

АНОТАЦІЯ

Кравченко О. В. Підвищення продуктивності тягодуттьових трактів котлів на основі удосконалення моделей аеродинамічних систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 144 – Теплоенергетика. – Одеський національний політехнічний університет МОН Україна, Одеса, 2020.

У *вступі* обґрунтовано актуальність розробки моделей аеродинамічних систем (АС), методів розрахунку і побудови енергетичних характеристик системи та її елементів, які сприяють правильному відображенню параметрів роботи АС, розробки моделі системної оцінки ефективності при зміні параметрів будь-яких елементів системи.

Теплова потужність котлів в період експлуатації доволі часто менше розрахункових паспортних значень. Ця проблема має назву «обмеження потужності» і пов'язана з недостатньою продуктивністю гідросистем (ГС) і особливо часто аеросистем (АС), а саме – дуттьових або тягових трактів котлів. Підтвердженням масового характеру обмежень потужності є дані режимних карт котлів і методичні рекомендації ОРГРЕС по обґрунтуванню недостатнього навантаження енергетичних об'єктів, а також рекомендації департаменту енергетики США «Improving Fan System Performance», в яких невідповідність реальних параметрів АС з проектними показниками пояснюють, як «системний ефект» і вирішують заміною вентиляторів або димососів на більш потужні.

Таким чином, у *вступі* обґрунтовано актуальність проблеми невідповідності реальних показників роботи тягодуттьових трактів котлів з проектними даними, що говорить про доцільність перегляду моделей представлення параметрів і характеристик АС і відповідно методів їх розрахунку на етапі проектування, а також в період експлуатації.

У *першому розділі* дисертації виконано аналіз моделей представлення параметрів роботи динамічних систем і методів вдосконалення та оптимізації на етапі проектування АС, сформульовані мета дисертаційної роботи і завдання

досліджень для підвищення продуктивності тягодуттьових трактів котлів з одночасним зниженням питомих витрат енергії на дуття або тягу, а також розробки системних показників ефективності динамічних систем в цілому та її елементів на етапі проектування, а також в період експлуатації.

В енергетичних каталогах і довідниках гідросистеми називають «насосними установками», а аеросистеми – «вентиляторними установками». Це свідчить про те, що в ГС і АС виділені насоси, вентилятори, димососи, компресори (далі нагнітачі) як головні елементи системи. Головною моделлю представлення параметрів АС сьогодні є енергетичні характеристики нагнітачів, які отримують в результаті експериментальних випробувань на стендах виробника. Основні параметри АС і ГС представляє напірна характеристика нагнітачів: для насосів $H_{\text{нагн}} = f(Q)$; для вентиляторів або димососів $P_{V.\text{нагн}} = f(Q)$, котрі можна вважати паспортом нагнітачів.

На етапі проектування ГС і АС розробляється характеристика мережі. Для розрахунку використовують опори обладнання з гідравлічних довідників. Втрати тиску ΔP у допоміжному обладнанні розраховують та представляють у вигляді напірної характеристики мережі $H_{\text{мережа}} = f(Q)$ в полі напірної характеристики нагнітача з каталогів. Перетин розрахункової характеристики мережі та напірної характеристики нагнітача з каталогу дає робочу точку PT , яка є основою визначення витрати нагнітача, а також витрат енергії, $KKД$ або ефективності нагнітача, але не системи в цілому. Оптимізація параметрів роботи АС виконується тільки за величиною максимальних $KKД$ нагнітача, що призводить до суперечностей при вирішенні завдань енергозбереження.

Проведення реконструкції АС з метою збільшення продуктивності (подачі) нагнітачів за рахунок зниження втрат тиску в мережі з одночасним зменшенням питомих витрат енергії призводить до зниження $KKД$ нагнітача. Позитивний результат реконструкції входить в протиріччя з критерієм оптимізації – $KKД$ нагнітача. Таким чином у першому розділі обґрунтовано протиріччя моделей ГС та АС: характеристики нагнітачів мають складну модель представлення параметрів і в період експлуатації їх важко переглядати; дані гідравлічних опорів

з довідників приймаються як неминуче, для оптимізації параметрів АС використовується тільки ККД нагнітача. На основі виявлених протиріч сформульовані мета і завдання досліджень.

У другому розділі виконаний аналіз причин обмежень потужності котлів по дуттю або тязі, виконані дослідження достовірності існуючих методів представлення параметрів гідро і АС на основі використання показника «повний напір», розроблено пропозиції щодо вдосконалення моделі представлення процесів в АС.

Для заданих перетинів АС повний напір розраховують, як суму трьох складових енергетичних параметрів рідин або газів в формі рівняння Бернуллі. Для представлення нагнітачів використовується показник – повний напір нагнітачів $H_{\text{нагн}}$ як різниця повних напорів в перерізі, де встановлений манометр – H_2 і місце установки вакуумметра – H_1 . Для аналізу параметричної моделі розроблена графо-аналітична Н-модель представлення показника повний напір нагнітачів (перший пункт наукової новизни), яка схематично показана на рис. 1.

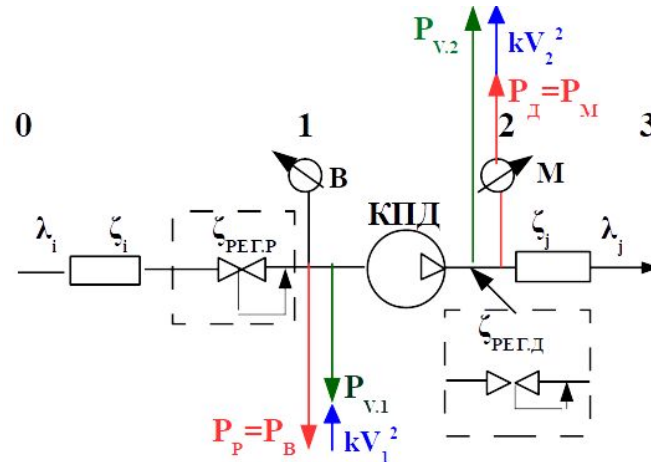


Рисунок 1 – Н-модель нагнітача на основі показника повний натиск.

Представлення параметрів нагнітача у вигляді Н-моделі дозволило виявити наступні невідповідності. Невиправдано ускладнена методика представлення параметрів систем на основі розрахунку параметра «повний напір». Н-модель показала, що при розрахунку трьох складових повного напору в зоні розрядження P_{V1} , динамічна складова $H_{\text{дин}} = kV_1^2$ використовується два рази, так як при використанні показника розрядження P_P вже є в показниках

вакуумметра P_B . Це дозволило обґрунтувати перехід від параметра повний напір нагнітача до пьезо показників АС як різниці показань манометра і вакуумметра.

$$P_{\text{нагн}} = P_M - P_B = P_2 - (-P_1) \quad (1)$$

Аналіз Н-моделі представлення параметрів нагнітача показав особливу роль показників манометра і вакуумметра. Таким чином, представлення енергії в АС умовно можна розділити на дві складові: показники пьезоприборів – манометрів і вакуумметрів; і динамічна складова енергії, яка характеризує процеси дії або динаміки.

