

*Ефективність газотурбінних установок залежить від чистоти всмоктуваного повітря. В статті представлено результати моделювання та дослідження процесу очищення повітря за допомогою патронних фільтрів із використанням традиційних та сучасних засобів моделювання*

*Ключові слова: повітряний фільтр, газотурбінна установка, інтелектуальна система, байєсівська мережа*

*Эффективность газотурбинных установок зависит от чистоты всасываемого воздуха. В статье представлены результаты моделирования и исследования процесса очистки воздуха с помощью патронных фильтров с использованием традиционных и современных средств моделирования*

*Ключевые слова: воздушный фильтр, газотурбинная установка, интеллектуальная система, байесовская сеть*

*The quality of induced air has an essential impact on efficiency of gas turbine plants. Results of the modelling and research of air cleaning process by means of cartridge filter using traditional and modern simulation tools are presented in the article*

*Keywords: air filters, gas turbine, intellectual systems, Bayesian network*

# МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ НА ПАТРОННИХ ФІЛЬТРАХ ДЛЯ ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК

**Л. М. Бугаєва**

Кандидат технічних наук, доцент\*  
Контактний тел.: (044) 563-39-40  
E-mail: bugaeva\_l@ukr.net

**К. М. Полякова\***

Контактний тел.: 050-294-10-55  
E-mail: poliakova\_k@ukr.net

**Г. О. Статюха**

Контактний тел.: (044) 406-82-12  
E-mail: gen.statyukha@mail.ru

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою\*  
\*Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

## 1. Вступ

Газотурбінні установки (ГТУ) широко застосовуються в багатьох галузях промисловості, енергетиці та на транспорті. Великий вплив на загальну економічність, надійність, довговічність і екологічну безпеку ГТУ має якість повітря, що всмоктується з атмосфери і проходить через елементи установки. Недостатньо ефективне очищення атмосферного повітря призводить до ерозійного зносу проточної частини двигуна, змінює швидкість робочого тіла в проточній частині компресора і турбіни, погіршує процес згорання палива. Тому проблема очищення повітря, яке подається до ГТУ, є надзвичайно актуальною. Очищення повітря від зважених частинок здійснюється із допомогою га-

зоочисних апаратів і фільтрів. Дослідження цих процесів та апаратів дозволяє виявити шляхи підвищення їх ефективності. Великий об'єм накопичених спостережень за станом фільтрів дає можливість моделювати процес як традиційними методами обробки інформації, так і застосовувати інтелектуальні методи, які дозволяють створювати програмні системи підтримки прийняття рішень, спрямованих на підвищення ефективності роботи ГТУ.

## 2. Постановка задачі

Враховуючи актуальність проблем, пов'язаних з очищенням атмосферного повітря для газотурбінних

установок, було приділено особливу увагу процесу очищення повітря за допомогою патронних фільтрів. Поставлено задачу проведення теоретичного та експериментального дослідження процесу фільтрації через циліндричну гофровану поверхню патронних фільтрів та впливу на процес їх режимних параметрів. Також необхідно було розглянути можливість використання байєсівських мереж для рішення задачі оцінювання ефективності процесу очищення атмосферного повітря для ГТУ.

### 3. Дослідження процесу очищення повітря на патронних фільтрах

Для видалення часток пилу з атмосферного повітря, що поступає до газових турбін, використовуються різні системи фільтрації [1]. Як відомо, розмір найбільших твердих частинок, що містяться в повітрі в нормальних умовах, складає 10 - 15 мкм. Ерозія лопаток компресора викликається частками більше 10 мкм, а забруднення компресора (відкладення пилу на лопатках) – частками менше 5 мкм. Частки від 5 до 10 мкм можуть викликати ерозію або забруднення в залежності від їх твердості, хімічного складу і фізичних властивостей.

Для очищення атмосферного повітря в нашому дослідженні використовувалися патронні фільтри. На рис. 1 показана схема фільтрування через циліндричну гофровану фільтрувальну перегородку. В процесі фільтрування на поверхні гофри відкладається осад пилу завтовшки  $\delta$ .

