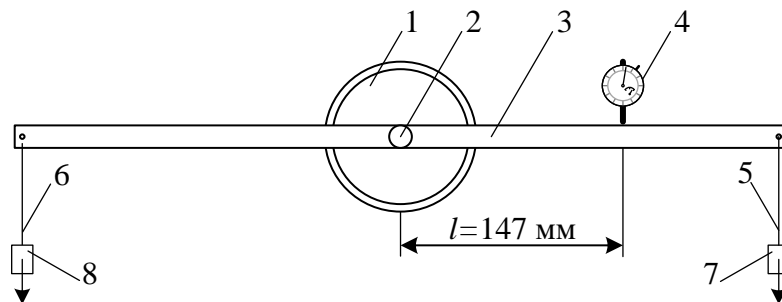


Рис. 4.1. Схема вимірювального стенду для дослідження статичної характеристики торсійного елемента ротаційного концентратоміра:

1 - ротаційний концентратомір паперової пульпи з досліджуваним магнітоелектричним компенсатором, 2 – вісь концентратоміра, 3 – важіль, 4 - мікрометр годинникового типу, 5, 6 – нитка, 7, 8 – вантаж.

Вимірювали лінійне переміщення точки дотику важеля з п'яткою мікрометра. Для знаходження кута повороту торсійного елемента α застосовано формулу:

$$\alpha = \arctg \frac{\Delta}{l}, \quad (4.1)$$

де Δ - лінійне переміщення точки дотику важеля з п'яткою мікрометра, l – відстань від осі ротаційного концентратоміра до п'ятки мікрометра ($l=147$ мм). Результати вимірювань наведені в табл. 4.1.



Рис. 4.2. Фіксація основного порожнистого валу, для дослідження статичної характеристики торсійного елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи.

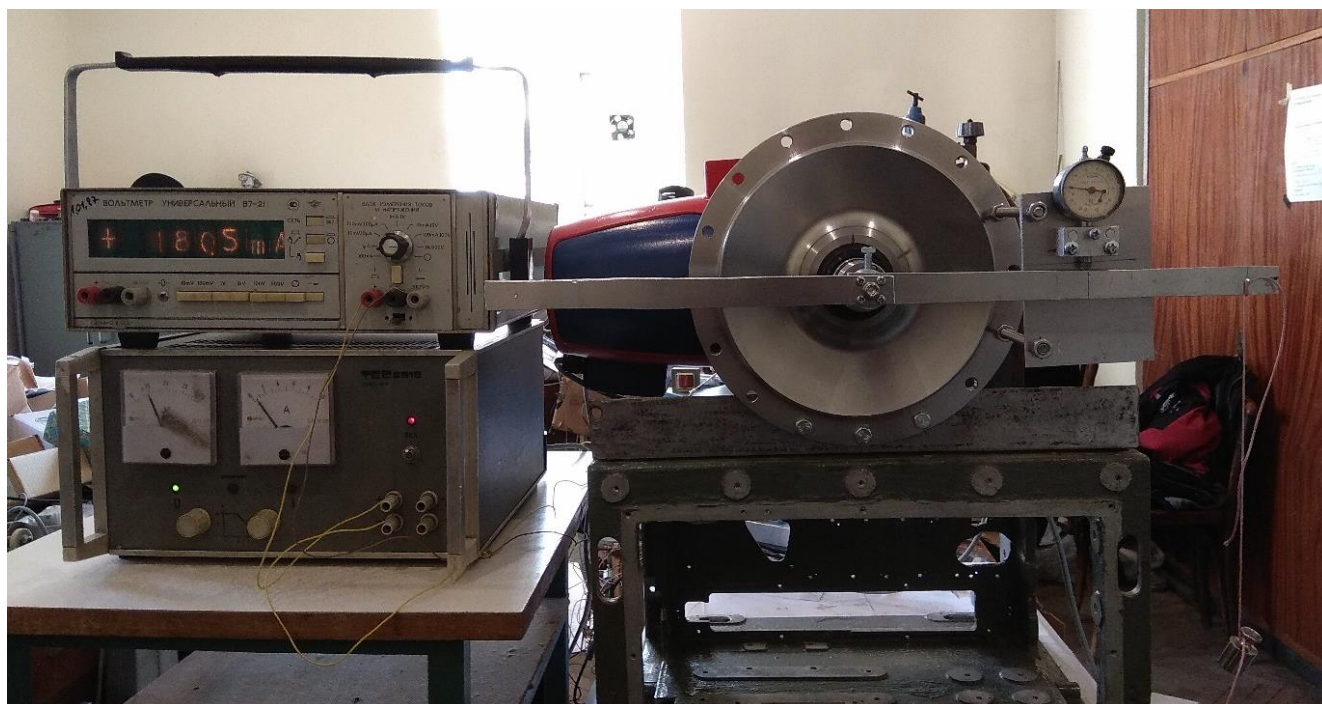


Рис. 4.3. Фото стенда для дослідження ротаційного концентратоміра паперової пульпи.

Таблиця 4.1.

Результати досліджень торсійного елемента ротаційного концентратоміра

m, г	$\Delta, 0.01\text{мм зліва}$	$\alpha, ^\circ$	$\Delta, 0.01\text{мм справа}$	$\alpha, ^\circ$
20	6	0,023	4	0,0155
50	17	0,066	17	0,066
100	37	0,144	39	0,152
200	82	0,319	78	0,304
300	1,2	0,467	1,1	0,428

При проведенні дослідів було встановлено, що гістерезис торсійного елемента складає $0,0155^\circ$. Для забезпечення точнішого вимірювання кута повороту з мікрометра було знято зворотну пружину, яка достатньо сильно спотворювала значення при вимірюваннях.

Одержану за результатами вимірювань статичну характеристику торсійного елемента ротаційного концентратоміра наведено на рис.4.4.

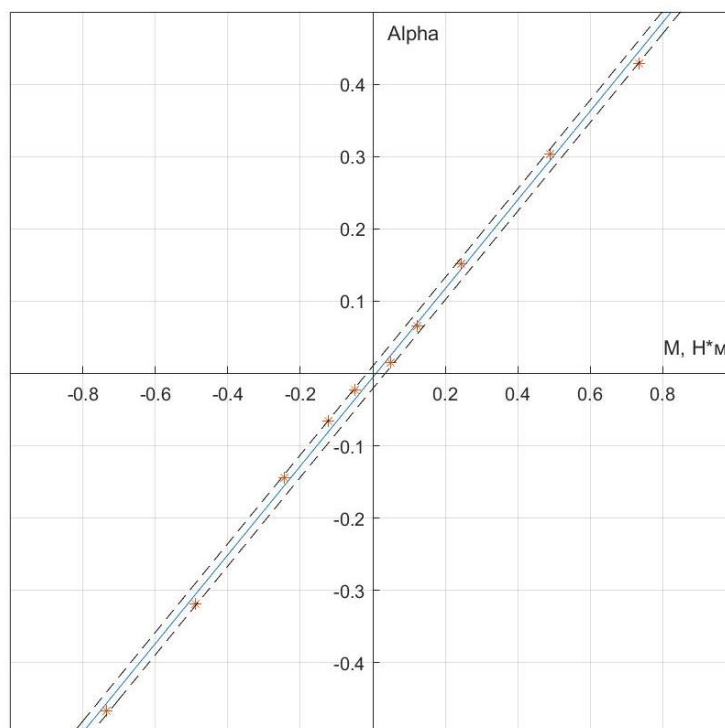


Рис. 4.4. Статична характеристика торсійного елемента ротаційного концентратоміра

4.1.2. Дослідження статичної характеристики ротаційного концентратоміра з магнітоелектричним компенсаційним механізмом

Для дослідження калібрувальної залежності магнітоелектричного компенсатора в'язкісного тертя створено вимірювальний стенд (рис. 4.5), який складається з ротаційного концентратоміра паперової пульпи з досліджуваним магнітоелектричним компенсатором 1, на горизонтально розташованій осі 2 якого зафіксовано важіль 3. Перед початком вимірювань важіль 3 виставили горизонтально. Початкове горизонтальне положення важеля 3 фіксували за допомогою мікрометра годинникового типу 4, чутливий елемент якого торкається до важеля 3. До правого плеча важеля 3 на нитці 5 у ході вимірювань прикріплювали вантаж 6 з відомою масою m . Точка кріплення нитки 5 до важеля 3 знаходиться на відстані l від центру осі 2.

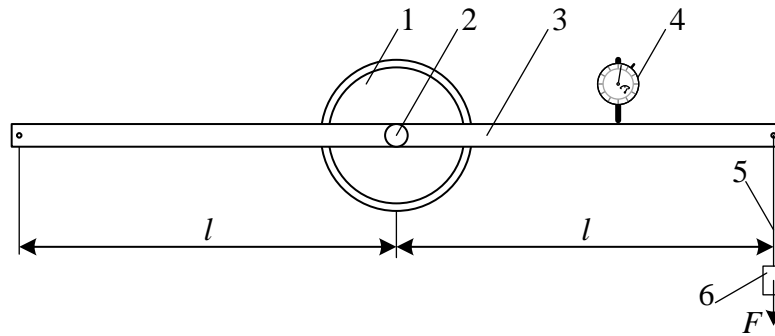


Рис. 4.5. Схема вимірювального стенду для дослідження магнітоелектричного та електромагнітного компенсатора в'язкісного тертя. 1 - ротаційний концентратомір паперової пульпи з досліджуваним магнітоелектричним компенсатором, 2 – вісь концентратоміра, 3 – важіль, 4 - мікрометр годинникового типу, 5 – нитка, 6 – вантаж.

Для виконання вимірювання реєстрували початковий показ мікрометра 4. Приєднували до нитки 5 вантаж 6 масою m , та підбирали силу струму I через навитку магнітоелектричного компенсатора концентратоміра так, щоб відновився початковий показ мікрометра 4. Обчислювали момент сили M , створений підвішеним вантажем 6 за формулою:

$$M = mgl, \quad (4.2)$$

де m – маса вантажу, кг; g – прискорення вільного падіння ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$);

l – плече сили ($l=250\text{мм}$). Результати вимірювань наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2.

Результати досліджень магнітоелектричного компенсатора

м, г	М, Н*м	I, мА
20	0,049	24
50	0,1226	61
100	0,2452	119
200	0,4905	243
500	1,2262	593

На основі отриманих експериментальних даних побудовано статичну характеристику магнітоелектричного компенсаційного механізму (рис. 4.6).