У *третьому розділі* отримала подальший розвиток концепція представлення енергії, для чого використовують дві компоненти енергії: потенціал – Π , який є «першопричиною» енергетичних проявів; і динаміка – $\mathcal{D}$. Добуток двох компонент відображає модель розрахунку потужності $N = \Pi \cdot \mathcal{D}$. Об'єднуючим фактором представлення і зіставлення різних видів енергії є універсальна одиниця виміру потужності – Ватт.

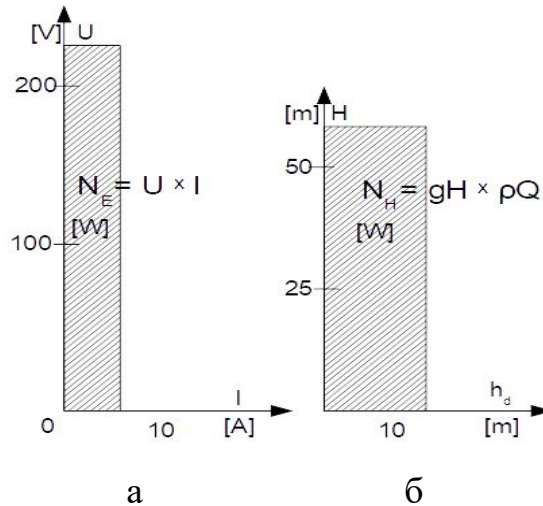


Рисунок 2 – Графічне представлення розрахунку потужностей
(а – електричної потужності, б – гідравлічної потужності).

Універсальна одиниця виміру потужності – Ватт для різних видів енергії дозволяє розраховувати ККД – «ефективність трансформації» $\eta_{\text{нагн}}$ або перетворення різних видів енергії. Таким чином, уніфікація одиниць потужності різних видів енергії дозволила сформулювати показник ефективності роботи

нагнітачів у відносній формі $0 < \eta_{\text{нагн}} < 1$ як показник відношення потужностей: аеропотужності $N_{\text{аеро}}$ до електричної $N_{\text{ел}}$. Завдяки показнику $KKД$ нагнітачів у відносній формі при проектуванні ГС і АС виконують оптимізацією тільки за максимальним значенням $KKД$ нагнітачів.

Існують методи розрахунку співвідношень динаміки і потенціалу з використанням коефіцієнта пропорційності - опір R . Можна запропонувати методику розрахунку «ефективність динамічних процесів» $\varphi_{\text{дин}}$ як співвідношень динаміки D і потенціалу Π , за умови уніфікації одиниць вимірювання обох компонент. В ГС насос з потенціалом H [м] формує динамічну складову $H_{\text{дин}}$ [м]. В АС повний напір нагнітачів P_V [мм] формує динамічну складову $h_{\text{дин}}$ [мм].

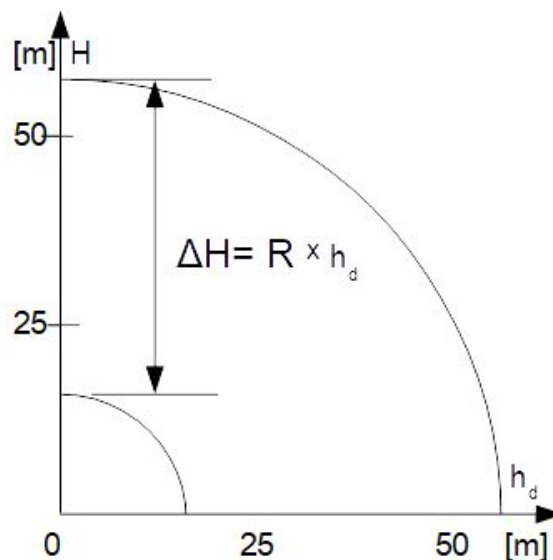


Рисунок 3 – Модель представлення ефективності динамічних процесів.

Уніфікація одиниць вимірювання компонент потенціалу та динаміки дозволило формулювати завдання розробки показника ефективності динамічних процесів $\varphi_{\text{дин}}$ у відносній формі $0 < \varphi_{\text{дин}} < 1$ (другий пункт наукової новизни).

$$\varphi_{\text{дин}} = D / \Pi = h_{\text{дин}} / H = 1 / (1 + R) \quad (2)$$

Спільне використання коефіцієнтів «ефективності трансформації» $\eta_{\text{нагн}}$ різних видів енергії в нагнітачі і «ефективність динамічних процесів» $\varphi_{\text{дин}}$ в аеросистемі дозволить розраховувати «системну ефективність» тягодуттєвих трактів $E_{f_{\text{сист}}}$ (третій пункт наукової новизни).

$$E_{f_{\text{сист}}} = \eta_{\text{нагн}} \cdot \varphi_{\text{дин}} \quad (3)$$

Таблиця 1. Модель розрахунку системної ефективності

Енергія $E \Rightarrow$ Робота A [Дж] $\Rightarrow$ Потужність $N = A / t$ [Вт]		
Трансформація енергії		Динамічні процеси
Потужність $N = P \cdot D$ [Вт]		$D \equiv P$
<i>Електрична енергія</i>		
$N_{ел} = U \cdot I$ [Вт]		$I = U / R = \varphi_{ел} U$ $\varphi_{ел} = 1 / R = I / U$
<i>Гідравлічна енергія</i>		
$N_{гидр} = Hg \cdot \rho Q$ [Вт]		$QV \equiv \varphi_{гидр} 2gHS = 2gHS / (1+R)$
$\eta_{тр} = N_{гидр} / N_{эл} = 0,85$		$\varphi_{гидр} = 1 / (1+R) = QV / 2gHS = 0,2$
<i>Розрахунки системної ефективності енергетичних процесів АС</i>		
$\eta_{сист} = \eta_{тр} \cdot \varphi_{гидр} = 0,85 \cdot 0,2 = 0,17$		

Розробка показника ефективності динамічних процесів $\varphi_{дин}$ може коректно характеризувати заходи щодо зниження опорів в динамічних системах, що дозволить збільшити продуктивність систем з одночасним зниженням витрат енергії. Такі заходи можуть бути альтернативою існуючої концепції заміни обладнання на більш потужне.

У четвертому розділі виконано аналіз відмінностей процесів в АС від гідросистем. На основі особливостей розроблена п'єзомодель АС, яка будується розрахунковим шляхом для трьох і більше ділянок системи.

Історично, моделі представлення процесів в АС розвивалися за аналогією з розробленими раніше моделями гідросистем. Однак, важливою особливістю ГС є те, що обладнання розташовується в зоні тиску, а зона розрядження, через небезпеку виникнення кавітації, має мінімальну кількість обладнання. У АС немає проблеми кавітації, тому обладнання може розташовуватися як в зоні тиску, так і розрядження. Крім систем з вентиляторами, де розвинена зона тиску, широко використовуються системи з димососами, в яких обладнання розташовують у зоні розрядження. На рисунку 4 показані енергетичні характеристики димососа Дн-26.

