

В.І. Осипенко, д.т.н., проф.**Л.Д. Мисник, к.т.н., доц.****Л.М. Мізнік, к.т.н., доц.****М.В. Хандюк, ст. викладач***Черкаський державний технологічний університет***Л.Г. Полонський, д.т.н., проф.***Державний університет «Житомирська політехніка»*

Закономірності зміни точності і метрологічної надійності манометрів для вимірювання тиску водяної пари в вакуум-випарних апаратах

У статті наведено результати повнофакторного експерименту щодо дослідження закономірностей зміни точності та метрологічної надійності пружинних манометрів, які застосовуються у вакуум-випарних апаратах харчової промисловості. Проаналізовано сучасні тенденції розвитку харчової галузі та обґрунтовано важливість точності вимірювання тиску в технологічних процесах теплової обробки продуктів, зокрема при експлуатації вакуум-випарних апаратів типу МЗС-320. Аналіз результатів повнофакторного експерименту по експериментальному дослідженню впливу рівня перевищення тиску над верхньою межею вимірювань і тривалості його дії на метрологічні характеристики манометрів дозволив встановити параметри точності та метрологічної надійності манометрів різних виробників, що найбільш часто використовуються як в вакуум-випарних апаратах МЗС-320, так і в іншому теплосиловому обладнанні харчової галузі. Встановлено, що при підвищенні тиску до 1,25 МПа протягом 45 хвилин і більше відбувається метрологічна відмова манометрів нижнього цінового сегмента через зниження пружних властивостей чутливих елементів. Манометри середнього цінового сегмента (WIKA, HYDROSCAND) продемонстрували вищу стабільність показань і відсутність метрологічних відмов у межах експериментальних режимів. Обґрунтовано доцільність використання пристроїв захисту від перевантажень і демпферних систем для забезпечення стабільності показань манометрів. Запропоновано рекомендації щодо підвищення надійності вимірювальних приладів, що сприятиме зниженню втрат сировини та покращенню ефективності технологічних процесів у харчовій промисловості.

Ключові слова: манометр; вакуум-випарний апарат; трубка Бурдона; тиск; метрологічна надійність; точність; похибка.

