

Харківський державний технічний університет  
будівництва та архітектури

На правах рукопису

Шушляков Дмитро Олександрович

ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ  
РОБОТИ ВИХРОВОГО АПАРАТУ З ДИСПЕРСНОЮ НАСАДКОЮ

05.23.03 -Теплопостачання, вентиляція,  
кондиціювання повітря, газопостачання  
та освітлення

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

м. Харків - 1996



Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківській державній академії міського господарства.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент  
Шульга Микола Олександрович

Офіційні опоненти:

1. Доктор технічних наук, професор Губар В.Ф.
2. Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Коваленко Ю.Л.

Провідна установа: Науково-дослідний інститут Кондиціонер,  
м.Харків

Захист відбудеться "4" липня 1996 р. об 11 год.  
на засіданні вченої ради у Харківському державному  
технічному університеті будівництва та архітектури, за  
адресою: м. Харків, вул. Сумська, б.40

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського  
державного технічного університету будівництва та  
архітектури

Автореферат розісланий "1" червня 1996 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
к.т.н., доцент



Колотило М.І.

Актуальність проблеми: Бурхливий розвиток промислового виробництва призвів до значного збільшення обсягів вентиляційних та технологічних викидів, що з'явилося причиною інтенсивного забруднення біосфери, тому що разом з відпрацьованими газами до атмосфери надходять змулені та газоподібні шкідливі речовини.

Сумарний вплив шкідливих речовин створив кризову екологічну ситуацію в багатьох районах земної кулі. До 2000 року кількість шкідливих речовин, які викидаються в атмосферу, може збільшитись в декілько разів, що призведе до екологічних катастроф планетарного масштабу.

Одним із шляхів запобігання забрудненню атмосфери є очистка газів перед їх викидом до атмосфери. У зв'язку з цим розробка та дослідження обладнання для високоефективної очистки газів з мінімально можливими затратами енергії є актуальною проблемою.

Підвищення ефективності та зниження витрат енергії на очистку газу може бути забезпечене за рахунок заміни багатоступінчатих схем очистки новими високоефективними апаратами та використання додаткових фізичних ефектів у робочій камері цих апаратів, вибору потрібних режимних та конструктивних параметрів, а також за рахунок кондиціювання газу перед його очисткою.

На основі викладеного вище можна вважати, що тема дисертаційної роботи актуальна, тому що спрямована на розробку та дослідження високоефективного пиловловлювача для очистки газу сухим способом за одноступінчатою схемою.

Метою дисертаційної роботи є дослідження аеродинаміки та ефективності роботи запропонованої конструкції вихрового апарата з дисперсною насадкою.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- провести аналіз існуючих конструкцій пиловловлюючих апаратів, обґрунтувати вибір апарата для очистки газів від домішок шкідливих речовин, окреслити визначальні фактори, які впливають на ефективність роботи, визначити діапазон їх змін, при яких забезпечується максимальна ефективність роботи апарата;
- виконати теоретичні дослідження аеродинаміки робочої камери апарата при поданні до неї дисперсної насадки та без неї, аналітичним шляхом визначити ефективність його роботи, розрахувати енерговитрати на очистку газу;
- провести експериментальні дослідження впливу режимних та конструктивних параметрів, властивостей дисперсної насадки, газу який очищується та домішок які уловлюються, на ефективність роботи пиловловлювача при уловлюванні дрібнодисперсних домішок;
- підтвердити експериментальним шляхом розрахункові значення затрат енергії на очистку повітря від змулених домішок;
- розробити методику розрахунку режимних та конструктивних параметрів запропонованого апарата;
- впровадити апарат на виробництві.

Науковою новизною є те, що вперше теоретично та експериментально досліджена аеродинаміка робочої порожнини розробленого автором вихрового апарата з дисперсною насадкою (ВАДН), запропоновані математичні моделі, що дозволяють розрахувати аеродинамічні параметри потоків газу, а також взаємодію цих потоків з дисперсною насадкою.

Отримані теоретичні залежності для розрахунку ефективності роботи та енерговитрат ВАДН.

Запропоновані залежності для розрахунку експериментальної ефективності вихрового апарата з дисперсною насадкою.

Розроблена методику розрахунку режимних та конструктивних параметрів ВАДН.

Практична цінність дисертації полягає в тому, що розроблена та досліджена нова конструкція вихрового пиловло

влючача, який забезпечує високу ефективність одноступінчатої сухої очистки газу від дрібнодисперсного пилу. При цьому затрати енергії на очистку газу у порівнянні із енергозатратами на очистку газу за допомогою цього апарата менші, ніж затрати енергії при застосуванні багатоступінчатої схеми очистки при рівних продуктивностях з очищеного газу.

Розроблена методика розрахунку режимних та конструктивних параметрів підбору ВАДН має практичну цінність, тому що дозволяє розраховувати та підбирати цей апарат для різних умов роботи, що розширює галузь використання ВАДН.

Отримані результати теоретичних та експериментальних досліджень підтверджують вірогідність запропонованої методики розрахунку та дозволяють обґрунтовано підбирати та впроваджувати у виробництво ВАДН, що також має практичну цінність.

Практична цінність результатів дисертаційної роботи підтверджена авторськими свідоцтвами № 1494944 від 22 березня 1989 року, № 1791292 від 1 жовтня 1992 року та патентом № 1838077 від 13 жовтня 1992 року.

Реалізація досліджень. Вихровий апарат з дисперсною насадкою впроваджено у проекти газоочистки на спільному українсько-угорському підприємстві "Титан - Евіг" по машинобудуванню, на заводі Криворіжсталь та на Запорізькій ДРЕС.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідались на III Республіканській конференції у м. Донецьку в 1993 р., на міжрегіональних наукових конференціях Харківського державного технічного університету будівництва та архітектури (колишній Харківській інженерно-будівельний інститут) в 1991 та 1995 р.р., на науково-технічних конференціях Харківської державної академії міського господарства в 1994 і 1996 р.р. (колишній Харківській інститут інженерів міського господарства).

Публікації. За темою дисертації опубліковано десять робіт, отримано два авторських свідоцтва та патент на винаходи.

Обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, списку використаних літературних джерел, додатків та містить 117 сторінок друкованого тексту, 44 малюнки, 9 таблиць, а також список літератури, який містить 130 найменувань вітчизняних та закордонних авторів.

### ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розглядається актуальність, наукова новизна та практична цінність проведених досліджень. Визначена мета дисертаційної роботи та основні завдання, які необхідно вирішити для досягнення даної мети.

В першому розділі проведено аналіз причин викидів промисловими підприємствами шкідливих речовин в атмосферу, розглянуті властивості змулених домішок, що впливають на ефективність їх уловлювання, проведено порівняння основних існуючих типів механічних пиловловлювачів, виявлені їх переваги та недоліки, проаналізовані методи розрахунку ефективності роботи та енерговитрат при очищенні газу цими апаратами.

В результаті аналізу встановлено, що основними причинами викидів шкідливих речовин в атмосферу є недосконалість технічного обладнання, моральний та фізичний знос систем аспірації та неефективна робота обладнання для очистки газів.

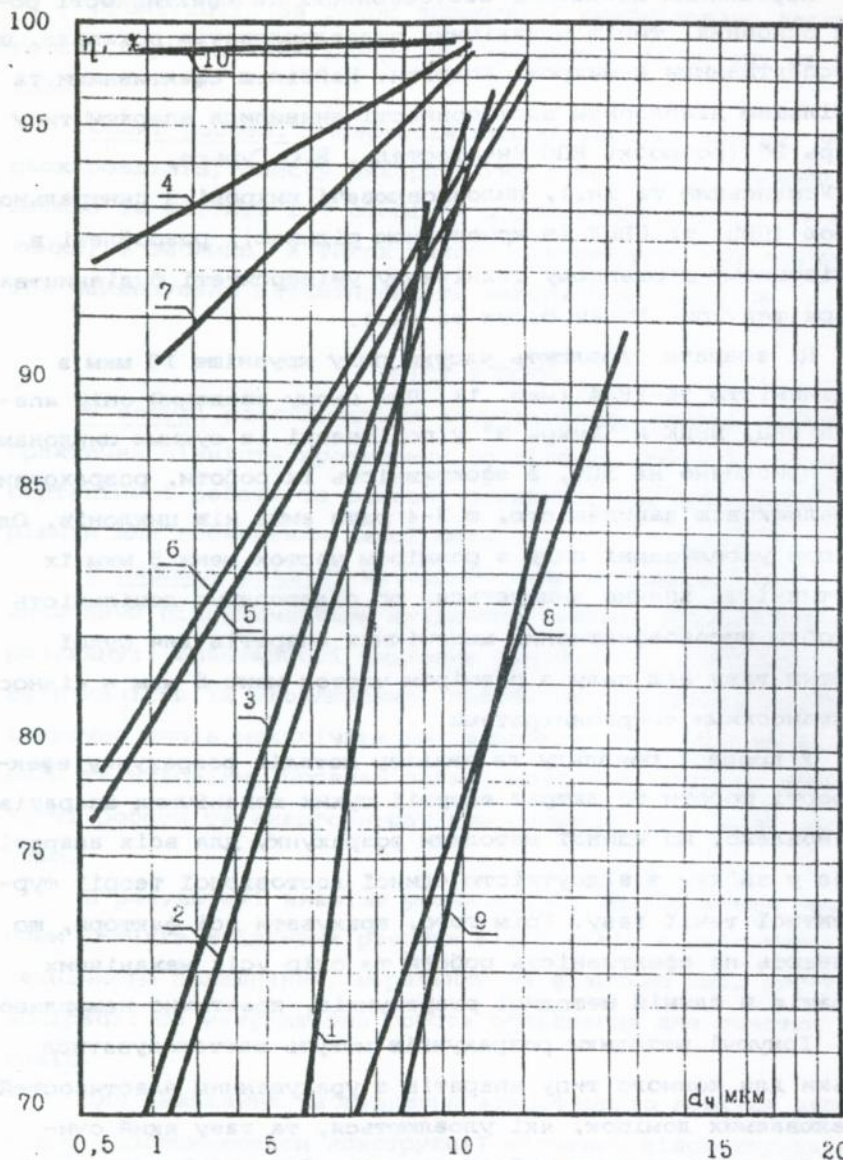
Для зменшення забруднення атмосферного повітря необхідно удосконалювати конструкції місцевих відсмоктувачів, систем аспірації та обладнання для очистки технологічних та вентиляційних газових викидів з урахуванням фракційного складу та щільності уловлюваних домішок та температури газу який очищується.

Порівняння діапазону застосовності та ефективності роботи основних типів механічних пиловловлювачів показало, що перспективними є вихрові апарати. Найбільш ефективними та з найбільшим діапазоном застосовності виявилися апарати типу "Вихрь Э" (розробка НПО Энергосталь, В.С.Гурьев, В.А.Успенський та ін.), пиловловлювачі вихрові з центральною трубою (ПВЦ) та ПВЦК (з криогенною рідиною), розроблені в Харківському державному технічному університеті будівництва та архітектури (Гулам Фарук та ін.).

Ці апарати уловлюють частки пилу крупніше 10 мкм з ефективністю 96-98 % (мал. 1). При цьому зведений опір апаратів ПВЦ, ПВЦК и "Вихрь Э" у порівнянні із сухими циклонами вище приблизно на 30%, а ефективність їх роботи, розрахована за залишковою запиленістю, в 3-4 рази вище ніж циклонів. Однак при уловлюванні пилу з розміром часток менш 5 мкм їх ефективність значно знижується, що підтверджує доцільність розробки високоефективних механічних апаратів для сухої очистки газу від пилу з розміром часток менш 5 мкм з відносно невисокими енерговитратами.

У процесі розгляду та аналізу методів розрахунку ефективності роботи та затрат енергії сухих механічних апаратів встановлено, що єдиної методики розрахунку для всіх апаратів немає у зв'язку з відсутністю єдиної достовірної теорії турбулентної течії газу. Крім того, врахувати всі фактори, що впливають на ефективність роботи та опір усіх механічних апаратів в єдиній методиці розрахунків, практично неможливо.