Димосос Дн-26 використовується при температурі 200 ° С. Однак, його можна використовувати в якості вентилятора при температурі 20 ° С. Виконано аналіз, який показав відмінність рекомендованої зони роботи при використанні різних показників ефективності. Так оптимальною зоною роботи при використанні показника $KKД$ є діапазон робочих точок $PT_1 - PT_2 - PT_3$. Використання коефіцієнта питомих витрат енергії $k_N = N / Q$ показує, що зона правіше точки максимального $KKД$ нагнітача (збільшення подачі) є більш кращою: k_{N4} має найкращі показники співвідношення витрат енергії $N_{ел}$ до подачі Q нагнітача.

	Познач	P _{T1}	P _{T2}	P _{T3}	P _{T4}
Q	тис.м ³ /Г	145	255	335	380
N	кВт	170	315	345	343
$\eta_{вент}$	—	0,74	0,82	0,74	0,64
k_N	кВт/м ³	1,22	1,24	1,04	0,9

Відмінності роботи АС від ГС, які доведено на рисунку 1 за допомогою графічної Н-моделі дозволили сформулювати концепцію нової моделі представлення параметрів роботи аеросистем. По-перше, необхідно виконати перехід від комплексного параметра «повний натиск» до показників, розрахунок яких повинен відображати і максимально збігатися з показаннями пьезоприборів. Для прикладу виберемо розрахунок показань приладів в двох характерних перетинах: показання вакуумметрів $P_1 = P_P$ в зоні розрідження і манометрів $P_2 = P_T$ в зоні тиску. Для порівнянності розрахункових параметрів в системі з показаннями приладів розроблена розрахунково - графічна «Р-модель» уявлення параметрів АС (Рисунок 5) (четвертий пункт наукової новизни).

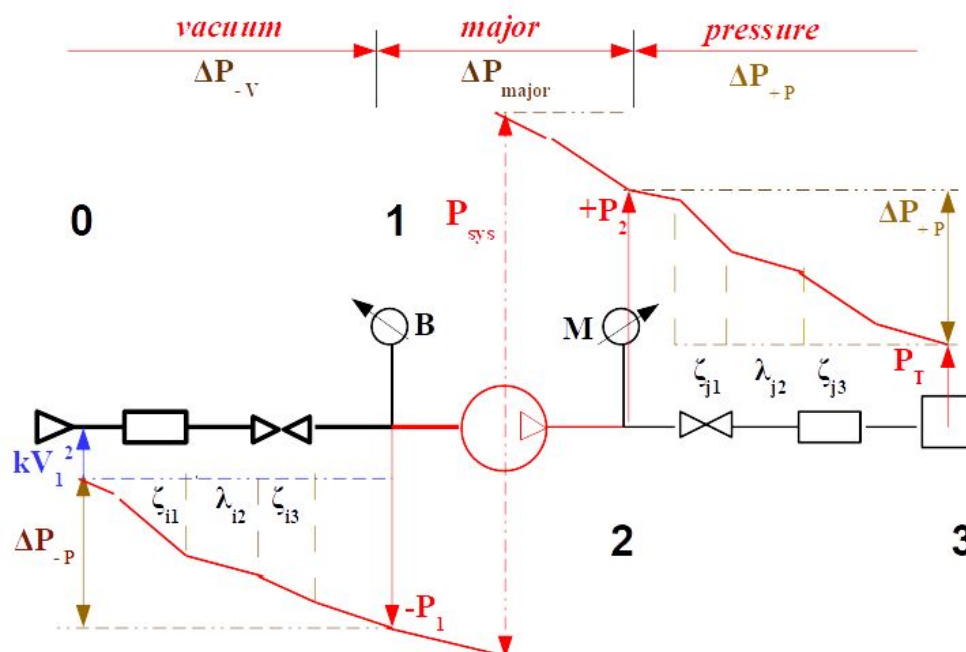


Рисунок 5 – Р-модель – пьезомодель параметрів АС

Динамічна складова енергії як є складовою частиною показання вакуумметра. Тому, її можна не показувати в пьезографічній моделі. При необхідності, динамічну складову енергії можна показувати в графічній моделі тільки в зоні розрядження, де ця складова формується і присутній в показанні вакуумметра. Це ніяк не змінить графік пьезо характеристики розрідження. Динамічна складова енергії як є складовою частиною показання вакуумметра. Тому, її можна не показувати в пьезографічній моделі. При необхідності, динамічну складову енергії можна показувати в графічній моделі тільки в зоні

розрядження, де ця складова формується і присутній в показанні вакуумметра. Це ніяк не змінить графік пьезо характеристики розрядження.

В роботі розроблена методика розрахунку пьезо параметрів для використання в «Р-моделі» з прогнозуванням вимірюваних показників пьезо параметрів - манометрів і вакуумметрів. При цьому пьезомодель функціонально (за родом завдань) і параметрично (зона розрядження і зона тиску) доцільно розділити на три ділянки: 0 - 1 - ділянка розрядження; 1 - 2 - ділянка нагнітача; 2 - 3 - ділянка тиску. Результати розрахунку пьезомоделі АС показана на рис. 6.

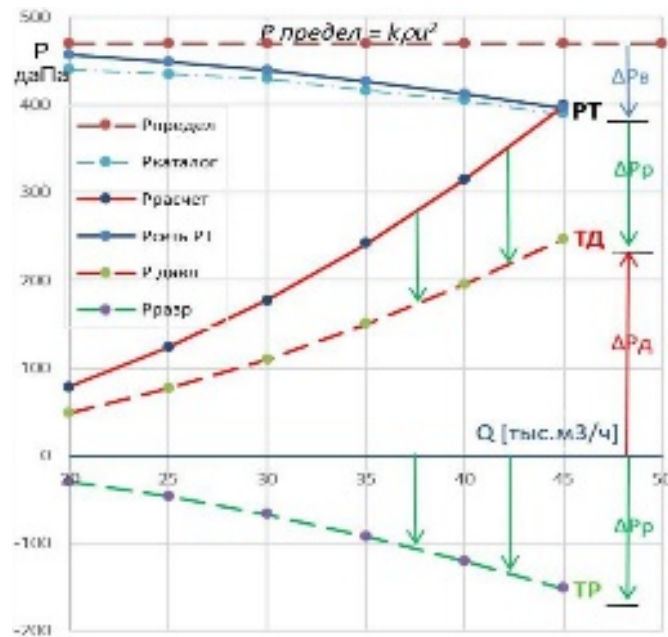


Рисунок 6 – Пьезо модель АС з вентилятором ВДн-15

Головною перевагою пьезомодели є можливість аналізувати збіг розрахункових параметрів з реальними свідченнями приладів в період експлуатації і коректного представлення результатів вдосконалення проточних частин з метою зниження втрат тиску в мережі $\Sigma \Delta P_{сет}$ як допоміжного устаткування і його окремих елементів, так і нагнітача. Порівняння показників розрахунково - графічної «Р-моделі» АС з параметрами «Н-моделі» показало порівнянність моделей. Графічне представлення Р-моделі показує, що розрахунковим шляхом розраховується поле потенціалів у вигляді показників в характерних перетинах системи.