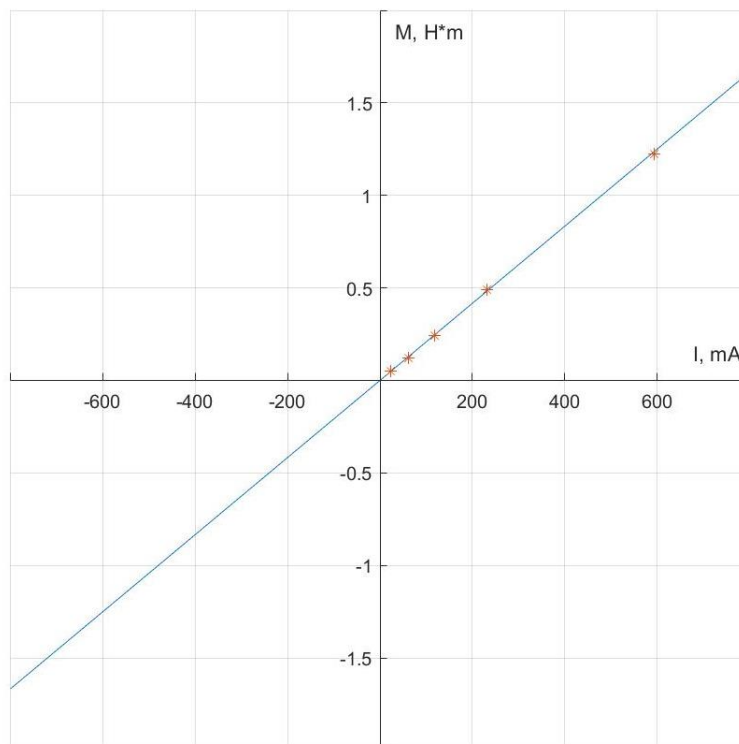


Рис. 4.6. Статична характеристика ротаційного концентратоміра з магнітоелектричним компенсаційним механізмом

Як видно з графіка 4.6, залежність моменту сили, створеної компенсатором, від сили струму через навітку компенсатора, у дослідженому діапазоні має лінійний характер.

На стенді, показаному на рис.4.5 досліджено калібрувальну залежність електромагнітного компенсаційного механізму. Дослідження проводились для чотирьох різних положень ($0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$) основного порожнистого валу, для зменшення впливу торсійного елемента. Результати вимірювань наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Результати досліджень електромагнітного компенсатора

№	m, г	M, Н*m	I, mA
1	20	0,049	115
	50	0,1226	197
	100	0,2452	283
	200	0,4905	402
	500	1,2262	600
2	20	0,049	140
	50	0,1226	204
	100	0,2452	283
	200	0,4905	407
	500	1,2262	587
3	20	0,049	115
	50	0,1226	192
	100	0,2452	281
	200	0,4905	387
	500	1,2262	582
4	20	0,049	117
	50	0,1226	193
	100	0,2452	274
	200	0,4905	402
	500	1,2262	600

На основі отриманих експериментальних даних побудовано статичну характеристику електромагнітного компенсаційного механізму (рис. 4.7)

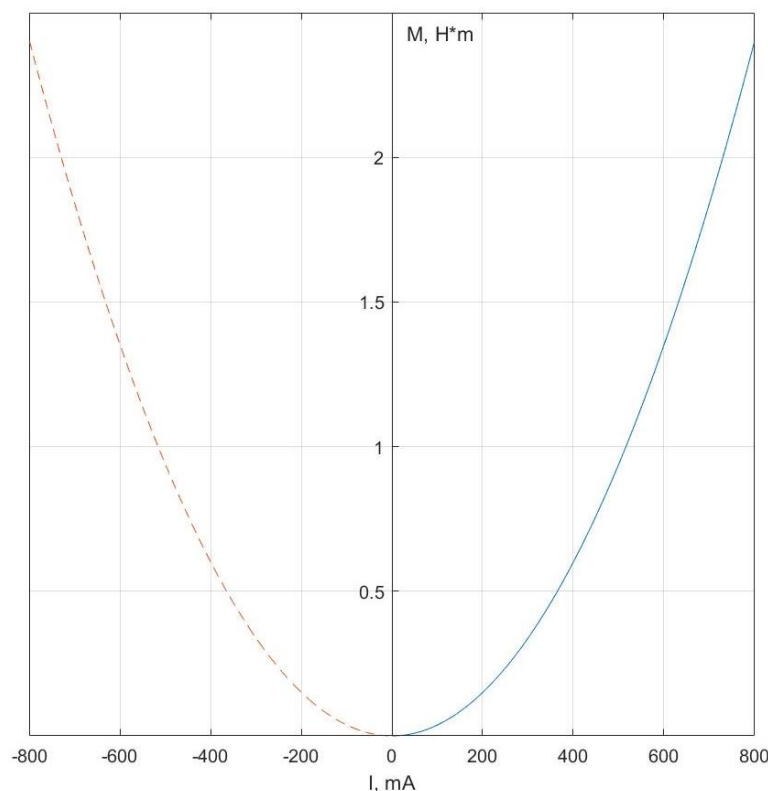


Рис. 4.7. Статична характеристика ротаційного концентроміра з електромагнітним компенсаційним механізмом

Як видно з графіка 4.7, залежність моменту сили, створеної електромагнітним компенсатором, від сили струму через навитку компенсатора, у дослідженому діапазоні має симетричну форму характерну, для степеневі функції з парним порядком степеня.

Магнітоелектричний перетворювач в порівнянні з електромагнітним має наступні переваги [12]: лінійна залежність функції перетворення, значно краща відтворюваність статичної характеристики, простіша процедура налагодження механічної частини концентроміра, менша маса деталей на валу чутливого елемента. Також статична характеристика магнітоелектричного перетворювача симетрична відносно початку координат і це дозволяє обертати чутливий елемент в обидва напрямки для компенсації, наприклад, впливу швидкості потоку паперової пульпи. Можливість побудови конструкції без застосування торсійного

елемента. Недоліком є наявність контактних кілець і щіток для підводу струму до навиток магнітоелектричного перетворювача.

4.2. Дослідження давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента

Обов'язковим елементом ротаційних концентратомірів є пристрій для визначення кута повороту чутливого елемента відносно осі обертання. При вдосконаленні таких концентратомірів виникає задача підвищення точності вимірювання кута повороту чутливого елемента відносно основної осі приладу, як при обертанні чутливого елемента за напрямом руху годинникової стрілки, так і у зворотному напрямку.

Для вимірювання в'язкості органічних рідин, найпоширенішими серед яких є мастильні оливи, точними і надійними є ротаційні віскозиметри типу Covimat 205-DD [95] і Brookfield TT-100 [96], в яких для визначення кута повороту чутливого елемента – циліндра застосовується індуктивний перетворювач. Згадані прилади не розраховані на важкі умови роботи з середовищем типу паперової пульпи. Пряме запозичення конструкції застосованих індуктивних перетворювачів кута повороту чутливого елемента не підходить для побудови концентратоміра паперової пульпи.

В інших відомих конструкціях концентратомірів паперової пульпи застосовуються оптичні давачі для вимірювання кута повороту чутливого елемента.

В конструкції, яка наведена в патенті [40], застосований оптичний вимірювач кута повороту чутливого елемента концентратоміра з двох дисків з прорізами по колу. Один з дисків закріплений на основному валу приладу, який обертається від двигуна через пасову передачу, а другий диск закріплений на валу чутливого елемента, який коаксіально розміщений всередині основного вала. Зміщення дисків, яке пропорційне до кута повороту чутливого елемента, вимірюється оптопарою з відкритим оптичним каналом. Прилад побудований за схемою прямого вимірювання моменту сил в'язкісного тертя за кутом повороту чутливого елемента.

Конструкція концентратоміра паперової пульпи Metso Rotating Consistency Transmitter [39], подібна до описаної у [40], але на основному валу приладу додатково встановлений пропелер для переміщення паперової пульпи з застійної зони вимірювальної комірки.

Концентратоміри паперової пульпи типу МЕК-2300, МЕК-2400 [38, 97] побудовані по компенсаційній схемі і відхилення кута повороту чутливого елемента в ньому весь час компенсується електромагнітним перетворювачем. Сила струму через навитку електромагнітного перетворювача буде пропорційною до моменту в'язкісного тертя і пов'язаної з ним концентрації паперової пульпи. В цій конструкції основний вал обертається через пасову передачу від асинхронного двигуна, встановлений додатковий пропелер для переміщення паперової пульпи з застійної зони. Вимірювання зміни кута повороту чутливого елемента здійснюється за допомогою оптичного давача з двох дисків з прорізами по колу – один на основному валу приладу, другий – на валу чутливого елемента. Зміщення дисків вимірюється за шириною імпульсів від оптопари з відкритим оптичним каналом.

Подальші описані конструкції концентратомірів мають два приводи: один для обертання основного вала приладу, другий – для обертання вала з чутливим елементом. Ці концентратоміри побудовані по компенсаційній схемі – споживана потужність приводом вала чутливого елемента буде пропорційною до моменту в'язкісного тертя. В описі [36] застосовано індуктивний давач відхилення кута повороту чутливого елемента концентратоміра, який близький по конструкції до оптичного. Ротори двигунів посаджені прямо на вали – основний вал приладу і вал чутливого елемента, пасова передача відсутня. Двигуни живляться від частотних перетворювачів. Близький до попереднього за конструкцією концентратомір паперової пульпи типу МЕК-3000 [41]. В ньому теж застосовано два приводи, диски з прорізами для вимірювання кута повороту чутливого елемента рознесені в просторі і кожен з них має свій окремий давач.

Отже, в усіх розглянутих конструкціях концентратомірів паперової пульпи та віскозиметрів застосовується давач для вимірювання повороту чутливого елемента. Він може бути оптичним, індуктивним або з застосуванням елементів Холла. Вдосконалення конструкції та способу опрацювання сигналу від таких пристроїв дозволяє розробляти концентратоміри паперової пульпи з вищими метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

Метою дослідження є вдосконалення способу опрацювання сигналу від оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента ротаційних концентратомірів паперової пульпи, які можуть бути побудовані як за схемою з прямим вимірюванням моменту в'язкісного тертя за кутом повороту, так і за схемами з компенсацією моменту в'язкісного тертя. Для способу опрацювання мають бути одержані аналітичні вирази, на основі яких можуть бути створені алгоритми роботи мікропроцесорних пристроїв.

4.2.1. Удосконалена конструкція концентратоміра паперової пульпи, для якої проводились дослідження пристрою для вимірювання кута повороту чутливого елемента

Дослідження давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента проводилось на удосконаленому нами концентратомірі паперової пульпи, конструкція механічної частини якого зображена на рис. 4.8. [12]. Ця конструкція відрізняється від аналогів застосуванням в ній магнітоелектричного перетворювача для компенсації моменту в'язкісного тертя, який діє на чутливий елемент дископодібної форми. Магнітоелектричний перетворювач має такі переваги в порівнянні з електромагнітним перетворювачем: використаним у промисловому концентратомірі МЕК-2300 [38]: лінійна залежність функції перетворення; значно краща відтворюваність; простіша процедура налагодження механічної частини концентратоміра, менша маса деталей на валу чутливого елемента. Статична характеристика магнітоелектричного перетворювача симетрична відносно початку координат і це дозволяє обертати чутливий елемент в обидвох напрямках для компенсації, наприклад, впливу несиметричності розподілу швидкості потоку

паперової пульпи відносно осі сенсора концентратоміра. Крім цього, запропонована конструкція магнітоелектричного компенсатора забезпечує його повноцінне функціонування при обертанні сенсора концентратоміра як за напрямом руху годинникової стрілки, так і у протилежному напрямі, оскільки змінити напрям моменту сили на протилежний можна, змінивши на протилежний напрям струму в навитках магнітоелектричного компенсатора. Відома конструкція електромагнітного компенсатора неспроможна змінити напрям компенсуючого моменту сили на протилежний, а тому вимагає обертання чутливого елемента концентратоміра в одному напрямі.