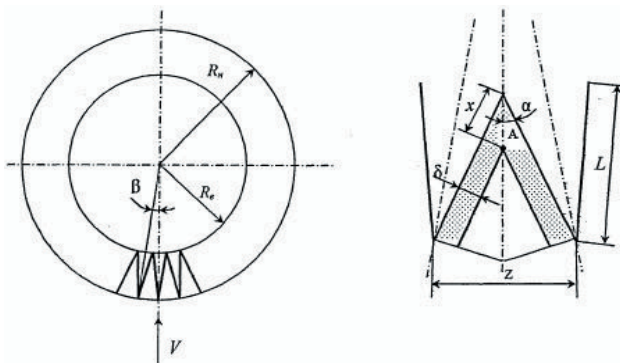


Рис. 1. Схема процесу фільтрування через циліндричну гофровану перегородку

Шари осаду на протилежних стінках сходяться в точці А, яка з часом зміщується до  $R_n$ , а внутрішня частина складки, заповнена пилом, поступово збільшується.

З рис. 2 видно, що при фільтруванні з утворенням осаду через гофровану перегородку після деякого часу (у нашому прикладі близько 5000 с) настає період швидкого зростання втрати тиску на перегородці, що повинне поза сумнівом враховуватися при виборі періоду фільтрування до регенерації.

Можна знайти повну витрату повітря через гофровану перегородку, використовуючи наступний вираз:

$$V = \Delta P \left( \frac{L-x}{R_{nn} + r_0 \delta} + \int_0^x \frac{dy}{R_{nn} + r_0 \sqrt{y^2 + \delta^2}} \right) \frac{2Hn}{\mu}$$

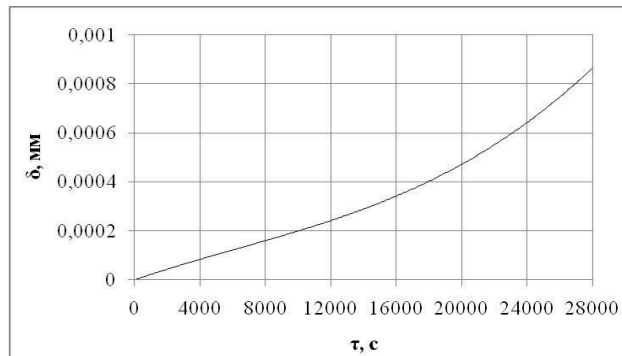


Рис. 2. Залежність товщини осаду від часу

Величина перепаду тисків, що забезпечує необхідну швидкість течії газового потоку через фільтрувальну перегородку є найважливішою експлуатаційною характеристикою будь-якого фільтру. З попереднього виразу можна визначити втрату тиску:

$$\Delta P = \frac{V}{\left( \frac{L-\delta}{R_{nn} + r_0 \delta} + \int_0^{\delta/\text{tg}\alpha} \frac{dy}{R_{nn} + r_0 \sqrt{y^2 + \delta^2}} \right) \frac{2Hn}{\mu}}$$

де

$$\delta = L \text{tg}\alpha \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{CV\tau}{\rho_0 L^2 H n \text{tg}\alpha}} \right)$$

$$R_{nn} = A \frac{32H(1-\epsilon)^2}{D^2 \epsilon^2} \quad \tau_{np} = \frac{\rho_0 H n L^2 \text{tg}\alpha}{CV}$$

$\Delta P$  – втрата тиску, Па;

$\delta$  – товщина шару осаду, м;

$\tau_{np}$  – граничний час фільтрування, с;

$R_{nn}$  – коефіцієнт опору перегородки;

$D$  – діаметр волокну, м;

$\epsilon$  – поруватість шару;

$V$  – витрата газу, м<sup>3</sup>/с;

$\mu$  – динамічна в'язкість газу, Па\*с;

$H$  – висота перегородки (патрон), м;

$n$  – число гофр фільтрувальної перегородки;

$r_0$  – питомий коефіцієнт опору шару осаду;

$L$  – ширина гофри, м;

$\rho_0$  – об'ємна щільність осаду;

$C$  – концентрація твердої фази в повітрі, що очищується, кг/м<sup>3</sup>.