Для реалізації Р-моделі пропонується основним завданням проектування АС вважати розрахунок потенціалів в перетинах, де встановлюються вимірювальні прилади. Тобто, характеристику мережі пропонується розділити на кілька частин. Для представленого прикладу будемо розраховувати і будувати дві ділянки: зона розрядження і зона тиску.

Пьезохарактеристика ділянки розрядження $P_P = f(Q)$ від початку систем (точка 0) до місця установки вакуумметра (точка 1) складається з двох складових. Розраховуються втрати тиску $\Sigma \Delta P_{0-1}$ на участку 0 – 1. Для перетину установки вакуумметра необхідно розрахувати динамічну компоненту за формулою.

$$P_P = P_1 = \Sigma \Delta P_{0-1} + \kappa V^2 = f(Q) \quad (4)$$

Тобто, на ділянці 0 - 1 потенціал системи витрачається на подолання опорів проточних частин в процесі руху газів і формування динамічної складової. Пьезохарактеристика ділянки тиску $P_m = f(Q)$ будується на основі розрахунку тільки втрат тиску $\Sigma \Delta P_{2-3}$ на ділянці від місця установки манометра (точка 2) до кінця системи (точка 3).

У нагнітачах генерується потенціал, граничне значення якого $P_{\text{сист}}^{\text{пред}}$ можна розрахувати по діаметру робочого колеса D_2 і його швидкості обертання n .

$$P_{\text{сист}}^{\text{пред}} = k u_{D_2}^2 = k (D_2 n)^2 \quad (5)$$

«Р-модель» має представляти аеросистеми структурно і параметрически від початку (точка 0) до точки споживання (точка 3). Потенціал витрачається на подолання опорів проточних частин в процесі руху рідин і газів. Заводам виробникам доцільно представляти параметри роботи нагнітачів не тільки енергетичними характеристиками тиску, потужності, ККД і ін, але в першу чергу давати величини опорів проточної частини нагнітачів, розрахованих за величиною динамічної складової в перерізі установки вакуумметра, для розрахунку пьезо характеристики ділянки нагнітача.

В період експлуатації Р-модель дозволяє коригувати пьезо параметри на всіх ділянках системи, уточнення опору для перерахунку параметрів роботи нагнітачів і АС в цілому в процесі експлуатації. Математична модель розрахунку

параметрів АС з урахуванням функції формування першопричини - граничного потенціалу в нагнітачі і функції формування динамічних процесів для виділених 3-х ділянок, представлена системою рівнянь.

$$Q \in PT \begin{cases} P_{\text{вент}} = P_{\text{гран}} - R_{\text{вент}} Q^2 \\ TT \rightarrow \Delta p_T = R_T Q^2 \\ TP \rightarrow \Delta p_P = R_P Q^2 \end{cases} \quad (6)$$

У математичної «Р-моделі» параметрів АС вперше розраховуються три пьезо характеристики для трьох ділянок. Однак, для можливості визначення подачі Q в системі доцільно зберегти методику розрахунку робочої точки РТ. Для побудови робочої точки Пьезо характеристика зони розрядження $P_P = f(Q)$, яка побудована в зоні розрядження, дублюється в зоні позитивних тисків (по абсолютній величині $|P_P|$) вище характеристики ділянки тиску $P_T = f(Q)$.

У п'ятому розділі показаний приклад виконання реконструкції котла ТП-50 Криворізької ТЕС, яка забезпечила вирішення задачі зняття обмежень потужності по тязі енергоблоку 300МВт за рахунок коригування аеродинаміки вхідних ділянок електрофільтрів. Використання Р-моделі дозволило системно обґрунтувати збільшення продуктивності димососа ДО-31,5 на 14% з одночасним зниженням витрат енергії на привід на 9%. Однак, результати реконструкції показали, що отримані результати привели до зниження ККД димососа. Протиріччя зниження ККД димососа вирішено завдяки використанню коефіцієнта «системного аналізу ефективності» АС.

$$\text{До реконструкції} \quad Ef_{\text{сист.1}} = \eta_{\text{нагн.1}} \cdot \varphi_{\text{дин.1}} = 0,8 \cdot 0,2 = 0,16$$

$$\text{Після реконструкції} \quad Ef_{\text{сист.2}} = \eta_{\text{нагн.2}} \cdot \varphi_{\text{дин.2}} = 0,78 \cdot 0,24 = 0,19$$

На прикладі зміни параметрів роботи тягового тракту енергоблоку 300 МВт після вдосконалення проточних частин вхідної ділянки електрофільтру показана кореляція позитивних результатів реконструкції з результатами системного аналізу зміни ефективності АС.

Ключові слова: обмеження потужності котлів, моделі аеросистем, вентилятор, димосос, опір, втрати тиску, ефективність.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Arsiri V Reconstruction of turbomachines on the basis of the flow structure visual diagnostics. Arsiri Vasyly, Kravchenko Oleg. Mechanics and Mechanical Engineering, Volume 22, Issue 2, Pages 405–414, eISSN 2354-0192, DOI: <https://doi.org/10.2478/mme-2018-0032>

Стаття опублікована у періодичному виданні, яке включене до міжнародних наукометричних баз Scopus

2. Арсірій, В. А., Бутенко, А. Г., & Кравченко, О. В. (2019). Аналіз розподілу параметрів і ефективності енергетичних процесів в гідравлічних і аеродинамічних системах. *Refrigeration Engineering and Technology*, 55(3), 177-186. <https://doi.org/10.15673/ret.v55i3.1576>

Стаття опублікована у фаховому періодичному виданні

3. Арсирій Василь, Карамушко Анжелика, Кравченко Олег Повышение эффективности энергетического оборудования – важное условие устойчивого развития *Устойчивое развитие: Международный журнал*. (Варна, Болгария) – 2018. - №1-2018. – С. 41-46. Періодичний журнал Технічного університету м. Варна, Болгарія. <https://maurorg77.wixsite.com/maur-org/arhiv-1>

4. Василий Арсирій, Олег Кравченко Юлия Сербова, Петр Рябоконт, Александр Крошка Пьезо модель расчета и представления энергетических характеристик аэродинамических систем. *Устойчивое развитие: Международный журнал*. (Варна, Болгария) – 2020. - №2-2020. – С. 52-59. Періодичний журнал Технічного університету м. Варна, Болгарія. <https://maurorg77.wixsite.com/maur-org/arhiv-1>

Статті опубліковані у міжнародному періодичному виданні

Наукові праці апробаційного характеру

5. Арсирій В.А., Карамушко А.В., Кравченко В.О. Улучшение экологических показателей энергетических систем с использованием визуализации потоков. Проблемы экологии и эксплуатации объектов энергетики: сборник трудов XXVIII международной конференции, (Одеса, 11–13 червня 2018 р.). К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2018. С. 151–155.

6. Арсирій В.А., Карамушко А.В. Кравченко О.В. Использование методов визуализации потоков для решения задач повышения экологической безопасности // Матеріали науково-технічної конференції «Проблеми екологічної безпеки» Кременчук, 2019. с 216 - 219.