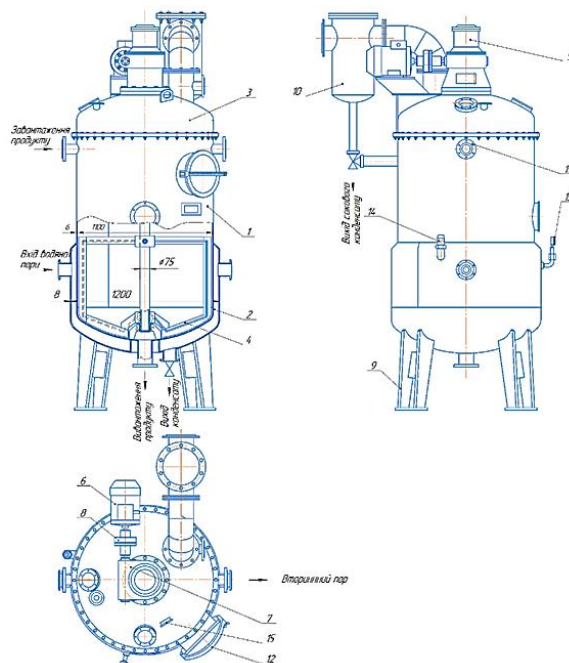
Постановка проблеми. Метрологія є інструментом забезпечення якості продукції, робіт і послуг – важливого аспекту багатогранної наукової та комерційної діяльності. Проблема якості актуальна для всіх країн незалежно від зрілості їх ринкової економіки. Дотримання правил метрології в різних сферах діяльності людини, дозволяє звести до мінімуму матеріальні втрати від недостовірних результатів вимірювань. У сучасних дослідженнях особлива увага приділяється впливу експлуатаційних факторів на точність вимірювальних приладів [1, с. 5]. У харчовій промисловості значна частка вимірювань (до 30 %) припадає на контроль тиску, що визначає параметри теплових і масообмінних процесів [2, с. 5]. Найбільш поширеними засобами вимірювання залишаються пружинні манометри, які поєднують конструкційну простоту та достатню точність. Водночас їх експлуатація в умовах перевантажень, температурних коливань і динамічних навантажень зумовлює зміну метрологічних характеристик, що потребує поглибленого дослідження їх надійності.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Історичні аспекти становлення метрології відображено у працях багатьох учених, які зробили вагомий внесок у формування її теоретичних і практичних основ. Зокрема, у роботах Г.І. Вільда, А.Я. Купфера, В.С. Глухова, Л.В. Залуцького, В.В. Бойцова та інших дослідників розкрито етапи розвитку метрології як науки, що забезпечує єдність та достовірність вимірювань [4, с. 6]. Їхні праці сприяли становленню наукових засад вимірювальної техніки, формуванню системи стандартів та еталонів, а також розвитку метрологічних служб. У переробній промисловості тиск є однією з змінних, які найчастіше потрібно реєструвати та контролювати. Як у стандартних застосуваннях, так і в спеціальних умовах експлуатації, кожне застосування вимагає манометрів, які ідеально відповідають його потребам. Манометри різних типів (механічні, електронні, вакуумметри) характеризуються різними принципами дії, що обумовлює специфіку їх метрологічних характеристик [5, с. 3; 10, с. 2]. Окрім характеристик точності зумовлених класом точності манометра та його калібруванням, слід враховувати внески невизначеності точності, зумовлені конкретними технологічними умовами застосування, такими як екстремальні температури, високий тиск у контейнерах, екстремальні перепади висот, удари, агресивні середовища або проблемні фізичні властивості продукту [6, с. 4]. Тому

важливим напрямом досліджень є вивчення впливу фізичних факторів на результати вимірювання тиску. Зокрема, для механічних манометрів з трубкою Бурдона, встановлено, що ефект перевищення тиску може суттєво змінювати чутливість приладу та викликати додаткову похибку [5, с. 4]. Незважаючи на вагомість наведених доробок, питання оцінювання точності та метрологічної надійності конкретних типів манометрів різних виробників та різного цінового діапазону, що використовуються в технологіях харчової галузі залишаються актуальними.

Метою дослідження є встановлення закономірностей зміни точності та метрологічної надійності пружинних манометрів у залежності від рівня перевищення тиску над верхньою межею вимірювань та тривалості дії перевантаження. Для досягнення мети передбачено: проведення повнофакторного експерименту; визначення умов виникнення метрологічних відмов; розроблення рекомендацій щодо підвищення надійності вимірювальних систем.

