

Висновки. Викладено методи дослідження поверхні зразка за допомогою атомно-силового мікроскопу на основі кантелівера механічного типу в безконтактному режимі. Показано, що під час дослідження топології поверхні в безконтактному режимі зонд не контактує із самим зразком, тому не руйнує його і не спотворює зображення. Зокрема, це може бути важливим під час сканування атомно-силовим мікроскопом біологічних об'єктів. Для подальших наукових розробок вибрано безконтактний метод дослідження поверхні зразка за допомогою атомно-силового мікроскопу на основі кантелівера механічного типу.

Література

1. Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М. : Изд-во "Техносфера". 2005. – 448 с.
2. Binnig G. Scanning tunneling microscopy / G. Binnig, H. Rohrer // *Helvetica Physica Acta.* – Vol. 55(1982). – 726 p.
3. Spatz J.P. Forces affecting the substrate in resonant tapping force microscopy / J.P. Spatz, S. Sheiko, M. Moller, R.G. Winkler, P. Reineker, O. Marti // *Nanotechnology.* – 1995. – Vol. 6. – 44 p.
4. Luthi R. Progress in noncontact dynamic force microscopy / R. Luthi, E. Meyer, L. Howald, H. Haefke, D. Anselmetti, M. Dreier, M. Ruetschi, T. Bonner, R.M. Overney, J. Frommer, H.-J. Guntherodt // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1994. – Vol. 3 B12. – 1673 p.

Иванцив Р.Д., Дупак Б.П. Методы исследования поверхности образца с помощью атомно-силового микроскопа на основе кантелівера механического типа

Изложены методы исследования поверхности образца с помощью атомно-силового микроскопа на основе кантелівера механического типа в бесконтактном режиме. Показано, что при исследовании топологии поверхности образца в бесконтактном режиме зонд не контактирует с самим образцом, поэтому не разрушает его и не искажает изображение. В частности, это может быть важным при сканировании атомно-силовым микроскопом биологических образцов.

Ключевые слова: атомно-силовой микроскоп, кантелівер, зонд, сканирующий зондовый микроскоп, силовая сканирующая микроскопия, сканирующая туннельная микроскопия.

Ivantsiv R.D., Dupak B.P. Methods of investigation sample surface using atomic force microscope based on cantilever of mechanical type

The methods of investigation sample surface using an atomic force microscope -based on cantilever of mechanical type in noncontact mode. It is shown that the study of the topology of the sample surface in noncontact mode, the probe is not in contact with the sample itself, so do not destroy it, and does not distort the image. In particular, it may be important when scanning atomic force microscope biological samples.

Keywords: atomic force microscope, cantilever, probe, scanning probe microscope, scanning force microscopy, scanning tunneling microscopy.

УДК 674:621.928.93

Аспір. Л.М. Дорундяк¹ – НЛТУ України, м. Львів

ВСТАНОВЛЕННЯ ВПЛИВУ НЕГЕРМЕТИЧНОСТІ БУНКЕРА НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛОНА

Представлено огляд відомостей про вплив негерметичності бункера на гідравлічний опір циклона та ефективність процесу очищення пилоповітряного потоку в сепараторі. За допомогою програмних пакетів Flow Simulation та FlowVision досліджено

вплив притоку та відтоку повітря з бункера на гідравлічний опір апарата та аеродинаміку процесу циклонування. Наведено результати експериментальних досліджень ефективності процесу повітроочищення за наявності негерметичності бункера.

Ключові слова: циклон, бункер, повітроочищення, аспірація.

Під час очищення пилоповітряного потоку в циклоні відбуваються складні аеродинамічні процеси, які повністю ще не досліджені. У чисельних публікаціях на тему циклонів описано залежність між конструктивними параметрами циклона та технологічними показниками процесу повітроочищення. Проте є питання, які висвітлені не достатньо й однобічно. На нашу думку, передусім до таких питань відноситься вплив негерметичності бункера на процес повітроочищення у циклоні. Відомо [1, 2], що внаслідок інтенсивного обертання повітряного потоку в корпусі циклона статичний тиск знижується від його периферії до центру. Така ж картина спостерігається в бункері. На основі цього у роботі [2] доходять до висновку, що герметичність бункера повинна бути повністю забезпечена не тільки під час встановлення циклона на всмоктуючій, але й на нагнітальній стороні вентилятора. Недотримання такої умови призводить до різкого зниження ефективності процесу пиловловлення [2]. У роботах [3, 4] зазначено, що недоліками відомих конструкцій циклонів є недостатній ступінь очищення потоку від дрібнодисперсного пилу, який різко знижується через виникнення явища підсмоктування у місці з'єднання бункера та циклона і в пристрої для вивантаження відходів. При швидкості потоку повітря на вході в циклон більшій за 15 м/с обов'язково порушується герметичність бункера [4]. Гідравлічний опір циклона підвищується, а ефективність знижується, що призводить до звуження сфери застосування циклонів.