ABSTRACT

Kravchenko Oleg. Improving the productivity of draft-blowing ducts of boilers based on the improvement of the models of the aerosystems. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the PhD degree in specialty 144 – Heat power engineering. – Odessa National Polytechnic University of Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2020.

The *introduction* substantiates the urgency of solving the problem of developing models of aerosystems, methods of calculation and construction of energy characteristics of the system and its elements, which contribute to the correct display of the parameters of the aerodynamic systems with a clear delineation of supercharger parameters and individual sections of the network (parameters of any others elements of the system).

The thermal capacity of most boilers (KVGM, PTVM, TP, etc.) during operation is significantly less than was calculated or specified when marking the passport values. This problem is called "power limitations" and is associated with insufficient performance of the hydraulic systems (HS) and especially the aerosystems (AS) - draft or traction ducts of boilers. Proof of the mass nature of power limitations are the data of the regime maps of boilers, where on the basis of tests the real parameters of operation of the boilers and their separate systems are specified. More than 30 years ago, ORGRES methodological recommendations were developed to substantiate the lower load of the energy facilities. The problem of power capacity limitations also exists in the United States, where the US Department of Energy's recommendations "Improving Fan System Performance: a sourcebook for industry" or "Improving the

performance of fan systems" have been developed, in which the problem of this effect is solved by replacing fans or smoke extractors.

Thus, in the introduction substantiates the urgency of the problem of inconsistency between the actual performance of the draft ducts of the boilers with the design data, which indicates the advisability of revising the models for representing the parameters and the characteristics of aerosystems and, accordingly, the methods for calculating them at the design stage, as well as during the operation period.

In *the first section* of the thesis, the analysis of the models for representing the operating parameters of the dynamic systems and the methods of improvement and optimization at the design stage of the draft-blowing ducts is carried out and also efficiency indicators of dynamic systems as a whole and its elements at the design stage, as well as during operation.

In the energy catalogs and reference books, hydraulic systems are called "pumping units", and aerosystems are called "fan units". These indicates that pumps, fans, smoke exhausters, compressors (hereinafter blowers) are singled out in the hydro and aero systems as the main (major) element of the system. The allocation of blowers in dynamic systems as the main element and the assignment of technological equipment to auxiliary equipment can be considered one of their methodological simplifications, leading to a discrepancy between real energy objects and design models.

The main model for representing the parameters of aerospace systems today is the energy characteristics of superchargers. The characteristics of fans and smoke exhausters are obtained as a result of experimental tests at the manufacturer's stands, which are published in various forms in the catalogs and are a parametric passport of the blowers. The main energy parameters are the pressure characteristics of the blower: for pumps $H_{fan} = f(Q)$; for fans or smoke exhausters $P_{V.fan} = f(Q)$.

At the design stage of the aerosystems, an additional characteristic of the pressure losses of the network of technological equipment is developed, which is considered auxiliary. Using the resistances of the equipment from the hydraulic manuals, the pressure loss ΔP is calculated in auxiliary equipment, but represented as

a pressure characteristic of the network $H_{net} = f(Q)$ in the field of graph representation of the pressure characteristics of the blower from the catalogs of its manufacturer. The intersection of the design characteristic of the network and the pressure characteristic of the supercharger from the catalog gives the operating point, which is the basis for determining the flow of the supercharger, as well as the energy consumption for its drive, efficiency of the supercharger, but not the system as a whole. The optimization of the operating parameters of the nuclear power plant is performed only by the value of the maximum values of the efficiency of the supercharger, and not the system itself, which leads to paradoxical contradictions in solving the problems of energy saving in the draft-blowing ducts. Reconstruction of the AS in order to increase the productivity (supply) of the blowers by reducing the pressure losses in the network with a simultaneous decrease in the specific energy consumption leads to a decrease in the efficiency of the blower. The positive result of the reconstruction contradicts the optimization criterion due to a decrease in the efficiency of the supercharger.

Thus, in the first section, a number of the AS design contradictions are highlighted: the energy characteristics of the superchargers are obtained as a result of the tests, they have a complex model for representing the parameters and during the operation period difficult to revise or optimize them. Data of the hydraulic resistances of equipment from reference books are taken in the design as inevitable. On the basis of the revealed contradictions, the goal and objectives of the research were formulated.

In the second section, the analysis of the reasons for the limitations of the power of the boilers by blowing or draft is carried out, the reliability of the existing methods for representing the parameters of hydro and aero systems based on the use of the "full pressure" indicator is carried out, proposals for improving the model of representing processes in the AS are developed.

For given sections of the aerosystem, the total head is calculated as the sum of the three components of the energy parameters of liquids or gases in the form of the Bernoulli equation. To represent the blowers, the indicator is used - the total head of the blowers H_{fan} as the difference of the total heads in the section where the pressure gauge is installed - H_2 and the place where the vacuum gauge is installed - H_1 . To

analyze the parametric model, a graph-analytical H-model has been developed for representing the indicator of the total pressure of the superchargers (the first point of scientific novelty), which is schematically shown in Fig. 1.

The H-model revealed the following contradictions. Complicated methodology for representing system parameters based on the calculation of the "full head" parameter. The H-model showed that when calculating the three components of the total head in the vacuum zone P_{V1} , the dynamic component $h_{dyn} = kV_1^2$ is used twice, since when using the vacuum indicator, the P_v is already in the reading of the vacuum gauge. This made it possible to substantiate the transition from the parameter full pressure of the supercharger to the piezo indicator of the AS as the difference between the readings of the pressure gauge and the vacuum gauge.

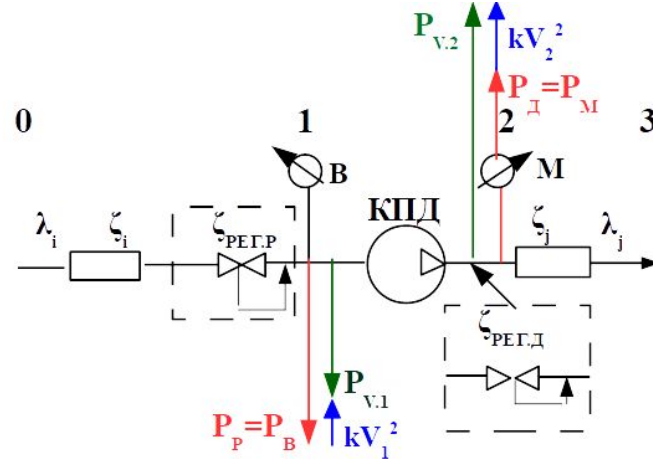


Figure 1 – H-model of a supercharger based on the total head indicator.

The H-model revealed the following contradictions. Complicated methodology for representing system parameters based on the calculation of the "full head" parameter. The H-model showed that when calculating the three components of the total head in the vacuum zone P_{V1} , the dynamic component $h_{dyn} = kV_1^2$ is used twice, since when using the vacuum indicator, the P_v is already in the reading of the vacuum gauge. This made it possible to substantiate the transition from the parameter full pressure of the supercharger to the piezo indicator of the AS as the difference between the readings of the pressure gauge and the vacuum gauge.

$$P_{fan} = P_p - P_v = P_2 - (-P_1) \quad (1)$$

Analysis of the H-model of the representation of the parameters of the AS showed the special role of the indicators of the manometer and vacuum gauge. Thus, the representation of energy in the aerosystem is conventionally divided into two components: indicators of piezodevices - manometers and vacuum gauges and the dynamic component of energy, which characterizes the processes of action or dynamics.