Існуючі методики розрахунків можуть застосовуватися тільки для кожного типу апаратів з урахуванням властивостей уловлюваних домішок, які уловлюються, та газу який очищується, а також умов роботи апарата. При зміні початкових умов роботи будь-якого типу апарата необхідно проводити додаткові дослідження та розробляти нову методику їх розрахунку. Таким чином, підтверджується необхідність розробки методики для оцінки ефективності підбору високоефективних вихро-



Мал.1. Графік фракційної ефективності пиловловлювачих апаратів: 1 - DSE-33; 2 - ВП1; 3 - ВЗП-200; 4 - Вихор600Е; 5 - ВП2; 6 - ВПЦ; 7 - ПВЦК; 8 - Ціклон зі щільним відбором пилогазового концентрату; 9 - ціклон СДК-ЦН-33; 10 - ВАДН (запропанован автором).

вих апаратів.

В другому розділі розглянута запропонована автором конструкція високоефективного вихрового апарата з дисперсною насадкою (ВАДН). Запропоновані моделі руху дисперсних турбулентних закручених потоків в його робочій камері (для розрахунку аеродинамічних параметрів газу, який очищується), взаємодія цих потоків з дисперсною насадкою, методика розрахунку енерговитрат та ексергітичної ефективності роботи цього апарата.

Підвищення ефективності роботи вихрового пиловловлювача забезпечується за рахунок підсилення дії відцентрових сил введенням в потік газу, який очищується, дисперсної насадки.

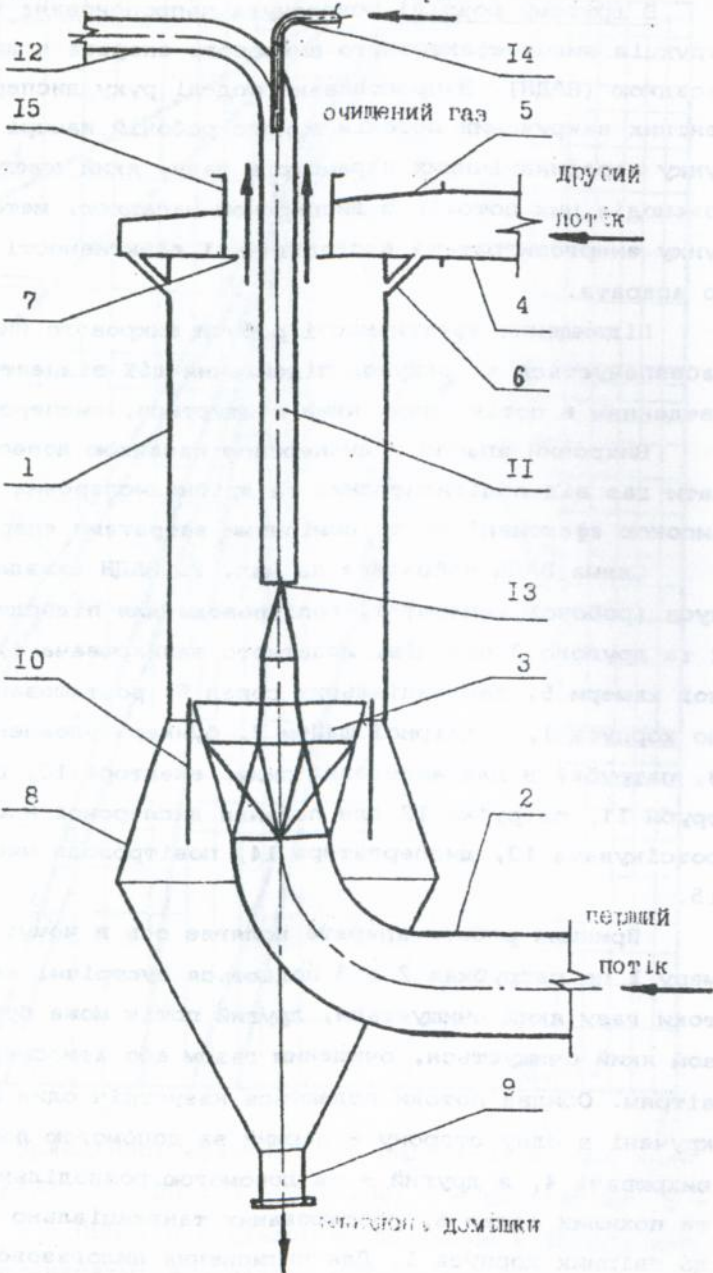
Вихровий апарат з дисперсною насадкою дозволяє очищувати газ від полідисперсних та дрібнодисперсних домішок з високою ефективністю та помірними затратами енергії.

Схема ВАДН зображена на мал. 2. ВАДН складається з корпусу (робочої камери) 1, повітровода для підведення першого 2 та другого 3 потоків, лопатного завихрювача 4, розподільної камери 5, тангенціальних сопел 6, розташованих під кутом до корпусу 1, підпірної шайби 7, бункера уловлених домішок 8, патрубку 9 для виведення пилу, ежектора 10, центральної труби 11, патрубка 12 для подання дисперсної насадки (ДН), розсікувача 13, диспергатора 14, повітровода чистого газу 15.

Принцип роботи апарата полягає ось в чому: в робочу камеру 1 по патрубках 2 і 3 подаються зустрічні закручені потоки газу який очищується, другий потік може бути також газом який очищується, очищеним газом або атмосферним повітрям. Обидва потоки подаються назустріч один одному, закручені в одну сторону - перший за допомогою лопатного завихрювача 4, а другий - за допомогою розподільної камери 5 та похилих сопел 6, розташованих тангенціально і під кутом до твірних корпусу 1. Для витиснення пилогазового потоку з присьової зони установлюється центральна труба 11. З метою

дисперсная насадка

пара



Мал. 2. Схема виброаппарата с дисперсной насадкой.

підвищення ефективності уловлювання субмікронного пилу по патрубку 12, з'єднаному з центральною трубою 11, за рахунок розрідження в апараті, подається дисперсна насадка. Рівномірне розподілення ДН по перерізу робочої камери і здійснюється розсікувачем 13. За рахунок інерційного осадження, турбулентної дифузії, адгезії, термо- і дифузіофорезу та інших фізичних процесів відбувається захоплення частками ДН часток змулених домішок.