Недоліком концентратоміра із магнітоелектричним компенсатором є наявність контактних кілець і щіток для підводу струму до навиток магнітоелектричного перетворювача. Проте надійність такого технічного рішення з використанням сучасних матеріалів висока і термін служби контактної вузла співмірний з терміном служби підшипників і інших механічних деталей приладу.

Результати досліджень можуть бути застосовані і для інших конструкцій ротаційних концентратомірів паперової пульпи, наприклад, для конструкцій з електромагнітним перетворювачем для компенсації моменту в'язкісного тертя, конструкцій з вимірюванням концентрації за кутом повороту чутливого елемента і торсійним пружним елементом між двома валами.

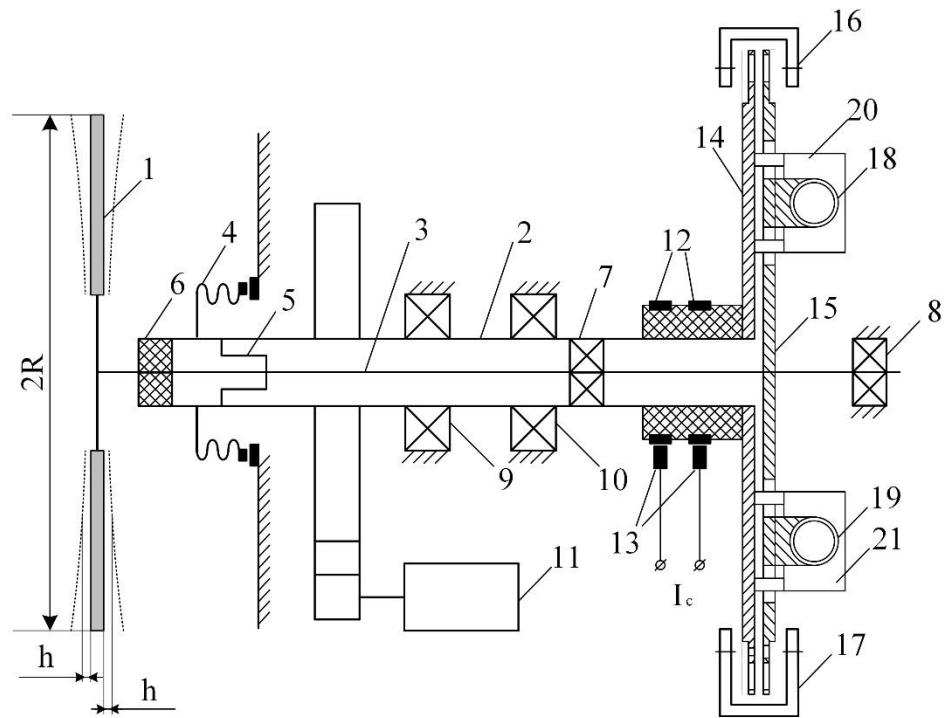


Рис. 4.8. Конструкція механічної частини ротаційного вимірювача концентрації паперової пульпи з магнітоелектричною компенсацією моменту в'язкісного тертя [12].

1 - чутливий елемент дископодібної форми; 2 – основний порожнистий вал приладу; 3 – вал чутливого елемента; 4 – ущільнення основного порожнистого вала з сільфону і кільцевих вставок зі сплаву карбід вольфраму-кобальт; 5 – гнучке ущільнення з поздовжньо гофрованої тонкостінної трубки; 6 – еластичне ущільнення для захисту від забивання ущільнення 5; 7, 8 – підшипники вала чутливого елемента; 9, 10 – підшипники основного порожнистого вала; 11 – двигун з живленням від частотного перетворювача; 12 – струмопідвідні кільця; 13 – графітокомпозитні щітки; 14 – диск з прорізами на основному валу приладу; 15 – диск з прорізами на валу чутливого елемента; 16 – оптопара з відкритим оптичним каналом для вимірювання зміщення дисків 14 і 15; 17 – оптопара з відкритим оптичним каналом для фіксації початку відліку; 18, 19 – навитки магнітоелектричного перетворювача, які закріплені на диску 15; 20, 21 – магнітні системи, які закріплені на диску 14.

Ротаційний концентратомір паперової пульпи, який зображений на рис. 4.8, складається з чутливого елемента 1 дископодібної форми з симетричними відносно

напряму обертання хвилеподібними виступами, основного порожнистого вала приладу 2, який обертається в підшипниках 9,10 від асинхронного двигуна 11 через пасову передачу. В середині основного порожнистого вала 1 на гнучкому поздовжньо гофрованому ущільненні 5, підшипниках 7 і 8 коаксіально розміщений вал 3, на якому закріплений чутливий елемент 1. Зі сторони паперової пульпи ущільнення 5 закрито еластичним кільцем 6, на основному валу 2 змонтоване ущільнення 4. Конструкція магнітоелектричного перетворювача і дисків з прорізами для вимірювання кута повороту чутливого елемента виконана інтегрованою. На валу 2 закріплений диск з прорізами по колу 14. На цьому ж диску на стійках закріплені магнітні системи 20 і 21. На валу 3 закріплений такий же по конструкції диск 15. На цьому диску закріплені два алюмінієві каркаси з навитками 18 і 19. Струм до навиток 18 і 19 підводиться через струмопідвідні кільця 12 і щітки 13. Кут повороту дисків 14 і 15 вимірюється оптопарою з відкритим оптичним каналом 16. Додаткова оптопара 17 застосовується для фіксації початку відліку імпульсів від оптопари 16.

При вимірюванні концентрації паперової пульпи основний вал і всі елементи, які закріплені на ньому обертаються з заданою кутовою швидкістю, яка вибрана для вимірювання. За рахунок в'язкісного тертя, яке буде залежати від концентрації паперової пульпи, виникне момент, який буде діяти на чутливий елемент 1. Під дією цього моменту чутливий елемент повернеться на певний кут відносно основного вала приладу. Цей кут вимірюється за зміщенням диска 15 відносно диска 14, що фіксується за шириною імпульсів, які поступають від оптопари 16. Відхилення кута повороту чутливого елемента компенсується магнітоелектричним перетворювачем, а струм через навитки магнітоелектричного перетворювача буде пропорційним до значення моменту в'язкісного тертя і, відповідно, до значення концентрації паперової пульпи.

4.2.2. Обґрунтування конструкції давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи

Незважаючи на велику кількість різноманітних конструкцій серійних інкрементних енкoderів для вимірювання кутів повороту і інших параметрів обертання, в ротаційних концентратомірах паперової пульпи застосовують спеціальні конструкції давачів для вимірювання кута повороту чутливого елемента. Це пояснюється тим, що вал 2 (рис. 4.8) обертається в підшипниках 9 і 10 з великим діаметром ($D=85$ mm, $d=45$ mm, 7209B) для забезпечення механічної міцності приладу та заданого терміну служби. Елементи більших підшипників мають більші відхилення розмірів і більші биття при обертанні, тому при стикуванні валів на таких підшипниках з енкoderами виникають великі коливання значення кута повороту чутливого елемента, що зменшує точність вимірювання. Такий ефект зустрічається і в інших технічних задачах, наприклад, при визначенні точки рубу в ротаційних ножицях. Індуктивний давач для вимірювання кута повороту чутливого елемента віскозиметрів [95, 96], які призначені для чистих рідин, не підходить для концентратоміра паперової пульпи, які є більш масивними приладами через важкі умови роботи.

Тому для ротаційних концентратомірів паперової пульпи пропонується конструкція оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента, яка складається з двох однакових дисків з прорізами по колу з максимально можливим діаметром. Один з дисків закріплений на основному валу, а другий - на валу з чутливим елементом. Оптопара з відкритим оптичним каналом – світлодіод і фотодіод вимірює зміщення щілин, яке міняється при повороті дисків один відносно одного.

Загальний вигляд оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента концентратоміра паперової пульпи, який застосовувався при дослідженнях перед вдосконаленням конструкції, наведений на рис. 4.9, це оптичний давач концентратоміра паперової пульпи МЕК-2300 [38].

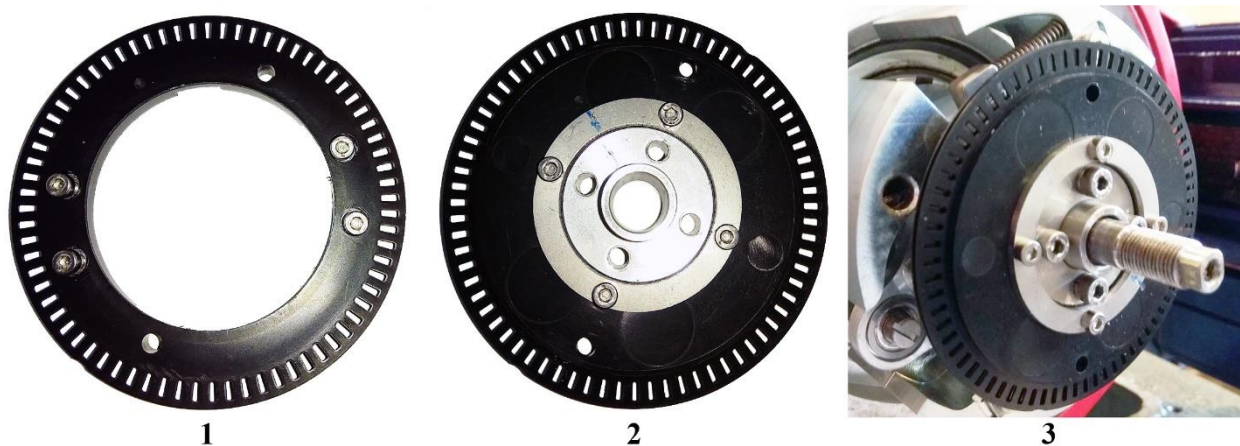


Рис. 4.9 Конструкція давача для визначення кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра [38]. 1 – диск з прорізами по колу, який закріплений на основному валу приладу; 2 – диск з прорізами по колу, який закріплений на валу чутливого елемента; 3 – оптичний давач для визначення кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи в зборі (без оптопар).

4.2.3. Опис структурної схеми запропонованого пристрою для опрацювання сигналу від оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи відносно ведучої осі, установки для дослідження, методики досліджень

Для опрацювання сигналу від оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи відносно ведучої осі нами запропоновано пристрій, структурна схема якого наведена на рис. 4.10. Цей же пристрій, доповнений частотоміром, застосовувався для досліджень оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи.