In the third section, the concept of energy representation was further developed, for which two components of energy representation are used: potential - P , which is the "root cause" of energy manifestations; and dynamics - D .

The product of two components reflects the model for calculating the power $N = P \cdot D$. The unifying factor for representing and comparing different types of energy is the universal unit for measuring power - Watt.

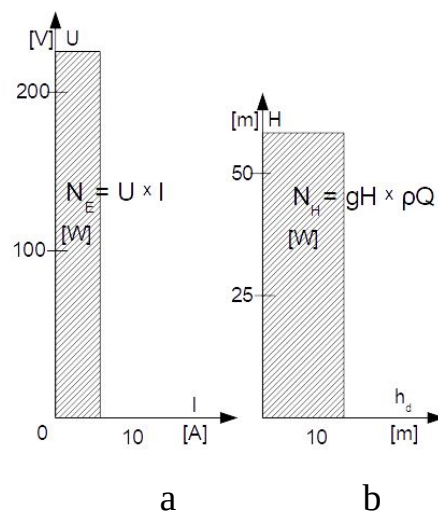


Figure 2 – Power calculation model: a - electrical power; b - hydraulic power.

The universal unit of measurement of power - Watt for different types of energy allows you to calculate the efficiency - "efficiency of transformation" η_{charg} or conversion of different types of energy. So unification of power units of different types of energy made it possible to formulate an indicator of the efficiency of the operation of blowers in relative form $0 < \eta_{charg} < 1$ as an indicator of the ratio of power: air power N_{aero} to electric N_{el} . Due to the efficiency index of the blowers in relative form, the design of the HS and AS is performed with optimization only for the maximum value of the blower efficiency.

There are methods for calculating the ratios of dynamics and potential using the proportionality coefficient - resistance R . It is possible to propose a method for calculating the "efficiency of dynamic processes" φ_{dyn} as ratios of the dynamics of D and the potential P , provided that the units of measurement of both components are unified. In HS, a pump with a potential H [m] forms a dynamic component h_{dyn} [mm]. In the AS, the full head of the blowers $P_V \rightarrow [\text{dePa}] = [\text{MM}]$ forms the dynamic component h_{dyn} [mm].

The unification of the units of measurement of the components of potential and dynamics will make it possible to formulate the task of developing an indicator of the effectiveness of dynamic processes φ_{dyn} in relative form $0 < \varphi_{dyn} < 1$ (the second point of scientific novelty).

$$\varphi_{dyn} = D / P = h_{dyn} / H = 1 / (1 + R) \quad (2)$$

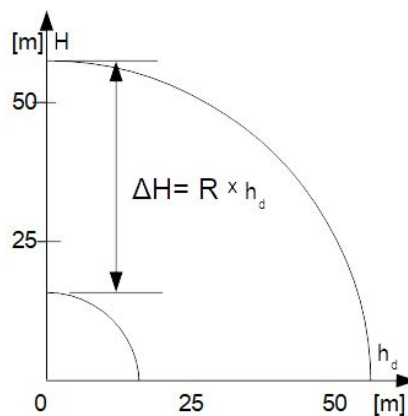


Figure 3 – Model of the efficiency of dynamic processes.

Sharing coefficients of "transformation efficiency" η_{charg} different types of energy in the supercharger and "efficiency of dynamic processes" φ_{dyn} in the aerospace system will allow calculating the "system efficiency" of draft tracts Ef_{syst} (third point of scientific novelty).

$$Ef_{syst} = \eta_{charg} \cdot \varphi_{dyn} \quad (3)$$

The development of an indicator of the efficiency of dynamic processes φ_{dyn} can correctly characterize measures to reduce resistance in dynamic systems, which will increase the performance of systems while reducing energy costs. Such measures can be an alternative to the existing concept of replacing equipment with more powerful ones.

Table 1. Model for the development of systemic efficiency

Energy $E \Rightarrow$ Work A [J] $\Rightarrow$ Power $N = A / t$ [W]		
Energy transformation		Dynamic processes
Power $N = P \cdot D$ [W]		$D \equiv P$
<i>Electric energy</i>		
$N_{el} = U \cdot I$ [W]		$I = U / R = \varphi_{el} U$ $\varphi_{el} = 1 / R = I / U$
<i>Hydraulic energy</i>		
$N_{hydro} = Hg \cdot \rho Q$ [W]		$QV \equiv \varphi_{hydro} 2gHS = 2gHS / (1 + R)$
$\eta_{tr} = N_{hydro} / N_{el} = 0,85$		$\varphi_{hydro} = 1 / (1 + R) = QV / 2gHS = 0,2$
<i>Calculations of system efficiency of AS processes</i>		
$\eta_{syst} = \eta_{tr} \cdot \varphi_{hydro} = 0,85 \cdot 0,2 = 0,17$		

In the fourth section, an analysis of the differences between processes in aerospace systems and hydraulic systems is carried out. Based on the features, a piezo model of the aerosystem has been developed, which is constructed by calculation for three or more sections of the system.

Historically, models for representing processes in aero systems have evolved by analogy with previously developed models of the hydraulic systems. However, an important feature of the HS is that the equipment is located in the pressure zone, and the vacuum zone, due to the danger of the cavitation, has a minimum amount of equipment.

There is no cavitation problem in the AS, so the equipment can be located both in the pressure and vacuum zones. In addition to systems with fans, where the pressure zone is developed, systems with smoke exhausters are widely used, in which the equipment is located in the vacuum zone. Figure 4 shows the energy characteristics of the Dn-26 smoke exhauster.

The analysis showed that the Dn smoke exhauster is used at a temperature 200°C. However, it can be used as a fan at temperatures 20°C. An analysis was performed that showed the difference in the recommended work area when using different performance indicators. So the optimal area of work when using the efficiency indicator is the range of operating points $OP_1 - OP_2 - OP_3$.