Частки ДН мають більші розміри та більшу масу, вони швидко досягають пристінної зони та разом із уловленими домішками відносяться другим потоком в бункер 8. В бункері 8 відбувається осадження ДН і домішок. Повітря, що потрапило до бункера, повертається за допомогою ежектора 10 в робочу порожнину ВАДН. Видалення пилу і ДН з бункеру 8 здійснюється через патрубок 9.

Для інтенсифікації процесу коагуляції змулених часток та осадження їх на поверхні, ДН зволожується насиченою паром або дисперговою водою із пристрою 14. При цьому витрачання пари повинно бути таким, щоб вона повністю конденсувалася на поверхні ДН. Для запобігання розвороту другого потоку у верхній частині ВАДН встановлюється підпірна шайба 15.

При використанні в якості ДН адсорбенту ВАДН буде забезпечувати комплексну очистку газу. В процесі взаємодії газу з адсорбентом буде відбуватися селективна очистка шкідливих газоподібних (пароподібних) та уловлювання змулених домішок. ДН разом з уловленими домішками з бункеру може подаватись на утилізацію, регенерацію або на рециркуляцію до повного насичення адсорбенту.

Дозування ДН можна здійснювати за допомогою циліндричного дозатора з рухомих патрубком. При очищенні газів високої вологості можливе використання спеціальних вологовбирачів.

Як додатковий захід підвищення ефективності уловлення пилу можливо робити електричне зарядження ДН та у пилу який уловлюється.

Для обґрунтованого вибору режимних та конструктивних параметрів ВАДН необхідно провести теоретичні та експериментальні дослідження аеродинаміки робочої камери апарата та розробити методику розрахунку ефективності роботи та витрат енергії на очистку газу за допомогою ВАДН.

Для керування процесом очистки газу за допомогою ВАДН необхідно змінювати аеродинамічну ситуацію в його робочій камері. З цією метою повинні бути вивчені закономірності розподілення першого та другого потоків газу який очищується в порожнині ВАДН.

Для розрахунку складових швидкості першого потоку, що поступає в вихровий апарат з дисперсною насадкою, запропонована математична модель руху вихрового турбулентного потоку в циліндричній трубці, при цьому припускається, що процес теплообміну відсутній. Рівняння руху розглядаємо у формі Навьє - Стокса в частинних похідних, а щільність потоку та його в'язкість визначаємо через дійсні величини. Рівняння записуємо в циліндричних координатах та замикаємо систему рівнянням нерозривності:

$$V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\varphi^2}{r} = -\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial p}{\partial r} + g_s \left( \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial r V_r}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_r}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

$$V_r \frac{\partial V_\varphi}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_\varphi}{\partial z} + \frac{V_r V_\varphi}{r} = g_s \left( \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial r V_\varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_\varphi}{\partial z^2} \right), \quad (2)$$

$$V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_s} \frac{\partial p}{\partial z} + g_s \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right), \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial r V_r}{\partial r} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

При цьому величини  $\rho_s$  та  $g_s$  в рівняннях (1)-(4) можна виразити у вигляді:

$$\rho_s = \rho_1 \left[ 1 + \frac{\varphi \rho_2 k^2}{(1 - \varphi) \rho_1} \right]; k = \frac{V_2}{V_1}; g_s = \frac{g_r}{\left[ 1 + \frac{\varphi \rho_2 k^2}{(1 - \varphi) \rho_1} \right]}, \quad (5)$$

де  $\rho_1$  та  $\vartheta_1$  - щільність та коефіцієнт кінематичної в'язкості дисперсного потоку;  $\rho_2$  і  $\rho_1$  - дійсна масова щільність несучого середовища та дисперсної фази;  $V_1$  та  $V_2$  - швидкості несучого середовища та дисперсної фази;  $\vartheta_T$  - коефіцієнт турбулентної, ефективно кінематичної в'язкості;  $\phi$  - питомий об'ємний вміст дисперсної фази в дисперсному потоці.

Дослідження закручених потоків, які рухаються в циліндричному каналі, показали, що ці потоки зберігають довгий час лінійний закон розповсюдження вздовж радіуса моменту кількості обертального руху. Враховуючи це та виконуючи ряд перетворень, отримаємо рішення системи (1)-(4):

$$V_z = -(1 + kr^2) \left( \frac{1}{2} a(R^2 - r^2) + b \ln \frac{R}{r} + c \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r^2} \right) - \frac{1}{4} d(R^4 - r^4) \right), \quad (6)$$

де  $a, b, c, d$  - функції, залежні від видаткової швидкості;  $a$  - константа;  $r$  - поточне значення радіуса;  $R$  - радіус циліндричного каналу

$$V_r = a^2 r \vartheta_1 - \vartheta_1 \frac{1}{r} - ar(1 + kr^2) \left( \frac{1}{2} a(R^2 - r^2) + b \ln \frac{R}{r} + c \left( \frac{1}{R^2} - \frac{1}{r^2} \right) - \frac{1}{4} d(R^4 - r^4) \right) \quad (7)$$

$$V_\varphi = \omega r, \quad (8)$$

де  $\omega$  - кутова швидкість руху газу.

Отримані залежності дозволяють розрахувати параметри першого потоку газу, який подається у ВАДН. Рух другого потоку в ВАДН будемо розглядати як розповсюдження турбулентного дисперсного струменя на угнутій поверхні у вихровому супутньому градієнтному потоці. При цьому будемо вважати, що рух стаціонарний, дисперсний потік являє собою в'язку несчисливу рідину, а потік будемо розглядати, як двошвидкісний континуум двох взаємопроникаючих суцільних середовищ, одне з яких є несучим, а друге - дисперсним. Рівняння Нав'є - Стокса у векторній формі для кожного з середовищ будуть мати вигляд:

$$(1 - \varphi)\rho_1 V_1 \nabla V_1 = -(1 - \varphi)\nabla P_1 + (1 - \varphi)\nabla(\tau_1 + \tau_{1r}) - (1 - \varphi)F_{12} - (1 - \varphi)\Pi_{12} \quad (9)$$

$$\varphi\rho_2 V_2 \nabla V_2 = -\varphi\nabla P_2 + \varphi\nabla(\tau_2 - \tau_{2r}) + \varphi F_{21} + \varphi\Pi_{21}, \quad (10)$$

де  $\varphi$  - відносний вміст дисперсної фази в потоці; "1" і "2" - індекси, які відносяться до суцільного середовища та дисперсної фази відповідно;  $V$ ,  $\rho$ ,  $P$ ,  $\tau$ ,  $\tau_r$  - швидкість, щільність, тиск, напруження сил молекулярного та турбулентного тертя, відповідно;  $\nabla$  - оператор Гельмгольца;  $F$  і  $\Pi$  - сили механічної та масообмінної взаємодії двох середовищ.