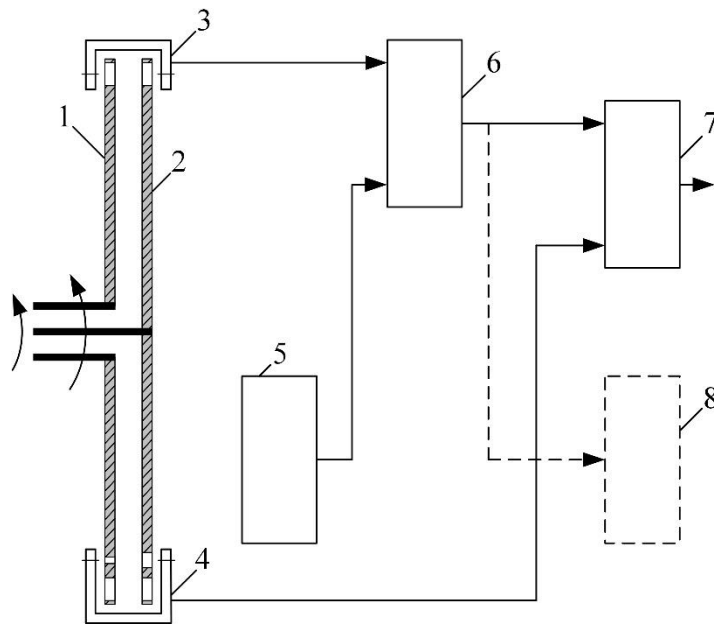


Рис. 4.10. Структурна схема запропонованого пристрою для обробки сигналу від давача для визначення кута повороту чутливого елемента ротаційного концентрометра [12]. 1 – диск з прорізами по колу, який закріплений на основному валу приладу; 2 – диск з прорізами по колу, який закріплений на валу чутливого елемента; 3 – оптопара для вимірювання зміщення прорізів дисків 1 і 2; 4 – оптопара для фіксації початку відліку; 5 – кварцований генератор імпульсів з частотою 50 кГц; 6 – логічний елемент співпадиння; 7 – вільнопрограмований логічний контролер з швидкісними входами; 8 – частотомір.

Пристрій функціонує наступним чином.

В залежності від кута повороту вала чутливого елемента відносно основного вала концентрометра буде зміщатися диск 2 відносно диска 1 і зміниться кут перекриття щілин на цих дисках. Оптопара 3 за один оберт дисків 1 і 2 зафіксує 72 імпульси прямокутної форми, ширина яких буде залежати від кута повороту диска 2 відносно диска 1. Початковим розміщенням диска 2 відносно диска 1 можна зробити так, що ширина імпульсів при збільшенні кута повороту чутливого елемента концентрометра буде зростати, або навпаки – буде зменшуватись.

Далі потрібно вирішити задачу вимірювання ширини імпульсів після оптопари 3. Найпростіше вирішити таку задачу з допомогою вільнопрограмованого

логічного контролера, якщо заповнити ці імпульси імпульсами зі значно вищою фіксованою частотою і порахувати їх.

Досліджувались і порівнювались три такі варіанти опрацювання сигналу: 1 – підрахунок кількості імпульсів в пачках після логічного елемента співпадіння 6 за фіксований час 1с; 2 – підрахунок кількості імпульсів в довільно вибраних послідовних 504 пачках імпульсів після логічного елемента 6, що відповідає 7 обертам основного вала приладу і по часу при вибраній кутовій швидкості обертання чутливого елемента буде близьким до 1с; 3 – обробка аналогічно до п. 2, тільки з прив'язкою до початку відліку за імпульсом від оптопари 4.

За критерій точності оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи було вибране значення відносного середньоквадратичного відхилення тридцяти послідовних вимірювань. Вимірювання проводились при обертанні валів концентратоміра в повітрі та в воді, а розрахунок значення відносного середньоквадратичного відхилення зводився до діапазону вимірювання концентратоміра 0 - 5 % паперової пульпи з суміші гофрокартону (50 %), канцелярського (25 %) та газетного (25 %) паперу. Детально результати вимірювань наведені у пункті 4.3.

4.2.4. Аналіз результатів дослідження давача кута повороту

Експериментальні вимірювання проводилися з давачем кута повороту чутливого елемента концентратоміра паперової пульпи, конструкція дисків з прорізами для якого показана на рис.4.9 [12]. Діапазон вимірювання кута повороту чутливого елемента $-1 - +1^\circ$. В компенсаційних приладах діапазон зміни кута повороту чутливого елемента менший і складає $-0,4 - +0,4^\circ$, при цьому момент, який зумовлений ущільненням вала чутливого елемента, міняється в межах $-0,7 - +0,7$ Н·м. Основний вал приладу обертася від асинхронного двигуна, точне значення кількості обертів асинхронного двигуна за 1 хв вимірювалось з допомогою того ж самого оптичного давача і при перерахунку в воді воно було рівним 1491 об/хв.. При зростанні моменту в'язкісного тертя до 1,25 Н·м значення кількості обертів двигуна зменшилось до 1482 об/хв., тобто, відносна зміна

кількості обертів склала 0,6 % і при подальших розрахунках вона не враховувалась. Ця зміна кількості обертів двигуна від механічного навантаження відтворюється однозначно, проте вона може мінятися в часі по мірі зношування підшипників. Очевидно, що для підвищення точності вимірювання концентрації паперової пульпи і для підвищення стабільності показів приладу в часі кількість обертів двигуна можна стабілізувати з вищою точністю при живленні двигуна від частотного перетворювача, який ввімкнений в замкнену систему регулювання кількості обертів двигуна.

Для вказаних значень кількості обертів двигуна кількість обертів основного вала була рівною $\omega = 7,193$ і $\omega = 7,15$ за 1с відповідно. При цьому кількість зубів на шківках понижуючої пасової зубчастої передачі дорівнювала $Z_1 = 22$ і $Z_2 = 76$. Розрахункова кількість імпульсів частотою 50 кГц в 72 пачках за один оберт основного вала приладу міняється від 0 до 2780 при зміні кута повороту чутливого елемента від -1° до $+1^\circ$.

Формула для розрахунку кількості імпульсів N_1 після логічного елемента б за час T має вигляд:

$$N_1 = \frac{m \cdot \alpha}{360^\circ} \cdot f_G \cdot T, \quad (4.3)$$

де, крім відомих: α – кут повороту диска 2 відносно диска 1; m – кількість прорізів на диску, $m=72$; f_G - частота кварцованого генератора.

Формули для розрахунку кількості імпульсів N_2 після логічного елемента б за один оберт чутливого елемента наступні:

$$N_2 = \frac{m \cdot \alpha}{360^\circ} \cdot \frac{f_G}{\omega}, \quad \omega = \frac{n}{60} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}, \quad (4.4)$$

де: ω – частота обертання чутливого елемента; n – кількість обертів двигуна за 1 хв; Z_1 – кількість зубів шківки на валу двигуна; Z_2 – кількість зубів шківки на основному валу концентратоміра.

В першому експерименті оцінювалось відносне середньоквадратичне відхилення значень кількості імпульсів після логічного елемента 6 за 1с при обертанні чутливого елемента в повітрі та в воді і з зведенням до діапазону вимірювання концентратоміра 0 – 5 % паперової пульпи, склад якої наведений в п. 4.2.3. Розрахункова кількість імпульсів при зміні кута повороту чутливого елемента в межах -1° – $+1^{\circ}$ від 0 до 20 000. Опрацювання результатів вимірювань проведено згідно з [98 - 101]. Результати наведені в табл. 4.4.

Експерименти проведені з використанням двох видів чутливих елементів: у формі диска, та Тип В, МЕК-2300 [38], фотографії яких наведено на рис. 4.11.

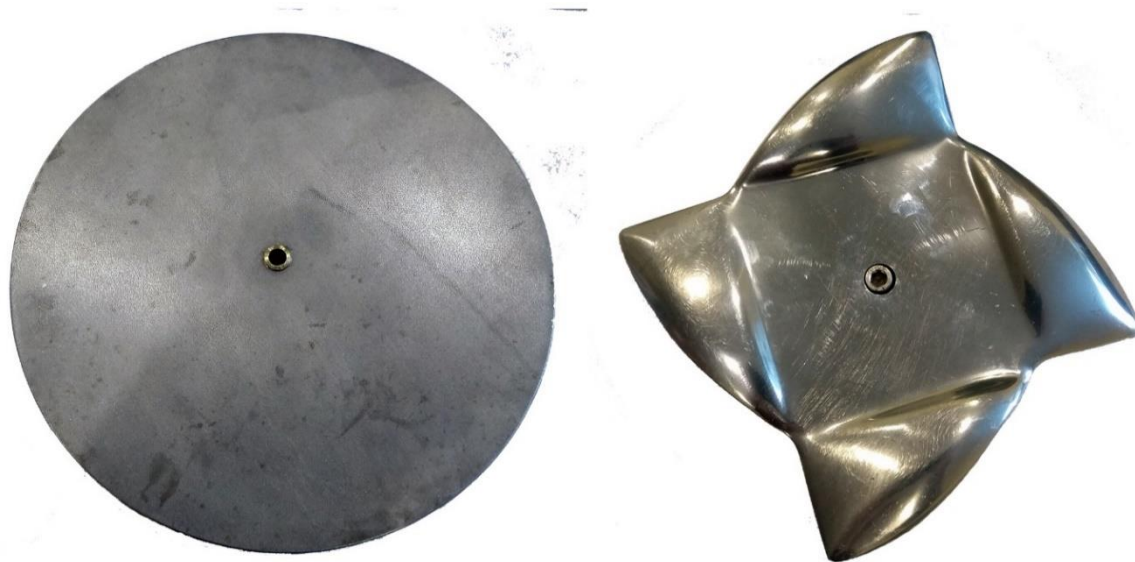


Рис.4.11. Фото чутливих елементів: диск \varnothing 186 мм та Тип В, МЕК-2300

Загальний вигляд експериментальної установки наведено на рис. 4.12.



Рис.4.12 Фото лабораторної установки для дослідження датчика для вимірювання кута повороту чутливого елемента ротатійного концентратоміра паперової пульпи

Таблиця 4.4.

Результати експериментального дослідження давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента концентратоміра паперової пульпи при підрахунку імпульсів після логічного елемента схеми за час 1 с.

Тип чутливого елемента	Диск \varnothing 186 мм			Тип В, МЕК-2300 [38]		
	Повітря	Вода, 20° С	Вода, 20° С, з компенсацією моменту	Повітря	Вода, 20° С	Вода, 20° С, з компенсацією моменту
Середнє значення кількості імпульсів	14393	13868	14396	14373	13685	14416
S, імп.	22	27	23	26	21	23
σ , % зведене до діапазону вимірювання	0,81	1,0	0,85	0,74	0,6	0,66

Було зроблено припущення, що на результати вимірювань впливають механічні фактори – наявність пасової передачі, биття основного вала і т.д. Тому для перевірки було вибрано час підрахунку імпульсів 10 с, хоча для реальних конструкцій такий час усереднення вимірювань кута повороту чутливого елемента занадто великий. Розрахункова кількість імпульсів буде в межах від 0 до 200 000. Результати наведені в табл. 4.5.

Таблиця 4.5.

Результати експериментального дослідження давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента концентратоміра паперової пульпи при підрахунку імпульсів після логічного елемента схеми за час 10 с.

Тип чутливого елемента	Диск \varnothing 186 мм			Тип В, МЕК-2300 [38]			
	Середовище	Повітря	Вода, 20° С	Вода, 20° С, з компенсацією моменту	Повітря	Вода, 20° С	Вода, 20° С, з компенсацією моменту
Середнє значення кількості імпульсів		143747	138327	144128	142961	135962	143695
S, імп		77	127	58	88	170	112
σ , % зведене до діапазону вимірювання		0,29	0,47	0,21	0,25	0,49	0,32

Відносні середньоквадратичні відхилення значень кількості імпульсів при підрахунку їх на протязі 10 с є меншими, ніж при підрахунку на протязі 1 с. Це свідчить про те, що механічні фактори впливають на роботу давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента приладу. Зменшити цей вплив можна застосувавши прямий привід від серводвигуна, як це зроблено в конструкціях концентратомірів, які описані в [36] та в [41].