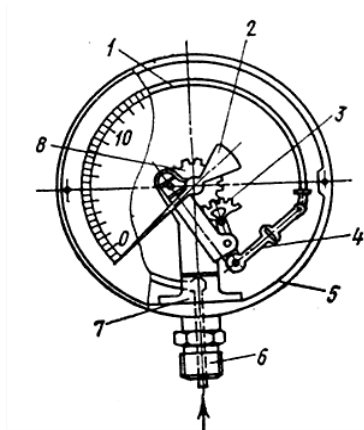
Викладення основного матеріалу. Сьогодні в усьому світі склалися такі тенденції та пріоритети: подальше зростання врожайності сільськогосподарської сировини, розвиток тваринництва, розширення асортименту, підвищення якості, покращення харчової цінності та смакових характеристик харчових продуктів, упровадження конкурентоспроможних та економічно вигідних технологій, скорочення технологічного циклу та інтенсифікація технологічних операцій, раціональне використання основної та вторинної сировини. Реалізація зазначених напрямків можлива лише за рахунок аналізу сучасних методів технологічного впливу на харчові продукти та вибору оптимальної організації технологічного потоку [2, с. 5]. Плоди і овочі – незамінне джерело легкозасвоюваних вуглеводів, фізіологічно активних речовин (вітамінів, поліфенолів, мінеральних з'єднань, природних антиоксидантів і харчових волокон). З давніх часів були відомі лікувальні властивості багатьох видів плодів, овочів і ягід. Проте термін зберігання їх обмежений, з його подовженням зростають втрати маси і якості, збільшуються витрати на зберігання. Ціль консервування – переведення нестійкої при зберіганні сировини в продукцію тривалого зберігання. Виробництво консервованих продуктів дозволяє значно скоротити втрати сільськогосподарської сировини, забезпечити цілорічне постачання населення плодоовочевою продукцією в широкому асортименті, понизити витрати праці і часу на приготування їжі, для армійського харчування, харчування в екстремальних умовах (під час тривалих експедицій) [7, с. 6]. В технологіях консервування в Україні широко використовуються вакуум-випарні апарати МЗС-320 виробництва ПАТ «Монастирищенського машинобудівного заводу» [8, с. 21]. Апарат використовується як вакуум-випарний апарат при приготуванні томатного пюре та пасти, різних соусів для овочевих та рибних консервів, повидла, варення, розсолів для приготування маринадів, а також овочевих та фруктових соків.



1 – корпус; 2 – парова камера; 3 – кришка; 4 – мішалка; 5 – привід мішалки; 6 – електродвигун; 7 – редуктор; 8 – втулично-пальцева муфта; 9 – стойки; 10 – пастка; 11 – оглядові вікна; 12 – люк; 13 – манометр; 14 – підливний клапан; 15 – мановакуумметр

Рис. 1. Вакуум-випарний апарат МЗС-320

Випарний апарат МЗС-320 – спеціалізована ємність, призначена для ефективного нагрівання та перемішування продукту, зображений на рисунку 1 [9, с. 283]. Його основні компоненти включають корпус 1 та паровий відділ, які разом створюють парову камеру 2, що забезпечує нагрівання продукту через подачу водяної пари. Температурний режим конкретного технологічного процесу визначається параметрами подачі водяної пари. Тиск подачі водяної пари контролюється манометром 13. В даній установці використовуються пружинні манометри [3, с.7] різних виробників. Прилад з трубчастою одновитковою пружиною показаний на рисунку 2.



1 – одновиткова трубчата пружина; 2 – стрілка; 3 – зубчатий сектор; 4 – тяга; 5 – корпус манометра; 6 – ніпель, 7 – основа манометра; 8 – трибка

Рис. 2. Манометр з одновитковою трубчастою пружиною

Принцип дії деформаційних манометрів полягає в тому, що тиск (рідини, газу або пари) вимірюється за величиною деформації пружних елементів. Деформаційні манометри відрізняються простотою та надійністю конструкції, невеликими габаритами, досить високою точністю, широким діапазоном вимірювання. Завдяки цим якостям деформаційні манометри широко застосовуються в різних галузях техніки в діапазоні вимірювань від 50 Па до 1000 МПа. Одновиткова пружина 1 (рис. 2) є сталевую або латунною порожнистою трубкою (трубка Бурдона) зігнутою по колу. Один кінець пружини 1 впаєний в основу 7 приладу. На цій же основі змонтовано механізм передачі зі стрілкою 2 і круглий корпус 5 манометра. Вимірюване середовище підводиться через ніпель 6 у внутрішню порожнину пружини. Під тиском вимірюваного середовища трубчата пружина прагне випрямитися, її вільний кінець відхиляється і через тягу 4 повертає зубчатий сектор 3, який, у свою чергу, повертає трибку (шестерню) 8, а з нею і стрілку 2 на кут, пропорційний тиску. При повороті шестерні стрілка, що закріплена на її осі, теж повертається і 2 показує на шкалі вимірюваний тиск.