Вважаючи, що дисперсне середовище достатньо розріджене у порівнянні з несучим середовищем, що  $P_2 \ll P_1$ ;  $\tau_2 \ll \tau_1$ ;  $\tau_{2r} \ll \tau_{1r}$ ;  $\vartheta_{\tau} \ll \vartheta$  і що  $V_2/V_1 = \text{const}$ , шляхом перетворення отримали рішення рівнянь (9) та (10):

для пристіночної частини струменя:

$$\frac{U_m - U}{\sqrt{\tau_1/\rho_1}} = 2,21 \ln \frac{\delta_m}{y}; \tau_1 = 0,0283 \text{Re}^{-0,25} \rho_3 U_m^2, \quad (11)$$

$$\text{Re} = \frac{U_c h}{\vartheta_3} \quad (12)$$

для вільної частини струменя

$$U = U_s + (U_m + U_s)(1 - 6\eta^2 + 8\eta^3 - 3\eta^4) \quad (13)$$

де

$$\eta = \frac{(h - \delta_m)}{(\delta - \delta_m)}$$

$$\tau_1 = \rho_3 \varepsilon (\delta - \delta_m)(U_m - U_s) \frac{\partial U}{\partial y}, \quad (14)$$

де  $\varepsilon$  - коефіцієнт турбулентності струменя;  $\delta_m$  - відстань від стінки до осі струменя пристіночної частини струменя (товщина струменя);  $\delta$  - відстань від осі струмен до зовніш-

ної межі струменя для вільної частини струменя (товщина струменя);  $U_m$  - швидкість плинущу струменя на осі;  $U_g$  - швидкість плинущу у вільній частині струменя;  $Re$  - число Рейнольдса на початку струменя;  $U_c$  - швидкість витікання струменя із сопла;  $h$  - діаметр сопла осесиметричного струменя. Формула (11) справедлива, коли  $Re > 20000$ .

Закономірність затухання вихрових потоків подаємо таким виразом:

$$U_s = U_0 \exp(-\vartheta_0 x), \quad (15)$$

де  $U_0$  - початкова швидкість зовнішнього потоку, що зносить;

$\vartheta_0$  - в'язкість цього потоку.

Швидкість струменя на осі:

$$U_m = U_c - \frac{\rho_1 B B_1 - B_1 + 1}{1 - 2B B_1 + B^2 B_2} [1 - \exp(-\vartheta_0 x)]', \quad (16)$$

$$\text{де } B = 2,21 \sqrt{0,0283 Re^{-0,25} \left[ 1 + \frac{\varphi * \rho_1 * k^2}{(1 - \varphi) \rho_2} \right]}$$

$$B_1 = \int_0^{\delta_p} \ln \frac{1}{y} d\bar{y}; B_2 = \int_0^{\delta_p} \left( \ln \frac{1}{y} \right)^2 d\bar{y}; Re > 20000$$

Товщина пристінного шару струменя визначається з експерименту.

Як дисперсна насадка в ВАДН застосована деревна тирса. Вибрана ДН є в багатьох випадках оптимальною, тому що має невелику вартість (відходить праці деревообробних цехів заводів), тирса являє собою пористий матеріал з розвинутою поверхнею та може бути використана як адсорбент. Крім того, суміш уловленої ДН та пилу з доданням в'язучого та інших компонентів дозволяє вирішити проблему безвідходного виробництва шляхом виготовлення блоків або інших будівельних матеріалів.

Для підвищення швидкості процесу коагуляції, а також

запобіганню утворюванню вибухопожежної суміші поверхню тир-  
состружкової маси доцільно зволожувати шляхом диспергування  
води або подання насиченої пари.

Для оцінки впливу ДН на ефективність роботи ВАДН запро-  
понована математична модель процесу взаємодії потоків газу  
який очищають з дисперсною насадкою. Форма часток ДН (тирси)  
прийнята пластинчаста. При взаємодії частки насадки будуть  
робити обертально-поступальний рух, утворюючи у поперечному  
перерізі пористу перегородку, крізь яку буде фільтруватися  
газ який очищають. У процесі фільтрації буде відбуватися ма-  
сообмін між частками насадки та газом який очищають. У  
зв'язку з тим, що частки ДН будуть робити обертальний рух,  
то проекції їх поверхні на напрям осі прийняті постійними,  
рівними певній ефективній поверхні. А процес масообміну вва-  
жаємо дифузійним.

Змінення концентрації пилу під час обтікання пилогазо-  
вим потоком пластин ДН запишемо за аналогією з рівнянням  
енергії:

$$V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} = D \frac{\partial^2 c}{\partial y^2}, \quad (17)$$

Переходячи до безрозмірних координат в рівнянні (17) за  
правилом:  $x = l * \bar{x}$ ;  $y = h * \bar{y}$ , отримуємо:

$$\frac{\partial^2 c}{\partial \bar{y}^2} - Re_1 \frac{\partial c}{\partial \bar{y}} = Re_2 \frac{\partial c}{\partial \bar{x}}$$

де

$$Re_1 = k_1 = \frac{V_x h}{D}; Re_2 = k_2 = \frac{V_y h}{D}; Re \gg 1, \quad (18)$$

Розв'язок рівняння (18) шукаємо у вигляді добутку двох  
функцій:

$$c = f(x)\varphi(y), \quad (19)$$

Підставляючи (19) в (18), після диференціювання розділяємо  
члени рівняння на (19) та отримуємо:

$$\frac{\varphi^n}{\varphi} - k_1 \frac{\varphi'}{\varphi} = k_2 \frac{f'}{f} = -\lambda, \quad (20)$$

де  $\lambda$  - визначається з експерименту.