У всіх оглянутих публікаціях негерметичність бункера розглядають, як негативне явище, якого допускати не можна. Ми зробили спробу описати вплив негерметичності бункера на аеродинаміку процесу циклонування та встановити залежність експлуатаційної характеристики апарата внаслідок впливу негерметичності бункера.

Основні дослідження проводили за допомогою програмних пакетів Flow Simulation та FlowVision. Ліцензія була надана фірмою-розробником у рамках програми підтримки студентів та аспірантів. Досліджували вплив негерметичності бункера на аеродинаміку процесу циклонування, значення гідравлічного опору циклона, розподіл складових швидкості потоку повітря в апараті. Під час руху всередині корпусу циклона швидкість потоку повітря розбивають на три складові: осьову, тангенціальну та радіальну. Осьова складова сприяє руху потоку та частинок пилу до дна циклона. Зменшення значення V_{oc} приводить до підвищення ступеня ризику забивання пиловловлювача, а підвищення – призводить до надто малого часу перебування частинки пилу в циклоні. Тангенціальна складова швидкості потоку визначає значення відцентрової сили, яка буде діяти на частинку пилу. Тому підвищення значення V_{tang} сприяє зростанню ефективності процесу повітроочищення. Радіальна складова визначає значення сили Стокса, яка протидіє руху частинки пилу до стінки апарата у випадку, коли V_{rad} напрямлена до осі циклона (явище радіального стоку) і сприяє рухові частинки пилу до стінки у випадку, коли вона напрямлена до периферії.

¹ Наук. керівник: проф. Є.М. Лютий, д-р техн. наук

Циклон було поділено чотирма площинами (П1-П4), перпендикулярними до осі циклона, що перетинали апарат у характерних перерізах (рис. 1), а саме: на середині глибини занурення вихлопної труби, на нижньому краї вихлопної труби, нижче вихлопної труби та в місці з'єднання циліндричної та конічної частини сепаратора. Розміри циклона були такими: діаметр – 400 мм; діаметр вихлопної труби – 220 мм; висота циліндричної частини – 700 мм; висота конічної частини – 800 мм; діаметр бункера – 600 мм; висота бункера – 450 мм; діаметр пилівипускного патрубку – 150 мм.

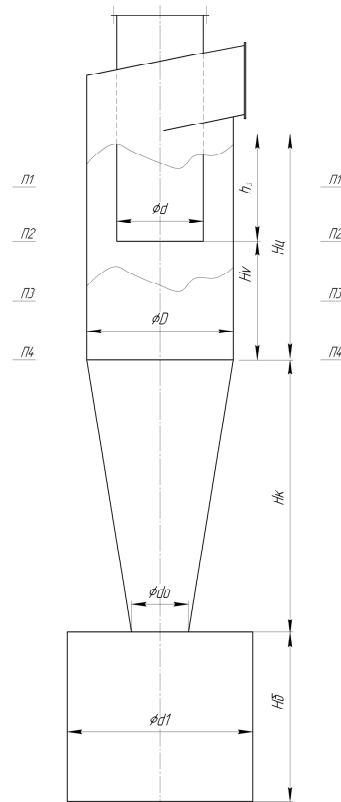


Рис. 1. Схема циклона

Модель циклона створювалася засобами системи автоматизованого проектування SolidWorks, а потім імпортована у програмний комплекс для дослідження аеродинаміки процесу повітроочищення. Застосовували математичну модель руху рідини, яка ґрунтується на рівняннях Нав'є-Стокса, рівняннях нерозривності, дифузійного переносу скалярної величини, законі збереження енергії та рівняннях k - ε моделі турбуленції, у якій турбулентна в'язкість α_t виражається через величини k - ε таким чином [6]:

$$\alpha_t = C_\alpha \rho \frac{k^2}{\varepsilon} f_\alpha,$$

де: k – турбулентна енергія, ε – швидкість дисипації, α_t – турбулентна в'язкість, ρ – густина.