До недоліків пружинних манометрів слід віднести: нестійка робота манометрів в умовах вібрації (коливання стрілки); не можна вимірювати тиск в агресивному середовищі, яке діє на металеві стінки трубок; не можна вимірювати тиск у в'язких середовищах (забиваються трубки). Основними недоліками подібних манометрів є наявність залишкових деформацій трубчастої пружини, що призводять до появи варіації показань, а також можливість зміни її пружних властивостей при перевищенні рівня вимірюваного тиску над верхньою межею вимірювань (ВМВ). Однак, якщо похибка від варіації нормована і не повинна перевищувати гранично допустиме значення для відповідного класу точності, то зміна пружних властивостей чутливого елемента може призвести до збільшення похибки вимірювань та метрологічної відмови манометра, яка буде виявлена лише при черговій повірці приладу. Невисока метрологічна надійність може бути обумовлена впливом умов експлуатації на властивості вимірювального механізму, оскільки навіть за відносно невеликого перевищення робочого тиску над ВМВ може статися незворотна пластична деформація чутливого елемента або вихід з ладу передавального механізму.

Для дослідження впливу рівня перевищення тиску на метрологічну надійність манометрів було проведено повний факторний експеримент (ПФЕ) об'єктом якого виступили нові справні манометри нижнього цінового сегменту найпоширеніших в Україні виробників – ПАТ «Склоприлад» (Україна) та «WIKА» (Німеччина). В якості референтної групи розглянуто манометри середнього цінового сегменту «HYDROSCAND» (Швеція). Їхні основні характеристики представлені в таблиці 2. Похибка всіх манометрів була попередньо досліджена в лабораторії ДП «Черкасистандартметрологія» за 5 контрольними точками і не перевищувала 0,01 МПа. Вся процедура повірки та калібрування манометрів регламентується відповідними нормативними документами, зокрема ДСТУ та міжнародними стандартами.

Характеристики досліджуваних манометрів

Виробник	Модель	Діаметр корпусу, мм	Діапазон, МПа	Клас точності	Приблизна ціна, грн
ПАТ «Склоприлад» (Україна)	ДМ 05063	63	0–1	2,5	220
«WIKА» (Німеччина)	111.10	63	0–1	2,5	320
«HYDROSCAND» (Швеція)	8360-00-010	63	0–1	1,6	850

Відповідно до ДСТУ 7224:2011 [9] манометри з ВМВ до 10 МПа повинні витримувати перевантаження надлишковим тиском у 25 % над ВМВ протягом 15 хвилин і після витримки без тиску не менше 1 години відповідати зазначеному класу точності. Однак триваліший вплив надлишкового тиску може призвести до метрологічної відмови манометра. Як фактори впливу в ПФЕ використовувалися рівні тиску (1,1, 1,2 і 1,25 МПа) і час впливу (15, 30, 45, 60 хвилини). Кожен манометр піддавався певному поєднанню рівня тиску та тривалості впливу і, таким чином, для реалізації всіх можливих комбінацій за умовами ПФЕ було досліджено по 12 манометрів кожної марки. Після впливу підвищеного тиску манометри витримували протягом 1 години без подачі тиску для релаксації пружного елемента, після чого проводили повторне дослідження похибки в лабораторії ДП «Черкасистандартметрологія». Залежності максимальної похибки манометрів від перевищення тиску над ВМВ за різної тривалості впливу (гранична допустима похибка досліджуваних манометрів дорівнює 0,025 МПа, позначена на рисунках горизонтальною лінією) представлені на рисунках 3–5. Шкала всіх розглянутих манометрів проградуєвана в МПа і перевантаження в 25 % відповідає рівню тиску 1,25 МПа.

