

**І.С. Козій, ст. викл.****Л.Л. Гурець, доц.****І.О. Трунова, доц.***Сумський державний університет***Т.В. Курбет, доц.***Житомирський державний технологічний університет*

## АНАЛІЗ ГІДРОДИНАМІЧНИХ І ПИЛОВЛОВЛЮЮЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АПАРАТА З ПРОВАЛЬНИМИ ТАРІЛКАМИ

*Стаття присвячена зниженню техногенного навантаження від пилових викидів хімічної промисловості шляхом вдосконалення системи пилоочищення із застосуванням високоефективного обладнання. Запропоновано зниження пилових викидів в атмосферне повітря шляхом вдосконалення системи пилоочищення із застосуванням апарата з провальними тарілками великих отворів. Розглянуто гідродинамічні режими роботи апарата з провальними тарілками великих отворів. Обладнання такого типу відповідає вимогам комплексного санітарного очищення газів, коли змінюються показники рідкої фази, що поглинає тверді частки і має широкий, стабільний режим роботи за швидкістю газу. Проведено експериментальні дослідження пилоочищення на лабораторному стенді з провальними тарілками великих отворів, які підтвердили високу ефективність, порівняно з існуючим пилогазоочисним обладнанням, що використовується у виробництві пігментного двоокису титану. Дослідження процесу пилоочищення в апараті дозволили встановити залежність ефективності пилоочищення від конструктивних характеристик і режимів роботи. Встановлено ефективність очищення від пилу на рівні 99,6 %.*

**Ключові слова:** атмосфера, гідродинаміка, пилоочищення, провальна тарілка.

**Постановка проблеми.** Одним з напрямків вирішення проблем екологічної безпеки є вдосконалення традиційних методів очистки газоповітряних сумішей, шляхом впровадження на промислових підприємствах нових високоефективних технологічних рішень [1, с. 4]. Складність та багатостадійність технологічних процесів на хімічних підприємствах є причиною утворення великої кількості різних за компонентним складом та фізико-хімічними властивостями пилогазових викидів [2, с. 20]. Різні за дисперсним складом, здатні до налипання і забивання обладнання, вони не дозволяють використовувати більшість видів традиційного пилоочисного обладнання як сухого, так і мокрого типів. При контакті з рідкою фазою в апаратах мокрого типу пилогазовий потік утворює відкладення на стінках і контактних пристроях апарату, що призводить до низької ефективності роботи та частого припинення роботи обладнання для очищення.

**Викладення основного матеріалу.** З метою покращення рівня екологічної безпеки та для виконання вимог високоефективного пилоочищення газів необхідно забезпечити високу ефективність пиловловлення, стійкість устаткування до забивання твердими відкладеннями, низькі капітальні й експлуатаційні витрати [3, с. 162; 4, с. 39].

1. Фізична модель гідродинаміки та пиловловлення в пилоочисному апараті.

Для опису фізичної моделі взаємодії фаз, більш доступним є розгляд елементарного акту процесу – вхід газу в рідину через одинарний або обмежену кількість отворів великого діаметра. В [5, с. 40] показано, що інтенсивність очищення газу визначається роботою одного отвору і залежить від маси газу, що виходить з нього. Це свідчить про можливість використання одинарного отвору для узагальнення закономірностей роботи апарата з провальними тарілками великих отворів (ПТВО).

В апараті відбувається протитечійний рух газу і рідини. Газова фаза містить тверді частинки пилу, тобто розглядаємо трьохфазну систему. Для вибору розміру отворів контактного пристрою проводилися візуальні спостереження за роботою тарілок з отворами діаметром від 0,09, 0,12, 0,15 та 0,18 м [6, с. 61].