Записуємо рівняння (20) у вигляді системи:

$$f' + \frac{\lambda}{k_2} f = 0 \quad (21)$$

$$\varphi^n - k_1 \varphi' + \lambda \varphi = 0, \quad (22)$$

Провівши ряд перетворень, отримаємо розв'язок системи:

$$c = \left[ A_1 \exp\left(\frac{k_1 + \sqrt{(-k_1)^2 - 4\lambda}}{2} y\right) + A_2 \exp\left(\frac{k_1 - \sqrt{(-k_1)^2 - 4\lambda}}{2} y\right) \right] \exp\left(-\frac{\lambda}{k_2} x\right) \quad (23)$$

де  $A_1$  та  $A_2$  - константи інтегрування, визначаєми межовими умовами.

Потік маси на поверхню пластини пропорційний різниці концентрацій та коефіцієнту масовидатності від потоку до об'єкту стінки. З другого боку у відповідності із законом Фіка потік маси пропорційний концентрації у поверхні та коефіцієнту дифузії речовини у несучому середовищі:

$$\beta(C_0 - C_k) = -D \frac{\partial c}{\partial y} \quad (24)$$

$$\beta = \frac{-D \frac{\partial c}{\partial y} \Big|_{y=0}}{(C_0 - C_k)} = - \frac{D \frac{\partial c}{\partial y} \Big|_{y=0}}{(C_0 - C_k)h} \quad (25)$$

де  $C_0$  - початкова концентрація пилу;  $C_k$  -кінцева концентрація пилу;  $\beta$  - коефіцієнт масовидатності;  $D$  - коефіцієнт дифузії пилу у потоці;  $h$  -товщина шару газу біля пластинки з якого надходять пилини на поверхню.

Потік маси пилу на дисперсне середовище може бути знайдений за виразом:

$$Q = 2\beta(C_o - C_k)Fn = \frac{2FC_o(M_1 - M_2)Dn}{(\exp M_1 - \exp M_2)h}, \quad (26)$$

де

$$M_1 = \frac{k_1 + \sqrt{(-k_1)^2 - 4\lambda}}{2}; M_2 = \frac{k_1 - \sqrt{(-k_1)^2 - 4\lambda}}{2}$$

F - площа поверхні пластини з одного боку; n - число часток (пластин), які приймають участь у масообміні.

Рівняння руху часток ДН буде мати вигляд:

$$V_r^2 = e^{-b_1 r} \left( -\frac{2\omega^2}{b_1} \left[ r e^{b_1 r} - r_0 e^{b_1 r_0} - \frac{1}{b} (e^{b_1 r} - e^{b_1 r_0}) \right] + V_{r_0}^2 \right), \quad (27)$$

$$\text{де } b_1 = \frac{C_y \rho F}{m_1}$$

$C_y$  - коефіцієнт лобового опору часткам у напрямі осі y;  $\rho$  - масова щільність газу;  $m_1$  - маса часток ДН;  $\omega$  - кутова швидкість обертання газового потоку.

Швидкість дисперсної частки визначається з такого рівняння:

$$V_\theta^2 = e^{-b_2 x} (-2g - b_2 V_{x_0}^2) \frac{1}{b_2} (e^{b_2 x} - 1), \quad (28)$$

де  $b_2 = \frac{C_x \rho F}{m_1} C_x$  - коефіцієнт лобового опору часток в напрямі осі x;  $V_{x_0}$  - видаткова швидкість у робочій порожнині апарата; g - прискорення вільного падіння.

В міру просування дисперсної фази уздовж робочої порожнини апарата швидкість обтікання буде зменшуватися у зв'язку зі зростанням швидкості дисперсної фази та у кінцевому підсумку буде рівною швидкості витання  $V_B$ , що відповідає максимальному насиченню пилогазового потоку дисперсною фазою ( $x = L$ ):

$$V_a^2 = e^{-4b_2L}(-2g - b_2V_{x_0}^2) \frac{1}{b_2} (e^{b_2L} - 1), \quad (29)$$

Ефективність очистки  $\eta$  газів від пилу представимо як:

$$\eta = 1 - \frac{C_k}{C_0}, \quad (30)$$

де  $C_k$  - кінцева концентрація пилу після очистки в апараті;

$C_0$  - концентрація пилу перед очисткою в апараті.

А для поточного значення ефективності у будь-якій точці:

$$\eta = 1 - \frac{C}{C_0}, \quad (31)$$

Рівняння (23) підставимо в (31) та, провівши подальші перетворювання, отримаємо вираз для визначення ефективності уловлювання пилу за допомогою дисперсної насадки:

$$\eta = 1 - \frac{\left[ \exp\left(M_2 \frac{r}{R}\right) - \exp\left(M_1 \frac{r}{R}\right) \right] \exp\left(-\frac{\lambda}{V_g} \frac{D}{h} \frac{x}{L}\right) Q_0 h \rho_p \gamma_s}{2(M_1 - M_2) D m_0 R} \quad (32)$$

де  $m_0$  - секундна витрата дисперсної насадки;  $\delta$  - товщина

пластин дисперсної насадки;  $\rho_p$  - масова щільність ДН;

$Q_0$  - витрачання пилогазового потоку;  $\lambda$ ,  $\lambda/h$ ,  $h/D$  - пара-

метри, що визначаються експериментально.

Аналіз формули (32) показує, що зі зростанням питомого вмісту дисперсної фази  $m_0/Q_0$ , а також зі зменшенням співвідношення  $\delta/R$  ефективність роботи збільшується, тому що відповідно збільшується ефективна поверхня дисперсної фази та час перебування дисперсної фази в апараті. При збільшенні  $\rho_p$  ефективність знижується, тому що зменшується час перебування ДН в робочій порожнині апарата.

Для оцінки затрат енергії на очистку газу та визна-

чення ефективності роботи ВАДН при очистці газу від домішок, які знаходяться в різних агрегатних станах, пропонується ексергетичний метод.

При розрахунку ексергетичної ефективності роботи ВАДН розгляд обмежено контрольною поверхнею, до якої включені апарат ВАДН, повітроводи, обв'язка ВАДН, паровід, димосос та пиловий вентилятор.