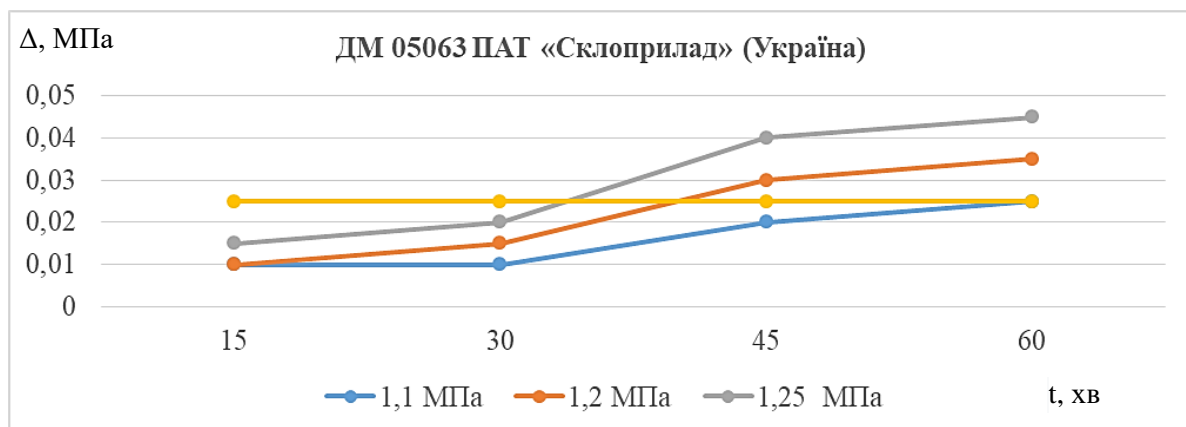


Рис. 3. Залежність максимальної похибки манометрів ДМ 05063 ПАТ «Склоприлад» від перевищення рівня тиску над ВМВ за різної тривалості впливу

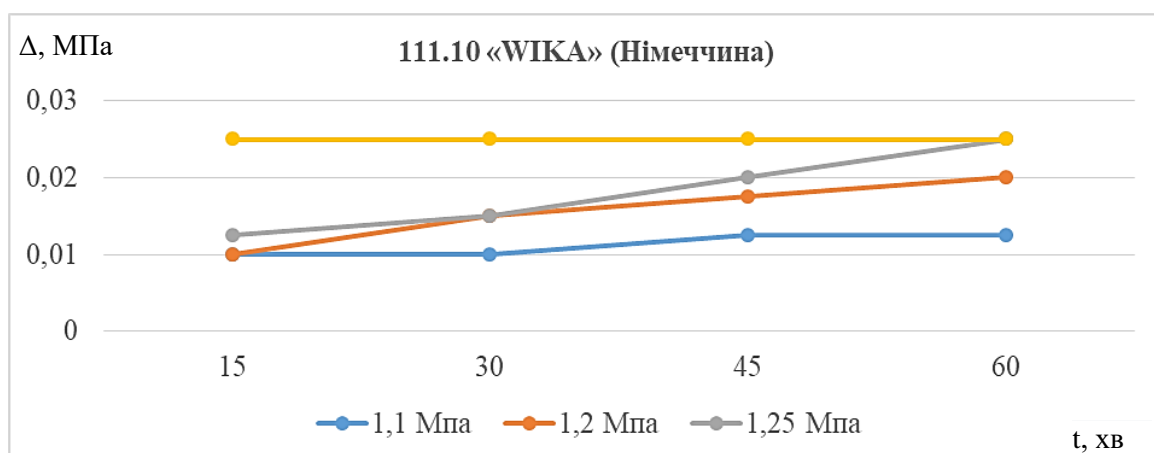


Рис. 4. Залежність максимальної похибки манометрів 111.10 «WIKА» від перевищення рівня тиску над ВМВ за різної тривалості впливу