Модель ґрунтується на таких основних рівняннях:

- рівняння Нав'є-Стокса

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \nabla(V \otimes V) = -\frac{\nabla P}{\rho} + \frac{1}{\rho} \nabla \left((\alpha + \alpha_t) (\nabla V + (\nabla V)^T) \right) + S,$$

$$\nabla V = 0$$

де джерело $S = \left(1 - \frac{\rho_{hyd}}{\rho}\right) g + B + \frac{R}{\rho}$, а B – сили обертання, R – сили опору;

- рівняння ентальпії

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(Vh) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{C_p} + \frac{\alpha_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + \frac{Q}{\rho};$$

- рівняння для визначення k та ε

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(Vk) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \frac{G}{\rho} - (\varepsilon - \varepsilon_{ini}) - F;$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(V\varepsilon) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\alpha + \frac{\alpha_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left(C_1 \frac{G}{\rho} - C_2 f_1 (\varepsilon - \varepsilon_{ini}) \right),$$

де ε_{ini} – початкове значення турбулентної дисипації; $G = \alpha_{eff} \frac{\partial V_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right)$;

- рівняння масопереносу

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(VC) = \frac{1}{\rho} \nabla \left(\left(\rho D + \frac{\alpha_t}{Sc_t} \right) \nabla C \right).$$

Застосовували різноманітні граничні умови. Під час дослідження роботи циклона, який встановлено на нагнітальній стороні вентилятора, задавали швидкість руху повітряного потоку у вхідному патрубку – 20 м/с, температура – 273 К; на виході з вихлопної труби використано тип границі "вільний вихід". Роботу циклона на всмоктувальній дільниці моделювали, задаючи швидкість виходу потоку з вихлопної труби.

На рис. 2 а зображено рух повітряних потоків у циклоні, який встановлено на нагнітальній стороні вентилятора. Бункер – герметичний. Повітряний потік поступає у пилловловлювач через вхідний патрубок і починає обертатися у корпусі апарата навколо його осі, одночасно здійснюючи опускання вниз.

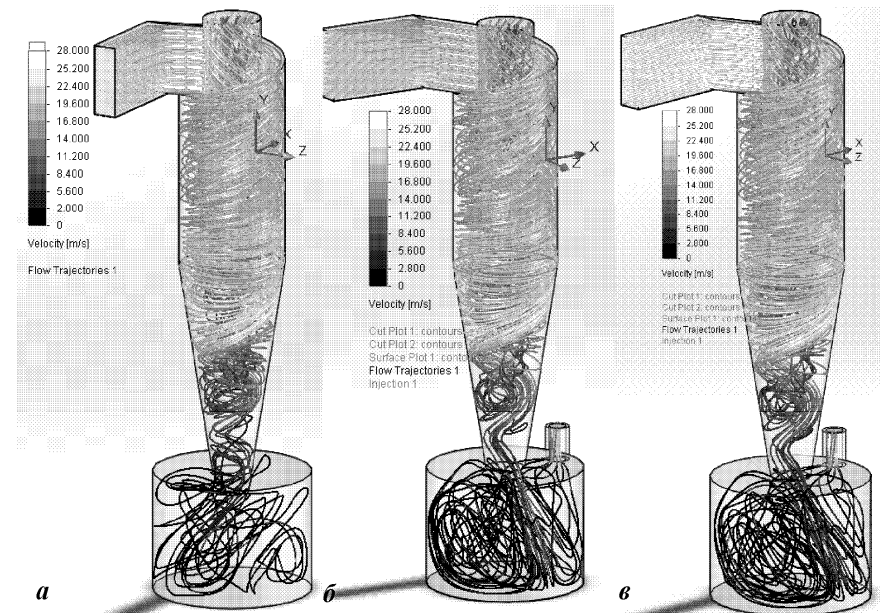


Рис. 2. Рух повітряних потоків у циклоні з герметичним (а) бункером, з витком (б), або підсмоктуванням (в) повітря у бункер

У циліндричній частині циклона спостерігаємо рівномірні значення швидкості повітряного потоку поблизу зовнішньої стінки апарата. У конічній частині швидкість потоку поступово знижується. Частина повітряного потоку потрапляє у бункер, де швидкість його руху знижується до 2 м/с. Потім цей потік підіймається, приєднується до внутрішнього вихору і через вихлопну трубу виходить в атмосферу.