Отримана залежність втрати тиску від часу при фільтруванні з утворенням осаду на гофрованій перегородці представлена на рис. 3.

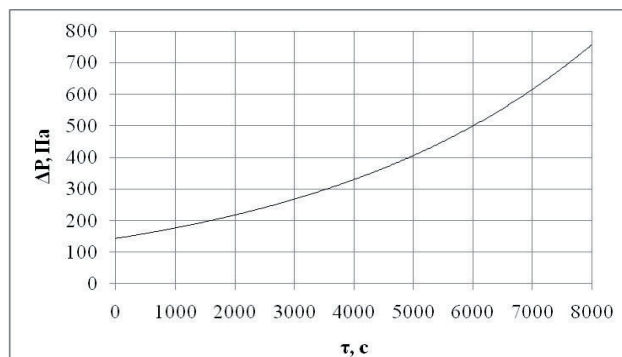


Рис. 3. Залежність втрати тиску від часу при фільтруванні з утворенням осаду на гофрованій перегородці

Мета експериментального дослідження – вивчення процесу фільтрування через циліндричну гофровану поверхню фільтр патронів і оцінка впливу на процес режимних і конструктивних параметрів фільтру, перевірка результатів і рекомендацій теоретичного дослідження процесу.

Експериментальні дослідження проводилися в ТОВ «Комплексні повітроочисні пристрої» (м. Київ). Для дослідження були використані патрони з числом гофр  $N = 180$ , і загальною площею фільтрування  $S_f = 2,455 \text{ м}^2$ . Досліди проводилися при різних концентраціях пилу і значеннях швидкості. За отриманими даними встановлювалися закономірності фільтрування (закупорювання пор, утворення осаду) на фільтрі, їх послідовність і тривалість. Визначалися константи фільтрування, необхідні для розрахунку фільтру і його застосування в тих або інших умовах.

На початку роботи фільтру втрата тиску на фільтр елементах визначається, опором чистої перегородки і складає  $\Delta P_n$ . У циклі фільтрування втрата тиску з часом росте, при цьому кінетика зростання  $\Delta P$  визначається структурою фільтрувального матеріалу, параметрами газу і пилу, швидкістю фільтрування і характером процесу (закупорювання пор, утворення осаду, змішаний або послідовний процес).

Досягши  $\Delta P$  кінцевого значення  $\Delta P_k$  включається цикл регенерації, після якого  $\Delta P$  знижується. Проте  $\Delta P$  може і не знизитися до  $\Delta P_n$  чистої перегородки, внаслідок часткового закупорювання пор, що сталося в попередньому циклі фільтрування. Таким чином,  $\Delta P_n$  від циклу до циклу фільтрування може поступово збільшуватися, а сам цикл в часі поступово скорочуватися.

Регенерація фільтру використовується для періодичного очищення фільтр-перегородки від осаду, відновлення початкової швидкості фільтрування  $W$  і втрати тиску на перегородці  $\Delta P$ . В нашому дослідженні регенерація здійснювалася зворотнім імпульсним продуванням патронів стислим повітрям. Тривалість імпульсів складала 0,2 с. У циклі регенерації через 1 хв. по черзі продувався один патрон без зупинки фільтрування в інших трьох. Досягши рівноважної регенерації і подачі повітря вентилятором залежності  $\Delta P(T)$  мають вигляд, показаний на рис. 4.

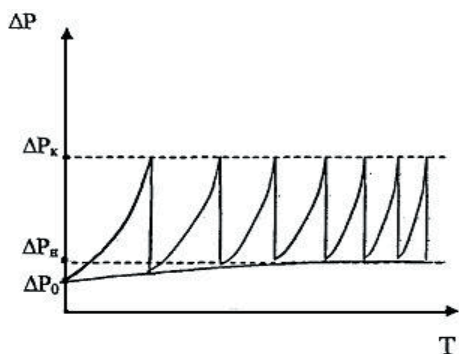


Рис. 4. Залежність перепаду тиску від часу в циклах фільтрування-регенерація:  $W=0.01 \text{ м/с}$

Дослідження ефективності пилловловлювання частинок на волокнистих фільтрах проводилися на

тих самих зразках фільтрувальних перегородок, що і гідравлічні випробування. На рис. 5 приведені результати по фракційній ефективності уловлювання частинок пилу для волокна. Швидкість фільтрації складала 0,01 м/с і 0,03 м/с. Приведені дані свідчать про високу ефективність уловлювання частинок пилу (близько 1 мкм) при швидкості фільтрації 0,03 м/с.