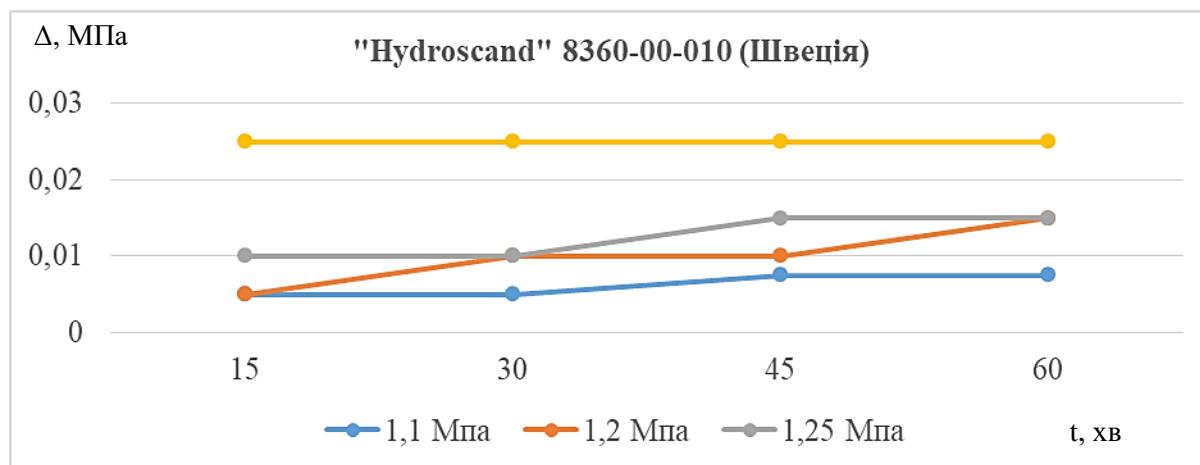


Рис. 5. Залежність максимальної похибки манометрів 8360-00-010 «Hydroscand» від перевищення рівня тиску над ВМВ за різної тривалості впливу

Як бачимо з результатів представлених на рисунку 3 при перевищенні тиску над ВМВ від 1,2 МПа до 1,25 МПа протягом 45 хвилин і більше відбулася метрологічна відмова манометрів ДМ 05063 ПАТ «Склоприлад» (Україна). Похибка манометрів 111.10 «WIKА» (Німеччина) (рис. 4) також помітно збільшилася, проте не перевищила гранично допустиме значення для відповідного класу точності. Під час проведення аналогічного експерименту з манометрами референтної групи випадків метрологічної відмови виявлено не було (рис. 5). Гранична допустима похибка в цьому випадку дорівнює 0,015 МПа через більш високий клас точності манометрів 8360-00-010 «HYDROSCAND» (Швеція).

Висновки:

1. Експериментальними дослідженнями встановлено залежність метрологічних характеристик манометрів від рівня перевищення тиску над верхньою межею вимірювань та тривалості впливу. Показано, що при тиску 1,25 МПа і тривалості дії понад 45 хвилин манометри нижнього цінового сегмента (типу ДМ 05063, ПАТ «Склоприлад») зазнають метрологічної відмови через втрату пружних властивостей чутливого елемента;
2. Манометри середнього цінового сегмента (WIKА, HYDROSCAND) продемонстрували вищу стабільність показань і відсутність метрологічних відмов у межах експериментальних режимів. Це свідчить про залежність метрологічної надійності приладів від якості матеріалів і конструктивних рішень;
3. Для запобігання метрологічним відмовам та підвищення надійності роботи вимірювальних систем у вакуум-випарних апаратах варто застосовувати манометри більш високого цінового сегменту або застосовувати пристрої захисту від перевантажень – запобіжні клапани та демпферні системи, які забезпечують стабільність роботи манометрів за умов коливання або перевищення робочого тиску;
4. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем контролю технологічних процесів у харчовій промисловості, підвищення точності вимірювань і запобігання аварійним ситуаціям, що зумовлює практичну значущість проведеного дослідження.