Негерметичність бункера моделювали встановленням на ньому відкритого патрубку. На виході з патрубка встановлювали граничну умову рівності статичного тиску атмосферному. Потік через такий патрубок може як входити у бункер, так і виходити з нього. Об'єм повітряних потоків, які проходять через патрубок, регулювали за допомогою зміни його діаметра. Встановлено, що негерметичність бункера може приводити як до "підсмоктування" повітря з атмосфери всередину бункера, так і до витікання частини потоку. Визначальний вплив при цьому має значення статичного тиску, в бункері. Коли воно є більшим за значення атмосферного тиску виникає явище витоку частини повітря з сепаратора, а якщо нижче – то явище "підсмоктування" повітря з атмосфери у бункер. Дослідження проводили для значень частки (k_n) загальної продуктивності циклона, яка витікає з бункера в атмосферу, що дорівнює 8 %. Під час дослідження підсмоктування частка (k_n) становила 5 %. Рух повітряних потоків у обох випадках зображено на рис. 2 б-в.

Коли відбувається витікання частини потоку з бункера, рух повітря у ньому поділяється на два потоки: один виходить в атмосферу, а інший підіймається у конічну частину, де приєднується до внутрішнього вихору. Таким чином, значно зменшується об'єм повітря, яке захоплено внутрішнім вихором. Знижується його швидкість та інтенсивність обертання. Зворотна ситуація виникає у випадку підсмоктування повітря з атмосфери. Об'єм внутрішнього вихору зростає як і швидкість повітряних потоків на виході з бункера в конічну частину. Такі потоки будуть захоплювати дрібнодисперсний пил, що призведе до зниження ефективності очищення повітряних потоків у циклоні.

На рис. 3-6 представлено графіки розподілу статичного тиску, швидкості повітряного потоку та її осьової, тангенціальної та радіальної складових у площинах П1-П4. На графіках по осі абсцис відкладено відстань від осі до точки заміру, а по осі ординат – значення відповідного параметра. Крива 1 відображає графік зміни відповідного параметра за наявності підсмоктування повітря з атмосфери, крива 2 – герметичний бункер і крива 3 – за наявності витоку частини повітря з бункера. В усіх перерізах значення статичного тиску та його градієнт за наявності явища підсмоктування (рис. 3 а-б а крива 1) є більшим, ніж в апараті з герметичним бункером (рис. 3 а-б а крива 2). За наявності витоку частини повітря з бункера значення статичного тиску та його градієнт у кожному з перерізів є найнижчими (рис. 3 а-б а крива 3).

Результати проведених досліджень свідчать про те, що негерметичність бункера не має особливого впливу на швидкість руху повітряних потоків у зовнішньому вихорі (відстань від осі в межах від 0,11 до 0,2), оскільки різниця між кривими 1, 2 та 3 відсутня (рис. 3 б-б б). На ділянці зовнішнього вихору відсутня не тільки різниця між значеннями швидкості повітряного потоку, а й між значеннями її тангенціальної, радіальної та осьової складових (рис. 3-б в-г).