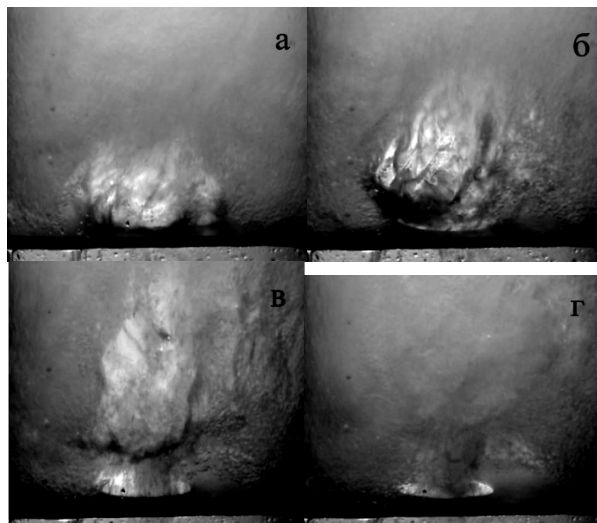
Візуальні спостереження за гідродинамікою тарілок з різними отворами за однаковими режимами роботи, показують, що при отворі 0,15 м практично немає застійних зон та створено розвинуту поверхню контакту фаз, що свідчить про можливість ефективної роботи з забрудненими потоками, а на тарілках з отворами 0,09 та 0,12 м спостерігаються застійні зони. Використання тарілки з діаметром отвору 0,18 м взагалі не дозволило створити пінного шару через суцільний провал рідини. Тому надалі будемо розглядати тарілку з отворами 0,15 м.

При підвищенні швидкості газу в апараті від 0 до 1,8 м/с спостерігається суцільний провал рідини через отвір тарілки. Зважаючи на розміри отвору контактного пристрою, режим первинного піноутворення в апараті існує в вузьких межах при швидкості газу 1,8–2,1 м/с. При режимі первинного

піноутворення практично не утворюється стабільний пінний шар, спостерігаються прориви газового потоку через центральну частину отвору у вигляді фонтануючих струменів, при цьому бризковиніс практично відсутній. З подальшим підвищенням швидкості газу до 2,5 м/с на обраній тарілці спостерігається нестабільний турбулізований шар піни і злив рідини з тарілки, що має неупорядкований характер (переважно це периферійна зона перетину отворів), збільшується кількість фонтануючих проривів та бризковиніс. Шар піни при цьому не має постійної висоти через значні коливання і не перевищує 0,3 м. Зі збільшенням швидкості газу в апараті (2,5–3,5 м/с) відбувається помітна стабілізація пінного шару, виділяємо появу на поверхні тарілки високо інтенсивного пінного режиму – вторинного піноутворення. Поява режиму вторинного піноутворення означає, що апарат вийшов на робочий режим.

У режимі вторинного піноутворення спостерігається розвинута вихрова взаємодія фаз внаслідок утворення тороїдального вихору при розпаді пухиря в зоні пінного шару над отворами тарілки. Газорідний потік являє собою вируючу піну, але одночасно спостерігається і помітна стабілізація шару та рівномірний розподіл локального газомісту шару і рідини по всьому поперечному перерізу апарата, а злив рідини відбувається переважно через центральну частину отворів тарілки. Шар піни в режимі вторинного піноутворення досягає висоти 0,6 м.

Основні стадії формування пухиря на ПТВО в режимі вторинного піноутворення представлені на рисунку 1.



*Рис. 1. Утворення пухиря на ПТВО:*

*а – початок формування пухиря; б – зростання пухиря; в – відрив пухиря від отвору тарілки з утворенням тороїдального вихору; г – повне руйнування пухиря з утворенням вихорів та дрібних пухирців*

Під час проходження газу через отвір тарілки на її поверхні утворюється пухир (рис. 1, а), поверхня якого за рахунок діаметра отворів тарілки має значні коливання. При швидкостях газу 2,5–3,5 м/с спостерігається швидке зростання об'єму та відповідно поверхні пухиря і його відрив від краю отвору тарілки (рис. 1, б).

Під час відриву від краю отвору (рис. 1, в) такий вихор розпадається внаслідок нестійкості форми та зменшення сил поверхневого натягу і утворює менші вихрові потоки та ряд дрібних, стійких пухирів (рис. 1, г). Саме в процесі подрібнення пухиря і утворення системи пухирів та вихрових потоків відбувається передача коливального імпульсу на отвір тарілки, що призводить до пульсаційної зміни тиску в просторі під тарілкою. Пульсаційне коливання полотна тарілки дозволяє апарату ефективно працювати з пилогазовим потоком, частинки якого характеризуються високою адгезійною здатністю і схильні до налипання на полотні тарілки.