Список використаної літератури:

1. Метрологія : навч. посіб. / уклад. Н.М. Зацепкіна. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 397 с.
2. Гніцевич В.А. Харчові технології. Технологія продуктів рослинного походження : навч. посіб. / В.А. Гніцевич, Р.П. Никифоров, А.В. Слащева. – Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2021. – 267 с.
3. Корець М.С. Лабораторний практикум з машинознавства. Основи гідравліки. Гідравлічні машини. Основи термодинаміки і теплопередача. Теплові двигуни / М.С. Корець. – Київ : Вид-во НПУ, 1999. – 274 с.
4. Залуцький Л.В. Метрологічне забезпечення промислових вимірювань / Л.В. Залуцький. – Харків : УкрНДІМ, 2001. – 180 с.
5. Schiering N. Uncertainty evaluation in industrial pressure measurement / N.Schiering, O.Schnelle-Werner // Journal of Sensors and Sensor Systems. – 2019. – Vol. 8. – P. 251–260. DOI: 10.5194/jsss-8-251-2019.
6. Investigations on measurement uncertainty and stability of pressure dial gauges and transducers / Measurement Science Review. – 2010. – Vol. 10, № 6. DOI: 10.2478/v10048-010-0021-7.
7. Шинкарик М.М. Технологічне обладнання консервної промисловості : навч. посіб. / М.М. Шинкарик, В.Я. Ворожук. – Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2023. – 284 с.
8. Бульба К.Г. Монастирищенський машинобудівний завод / К.Г. Бульба // Енциклопедія Сучасної України ; редкол. І.М. Дзюба, А.І. Жуковський, М.Г. Железняк та ін. ; НАН України, НТШ. – Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2019 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://esu.com.ua/article-69633>.

9. Черевко О.І. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник / О.І. Черевко, А.М. Поперечний. – 2-ге вид., доп. та випр. – Харків : Світ Книг, 2014. – 495 с. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://surl.li/dgpdsh>.
10. Calibration of pressure sensors / M.Varga and other // MM Science Journal. – 2023. DOI: 10.17973/MMSJ.2023_10_2023075.

References:

1. Zashchepkina, N.M. (ed.) (2022), *Metrolohiia*, navch. posib., KPI im. Ihoria Sikorskoho, Kyiv, 397 p.
2. Hnitsyevych, V.A., Nykyforov, R.P. and Slashcheva, A.V. (2021), *Kharchovi tekhnolohii. Tekhnolohiia produktiv roslynnoho pokhodzhennia*, navch. posib., DonNUET, Kryvyi Rih, 267 p.
3. Korets, M.S. (1999), *Laboratornyi praktykum z mashynoznavstva. Osnovy hidravliky. Hidravlichni mashyny. Osnovy termodynamiky i teploperedacha. Teplovi dyuhuny*, Vyd-vo NPU, Kyiv, 274 p.
4. Zalutskiy, L.V. (2001), *Metrolohichne zabezpechennia promyslovykh vymiriuvan*, UkrNDIM, Kharkiv, 180 p.
5. Schiering, N. and Schnelle-Werner, O. (2019), «Uncertainty evaluation in industrial pressure measurement», *Journal of Sensors and Sensor Systems*, Vol. 8, pp. 251–260, doi: 10.5194/jsss-8-251-2019.
6. «Investigations on measurement uncertainty and stability of pressure dial gauges and transducers» (2010), *Measurement Science Review*, Vol. 10, No. 6, doi: 10.2478/v10048-010-0021-7.
7. Shynkaryk, M.M. and Voroshchuk, V.Ya. (2023), *Tekhnolohichne obladnannia konservnoi promyslovosti*, navch. posib., FOP Palianytsia V.A., Ternopil, 284 p.
8. Bulba, K.H. (2019), «Monastyryshchenskyi mashynobudivnyi zavod», *Entsyklopediia Suchasnoi Ukrainy*, in Dziuba, I.M., Zhukovskiy, A.I., Zhelezniak, M.H. et al. (ed.), NAN Ukrainy, NTSh, Instytut entsyklopedychnykh doslidzen NAN Ukrainy, Kyiv, [Online], available at: <https://esu.com.ua/article-69633>
9. Cherevko, O.I. and Poperechnyi, A.M. (2014), *Protsey i aparaty kharchovykh vyrobnytstv*, pidruchnyk, 2nd ed., dop. ta vypr., Svit Knyh, Kharkiv, 495 p., [Online], available at: <https://surl.li/dgpdsh>
10. Varga, M. et al. (2023), «Calibration of pressure sensors», *MM Science Journal*, doi: 10.17973/MMSJ.2023_10_2023075.