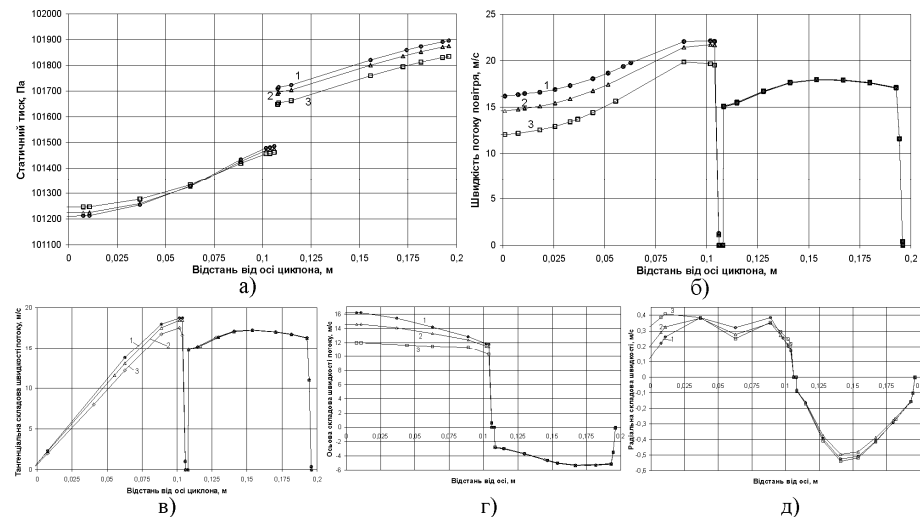


Рис. 3. Розподіл статичного тиску (а), швидкості потоку повітря (б), тангенціальної (в), осьової (г) та радіальної (д) складових швидкості у площині П1

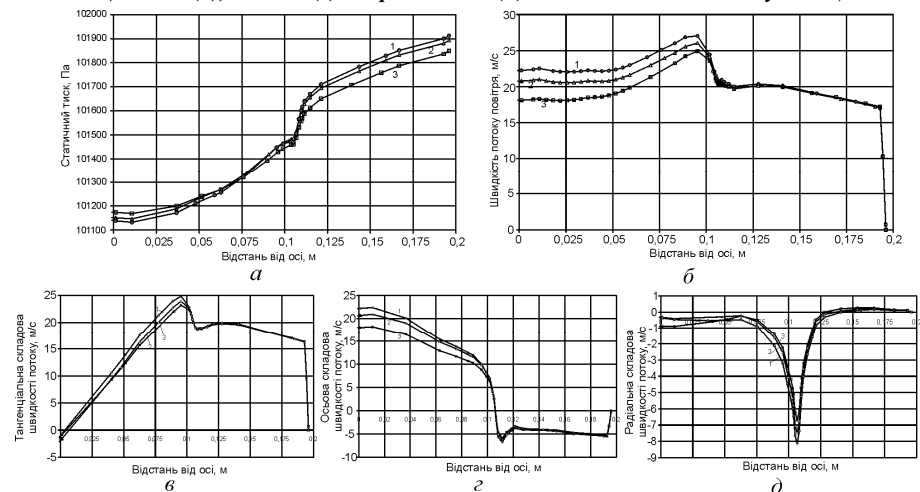


Рис. 4. Розподіл статичного тиску (а), швидкості потоку повітря (б), тангенціальної (в), осьової (г) та радіальної (д) складових швидкості у площині П2

Негерметичність бункера має значний вплив на дію внутрішнього потоку, який зароджується у конічній частині апарата, підсилюється потоками, які виходять з бункера, підіймається і через вихлопну трубу виходить в атмосферу. Вважаємо, що діаметр цього вихору дорівнює діаметра вихлопної труби. На графіках 3-6 межах вихлопної труби відповідає ділянка 0-0,11. За наявності витоку частини повітря (рис. 3 б-б б крива 1) з бункера швидкість повітряного потоку у вихлопній трубі є нижчою, порівняно з аналогічними швидкостями в апараті з герметичним бункером (крива 2) та за наявності "підсмоктування" (крива 3). Позитивний вплив витоку частини очищеного повітря з бункера про-

являється й при аналізі складових швидкості повітряного потоку у вихлопній трубі. Значення тангенціальної складової швидкості потоку повітря, порівняно з апаратом з герметичним бункером (рис. 3 в-б в крива 2), знижується за наявності витіку (крива 3) та зростає за наявності підсмоктування (крива 1). Аналогічним чином змінюється й осьова складова (рис. 3 г-б г). Зниження значення осьової складової швидкості потоку у вихлопній трубі приведе до зниження сили захоплення дрібнодисперсного пилу внутрішнім вихором. Радіальні складові швидкості повітряного потоку при різних негерметичностях бункера є близькими (криві 1,3 рис. 3 д-б д).