Наступний експеримент полягав в підрахунку 504 пачок імпульсів після логічного елемента б, що наближається по часу до опрацювання результатів вимірювання за 1 с за попередньою методикою і відповідає 7 повним обертам основного вала. Результати наведені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6.

Результати експериментального дослідження давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента концентратоміра паперової пульпи при підрахунку 504 пачок імпульсів після логічного елемента схеми.

Тип чутливого елемента	Диск \varnothing 186 мм			Тип В, МЕК-2300 [38]			
	Середовище	Повітря	Вода, 20° С	Вода, 20° С, з компенсацією моменту	Повітря	Вода, 20° С	Вода, 20° С, з компенсацією моменту
Середнє значення кількості імпульсів		14185	13670	14178	14167	13496	14211
S, імп		20	23	19	24	17	18
σ , % зведене до діапазону вимірювання		0,77	0,89	0,74	0,72	0,51	0,54

Відносні середньоквадратичні відхилення вимірювань для цього експерименту є меншими в порівнянні з результатами, наведеними в табл. 4.4. Отже, цей метод опрацювання сигналу про значення кута повороту чутливого елемента є точнішим.

Наступним припущенням було те, що введення фіксації початку підрахунку імпульсів в пачках за імпульсом від додаткової оптопарі 4 теж має зменшити відносне середньоквадратичне відхилення результатів вимірювання. Для цього був проведений експеримент, аналогічний до попереднього, тільки з фіксацією початку відліку з одного і того самого місця диску 1 за імпульсом від оптопарі 4. Результати експерименту наведені в табл. 4.7.

Таблиця 4.7.

Результати експериментального дослідження давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента концентратоміра паперової пульпи при підрахунку 504 пачок імпульсів після логічного елемента схеми із фіксацією початку відліку.

Тип чутливого елемента	Диск \varnothing 186 мм			Тип В, МЕК-2300 [38]		
	Повітря	Вода, 20° С	Вода, 20° С, з компенсацією моменту	Повітря	Вода, 20° С	Вода, 20° С, з компенсацією моменту
Середнє значення кількості імпульсів	14154	13662	14157	14164	13486	14205
S, імп	14	12	11	12	15	13
σ , % зведене до діапазону вимірювання	0,54	0,47	0,43	0,36	0,45	0,39

Результати, які наведені в табл. 4.7, підтверджують позитивний результат від введення фіксації початку підрахунку імпульсів за сигналом від додаткової оптопари 4. Цей варіант опрацювання сигналу від давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента концентратоміра паперової пульпи вибраний як найточніший для реалізації приладу.

Результати дослідження показали, що для побудови концентратомірів паперової пульпи перспективною є конструкція з магнітоелектричним компенсатором в'язкісного тертя, виконаного як інтегрована конструкція з оптичним давачем для вимірювання кута відхилення чутливого елемента. Ця конструкція є також дуже зручна з точки зору технічної реалізації та відлагодження. Запропоновано також вимірювати значення кута повороту чутливого елемента за фіксовану кількість повних обертів дисків з прорізами на валах приладу, причому для початку опрацювання сигналу від основної оптопари вводити початковий імпульс від додаткової оптопари.

Запропоновану опрацювання сигналу від оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента концентратоміра паперової пульпи можна застосувати і для конструкцій концентратомірів з прямим вимірюванням значення моменту в'язкісного тертя.

4.3. Розрахунок градуювальних характеристик концентратоміра паперової пульпи з магнітоелектричною компенсацією та порівняння з експериментальними даними.

Для забезпечення високої точності вимірювань ротаційним концентратоміром потрібно проводити його калібрування згідно з градуювальними таблицями або графіками. Для кожного типу паперової маси є окремий графік, який побудований для конкретного типу концентратоміра, та чутливого елемента. На рис.4.13 зображено градуювальні характеристики для ротаційного концентратоміра типу МЕК-2300 для: 1 – суміші канцелярського паперу (50%) та газетного паперу (50%), 2 – суміші гофрокартону (50 %), канцелярського паперу (25 %) та газетного паперу (25 %), 3 – гофрокартону.

Процедура калібрування полягає в тому, що ми проводимо відбір проби паперової пульпи, після чого проводимо її лабораторні дослідження. В лабораторії для паперової пульпи визначають ряд показників якості, для калібрування нам потрібно лише значення концентрації паперової пульпи. Концентрацію паперової пульпи визначають за формулою (4.5) [27] :

$$C = \frac{m_{\text{сух.}}}{m_{\text{зразка}}} \cdot 100\% , \quad (4.5)$$

де C – концентрація паперової пульпи, $m_{\text{сух.}}$ – маса сухого матеріалу у зразку паперової пульпи, $m_{\text{зразка}}$ – маса зразка паперової пульпи.

Для виготовлення одношарового санітарно-гігієнічного паперу використовується паперова пульпа з сировини приблизно такого складу: гофрокартон, канцелярський папір та газетний папір. Тому шляхом перерахунку відомих градуювальних характеристик було побудовано градуювальну

характеристику для паперової пульпи зі складом: гофрокартон (50 %), канцелярський папір (25 %) і газетний папір (25 %) (рис 4.13).

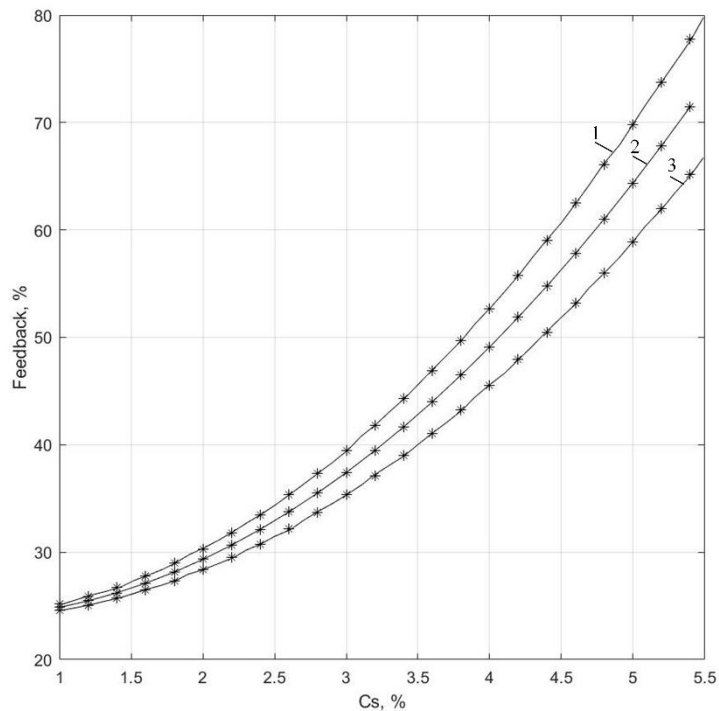


Рис. 4.13 Графік для калібрування ротаційних концентратомірів типу МЕК-2300, для різних типів паперової пульпи: 1 – канцелярський та газетний папір (50%), 2 – суміш гофрокартону (близько 50 %), канцелярського (25 %) та газетного (25 %) паперу, 3 – гофрокартон

Одержані розрахункові дані градувальної характеристики суміші гофрокартону, канцелярського та газетного паперу були апроксимовані за допомогою степеневі функції типу $f(x) = ab^x + c$. Результатом апроксимації є функція:

$$f(x) = 16.38 \cdot x^{1.894} + 169.3 \quad (4.6)$$

На рис.4.14 зображено порівняння розрахованої градувальної характеристики концентратоміра паперової пульпи та апроксимованої градувальної характеристики концентратоміра паперової пульпи з електромагнітною системою компенсації.

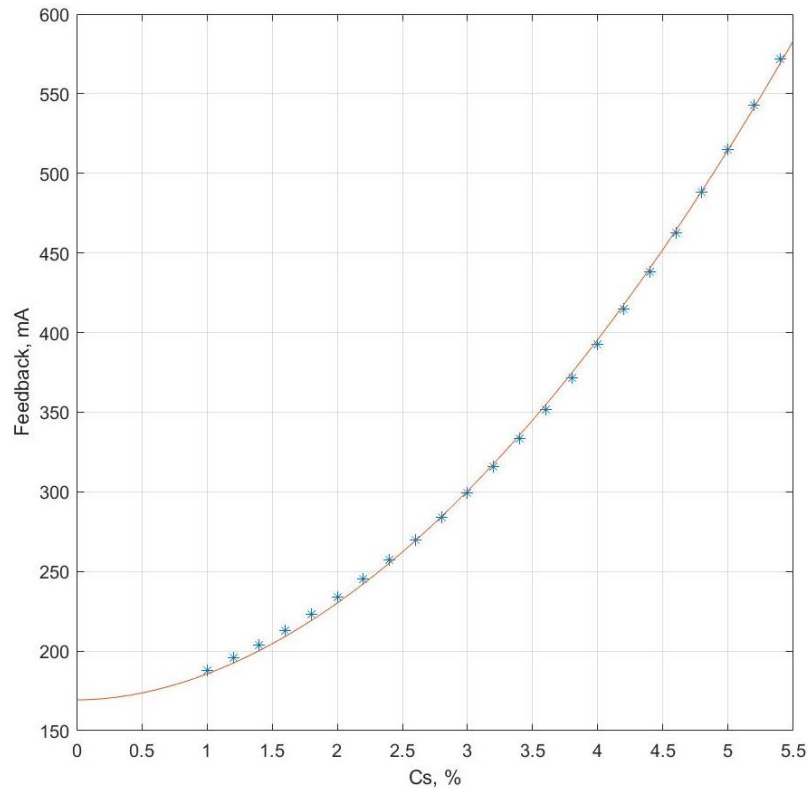


Рис.4.14. Градувальна характеристика концентроміра паперової пульпи з електромагнітною компенсацією

* – експериментальні дані; - – розрахована степенева функція.

При порівнянні апроксимованої градувальної характеристики концентроміра паперової пульпи з електромагнітною компенсацією з експериментально одержаними даними отримані наступні результати: максимальна абсолютна похибка $\Delta=0.75$ мА, відносна похибка $\delta=0.3\%$. Такі результати свідчать, що одержана градувальна характеристика адекватна і її можна використовувати у подальших дослідженнях.

Шляхом перерахунку відомих градувальних характеристик, поелементного дослідження статичних характеристик перетворення складових концентроміра та після корекції експериментальним шляхом для концентроміра паперової пульпи з магнітоелектричною компенсацією одержана градувальна характеристика, яку апроксимовано за допомогою степеневі функції типу $f(x) = ab^x + c$. Результатом апроксимації є функція:

$$f(x) = 3.082 \cdot x^{2.866} + 170.9 \quad (4.7)$$

На рис.4.15 зображено порівняння розрахованої градуювальної характеристики концентратоміра паперової пульпи та апроксимованої градуювальної характеристики концентратоміра паперової пульпи з магнітоелектричною системою компенсації.

При порівнянні апроксимованої градуювальної характеристики концентратоміра паперової пульпи з електромагнітною компенсацією з експериментально одержаними даними отримані наступні результати: максимальна абсолютна похибка $\Delta=9.42$ мА, відносна похибка $\delta=1.6\%$. Такі результати свідчать, що одержана градуювальна характеристика адекватна і її можна використовувати у подальших дослідженнях.