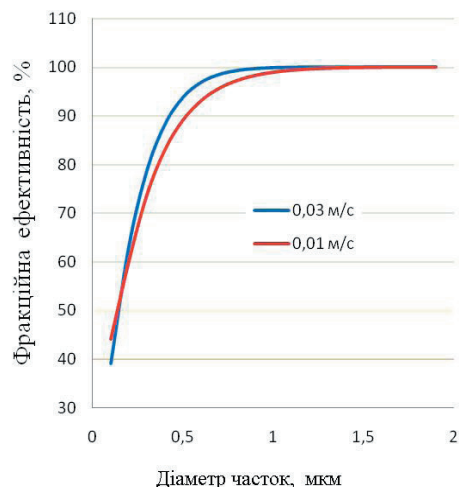


Рис. 5. Фракційна ефективність при різній швидкості фільтрації

Таким чином, була показана доцільність практичного застосування фільтрації при швидкостях газового потоку  $> 0,01 \text{ м/с}$  і діаметрі волокна 10 мкм при температурі повітря  $20^\circ\text{C}$ , опорі фільтру  $4 \text{ кгс/м}^2$  і товщині шару 0,0003 м.

#### 4. Аналіз процесу очищення повітря на патронних фільтрах із допомогою мереж Байеса

Наявність експериментальних (моніторингових) даних крім традиційної статистичної обробки даних дозволяє провести ще й інтелектуальний аналіз даних [2]. Зараз широкого застосування набули такі інтелектуальні засоби як нейронні мережі, системи нечіткого виведення та багато інших, серед яких є й так звані мережі Байеса. Ці мережі представляють собою графічні моделі імовірнісних і причинно-наслідкових відносин між змінними в статистичному інформаційному моделюванні. В байесівських мережах можуть органічно поєднуватися емпіричні частоти появи різних значень змінних, суб'єктивні оцінки «очікувань» і теоретичні уявлення про математичну імовірність тих або інших наслідків з апріорної інформації, що відрізняє байесівські мережі від інших методик інтелектуального моделювання. Інтелектуальний аналіз даних процесу очищення атмосферного повітря для газотурбінних установок проводився на базі байесівських мереж в середовищі HUGIN Expert, яке дозволяє створювати системи підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності в різних проблемних областях.

Виходячи з аналізу процесу фільтрації повітря патронним фільтром для газотурбінного двигуна, були виділені основні чинники, що впливають на ефективність процесу:

- діаметр частинок пилу в повітрі, що фільтрується;
- температура повітря на вході в очисну систему;
- швидкість повітря на вході;
- перепад тиску на фільтрувальній перегородці.

чити, що при температурі повітря 25-35°C, швидкості повітря в межах 0.01-0.02 м/с та розмірі частинок пилу в повітря в межах 1 мкм імовірність якісного очищення мала. Значення ефективності 20-40%, коефіцієнту пропуску в межах 40-

60% і дуже великий перепад тиску – 300-350 Па свідчить про те, що фільтри вже забруднені і потребують заміни. Вершина «Рекомендації» з трьох можливих варіантів дій пропонує замінити фільтри.