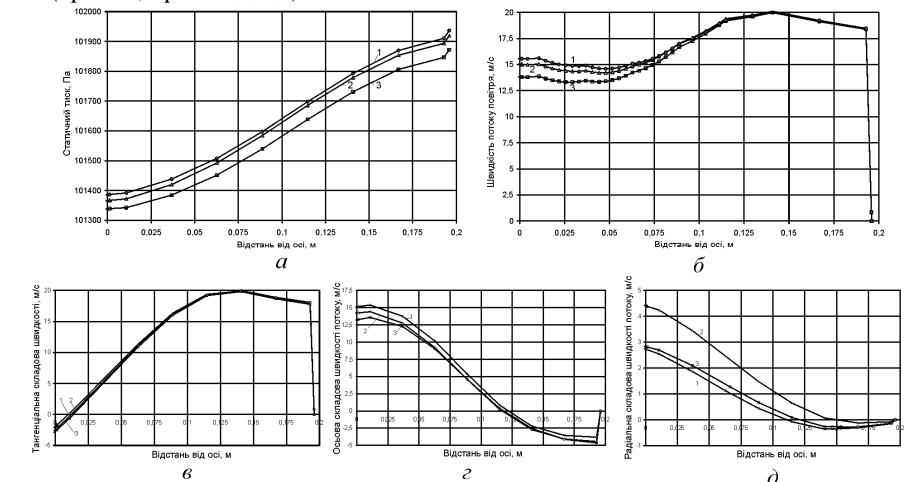


Рис. 5. Розподіл статичного тиску (а), швидкості потоку повітря (б), тангенціальної (в), осьової (г) та радіальної (д) складових швидкості у площині ПЗ

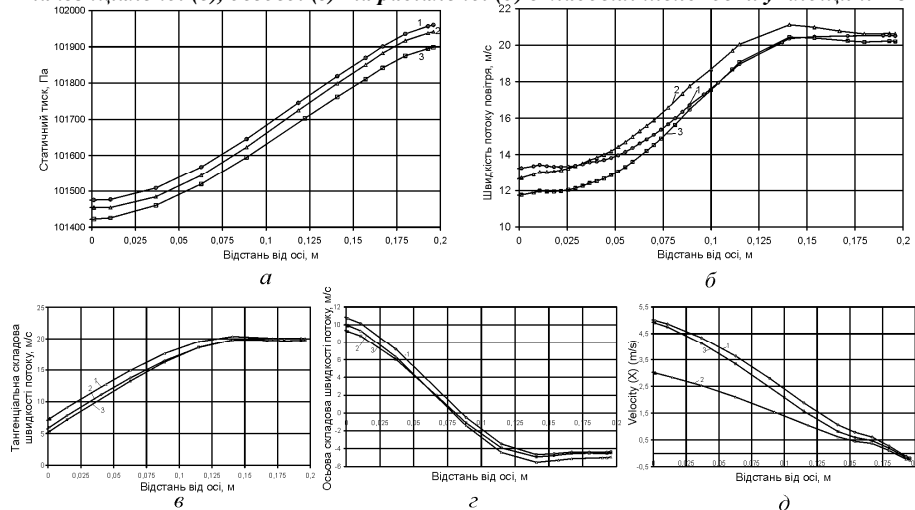


Рис. 6. Розподіл статичного тиску (а), швидкості потоку повітря (б), тангенціальної (в), осьової (г) та радіальної (д) складових швидкості у площині П4

Зниження швидкості потоку повітря у вихлопній трубі (рис. 3 б-б б криві 1-3), покращення характеру зміни складових швидкості потоку, одночасно зі зниженням статичного тиску та його градієнта (рис. 3 а-а криві 1-3) у плоскому перерізі циклона створює більш сприятливі умови для підвищення ефективності процесу повітроочищення.

Негерметичність бункера має вплив на значення гідравлічного опору апарата. У разі витікання частини повітря з бункера зменшується об'єм повітря внутрішнього вихору, знижується перепад статичного тиску у плоскому перерізі циклона. Ці фактори призводять до зниження значення гідравлічного опору циклона. На рис. 7 представлено залежність значення ΔP від частки (k_6) загальної продуктивності апарата, яка витікає через негерметичність бункера.

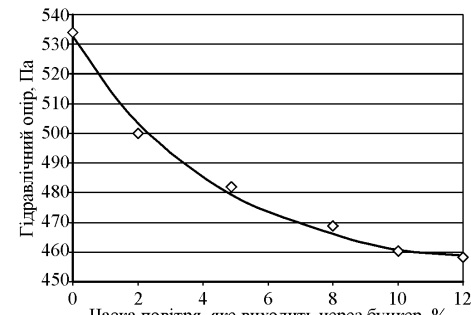


Рис. 7. Залежність гідравлічного опору циклона від частки повітря, яке виходить з бункера

Внаслідок зростання значення k_6 від 0 до 10 % гідравлічний опір циклона знижується від 533 до 461 Па. Подальше збільшення частки витіку не має впливу на гідравлічний опір апарата, а інколи може навіть приводити до його підвищення, що може бути пояснене явищами перемішування потоків [5]. За умови підсмоктування повітря з атмосфери маємо зворотні наслідки. Гідравлічний опір циклона буде зростати зі збільшенням об'ємів засмоктуваного повітря.