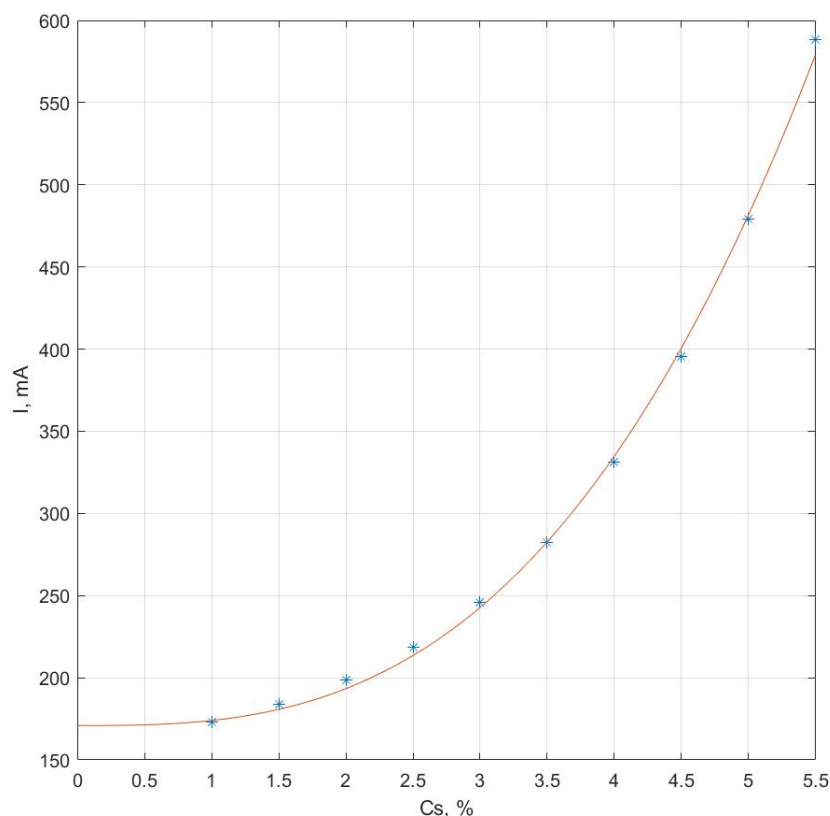


Рис.4.15. Градувальна характеристика концентратоміра паперової пульпи з магнітоелектричною компенсацією .

* — експериментальні дані; - — розрахована степенева функція.

Для перевірки адекватності отриманих результатів побудови градуювальної характеристики магнітоелектричного концентратоміра паперової пульпи було

проведено її експериментальне дослідження. Експерименти проводились для двох різних значень концентрації паперової пульпи при $t = 20^\circ \text{C}$, $\omega = 7,1 \text{ об/с}$, двома різними чутливими елементами: диск $D = 186 \text{ мм}$ та Тип В, МЕК-2300. Концентрація паперової пульпи розраховувалась за формулою 4.4. Результати дослідження наведено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8.

Результати експериментального дослідження градувальної характеристика концентратоміра паперової пульпи з магнітоелектричною компенсацією

Cs, %	Тип чутливого елемента	I, mA	Тип чутливого елемента	I, mA
2,12	Диск $\varnothing 186 \text{ мм}$	191,43	Тип В, МЕК-2300	200.31
4,42	Диск $\varnothing 186 \text{ мм}$	383,03	Тип В, МЕК-2300	391.25

Для одержаних експериментальних даних побудовано графіки (рис.4.16) з накладанням на графік градувальної характеристики ротаційного концентратоміра паперової пульпи з магнітоелектричним компенсаційним механізмом.

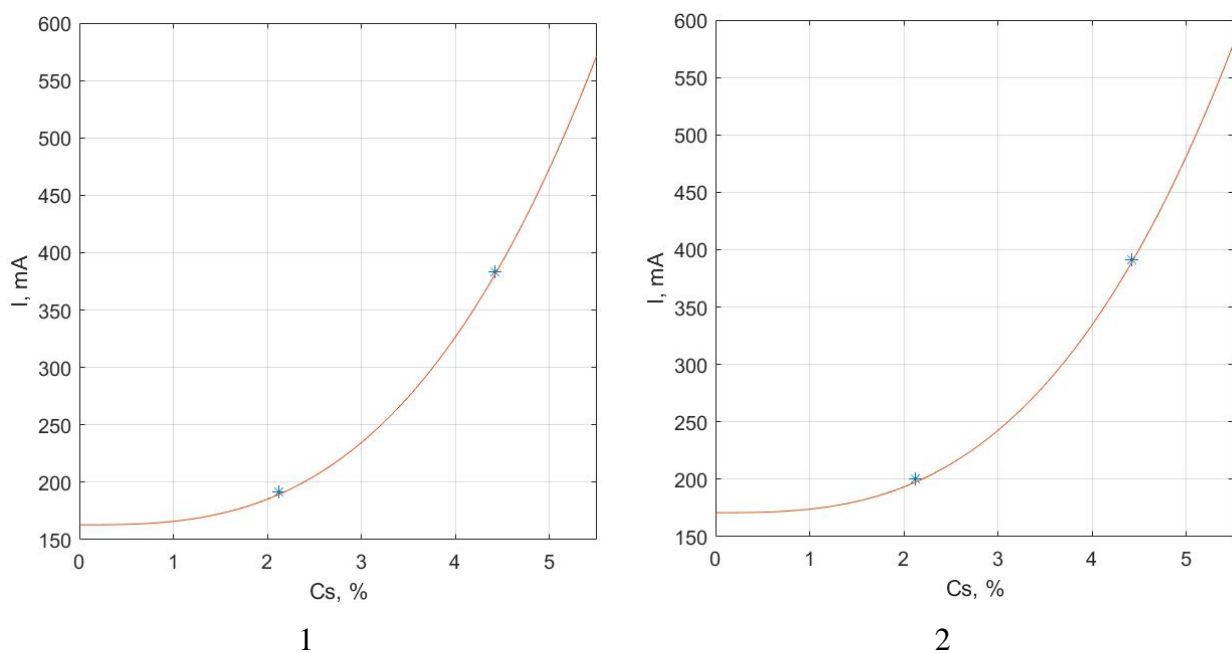


Рис.4.16 Графіки експериментальних досліджень: 1 – для диску $D = 186 \text{ мм}$, 2 – для чутливого елемента ВТГ Тип В. * – експериментальні дані.

Побудовані графіки підтверджують адекватність отриманої градуювальної характеристики.

4.4. ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Запропоновано спосіб обробки сигналу від оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента та одержані аналітичні співвідношення для обробки цього сигналу. Запропонований спосіб обробки сигналу від оптичного давача забезпечує найменше відносне середньоквадратичне відхилення результатів цього вимірювання.

2. Запропоновано застосовувати магнітоелектричний метод компенсації моменту в'язкого тертя в ротаційних концентратомірах паперової пульпи, який має кращу відтворюваність статичної характеристики, що дозволяє підвищити точність вимірювання на початку діапазону вимірювання і мінімізувати вплив ущільнення вала з чутливим елементом на результат вимірювання.

3. Вперше уніфіковано вигляд градуювальних характеристик для ротаційних та лопаткових концентратомірів паперової пульпи за рахунок компенсаційного вимірювання моменту в'язкого тертя паперової пульпи магнітоелектричними перетворювачами і дотримання однакових заданих швидкостей зсуву паперової пульпи, що дозволило уніфікувати алгоритми опрацювання інформації мікропроцесорними засобами.

ВИСНОВКИ

В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень в дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу, яка полягає у розробці методів та засобів покращення метрологічних та експлуатаційних параметрів приладів для вимірювання концентрації паперової маси шляхом модифікації процесу вимірювання її в'язкості з подальшим алгоритмічним опрацюванням результатів вимірювання.

При цьому одержано такі основні результати:

1. На основі проведеного аналізу сучасного стану методів та технічних засобів вимірювання консистенції паперової пульпи обґрунтовано вибір механічного методу вимірювання концентрації паперової пульпи на основі вимірювання моменту сили зсуву, з яким діє на чутливий елемент концентратоміра досліджувана паперова пульпа, та шляхи вдосконалення механічного методу вимірювання концентрації паперової пульпи.

2. Вперше розроблено новий принцип вимірювання концентрації паперової пульпи, що полягає у вимірюванні ефективної в'язкості неньютонівської рідини за двох швидкостей обертання і за двох режимів роботи (прямо / реверс) чутливого елемента ротаційного концентратоміра та алгоритмічного опрацювання результатів вимірювання моменту в'язкісного тертя, що зменшує вплив швидкості потоку пульпи на результат вимірювання. Запропоновано нову схему побудови ротаційного концентратоміра паперової пульпи з кращими метрологічними та експлуатаційними характеристиками.

3. Розроблено та досліджено математичну модель ротаційного концентратоміра паперової пульпи та його складових, створено методіку перерахунку відомих експериментальних даних для корекції функції перетворення розробленого концентратоміра, що зменшує затрати на періодичне градуювання приладів у виробничих умовах. Запропоновано алгоритм опрацювання результатів вимірювань, який дозволяє зменшити вплив моментів сил тертя в ущільненнях та у підшипниках вимірювальної осі концентратоміра на отримане значення концентрації паперової пульпи. Сформовані напрямки подальшого розвитку

механічного методу для побудови ротаційних концентратомірів паперової пульпи, які передбачають модифікацію керування рухом чутливих елементів, що дозволить компенсувати вплив неінформативних параметрів та покращити їх метрологічні характеристики.

4. Запропоновано спосіб опрацювання сигналу від оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра та одержані аналітичні співвідношення для опрацювання цього сигналу. Запропонований спосіб опрацювання сигналу від оптичного давача забезпечує найменше відносне середньоквадратичне відхилення результатів цього вимірювання.

5. Запропоновано застосовувати магнітоелектричний метод компенсації моменту в'язкісного тертя в ротаційних концентратомірах паперової пульпи, який має кращу відтворюваність статичної характеристики, що дозволяє підвищити точність вимірювання на початку діапазону вимірювання і мінімізувати вплив ущільнення вала з чутливим елементом на результат вимірювання.

6. Вперше уніфіковано вигляд градуювальних характеристик для ротаційних та лопаткових концентратомірів паперової пульпи за рахунок компенсаційного вимірювання моменту в'язкісного тертя паперової пульпи магнітоелектричними перетворювачами і дотримання однакових заданих швидкостей зсуву паперової пульпи, що дозволило уніфікувати алгоритми опрацювання інформації мікропроцесорними засобами.

7. Вперше запропоновано керувати рухом чутливого елемента лопаткового концентратоміра паперової пульпи за сигналом від генератора імпульсів трикутної форми, що дозволяє забезпечити задану швидкість зсуву паперової пульпи при вимірюванні і тим самим підвищити точність вимірювання моменту в'язкісного тертя.