Осадження твердих часток у шарі піни ПТВО відбувається під дією турбулентно-інерційного і турбулентно-дифузійного механізмів, залежно від густини і розміру частинок. Для дослідження пиловловлення в апараті з ПТВО було обрано пил двоокису титану, який окрім того, що є дрібнодисперсним, характеризується високим кутом змочування та адгезійними властивостями, що при контакті з рідиною призводить до налипання на стінках та контактних пристроях пилоочисних апаратів.

Частинки твердої фази мають розмір, значно менший за розмір турбулентних пульсацій потоку, і тому втягуються у пульсаційний вихровий рух газового потоку. Великі частинки пилу, які мають велику інерційність, осаджуються переважно на змоченому полотні тарілки та на стікаючі струмені рідини з

отворів тарілки під впливом турбулентно-інерційного механізму («механізм удару»). Значна частина пилу переходить у рідку фазу, а решта внаслідок своїх адгезійних властивостей налипає на нижній поверхні тарілки. Внаслідок експериментальних спостережень візуально можна було спостерігати налипання частинок пилу знизу тарілки ближче до пристінного простору, знизу по периметру отвору налипання майже відсутнє протягом тривалого часу експлуатації (більше доби). Відсутність забивання полотна з тарілками великих отворів пояснюється як наслідок пульсації полотна тарілки за рахунок енергії розпаду пухиря, що створюється на поверхні тарілки.

Дрібні частинки, які характеризуються високим ступенем захоплення [7, с. 90], осаджуються на поверхню рідини (осадження на поверхню пухиря та змочене полотно тарілки) під впливом турбулентно-інерційного механізму, а після розпаду пухиря на дрібні струмені і пухирці – турбулентно-дифузійного (осадження в шарі піни). При роботі апарата з ПТВО пиловловлення відбувається в основному за турбулентно-дифузійним механізмом, зумовленим високотурбулізованим шаром піни.

При утворенні газового пухиря частинки пилу, що за інерцією потрапили разом з газовим потоком в середину нього, знаходяться в середовищі з відносною вологістю 100 %. Тим самим, внаслідок високого кута змочування та хаотичного руху часток в середині пухиря утворюються агломерації, які внаслідок збільшення своєї маси осідають на поверхні пухиря. Після досягнення критичного розміру пухиря відбувається його руйнування і сили поверхневого натягу, що підтримували тиск в середині нього зникають. Внаслідок цього утворюється розрідження, що збільшує ймовірність зіткнення й агломерації пилових часток. Решта пилу, що не осіла на поверхні пухиря, потрапляє в газорідні струмені і дрібні пухирці після його руйнування, де далі продовжує вловлюватись під дією турбулентно-дифузійного механізму в шарі піни.

Отже, можна говорити про можливість застосування ПТВО як пристрою з мінімальною схильністю до заростання отворів контактної пристрою для очистки газового потоку як від легкозлипливих, так і смолистих часток.

## 2. Гідродинаміка апарата з ПТВО.

Для виявлення робочого режиму апарата з ПТВО проводились дослідження гідродинамічних характеристик проводилися в наступному діапазоні режимних параметрів:

- швидкість повітря ( $w_2$ ) в колоні при проведенні дослідів змінювали в межах 0,5–3,5 м/с;

- щільність зрошення ( $L_3$ ) складала 10–20 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>-год.

У колоні відбувається протитечійний рух газу і рідини, який призводить до утворення високотурбулізованого газорідного шару на полотні тарілки.

Проведені дослідження гідродинаміки апарату на тарілці з отворами 0,15 м дозволили виявити чотири режими роботи колони (рис. 2) [6, с. 62].

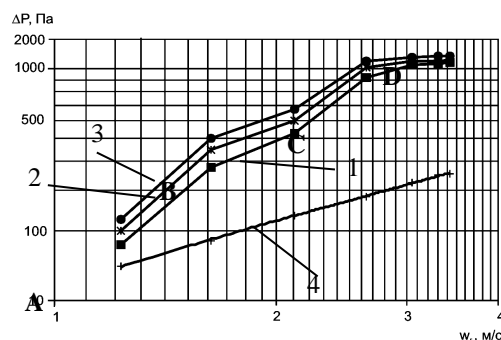
Аналіз графічних залежностей на рисунку 2 дозволив отримати залежність гідравлічного опору від швидкості газу в апараті, результатом є рівняння:

$$y = -31,16\delta^2 + 743,82\delta - 893,71. \quad (1)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (1) складає  $R^2 = 0,951$ .