На рис. 8 представлено залежність ефективності (η) процесу повітроочищення від частки продуктивності, яка витікає з бункера. За умови зростання значення k від 0 до 12 % η зростає від значення 94,6 % до 98,3 %. У діапазоні значень $k_6 \in [94,6; 98,3]$ значення η залишається сталим, після чого починає знижуватися.

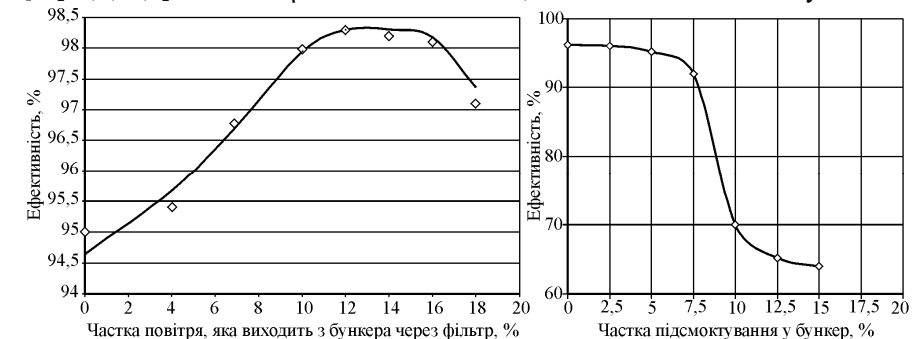


Рис. 8. Вплив частки повітря, яка виходить в атмосферу через фільтрувальний рукав, який встановлено на бункері на ефективність процесу повітроочищення

Рис. 9. Вплив частки повітря, яка "підсмоктується" з атмосфери через фільтрувальний рукав, який встановлено на бункері на ефективність процесу повітроочищення

На рис. 9 показано залежність ефективності процесу повітроочищення від частки (k_n) продуктивності, яка "підсмоктується" з атмосфери у бункер [7]. Результати досліджень дають підстави стверджувати, що підсмоктування повітря з бункера "підсмоктування" повітря з атмосфери у бункер негативно впливає на гідравлічний опір апарата (він зростає) і на ефективність процесу повітроочищення, яка знижується.

Висновки. На основі представлених результатів вважаємо, що негерметичність бункера не завжди негативно впливає на аеродинаміку процесу циклонування. У деревообробній промисловості, де традиційно циклиони встановлюються на нагнітальній стороні вентилятора, відведення частини очищеного повітря з бункера в атмосферу покращує експлуатаційні показники пиловловлювача. Важливим є значення частки загальної продуктивності апарата, яка через негерметичність бункера виходить в атмосферу.

Література

1. Лютий Є.М. Циклиони в деревообробній промисловості : монографія / Є.М. Лютий, Л.О. Тисовський, Ю.Р. Дадак, А.В. Ляшеник. – Львів : Редакція журналу "Український пасічник", 2009. – 148 с.
2. Тимонин А.С. Инженерно-экологический справочник. – В 3-х т. – Калуга : МГУ, Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. – 236 с.
3. Эрлихман С.Я. Справочник по специальным работам: наладка, регулировка и эксплуатация систем промышленной вентиляции / С.Я. Эрлихман. – М. : Госстройиздат, 1962. – 560 с.
4. Ватин Н.И. Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон / Н.И. Ватин, К.И. Стрелец. – СПб., 2003. – 236 с.
5. Дорундяк Л.М. Результати дослідження ефективності процесу пиловловлення у циклоні для системи перекачування деревних відходів / Л.М. Дорундяк // Науковий вісник НЛТУ України : зб. наук.-техн. праць. – Львів : РВВ НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.14. – С. 152-157.
6. [Електронний ресурс]. – Доступний з http://www.thesis.com.ru/infocenter/downloads/flow-vision/fv_mei_07.pdf
7. Экотехника. Защита атмосферного воздуха от выбросов пыли, аэрозолей и туманов / под ред. Л.В. Чекалова. – Ярославль : Изд-во "Русь", 2004. – С. 424.