8. Розроблено та досліджено математичну модель лопаткового концентратоміра паперової пульпи та створено методику перерахунку відомих експериментальних даних для корекції функції перетворення розробленого концентратоміра, що зменшує затрати на періодичне градуювання приладів у

виробничих умовах. Запропоновано новий порядок проведення вимірювань концентрації паперової пульпи за допомогою лопаткового концентратоміра з активною лопаткою із проведенням вимірювання моменту сили зсуву при постійному програмно встановлюваному значенні швидкості зсуву та алгоритм визначення концентрації паперової пульпи на його основі, який зменшує вплив швидкості течії паперової пульпи на визначене значення її концентрації.

9. Результати теоретичних та експериментальних досліджень впроваджені у навчальний процес кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій (АВКТ) НУ «Львівська політехніка» при викладанні курсу “Метрологія, технологічні вимірювання та прилади, частина 2”.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Офіційний сайт міністерства економічного розвитку і торгівлі України. Целюлозно-паперова промисловість України. [Електронний ресурс] URL: <http://www.ukrexport.gov.ua/ukr/prom/ukr/25.html>
2. Зінченко Д. В., Дунська А.Р. Проблеми та перспективи розвитку целюлозно-паперової промисловості України в умовах світового ринку // Економічний вісник НТУУ «КПІ» 8с. [Електронний ресурс]. - URL: <http://probleconomy.kpi.ua/pdf/2014-12.pdf>
3. Попадинець Н.М. Ринок целюлозно-паперової промисловості: тенденції, проблеми та напрямки розвитку.// Науковий вісник НЛТУ України. 2011. Вип. 21.8. С.278-284. URL: http://nltu.edu.ua/nv/Archive/2011/21_8/278_Pop.pdf
4. Яблочкин Н.И., Комаров В.И., Ковернинский И.Н. Макулатура в технологии картона. Архангельск: изд-во Архангельского государственного технического университета, 2004. 252 с.
5. Технология целлюлозно-бумажного производства. Справочные материалы. В 3 т. Т 1. Ч. 1. Сырье и производство полуфабрикатов. / Под. ред. П.С. Осипова. - СПб.: ЛТА, 2002. 425 с.
6. Schramm, G. A. Practical Approach to Rheology and Rheometry. 2-nd Edition, Gebrueder HAAKE GmbH, Karlsruhe, 2000. 291 p.
7. Instrument and Automation Engineer's Handbook. V.II. Analysis and Analyzers. / Ed. Lipták V. G., Venczel K. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. 1314p.
8. Oleksandr Romaniuk, Bohdan Kril', Oleksandr Kril'. Algorithmic Method of Precision Enhancement of the Paper Pulp Blade Consistometer // Energy Engineering and Control Systems. 2016. Vol.2. № 1. P.25 – 31.
9. Романюк О. М., Кріль Б. А., Кріль О. В. Алгоритмічний метод підвищення точності лопаткових концентратомірів паперової маси // Методи та прилади контролю якості. Івано-Франківськ. 2017. №1 (38), С.28-33.

10. Romaniuk O.M., Kril B.A., Kril O.V., Krykh H.B. Rotational paper pulp viscometer with measurements at two shear speeds. // Scientific Bulletin of UNFU. 2017. Vol. 27. № 6. P. 172 – 177.
11. Романюк О. М., Крих Г.Б., Кріль Б. А., Кріль О. В. Удосконалення ротаційного віскозиметра для вимірювання концентрації паперової маси // Методи та прилади контролю якості. 2017. №2 (39). С.47-54. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу.
12. Y. Pistun, B. Kril, O. Romaniuk, O. Kril. Investigation of sensor for measurement of rotation angle of sensitive element in rotational paper pulp consistometer // Energy Engineering and Control Systems. 2017. Vol.3. № 2. P.73–80. URL: <https://doi.org/10.23939/jeeecs2017.02.073>
13. Романюк О.М., Кріль Б.А. Розробка ротаційного віскозиметра для вимірювання концентрації паперової маси // 5-а науково-практична конференція студентів і молодих вчених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання» (24–25 листопада 2015р. Івано-Франківськ). Збірник тез доповідей. Івано-Франківськ, 2015. С. 172–174.
14. Romaniuk O., Kril' B. Development of Analyzer for Paper Stock Concentration Measurement // Proceedings of 5-th International academic conference “Electric Power Engineering & Control Systems 2015” (EPECS-2015). (November 26-28, 2015, Lviv). Lviv. 2015. P.168-169.
15. Романюк О.М., Кріль Б.А. Підвищення точності ротаційних віскозиметрів алгоритмічним шляхом // Матеріали II Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (25 листопада 2015р.) [Електронний ресурс] НУХТ. Київ. 2015 р. С.71–72.
16. Романюк О. М., Кріль Б. А., Кріль О. В. Поточкові концентратоміри паперової маси з компенсацією впливу швидкості середовища // XV Міжнародна науково-

технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (17–18 травня 2016 р., Київ). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», ПБФ. Київ, 2016. С.112.

17. Романюк О. М., Кріль Б. А., Кріль О. В., Кокошко Р.В. Підвищення точності вимірювання лопаткових концентратомірів паперової пульпи алгоритмічним методом // Матеріали III Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне, та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними та технологічними комплексами» (23 листопада 2016р.) [Електронний ресурс] НУХТ. Київ. 2016. С.80-81.

18. Oleksandr Romaniuk, Bohdan Kril' Danylo Kril', Roman Kokoshko. Algorithmic Method of Precision Enhancement of Paper Blade Consistometer // Proceedings of 6-th International Academic Conference "Electric Power Engineering & Control Systems 2016" (EPECS-2016). (November 24-26, 2016, Lviv). Lviv. 2016. P.205–206.

19. Романюк О. М., Кріль Б. А., Кріль О. В. Лопатковий концентратомір паперової пульпи із зменшеним впливом швидкості на процес вимірювання // IV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології 2017 (АКІТ – 2017)» (19-20 квітня 2017р., Київ). Матеріали конференції. НТУУ «КПІ». 2017. С.162–163.

20. Романюк О. М., Кріль Б. А., Кріль О. В. Зменшення впливу швидкості потоку паперової пульпи на процес вимірювання концентрації лопатковими концентратомірами // XVI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (16–17 травня 2017 р., Київ). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», ПБФ. Київ, 2017. С.99 – 100.

21. Романюк О.М., Кріль Б.А., Кріль О.В. Вдосконалення механічних концентратомірів паперової пульпи // IV міжнародна наукова конференція «Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах (ВКДТС-2017)» (31 жовтня – 02 листопада 2017 р., Вінниця). Матеріали конференції. Вінниця, 2017. С.114–115.

22. Romaniuk O., Kril' B., Kril' O. Improvement of the Mechanical Consistometers for Paper pulp // Proceedings of 7-th International Academic Conference "Electric Power Engineering & Control Systems 2017" (EPECS-2017). (November 23-25, 2017, Lviv). Lviv. 2017. P.186-187.
23. Романюк О.М., Кріль Б.А., Кріль О.В. Дослідження ротаційного концентратоміра паперової пульпи з магнітоелектричною компенсацією // 8-ма науково-технічна конференція "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання". (14 – 16 листопада 2017р. Івано-Франківськ). ІФНТУНГ. Івано-Франківськ. 2017. С.173-175.
24. Романюк О.М., Кріль Б.А., Кріль О.В. Дослідження оптичного давача для вимірювання кута повороту чутливого елемента ротаційного концентратоміра паперової пульпи // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної Internet-конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем керування організаційно-технічними та технологічними комплексами», (22 листопада 2017р.) [Електронний ресурс] НУХТ. Київ. 2017р. С.82-83.
25. Пат. на винахід №119899 Україна, МПК G01 N 11/10, G01 N 15/06, G01 N 33/34, G05 D 24/02. Пристрій для вимірювання концентрації паперової маси/ Кріль Б.А., Кріль О.В., Романюк О.М.; заявник і патентовласник Національний університет «Львівська політехніка». - №а201708172; заявл. 07.08.2017; опубліковано 27.08.2019, Бюл. № 16. - 4 с.: іл.
26. Waller M.H. A tutorial on the measurement of paper stock consistency // ISA Transactions. 1993. V. 32. P. 277-282.
27. Consistency (concentration) of pulp suspensions, T 240 om-88, TAPPI Test Methods 1, TAPPI Press, Atlanta, GA, 1988.
28. Клименко Л.П., Соловйов С.М., Норд Г.Л. Системи технологій. 6.4. Лісова, деревообробна та целюлозно - паперова промисловість. С. 379-401. URL: lib.chdu.edu.ua/pdf/posibnuku/247/28.pdf

29. Фляте Д.М. Технология бумаги: Учеб. для вузов. М.: Лесная промышленность, 1988. 440 с.
30. Кларк Дж. Технология целлюлозы (Наука о целлюлозной массе и бумаге, подготовка массы, переработка её в бумагу, методы испытаний) / пер. с англ. А.В. Оболенской, Г.А. Пазухиной. М.: Лесная промышленность, 1983. 456 с.
31. Технология целлюлозно-бумажного производства: справочные материалы: в 3 т. Т 1. Сырьё и производство полуфабрикатов. Ч. 2. / под ред. П.С. Осипова. СПб.: ЛТА, 2005. 633 с.
32. Saville Frank. Energy and Paper Recycling: An Investigation of Repulping. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. The University of British Columbia (Vancouver) May 2016. 211p. URL: <https://open.library.ubc.ca/media/download/pdf/24/1.0300490/4>
33. Barnes H.A., Nguyen Q.D. Rotating vane rheometry – a review // J. Non-Newtonian Fluid Mech. 2001. V. 98. P. 1–14.
34. Torsion digital viscometer: United States Patent No.US 3751975. / Katsura T. App1.No.: 171,139. Filling date: 12.08.1971; Publication date 14.08.1973.
35. Viscometer: United States Patent No.US 5,763,766. / Robinson G. Appl No.: 656,267. Filed: Dec. 17, 1993. Date of Patent: Jun. 9, 1998.
36. Phase controller for a dual motor torque detecting device: United States Patent No US 8,171,776 B2. / Andersson N., Kullander J., Lundberg P., Adrian P. Appl. No: 12/523,076. Filed: Dec. 19, 2007. Date of Patent: May 8, 2012.
37. Rotational viscosity measurement apparatus: United States Patent No US 5987970 A. / Ball D.M. App1- No.: 09/131,947. Filing date Aug 10, 1998. Date of Patent: Nov 23, 1999.
38. User manual MEK-2300 with JCT-1100 Smart Rotating Consistency Transmitter. M218.56/2e. BTG 2002. URL: http://www.inven.nl/documenten/MEK2300_handleiding.pdf