Складемо ексергетичний баланс контрольної поверхні.

Прибуваюча ексергія,  $E'$ : первинна ексергія газу який очищають, та шкідливих домішок  $E_{п}$ ; ексергія електроенергії (приводи вентилятора і димососа)  $E_{эл}$ ; ексергія дисперсної насадки  $E_{дн}$ ; ексергія поданої пари  $E_{пп}$ .

Ексергія яка витрачається,  $E''$ : ексергія очищених газів, які викидають до атмосфери та неуловлених домішок  $E_{г}$ ; ексергія уловленої насадки та домішок шкідливих речовин  $E_{у}$ .

Дисипируюча ексергія,  $D$ : ексергія, яка йде на подолання опору повітроводів та апарата  $E_{в}$ ; втрати ексергії разом з теплотою крізь корпус апарата  $E_{р}$ .

Ексергетична ефективність апарата ВАДН  $\eta_0$  може бути розрахована по формулі:

$$\eta_0 = \frac{(E_{п} + E_{эл} + E_{дн} + E_{пп}) - (E_{в} + E_{г} + E_{р})}{E_{п} + E_{эл} + E_{дн} + E_{пп}} = \frac{E_{у}}{E'} , \quad (33)$$

Питомі затрати енергії при очищенні газу від домішок у ВАДН вищі, ніж у циклона СДК-ЦН-33 приблизно у 2,25 разів, загальна ефективність роботи у 2,77 разів, що відповідає фізиці процесу очистки. Ексергетична ефективність ВАДН значно вище, ніж у циклона, що належить пояснити максимальним використанням енергії на очистку газу та мінімальними її витратами.

У третьому розділі викладається методика експериментальних досліджень вихрового апарата з дисперсною насадкою, наводиться схема лабораторної установки, результати експери-

ментальних досліджень.

Експериментальні дослідження проводилися з використанням стандартного кварцевого пилю щільністю  $2650 \text{ кг/м}^3$  та питомою поверхнею  $S = 3000; 5600; 8800$  та  $11000 \text{ см}^2/\text{г}$ . Як дисперсна насадка використовувалась деревина тирса щільністю  $810 \text{ кг/м}^3$  та розмірами  $0,4+1,0 \text{ мм}$ .

У процесі експериментальних досліджень були вивчені закономірності розповсюдження вихрового турбулентного дисперсного потоку, рух турбулентного дисперсного струменя на утнутій поверхні у вихровому супутньому градієнтному потоці. Досліджено процес взаємодії потоків газу який очищують з дисперсною насадкою. Експериментально визначено розподілення концентрації пилю і ДН в робочій порожнині ВАДН. Перевірено вплив режимних та конструктивних параметрів і ДН на ефективність роботи апарата. Отримані дані про втрати енергії на очистку газу від змулених домішок. Визначена фракційна ефективність роботи ВАДН.

Була перевірена адекватність теоретичних та експериментальних даних. Перевірка проводилася з використанням критерію адекватності (критерію Фішера). В результаті розрахунків були отримані розрахункові значення критерію, які підтверджують адекватність теоретичної та експериментальної частини.

У четвертому розділі розглядається галузь застосування апарата з дисперсною насадкою, викладається методика його розрахунку та приводяться результати промислових випробувань апарата.

Вихровий апарат з дисперсною насадкою рекомендується до застосовування на промислових підприємствах для уловлювання дрібнодисперсних змулених домішок з розмірами часток менше  $5 \text{ мкм}$ .

Запропонована методика розрахунку ВАДН дає можливість обґрунтовано розраховувати та підбирати апарат для широкого діапазону вихідних умов його праці. Для спрощення процесу

розрахунку на основі запропонованої методики була розроблена номограма для визначення режимних та конструктивних параметрів ВАДН, яка дозволяє за відомими витратами газу, що подається на очистку, а також за його властивостями та властивостями уловлюваних часток змулених домішок підбирати геометричні розміри апарата та значення складових швидкостей потоків газу в його робочій камері.

Вихровий апарат з дисперсною насадкою був випробуваний у виробничих умовах та впроваджений у проекти системи газоочистки на Спільному українсько-угорському підприємстві "Титан - Евіг" по машинобудуванню, на заводі Криворіжсталь та Запорізькій ДРЕС.

Виробничі дослідження ВАДН проводили при концентрації пилу від 1000 до 3000 мг/м<sup>3</sup>, з розмірами часток від 1 до 5 мкм зі щільністю більш 3000 кг/м<sup>3</sup>. Ефективність роботи ВАДН складала до 98%, а питомі втрати тиску - до 1300 Па. Як дисперсна насадка використовувалася деревна тирса щільністю 810 кг/м<sup>3</sup>.

Експериментальні дослідження підтвердили доцільність впровадження вихрового апарата з дисперсною насадкою на виробничих підприємствах.

#### ОСНОВНІ ВИСНОВКИ:

1. Проведено аналіз існуючих конструкцій апаратів для очищення газів від змулених домішок та встановлено, що розглянуті механічні пиловловлювачі не можуть застосовуватися при очищенні газів від змулених домішок з медіанним розміром менш 5 мкм. Для поширення діапазону застосовності пиловловлювачів необхідна розробка та дослідження механічного апарата для сухого очищення газу від пилу з  $d_{50} < 5$  мкм.

2. Розроблено апарат для механічної сухої високоефективної очистки газів від дрібнодисперсних домішок з розміром часток більш 0,5 мкм, який поєднує переваги вихрового пиловловлювача та шарового фільтру, що дозволяє поширити галузь

застосування механічних пиловловлювачів.

3. Проведені теоретичні дослідження взаємодії дисперсних потоків в робочій камері розробленого апарата та отримані математичні моделі, що дозволяють розрахувати швидкості потоків у будь-якій точці вздовж радіуса та по височині робочої камери з урахуванням впливу змулених домішок та дисперсної насадки.

4. Отримані залежності загальної та ексергетичної ефективності від режимних та конструктивних параметрів запропонованого апарата, властивостей газу який очищують, уловлюваних домішок та дисперсної насадки. Ці залежності дозволяють обґрунтовано підбирати апарат та визначати причини непродуктивних втрат енергії в процесі роботи системи газоочистки та шляхи зниження енерговитрат.