Дорундяк Л.М. Выяснение влияния негерметичности бункера на эксплуатационные характеристики циклона

Представлен обзор сведений о влиянии негерметичности бункера на гидравлическое сопротивление циклона и эффективность процесса очистки пылевоздушного потока в сепараторе. При помощи программных пакетов Flow Simulation и FlowVision исследовано влияние притока и оттока воздуха из бункера на гидравлическое сопротивление аппарата и аэродинамику процесса циклонирования. Приведены результаты экспериментальных исследований эффективности процесса воздухоочистки при наличии негерметичности бункера.

Ключевые слова: циклон, бункер, воздухоочистка, аспирация.

Dorundyak L.M. Elucidate the influence of not leak bunker on cyclone performance

This paper describes the effect of air leakage from the bunker on the characteristics of the cyclone. We study the hydraulic resistance and efficiency of the machine. We used the software package FlowVision for analysis of aerodynamics process. The results of experimental studies of the effectiveness of the cleaning process in the presence of air leaks bunker.

Keywords: cyclone, bunker, clearing of the air, aspiration.

УДК 539.3

Доц. І.М. Ольховий¹, канд. техн. наук;

доц. Л.Ф. Дзюба¹, канд. техн. наук; інж. Х.І. Ліщинська², канд. техн. наук

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ВИТРИВАЛОСТІ ВАЛА ЗА УТОЧНЕНИМИ ТА НАБЛИЖЕНИМИ ГЕОМЕТРИЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ

Досліджено вплив уточнених геометричних характеристик перерізу круглого вала зі шпонковим пазом на величини напружень і коефіцієнта запасу витривалості вала під час роботи в умовах повторно-змінних навантажень. Наведено формули для уточненого визначення геометричних характеристик поперечного перерізу. Подано результати досліджень для вала циліндричної косозубої передачі в місці його шпонкового з'єднання з зубчастим колесом. Встановлено, що визначені за уточненими формулами для геометричних характеристик перерізу величини напружень є більші, а коефіцієнта запасу витривалості – менші порівняно з відповідними величинами, визначеними за наближеними формулами.

Ключові слова: вал, шпонковий паз, границя витривалості, циклічні напруження, поперечний переріз, геометричні характеристики.

Актуальність і огляд основних результатів. Для належного передбачення тривалості безпечної (безвідмовної) роботи машини ще на етапі проектування необхідно точніше враховувати закономірності зміни механічних властивостей деталей в умовах, наближених до реальних. У реальних експлуатаційних умовах можуть наступити непередбачені зміни та перепади навантажень, температур, швидкостей тощо, які істотно впливають на характеристики довговічності деталей [1]. Особливо відповідальними деталями механічних передач є вали. Як відомо, вали працюють на згин та кручення в умовах циклічно змінних навантажень. Розрахунок валів на витривалість є обов'язковим, оскільки руйнування вала від втоми і настання, як наслідок, раптової відмови машини, є недопустимим.

Небезпечними перерізами валів механічних передач є місця концентрації напружень, до яких належать шпонкові пази. Для вірного обчислення циклічних напружень у перерізах вала зі шпонковим пазом необхідно, окрім усього іншого, якомога точніше визначати геометричні характеристики перерізу.

Постановлення задачі та методика її розв'язування. У роботі розглянуто питання уточненого визначення складових циклічних напружень у перерізах круглих валів, ослаблених шпонковими пазами. Ці напруження залежать від певних геометричних характеристик указаних перерізів, які, зазвичай, визначають за наближеними формулами [1, 2]. У роботі запропоновано уточнення цих формул. Показано вплив указаних уточнень на величину циклічних напружень і коефіцієнтів запасу міцності валів відносно втомного руйнування.

Для забезпечення довготривалої роботи валів, які працюють за повторно-змінних навантажень, для їх небезпечних перерізів обов'язково виконують розрахунок на витривалість. У цьому розрахунку враховують характер зміни напружень, характеристики витривалості матеріалу, фактори концентрації напружень тощо. Розрахунок на витривалість зводять до визначення коефіцієнта запасу міцності відносно втомного руйнування і перевірки умови міцності:

¹ Львівський ДУ безпеки життєдіяльності;

² НУ "Львівська політехніка"