Порівнюючи результати отримані за допомогою HUGIN з результатами отриманими традиційними методами моделювання, можна зауважити, що деяка розбіжність має місце. Вона пояснюється тим, що на етапі побудови системи в програмному середовищі HUGIN, ми не мали інформації про імовірність настання тієї чи іншої події,

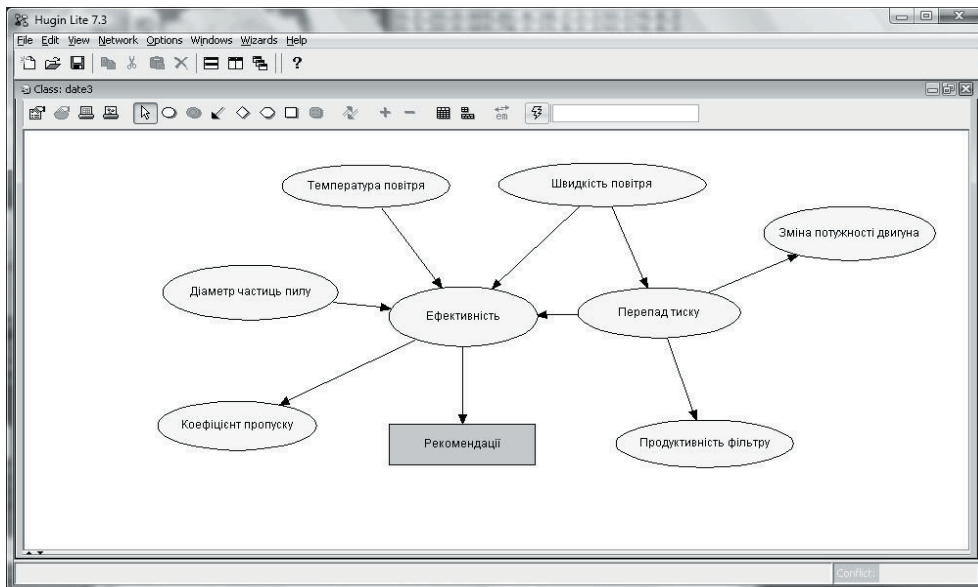


Рис. 6. Вершини байєсівської мережі, що описує процес фільтрації

Звичайно, факторів, від яких залежить ефективність очищення повітря, значно більше. Також до показників, що описують процес фільтрації, віднесемо коефіцієнт пропуску частинок пилу через фільтрувальну перегородку, зниження потужності двигуна (викликане перепадом тиску на перегородці) та продуктивність фільтру. Таким чином, було виділено сім чинників (вершин), що впливають на ефективність процесу (восьма вершина) та можливі рекомендації (дев'ята вершина) щодо його проведення. Всі ці вершини байєсівської мережі показано на рис. 6.

Для побудови таблиць умовної імовірності були використані експериментальні дані спостережень факторів процесу за деякий період часу. Загальна кількість статистичних даних перевищує 800 спостережень. Коли структура мережі та дані для її побудови було визначено, необхідно було також визначити всі можливі стани для змінних. На рис. 7 представлено побудовану байєсівську мережу із вказаними значеннями факторів. Можна ба-