Традиційний для пінних апаратів режим – барботажний (нерівномірний), зважаючи на розмір отвору, не спостерігається (рис. 2, АВ). При роботі тарілки з отвором 0,15 м до швидкості газу  $w_2 = 1,2$  м/с відбувається суцільний провал рідини. Подальший ріст швидкості газу (1,2–1,6 м/с) супроводжується накопиченням рідини на поверхні тарілки (рис. 2, АВ), інтенсивність провалу рідини зменшується.

II режим – пінний (рис. 2, ВС), на тарілці утворюється газорідна дисперсна система – піна. Пінний режим в апараті з провальною тарілкою великого отвору існує вузький діапазон зі швидкістю газу 1,6–2,1 м/с, тобто практично відсутній. В даному режимі газорідний шар має яскраво виражені поздовжні коливання з великою амплітудою. При цьому практично відсутнє бризковинесення.



E

Рис. 2. Залежність гідравлічного опору від швидкості газу в апараті з тарілкою 0,15 м ( $\tau = 23,5\%$ ) при різних значеннях щільності зрошення  $L_z$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год.})$ :  
1 – 12; 2 – 15; 3 – 20; 4 – суха тарілка

III режим – інверсія фаз (рис. 2, CD), коли збільшення швидкості газу призводить до різкого росту гідравлічного опору, кількості утримуваної рідини, висоти газорідинного шару та, відповідно, поверхні контакту фаз. При цьому інтенсивність провалу рідини різко знижується. За даного режиму газорідинний шар схильний до поздовжніх коливань із великою амплітудою і спостерігається інтенсивне бризковинесення. Межа існування даного режиму для ПТВО до швидкості газу в апараті 2,1–2,5 м/с.

IV режим – вторинного піноутворення (рис. 2, DE). Підвищення швидкості газу понад 2,5 м/с призводить до розвиненої вихрової взаємодії фаз. Газорідинна суміш виглядає як “бурхлива піна”, але одночасно спостерігається помітна стабілізація шару (зниження пульсації). Також спостерігається рівномірний розподіл газомісту шару й рідини по всьому поперечному перерізу апарата. При даному режимі досягається значна висота газорідинного шару і, як наслідок, розвинута поверхня контакту фаз та великий гідродинамічний ККД. Цей режим має стабільний і широкий діапазон по швидкості газу [8, с. 162]. Варто зазначити, що чим вища щільність зрошення, тим стабільніше працює тарілка. Внаслідок такої однорідної структури й незначних поперечних коливань шару, а, отже, і локального градієнта статичного тиску рідини на тарілку (гідравлічний опір тарілки становить 1300 Па), відбувається одночасне витікання газу й рідини через отвір.

З підвищенням  $w_z$  від 2,2 до 3,0 м/с висота газорідинного шару зростає в 4 рази (до 0,6 м), що дозволяє створити розвинену поверхню контакту фаз та значно підвищити ефективність пилоочищення у порівнянні з типовими тарілчастими пінними апаратами. Час виходу на даний режим в усіх випадках з різною щільністю зрошення випадках становив не більше 3 хвилин.

При недостатній щільності зрошення та, відповідно, висоті шару рідини на полотні тарілки, можливе часткове або повне оголення полотна тарілки внаслідок коливань пінного шару. Це супроводжується провалом рідини та не дає апарату вийти на робочий режим. Підвищення швидкості газу в апараті призводить до підтримки стабільного об’єму рідини на полотні тарілки, що забезпечує ефективну роботу апарата.

Залежність кількості утримуваної рідини від швидкості газу в апараті можна відобразити рівнянням:

$$y = 12,26^2 + 8,23x - 27,49. \quad (2)$$

Коефіцієнт детермінації рівняння (2) складає  $R^2 = 0,98$ .

У результаті проведених досліджень гідродинаміки обираємо робочий режим апарата з ПТВО, який за швидкістю газу відповідає діапазону існування режиму вторинного піноутворення і становить 2,5–3,5 м/с. Необхідна щільність зрошення для досягнення високого шару піни в апараті складає діапазон 15–20  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год.})$ , адже у промислових умовах важко забезпечити одне стабільне значення даного показника.