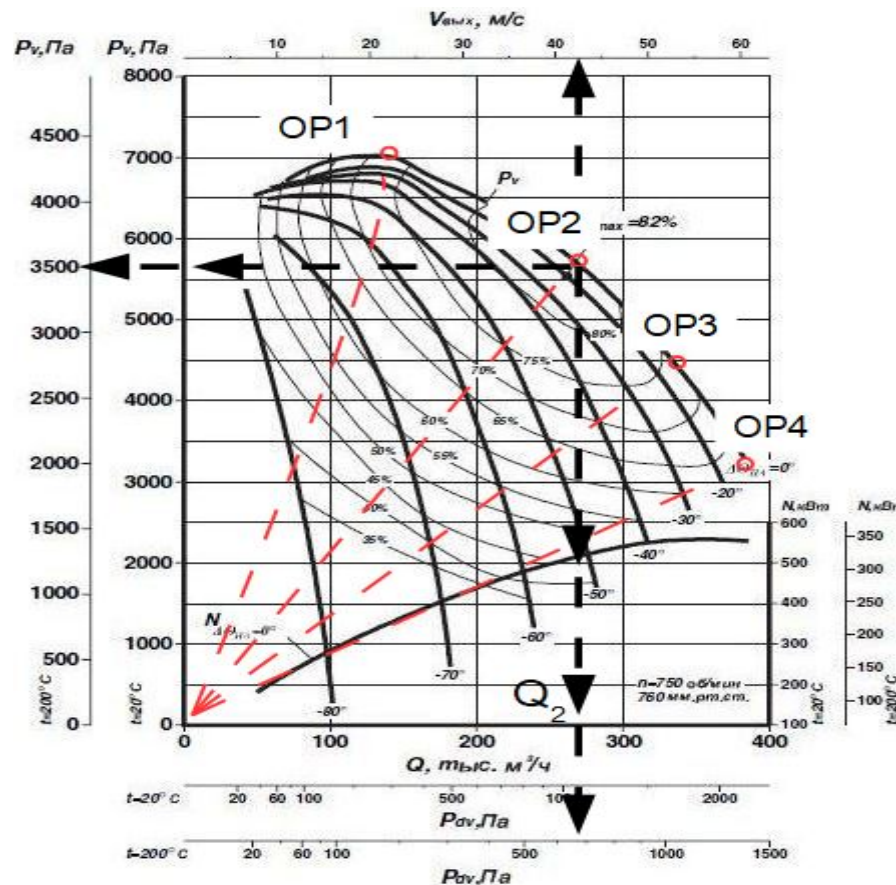


Figure 4 – Energy characteristics of the DN-26 smoke exhauster.

Using the coefficient of unit energy consumption $k_N = N / Q$ shows that the zone to the right of the point of maximum efficiency of the supercharger (increase in flow) is more preferable: k_{N4} has the best indicators of the ratio of energy consumption N_{el} to the supply Q of the supercharger.

Table 2 – Analysis of performance indicators of the blower Dn-26

	Designation	OP ₁	OP ₂	OP ₃	OP ₄
Q	th.m ³ /h	145	255	335	380
N	kWt	170	315	345	343
η_{fan}	—	0,74	0,82	0,74	0,64
k_N	kWt /M ³	1,22	1,24	1,04	0,9

The developed graphical H-model (Figure 1) with the presentation of the parameters in the form of a computational complex, the full pressure is today used both for hydraulic systems and for aero systems. To determine the real performance of the system, the concept of constructing the operating point of the OP is used due to the intersection of two characteristics: the pressure characteristic of the blower from the

catalog and the calculated characteristic of the network, built on the basis of calculating the pressure losses. The massive nature of the restrictions on the power of boilers by blowing or draft indicates that the H-model does not provide the main design task - the determination of the given flow - the performance of aero systems during operation.

The revealed differences in the operation of the AS made it possible to form the concept of a new model for representing the parameters of the operation of aero systems. First, it is necessary to make a transition from the complex parameter "full head" to indicators, the calculation of which should reflect and coincide as much as possible with the indications of piezo devices. For example, let us choose the calculation of gauge readings in two typical sections: readings of P_1 vacuum gauge in the vacuum zone and P_2 manometer in the pressure zone. For the comparability of the calculated parameters in the system with the readings of the guages, a computational - graphic "P-model" of the representation of the parameters of the AS has been developed (Figure 5) (fourth point of scientific novelty).

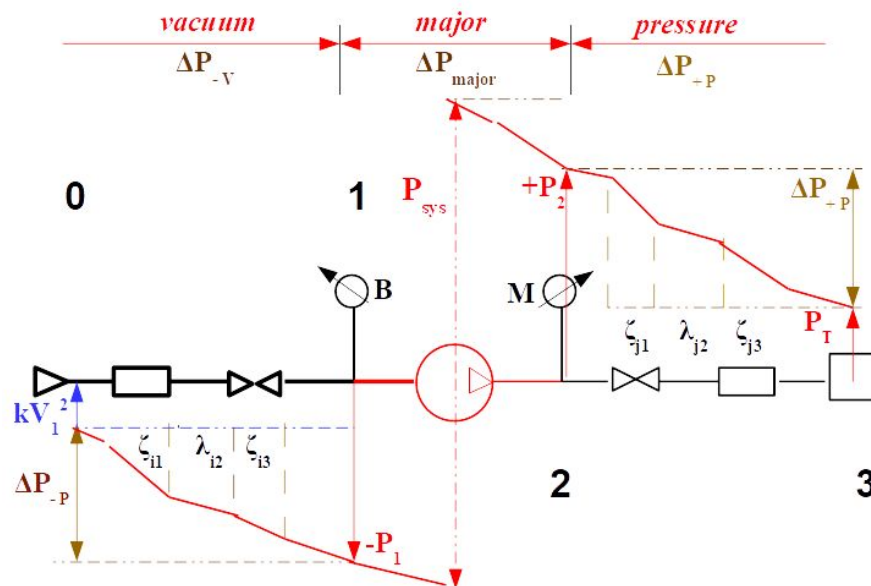


Figure 5 – P-model - piezo-model of AS parameters

The dynamic component of energy is a constituent part of the vacuum gauge reading. Therefore, it may not be shown in the piezo graphic model. If necessary, the dynamic energy component can be shown in the graphical model only in the vacuum zone, where this component is formed and is present in the vacuum gauge reading. This will not change the piezo vacuum curve in any way.

The paper developed a method for calculating piezo parameters for use in the "P-model" with predicting the measured readings of piezo parameters - manometers and vacuum gauges. In this case, the piezo model is functionally (by the nature of the tasks) and parametrically (vacuum zone and pressure zone) divided into three sections: 0 - 1 - section of vacuum; 1 - 2 - section of the supercharger; 2 - 3 - pressure section. The main advantage of the piezo model is the ability to analyze the coincidence of the calculated parameters with the real readings of the devices during the operation period and the correct presentation of the results of improving the flow paths in order to reduce pressure losses in the network. $\Sigma \Delta P_{net}$ both auxiliary equipment and its individual elements, and a blower. The results of calculating the piezo model of the aero system are shown in Figure 6.

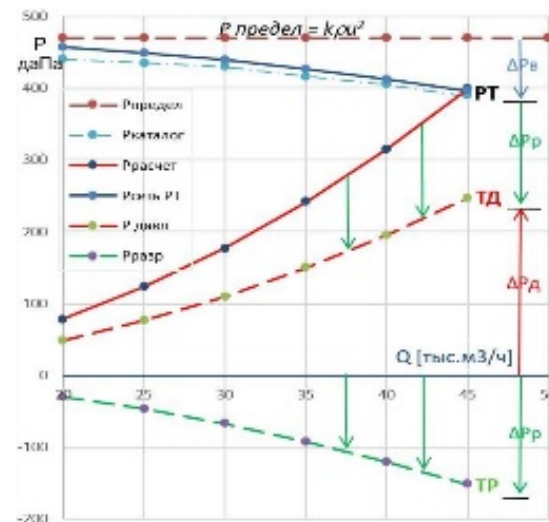


Figure 6 – Piezo model of the aero system with the Vdn-15 fan

Comparison of the indicators of the computational - graphic "P-model" of the AS with the parameters of the "H-model" showed the comparability of the models. The graphical representation of the P-model shows that the potential field is calculated by calculation in the form of indicators in the characteristic sections of the system.