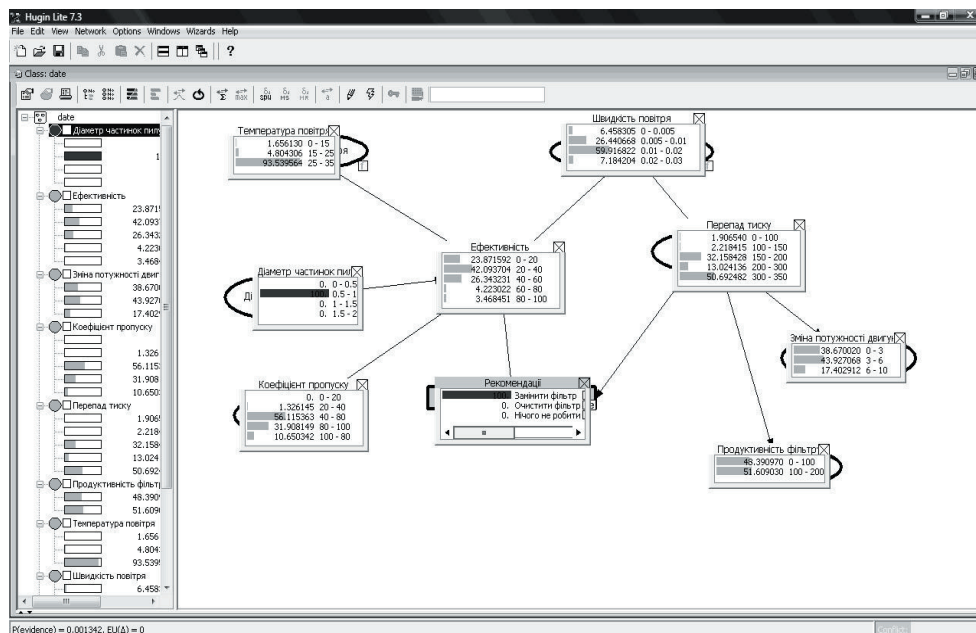


Рис. 7. Вікно програми HUGIN з побудованою байєсівською мережею

а мали лише статистичні дані процесу очищення атмосферного повітря за допомогою фільтр-патронів, накопичену за останній рік. Саме використовуючи цю інформацію програма згенерувала таблицю ймовірностей для всіх змінних. Але в загалом можна вважати, що розроблена система підтримки прийняття рішень у вигляді байєсівської мережі повною мірою відображає досліджуваний процес.

## 5. Висновки

В представленій роботі надано математичний опис процесу нестационарного фільтрування з утворенням осаду через циліндричну гофровану фільтрувальну перегородку і розглянуто його особливості. Приведено результати дослідження впливу часу фільтрування на перепад тиску, зміни гідравлічного опору та ефективності процесу пиловловлювання частинок пилу патронними фільтрами. Показано, що суттєву втрату тиску з часом при фільтруванні з утворенням осаду на гофрованій перегородці необхідно враховувати при виборі режимних параметрів патронного фільтру. На основі експериментальних даних процесу очищення повітря для газотурбінної установки, наданих ТОВ «Комплексні повітроочисні пристрої» в середовищі Hugin Expert розроблена байєсівська мережа, що дає змогу оцінити стан фільтруючого елемента за кон-

кретних умов функціонування та ефективність всього процесу в цілому. Результати моделювання та оцінки ефективності процесу очищення атмосферного повітря виконано на замовлення ТОВ «Комплексні повітроочисні пристрої» з метою подальшого впровадження на газопровідних станціях.

### Література

1. Лебедев А.С. Общие технические требования к системам фильтрации воздуха для энергетических газотурбинных установок / А.С. Лебедев, М.Ю. Львов, В.Е. Михайлов; М., ОАО «РАО ЕЭС», 2006.
2. Бугаева Л.Н., Полякова Е.Н. Оценка эффективности процесса очистки воздуха для газотурбинных установок / Сб. трудов Международ. науч. конф. Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23, Саратов, Россия, 2010.

УДК 502/504

# ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ СТАЛОСТІ РЕГІОНІВ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ ДАНИХ 2008 РОКУ

**І.М. Джигирей**

Кандидат технічних наук, старший викладач\*  
Контактний тел.: (044) 408-82-12  
E-mail: dzhygyrey@gmail.com

**Г.О. Статюха**

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедрою\*  
Контактний тел.: (044) 408-82-12  
E-mail: gen.statyukha@mail.ru

\*Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів  
Національний технічний університет України «Київський  
політехнічний інститут»  
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

*Модифіковано український регіональний індекс екологічної сталості. Наведено результати оцінювання екологічної сталості регіонів України на основі даних 2008 року*

*Ключові слова: сталий розвиток, екологічна сталість, оцінювання, індикатор, індекс*

*Модифицирован украинский региональный индекс экологической устойчивости. Приведены результаты оценивания экологической устойчивости регионов Украины на основе данных 2008 года*

*Ключевые слова: устойчивое развитие, экологическая устойчивость, оценивание, индикатор, индекс*

*Modified Ukrainian Regional Environmental Sustainability Index is proposed. The results of environmental sustainability assessment of Ukrainian regions based on 2008 data are given*

*Key words: sustainable development, environmental sustainability, assessment, indicator, index*

## 1. Вступ

Системи індикаторів сталого розвитку активно розробляються та впроваджуються у світі [1], зокрема

і в Україні, наприклад метрики [2–5], на різних рівнях, у різних сферах суспільного життя. У контексті сталого розвитку оцінювання на основі індикаторів дає змогу зробити висновки щодо стану і тенденцій