39. Oy JT-Tieto & Nygård M. Metso Rotating Consistency Transmitter. Installation & Owner's Manual K09157 V1.0 EN Metso Automation Inc. Documentation. 2010 URL: www.metso.com/automation.
40. Rotating consistency transmitter impeller and method: United States Patent No US 5684247 / Preikschat E. Appl. No: 666'903. Filing date: 19.06.1996; Publication date 04.11.1997.
41. MEK – 3000 TWIN TORQUE // URL: <https://www.btg.com/en/products/products-by-type/inline-instrumentation/consistency/consistency-detail/155/>
42. Valmet Rotating Consistency Transmitter. URL: <http://www.valmet.com/automation-solutions/analyzers-and-measurements/consistency/rotating-consistency-transmitter-rotary/>
43. Metso Rotating Consistency Measurement. URL: http://valveproducts.metso.com/documents/cct/products/Metso_Rotary/Manuals/K09177%20V1.0%20EN%20-%20Metso%20Rotary%20PA%20manual.pdf
44. MEK-2500 RotoForce. URL: <https://www.btg.com/en/products/products-by-type/inline-instrumentation/consistency/consistency-detail/279/>
45. SBT-2400. URL: <https://www.btg.com/en/products/products-by-type/inline-instrumentation/consistency/consistency-detail/159/>
46. *Valmet SP - Installation & User's manual K11389 V1.1 EN* URL: http://194.251.26.188/documents/cct/products/Valmet_SP/Manuals/SP%20user%20manual%20K11389%20V1-1%20EN.pdf
47. Metso Blade Consistency Transmitter – Metso SP. URL: http://valveproducts.metso.com/documents/cct/products/Metso_SP/Manuals/Metso%20SP%20owner%20manual.pdf
48. MBT-2500. URL: <https://www.btg.com/en/products/products-by-type/inline-instrumentation/consistency/consistency-detail/154/>

49. ACT-2500 AmpliForce. URL: <https://www.btg.com/en/products/products-by-type/inline-instrumentation/consistency/consistency-detail/153/>
50. Consistency transmitter: United States Patent No US 5686660 / Lundberg P. Appl. No.: 666,507. Filed: Nov. 22, 1995. Date of Patent: Nov. 11, 1997.
51. Sealless consistency transmitter: United States Patent No US 5369987 / Nettamo K., Mustonen M. Appl. No.: 899,725. Filled: June 17, 1992. Date of Patent: Dec. 6, 1994.
52. Method of measuring and regulation the concentration of a fiber suspension and a device for carrying out the method: United States Patent No. US 4677846 / Lundberg P. Appl. No.: 829,123. Filled: Apr. 9, 1985. Date of patent Jul. 7, 1987.
53. Method and apparatus for measuring the viscosity of a medium: United States Patent No US 4875362 / Skallen B. Appl. No.: 849,761. Filed: Apr. 9, 1986. Date of Patent: * Oct. 24, 1989.
54. Sensor element and consistency transmitter: US Patent Application Publication. Pub. No. US 2010/0116032 A1 / Ruossari O.P. Appl. No. 12/450,962. Fil. Apr. 25, 2008. Pub. Date May. 13, 2010.
55. Coating and surface sizing with blades. URL: <https://www.btg.com/en/products/products-by-type/metering-blades-and-rods/metering-blades-and-rods-detail/177/>
56. Method and apparatus for indicating the size distribution of particles in a flowing medium: United States Patent No US 4318180 A / Lundqvist I.J., Pettersson J. G. T., Fladda G. H. Appl. No.: 47,002. Filed: Jun. 11, 1979. Date of Patent: Mar. 2, 1982.
57. Jack J. S., Bentley R. G., Barron R. L. Optical Pulp Consistency Sensors // Pulp & Paper Canada. 1990. V. 91. N 2. P. 76–80.
58. Metso Optical Consistency Transmitter. URL: http://valveproducts.metso.com/documents/cct/products/Metso_OC/Manuals/K11299%

20V1.0%20EN%20-

%20Metso%20OC%20Installation%20&%20Owner%20Manual.pdf

59. RET-2502/2512 PeakTwo. URL: <https://www.btg.com/en/products/products-by-type/inline-instrumentation/consistency/consistency-detail/156/>

60. TCR-2501/2511 PeakTotal. URL: <https://www.btg.com/en/products/products-by-type/inline-instrumentation/consistency/consistency-detail/160/>

61. TCR-2502/2512 PeakTotal. URL: <https://www.btg.com/en/products/products-by-type/inline-instrumentation/consistency/consistency-detail/161/>

62. TCT-2501/2511 PeakOne URL: <https://www.btg.com/en/products/products-by-type/inline-instrumentation/consistency/consistency-detail/162/>

63. Valmet Optical Low Consistency Transmitter. URL:

<http://www.valmet.com/automation-solutions/analyzers-and-measurements/consistency/optical-low-consistency-transmitter-lc/>

64. Valmet Optical Consistency Transmitter, Valmet OC, Valmet OCE, Valmet OCR, Valmet OCS. URL: <http://www.valmet.com/automation-solutions/analyzers-and-measurements/consistency/optical-consistency-transmitter-oc/>

65. TCT-2531 PeakOFT. URL: <https://www.btg.com/en/products/products-by-type/inline-instrumentation/consistency/consistency-detail/163/>

66. RET-5503 PeakAsh. <https://www.btg.com/en/products/products-by-type/inline-instrumentation/consistency/consistency-detail/157/>

67. RET-5533 PeakAsh. URL: <https://www.btg.com/en/products/products-by-type/inline-instrumentation/consistency/consistency-detail/158/>

68. Petersen D. E. Nuclear Density Consistency Meter Evaluation // 1994 Process Control Symposium: Proceedings (Atlanta, GA, 1994). Atlanta, GA, 1994. TAPPI Press. P.9–12.

69. *Valmet SP - Installation & User's manual K11389 V1.1 EN* URL: [http://194.251.26.188/documents/cct/products/Valmet SP/Manuals/SP%20user%20manual%20K11389%20V1-1%20EN.pdf](http://194.251.26.188/documents/cct/products/Valmet_SP/Manuals/SP%20user%20manual%20K11389%20V1-1%20EN.pdf)

70. BTG Product Digest.

http://www.pulpapernews.com/sites/default/files/btg_product_digest_e-brochure_ny.pdf

71. KC/7 Microwave Consistency Transmitter. URL:

<http://engematic.com.br/admin/public/img/kc7-manual-v1.pdf>

72. Consistency Measurement and Control In a Tissue Mill. URL:

<http://www.tappi.org/content/events/11papercon/documents/271.429%20ppt.pdf>

73. Valmet Microwave Consistency Transmitter (Valmet MCA). URL:

<http://www.valmet.com/automation-solutions/analyzers-and-measurements/consistency/microwave-consistency-transmitter-mca/>

74. Metso Microwave Consistency Transmitter. URL:

http://www.elscolab.com/sites/default/files/imported/Valmet_MCA_MicrowaveConsistencyTransmitter_Manual.pdf

75. Microwave Consistency Meter A344 URL: <http://www.aquar-system.com/catalog/pulp-consistency-meter/microwave-consistency-meter-a344/>

76. Steffe J.F. Rheological Methods in Food Process Engineering. Second edition.

Freeman Press, East Lansing, MI, USA, 1996. 418 p. URL :

<https://sites.google.com/site/jfsteffe/freeman-press>

77. Introduction to Rheology.V.2.1E.doc URL:

<http://www.dongjins.com/service/file/Introduction%20to%20rheology.pdf>

78. Ерофеева А.А. Безножевой размол волокнистых полуфабрикатов с учетом реологических особенностей суспензий: автореф. Дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук: [спец.] 05.21.03 - "Технология и оборудование химической переработки биомассы дерева; химия древесины" / Сиб. гос. техно. Ун-т. Красноярск: 2012. 19с.

79. Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. Москва, Химия, 1977. 440 с.

80. Мордасов М.М., Мордасов Д.М. Аэрогидродинамические принципы реализации измерений в капиллярных вискозиметрах Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2011. 184 с.

81. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. Изд. 8-е. Л: Химия, 1976. 552с.
82. Derakhshandeh B., Kerekes R.J., Hatzikiriakos S.G., Bennington C.P.J. Rheology of pulp fibre suspensions: A critical review // *Chemical Engineering Science*. 2011. V. 66. P. 3460-3470.
- 83 Barnes H. A. A review of the slip (wall depletion) of polymer solutions, emulsions and particle suspensions in viscometers: its cause, character, and cure // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 1995. V. 56, Issue 3, P.221-251.
84. Nguyen Q.D., Boger D.V. Measuring the flow properties of yield stress fluids // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 1992 V. 24. P.47-88.
85. Barnes H.A. Thixotropy – a review. // *J. of Non-Newtonian Fluid Mech*. 1997. V.70. N 1-2. P.1-33.
86. Swerin A. Rheological properties of cellulosic fibre suspension flocculated by cationic polyacrylamides // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 1998. V.133 N 3. P.279-294.
87. Wikstrom T., Rasmuson A. Yield stress of pulp suspensions: the influence of fibre properties and processing conditions // *Nordic Pulp Paper Resource Journal*. 1998. V. 13. N 3. P. 243-250.
88. Chase W.C., Donatelli A.A., Walkinshaw J.W. Effects of freeness and consistency on the viscosity of hardwood and softwood pulp suspensions // *TAPPI Journal*. 1989. V.72. N 5. P.199-204.
89. Bennington C.P.J., Kerekes R.J., Power requirements for pulp suspension fluidization // *TAPPI Journal* 1996. V.79. N 2. P. 253-258.
90. Derakhshandeh B., Hatzikiriakos S.G., Bennington C.P.J. Rheology of pulp fibre suspensions using ultrasonic Doppler velocimetry // *Rheologica Acta*. 2010. V. 49. N 11-12. P. 1127-1140.

91. Blanco A., Negro C., Fuente E., Tijero J. Rotor selection for a Searle-type device to study the rheology of paper pulp suspensions // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2007. V. 46. Issue 1. P. 37–44.
92. Савельев И. В. Курс общей физики. В 3 томах. Том 2. Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. Москва. Лань. 2008. 500с.
93. Valmet Blade Consistency Transmitter – Valmet SP Installation and User's Manual, Valmet Automation Inc., Kajaani, Finland. – 2015.
94. Consistency measuring apparatus: United States Patent Patent No US 3364730 A / Wall, H. A. Appl. No.: 441181. Filed: Mar. 19, 1965. Date of Patent: Jan. 23, 1968.
95. Covimat 205. URL:
http://www.prorheo.de/fileadmin/user_upload/pdfs/Covimat_205_DD_zF.pdf
96. TT-100 Viscometer for In-line System Applications. URL:
<http://www.brookfieldengineering.com/products/viscometers/in-line-process-viscometers/tt-100-viscometer>
97. MEK-2400 Roterende consistentie transmitter. URL.:
<http://www.inven.nl/mek2400.html>
98. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100:2008. First edition 2008. Corrected version 2010. 134 p. URL: https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf
99. Дорожовець М. Опрацювання результатів вимірювань: навч. посіб. Львів: Вид. Національного університету «Львівська політехніка», 2007. 624с.
100. Основи метрології та вимірювальної техніки. Підручник: у 2т. Т.1. Основи метрології / Дорожовець М., Стадник Б., В. Мотало В. та ін. За ред. Стадника Б. Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2005. 532 с.
101. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О. та ін. За ред. Поліщука Є.С. Львів.: Бескид Біт, 2003. 544 с.

102. Apparatus and method for determining pulp stock consistency: United States Patent No US 4507556 / Brenholdt I.R. Appl. No. 448040. Filed Dec. 8. 1982. Date of Patent Mar. 26. 1985.

103. Примаков С.Ф., Барбаш В.А., Шутько А.П. Технология бумаги и картона: учеб. пособ. для вузов. М.: Экология, 1996. 304 с.

104. Жидецький Ю.Ц. Матеріалознавство: навч. посіб. Лебедин: 2010. 116 с.

105. Примаков С.Ф. Производство бумаги. М.: Лесная промышленность, 1987. 222 с.