Осипенко Василь Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри проектування харчових виробництв та верстатів нового покоління Черкаського державного технологічного університету.

<https://orcid.org/0000-0002-2166-7766>.

Наукові інтереси:

- процеси фізико-технічної обробки матеріалів;
- технології лазерної обробки матеріалів;
- визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів процесів харчових виробництв.

E-mail: v.osypenko@chdtu.edu.ua.

Мисник Людмила Дмитрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування харчових виробництв та верстатів нового покоління Черкаського державного технологічного університету.

<https://orcid.org/0000-0002-7653-9569>.

Наукові інтереси:

- визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів процесів харчових виробництв.

E-mail: l.mysnyk@chdtu.edu.ua.

Мізік Лариса Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування харчових виробництв та верстатів нового покоління Черкаського державного технологічного університету.

<https://orcid.org/0000-0003-3225-6900>.

Наукові інтереси:

- визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів процесів харчових виробництв.

E-mail: gasminum@gmail.com.

Хандюк Микола Васильович – старший викладач кафедри проектування харчових виробництв та верстатів нового покоління Черкаського державного технологічного університету.

<https://orcid.org/0000-0003-3225-6900>.

Наукові інтереси:

- визначення раціональних конструктивно-технологічних параметрів процесів харчових виробництв.

E-mail: nikolay.khandiuk@gmail.com.

Полонський Леонід Григорович – доктор технічних наук, професор кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-4347-9088>.

Наукові інтереси:

- технології машинобудування;
- обробка важкооброблюваних матеріалів.

E-mail: pol@ztu.edu.ua.

Osypenko V.I., Mysnyk L.D., Miznik L.M., Khandyuk M.V., Polonskyi L.G.

Patterns of change in accuracy and metrological reliability of pressure gauges for measuring steam pressure in vacuum evaporators

This article presents the results of a full-factorial experiment investigating the patterns of change in the accuracy and metrological reliability of pressure gauges used in vacuum evaporators in the food industry. Current trends in the development of the food industry are analyzed, and the importance of pressure measurement accuracy in the technological processes of heat treatment of products is substantiated, particularly during the operation of M3C-320-type vacuum evaporators. Analysis of the results of a full-factor experiment on the experimental study of the effect of the pressure level exceeding the upper measurement limit and the duration of its action on the metrological characteristics of pressure gauges allowed us to establish the parameters of accuracy and metrological reliability of pressure gauges from various manufacturers, which are most frequently used both in M3C-320-type vacuum evaporators and in other thermal power equipment in the food industry. It has been established that when pressure is increased to 1.25 MPa for 45 minutes or longer, low-end pressure gauges fail due to a decrease in the elastic properties of their working elements. Pressure gauges in the mid-price segment (WIKA, HYDROSCAND) demonstrated higher stability and no metrological failures within the experimental conditions. The feasibility of using overload protection devices and damping systems to ensure the stability of pressure gauge readings has been substantiated. Recommendations are proposed for improving the reliability of measuring instruments, which will help reduce raw material losses and improve the efficiency of technological processes in the food industry.

Keywords: pressure gauge; vacuum evaporator; Bourdon tube; pressure; metrological reliability; accuracy; error.

Стаття надійшла до редакції 18.12.2025.