5. Проведені експериментальні дослідження ефективності роботи ВАДН у лабораторних та промислових умовах. Отримані дані підтвердили достовірність теоретичних залежностей для розрахунку розподілу складових швидкостей в робочій камері, ефективності роботи та енерговитрат на очистку газу за допомогою вихрового апарата з дисперсною насадкою.

Підтверджена доцільність широкого застосування цих апаратів при очищенні газу, який містить частки з розмірами менше 5 мкм, видалюемого від обладнання металургійної, будівельної, хімічної, машинобудівельної промисловості та на об'єктах енергетичних комплексів.

6. Розроблена достовірна методика розрахунку режимних та конструктивних параметрів та підбору вихрового апарата з дисперсною насадкою.

Основний зміст роботи відображено у таких публікаціях:

1. Шушляков Д.А. Определение эффективности и энергозатрат комплексной очистки газа. Повышение эффективности и надежности системы городского хозяйства. Сб. науч. трудов. - Киев, 1994, - с. 105-108.

2. Шушляков Д.А., Шушляков А.В. Вихревой аппарат с дисперсной насадкой. Информационный листок.- Харьков: ХАРПНТЭИ, 1995.

3. Шушляков Д.А., Шушляков А.В. Комбинированный пылеуловитель. Информационный листок.- Харьков: ХАРПНТЭИ, 1995.

4. А.с. № 1494944 (СССР) Аппарат для очистки газов от примесей. Шушляков Д.А., Шушляков А.В., Радвинская Э.П., Тимошин К.Н., опубл. в В.И. №27, 1989.

5. А.с. № 1791292 (СССР) Установка пневматического транспортирования сыпучих материалов. Шушляков Д.А., Шушляков А.В., опубл. в В.И. №4, 1993.

6. Пат. № 1838074 (СССР) Устройство для удаления продуктов из зоны резания. Шушляков Д.А., Шушляков А.В., Соболев Н.Е., Ивасишин В.С., опубл. в В.И. №32, 1993.

7. Шушляков Д.А. Очистка газов, удаляемых от электросталеплавильных печей. Тезисы докл. III Республиканской студенческой конференции.- Донецк, 1993, с. 23.

8. Шушляков Д.А. Кольцевая система пневмотранспорта топливopодачи. Тез. студ. НТК.- Харьков: ХИСИ, 1991,- с. 120.

9. Шушляков Д.А., Ким С.А. Производственные исследования очистки газов от электросталеплавильных печей. Тезисы докл. межрегион. НТК.- Харьков: ХИСИ, 1993, с.

10. Успенский В.А., Шушляков Д.А. Взаимодействие дисперсной насадки с закрученным потоком очищенного газа в ВАДН. Тез. XXVII НТК. ХИИГХ,- Харьков,- 1994,- с. 56

11. Шушляков Д.А. Турбулентная дисперсная струя на вогнутой поверхности в вихревом слутном градиентном потоке в аппарате ВАДН. Тез. XXVII НТК. ХИИГХ, Харьков,- 1994,- с. 56-57

12. Шушляков А.В., Шушляков Д.А. Выбор аппарата для комплексной очистки газа. Тезисы докл. 50-й НТК ХГТУСА, 1995,- с. 90-92

13. Шушляков Д.А. Внедрение вихревого аппарата с дис-

персной насадкой. Тез. XXVIII НТК. ХГАГХ, Харьков, - 1996, - с. 59

14. Шушляков Д.А., Шульга Н.А. Определение скорости турбулентной струи, распространяющейся по вогнутой поверхности рабочей камеры вихревого аппарата с дисперсной насадкой. Тез. XXVIII НТК. ХГАГХ, Харьков, - 1996, - с. 60

Шушляков Д.А. Исследование аэродинамики и эффективности работы вихревого аппарата с дисперсной насадкой.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.03 - Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. Харьковский государственный технический университет строительства и архитектуры. Харьков 1996.

На защиту выносятся результаты исследования: конструкция вихревого аппарата с дисперсной насадкой; математические модели движения потоков газа в рабочей полости аппарата и взаимодействие этих потоков с дисперсной насадкой; зависимости для расчета эффективности и энергозатрат на очистку газа с помощью разработанного аппарата; зависимости для расчета эксергетической эффективности его работы; методика расчета режимных и конструктивных параметров аппарата. Установлено, что предложенный аппарат имеет эффективность работы при улавливании пыли с размерами менее 5 мкм не менее 97%, а энергозатраты, сравнимы с существующими видами оборудования для сухой очистки газов от пыли. Осуществлено промышленное внедрение аппарата, доказавшее его высокую эффективность. Результаты диссертации изложены в 14 научных трудах.

Shyshlyakov D.A. Research on aerodynamics and efficiency of work of the vartical apparatus with dispersical nozzle.

Thesis submitted for a degree of Candidate of technical science on speciality 05.23.03 - heat supply, air-conditioning, gas supply and lighting. The Kharkov State

Technical University of building and architecture. Kharkov, 1996.

The results of research to be presented for the defence include research of: the construction of the vartical apparatus with dispersical nozzle; the mathematical models of movement of the gas flow at working cavity of apparatus and interaction these flow with dispersical nozzle; dependencies for calculation of efficiency and power for gas cleaning with the help of designed apparatus; dependencies for calculation of exergetic yield of its work; technique of calculation of and constructive parameters of the apparatus. The proposed apparatus is established to have effectiveness of work by catching dust with dimension smaller 5 mcm not smaller than 97%, and power inputs comparable with existing kinds of equipment for dry gas cleaning from dust. The industrial introduction of apparatus, proving its high efficiency, has been realised. The thesis results have covered in 14 scientific publications.

**Ключові слова:** вихровий апарат з дисперсною насадкою; вловлювання пилю; підвищення ефективності; захист навколишнього середовища.



Підп. до друку 31.05.96.

Формат 60x84 1/16

Папір друк. №2. Друк офсетний

Зам. № 93

Умов.-друк. аркушів 1,0

Тираж 100 прим.

Безкоштовно

Сектор оперативної поліграфії ОЦ ХДАМГ

310002, м.Харків, вул. Революції, 12.