For the implementation of the P-model, it is proposed that the main task of designing an AU is to consider the calculation of potentials in the sections where the measuring devices are installed. That is, it is proposed to divide the network characteristics into several parts. For the presented example, we will calculate and build two sections: a vacuum zone and a pressure zone.

Piezo characteristic of the vacuum section $P_v = f(Q)$ from the beginning of the systems (point 0) to the place where the vacuum gauge is installed (point 1) consists of two components. Pressure losses are calculated $\Sigma \Delta P_{0-1}$ in the section 0 - 1. For the section of the vacuum gauge installation, it is necessary to calculate the dynamic component by the formula.

$$P_v = P_1 = \Sigma \Delta P_{0-1} + \kappa V^2 = f(Q) \quad (4)$$

That is, in section 0 - 1, the potential of the system is spent on overcoming the resistances of the flow paths in the process of gas movement and the formation of a dynamic component. The piezo characteristic of the pressure section $P_p = f(Q)$ is constructed on the basis of calculating only the pressure losses $\Sigma \Delta P_{2-3}$ in the section from the place of installation of the pressure gauge (point 2) to the end of the system (point 3). A potential is generated in the blowers, the limiting value of which P_{sys}^{lim} can be calculated from the diameter of the impeller D_2 and its rotation speed n .

$$P_{sys}^{lim} = k u_{D_2}^2 = k (D_2 n)^2 \quad (5)$$

The "P-model" should represent the aero system structurally and parametrically from the origin (point 0) to the point of consumption (point 3). The potential is spent on overcoming the resistances of the flow paths during the movement of liquids and gases. It is advisable for manufacturers to present the parameters of the operation of the blowers not only by the energy characteristics of pressure, power, efficiency, etc., but first of all to give the values of the resistances of the flow path of the blowers, calculated by the value of the dynamic component in the section of the vacuum gauge installation, to calculate the piezo characteristics of the blower section.

During the operation period, the P-model allows you to correct the piezo parameters in all sections of the system, to refine the resistance to recalculate the operating parameters of the blowers and the AU as a whole during operation. The mathematical model for calculating the parameters of the AS taking into account the function of forming the root cause - the limit potential in the supercharger and the

function of forming dynamic processes in the selected 3 sections, is represented by a system of equations:

$$Q \in BEP \begin{cases} P_{fan} = P_{sys}^{lim} - R_{fan}Q^2 \\ PP \rightarrow \Delta p_p = R_p Q^2 \\ DP \rightarrow \Delta p_d = R_d Q^2 \end{cases} \quad (6)$$

In the mathematical "P-model" of the AC parameters, three piezo characteristics for three sections are calculated for the first time. However, in order to be able to determine the flow rate Q in the system, it is advisable to keep the methodology for calculating the operating point OP. To build a working point, the piezo characteristic of the vacuum zone $P_{fan} = f(Q)$, which is built in the vacuum zone, is duplicated in the zone of positive pressures (in absolute value) above the characteristic of the pressure section $P_p = f(Q)$. The fifth section shows an example of the reconstruction of the TP-50 boiler of the Kryviy Rig thermoelectric power station, which ensured the solution of the problem of removing the power constraints in terms of thrust of a 300 MW power unit by adjusting the aerodynamics of the inlet sections of the electrostatic precipitators. The use of the P-model made it possible to systematically substantiate the increase in the productivity of the DO-31.5 smoke exhauster by 14 % while reducing drive energy costs by 9%. However, the results of the reconstruction showed that the results obtained led to a decrease in the efficiency of the exhauster. The contradiction in reducing the efficiency of the smoke exhauster was resolved through the use of the coefficient of "system analysis of efficiency" of aerospace systems.

Before reconstruction $Ef_{net.1} = \eta_{charg.1} \cdot \varphi_{dyn.1} = 0,8 \cdot 0,2 = 0,16$

After reconstruction $Ef_{syst.2} = \eta_{charg.2} \cdot \varphi_{dyn.2} = 0,78 \cdot 0,24 = 0,19$

Using the example of the change in the operating parameters of the traction path of a 300 MW power unit after the improvement of the flow paths of the inlet section of the electrostatic precipitator, the correlation of the positive results of the reconstruction with the results of the system analysis of the change in the efficiency of the aero system is shown.

Keywords: boiler capacity limitations; models of aero systems, fan, smoke exhauster, resistance; pressure loss, efficiency.

LIST OF THE APPLICANT'S PUBLICATIONS

1. Arsiri V Reconstruction of turbomachines on the basis of the flow structure visual diagnostics. Arsiri Vasyly, Kravchenko Oleg. Mechanics and Mechanical Engineering, Volume 22, Issue 2, Pages 405–414, ISSN 2354-0192, DOI: <https://doi.org/10.2478/mme-2018-0032>

The article is published in the periodical, which is included in the international scientometric databases Scopus

2. Arsiriy V.A., Butenko A.G., & Kravchenko O.V. (2019). Analysis of the distribution of parameters and efficiency of the energy processes in the hydraulic and aerodynamic systems. *Refrigeration Engineering and Technology*, 55(3), 177-186. <https://doi.org/10.15673/ret.v55i3.1576>

The article was published in a professional periodical.

3. Arsiriy Vasily, Karamushko Angelica, Kravchenko Oleg. Improving the efficiency of the energy equipment is an important condition for sustainable development. *Sustainable Development: International Journal*. (Varna, Bulgaria) – 2018. - №1-2018. – Pages. 41-46. Periodical Journal of the Technical University of Varna, Bulgaria. <https://maurorg77.wixsite.com/maur-org/arhiv-1>

4. Vasily Arsiriy, Oleg Kravchenko, Yulia Serbova, Petr Ryabokon, Alexander Kroshka. Piezo model for calculating and representing the energy characteristics of the aerodynamic systems. *Sustainable Development: International Journal*. (Varna, Bulgaria) – 2020. - №2-2020. – Pages. 52-59. Periodical Journal of the Technical University of Varna, Bulgaria. <https://maurorg77.wixsite.com/maur-org/arhiv-1>

The articles were published in the international periodicals Scientific works of the approbation character.

5. Arsiriy V.A., Karamushko A.V., Kravchenko O.V. Improving the environmental performance of energy systems using the flow visualization. Problems of ecology and operation of energy facilities: the publication of works XXVIII international conference, (Odessa, June 11-13, 2018). K.: Engineering and Production Center Alkon, 2018. Pages. 151–155.

6. Arsiriy V.A., Karamushko A.V., KravchenkoThe O.V. The use of flow visualization methods for solving problems of improving environmental safety. // Materials of the Science and Technology Conference "Problems of Environmental Safety" Kremenichuk, 2019. Pages 216 - 219.