### 3. Пиловлвлення в апараті з ПТВО.

Механізм очищення забруднених твердими домішками газів в провальних тарілках з розміром отвору 0,002–0,01 м, як і в тарілках з отворами розміром 0,15 м, має велику подібність. Однак частина “внеску”, який робить кожна стадія очищення газів, для апаратів зі звичайними отворами і з отворами великого діаметра, різна. В апаратах з ПТВО збільшення ступеню очищення відбувається за рахунок динамічної висоти газорідинного шару [9, с. 69; 10, с. 44].

Пиловлвлення відбувається за рахунок інерційного і дифузійного механізмів пилоосадження.

Зростання ефективності пиловвлвлення, обумовленого інерційним механізмом пилоосадження, з ростом швидкості газу пов’язане зі зростанням сил інерції, які виникають при контакті газопилового потоку з плівкою рідини на тарілці колони. Пил, захоплений газовим потоком, підходить до поверхні змоченої тарілки, потім залежно від величини сил, що діють на частинку і визначаються її фізико-хімічними властивостями, спостерігається або адгезійне захоплення, або пружне відштовхування від плівки рідини. Якщо ж відбулося захоплення, то в результаті змочування частинки має місце третя стадія – проникнення в шар рідини.

Основна частина пилу, зважаючи на його дрібнодисперсність [11, с. 194], вловлюється завдяки турбулентно-дифузійному механізму. При малих швидкостях газу перенос високодисперсних часток пилу на поверхню плівки рідини здійснюється дифузисю. Виникнення тороїдального вихору та дрібних пухирців і, відповідно, розвинутої поверхні контакту фаз під час розпаду пухирця на полотні тарілки, сприяє збільшенню пилоочищення за турбулентно-дифузійним механізмом.

Рівняння для опису дифузійного механізму осаження частинок у зоні розпаду тороїдального вихра має вигляд [9, с. 70]:

$$\frac{dz}{dt} = w_z \frac{dz}{dx} - K_v z, \quad (3)$$

де  $K_v = K_f a$  – коефіцієнт швидкості пиловловлення (аналог коефіцієнта масопередачі),  $c^{-1}$ ;  $a$  – питома поверхня осадження,  $m^2/m^3$ ;  $x, z$  – осі координат;  $t$  – час.

Збільшення швидкості газу призводить до зростання високотурбулізованого газорідного шару на полотні тарілки, що відповідно супроводжується ростом інтенсивності турбулентної дифузії в робочій зоні апарата.

Для підтвердження ефективності використання апарата з ПТВО були проведені експериментальні дослідження на лабораторному стенді на базі лабораторії кафедри прикладної екології Сумського державного університету.

Як досліджуваний пил було обрано пил двоокису титану [11, с. 193], його концентрація в повітрі становила  $3 \text{ г/м}^3$ , що відповідає реальним умовам на виробництві. Результати проведеного дослідження ефективності пиловловлення на тарілці з отворами  $0,15 \text{ м}$  відображено на рисунку 3.

$\eta, \%$

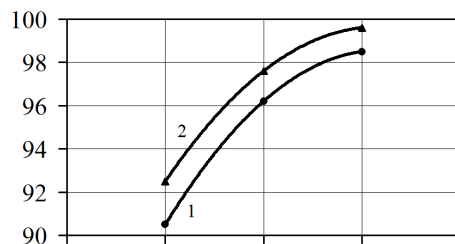


Рис. 3. Залежність ефект швидкості газу при різних значеннях щільності зрошення  $L_z, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год.})$ : 1 – 15; 2 – 20 від швидкою  $0,15 \text{ м}$  ( $\tau = 23,5 \%$ ) від

Аналіз рисунку 3 дозволяє стверджувати, що збільшення ефективності роботи апарата при щільностях зрошення понад  $15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год.})$ , обумовлено високим та стабільним сильнотурбулізованим шаром піни. Максимальна ефективність пиловловлення в досліджуваному апараті становить  $99,6 \%$  при швидкостях газу  $3,5 \text{ м/с}$  та щільності зрошення  $18\text{--}20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год.})$ .

**Висновки.** Експериментальні дослідження гідродинаміки лабораторного стенду дозволили встановити робочий режим апарата з ПТВО – режим вторинного піноутворення, що відповідає інтервалу швидкості за газом  $2\text{--}3,5 \text{ м/с}$ . Робочий інтервал щільності зрошення становить  $15\text{--}20 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год.})$ . Висота шару піни становить  $0,6 \text{ м}$ .

Дослідження процесу пилоочищення в апараті дозволили встановити залежність ефективності пилоочищення від режимних параметрів роботи. Апарат має високу ефективність очищення (до  $99,6 \%$ ) в режимі вторинного піноутворення, низьку енергоємність і стабільну роботоздатність за умов тривалої експлуатації.

#### Список використаної літератури:

1. Вальдберг А.Ю. Технология пылеулавливания / А.Ю. Вальдберг. – Л. : Машиностроение, 1985. – 192 с.
2. Очистка промышленных газов от пыли / В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. – М. : Химия, 1981. – 392 с.
3. Гурець Л.Л. Очистка промислових газів в апаратах із провальними тарілками великих отворів / Л.Л. Гурець, І.С. Козій // Вісник КДПУ ім. М.Остроградського – 2008. – № 5 (52), Ч. 2. – С. 162–164.
4. Козій І.С. Використання апаратів мокрого пилоочищення при виробництві двоокису титану / І.С. Козій, Л.Л. Гурець // Матер. V Міжнар. ювілейної наук.-практ. конф. «Екологія. Економіка. Енергозбереження» (м. Суми, 14–16 трав. 2009 р.). – С. 39.
5. Айтбаев Е. Взаимодействие фаз при истечении газа в жидкость через одно и группу отверстий и гидродинамика крупнодырчатых провальных тарелок : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Айтбаев Е. – М., 1983. – 183 с.
6. Пляцук Л.Д. Експериментальні дослідження гідродинаміки провальних тарілок великих отворів / Пляцук Л.Д., Гурець Л.Л., Козій І.С. // Вісник СумДУ. – 2009. – № 1. – С. 61–66.
7. Сувак Е.В. Очистка газовых выбросов от высокодисперсных частиц в дисперсно-кольцевом потоке / Е.В. Сувак, Н.А. Войнов, Н.Ю. Житкова // Химия растительного сырья. – 2000. – № 4. – С. 85–101.
8. Молдабеков Ш.М. Очистка фосфор-, фтор- и серусодержащих газов производства фосфора и его соединений : дис. ... докт. техн. наук : 05.17.01 / Ш.М. Молдабеков. – М., 1984. – 529 с.

9. Исследование гидродинамики и массопередачи в газовой фазе на провальных тарелках крупной перфорацией / Ш.М. Молдабеков, С.М. Почанова, И.П. Левш, М.И. Ниязов // Весник АН Каз ССР. – 1976. – № 8. – С. 68–72.
10. Хромова Е.М. Конденсационные механизмы улавливания субмикронных пылей в мокрых газоочистителях : дис.... канд. физ.-мат. наук : 01.04.14 / Хромова Елена Михайловна. – Томск, 2005. – 152 с.
11. Паспортизація пилу двоокису титану та пошук шляхів для зменшення його втрат на ВАТ «Сумихімпром» / І.С. Козій, Л.Д. Пляцук, Л.Л. Гурець, С.В. Вакал // Вісник КДПУ ім. М.Остроградського. – 2009. – № 6 (59). – С. 193–195.

КОЗІЙ Іван Сергійович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри прикладної екології Сумського державного університету.

Наукові інтереси:

– очищення атмосферного повітря в хімічній промисловості

Тел.: (0542) 33–12–05; (моб.) (050) 827–827–4.

E-mail: [koziy.ivan@gmail.com](mailto:koziy.ivan@gmail.com).

ГУРЕЦЬ Лариса Леонідівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної екології Сумського державного університету.

Наукові інтереси:

– високоефективне пилогазоочисне обладнання.

Тел.: (0542) 33–12–05; (моб.) (095) 559–612–1.

E-mail: [larisa\\_gurets@bk.ru](mailto:larisa_gurets@bk.ru).

ТРУНОВА Інна Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри прикладної екології Сумського державного університету.

Наукові інтереси:

– екологічна безпека та охорона праці.

Тел.: (0542) 33–12–05; (моб.) (095) 178–754–3.

E-mail: [inna.trunova@rambler.ru](mailto:inna.trunova@rambler.ru).

КУРБЕТ Тетяна Володимирівна – доцент кафедри природничих наук Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– екологічна безпека;

– очисне обладнання.

Стаття надійшла до редакції 27.09.2013