

# ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.928

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/28>**Риндюк Д.В.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Степанченко А.А.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВІТРЯНОГО ЦИКЛОНА ДЛЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

В умовах складної економічної та політичної ситуації, що має місце в Україні, для невеликих приватних домогосподарств і мешканців сільської місцевості актуальним є використання альтернативних технологій отримання теплової та електричної енергії. Доцільним і недорогим варіантом може стати технологія газифікації біопалива. Її використання є обґрунтованим з точки зору використання в системах енергопостачання малої потужності. Для отримання електроенергії на основі генераторного газу необхідне його якісне очищення перед використанням в двигунах внутрішнього згоряння генераторів. Найбільш простим способом очистки генераторного газу від механічних домішок є застосування сухих методів очистки, в першу чергу циклонів. Проте при конструюванні газогенераторних установок малої потужності (до 40 м<sup>3</sup>/год газу) виникають значні проблеми з вибором конструкції та типорозмірів циклонів. Ефективність очистки генераторного газу циклонами, конструктивно-технологічні параметри яких обрано за класичних методів розрахунку, має низьку результативність.

Зважаючи на відсутність достовірної методики для розрахунку геометричних розмірів циклонів малої потужності, створено математичну модель процесу фільтрації генераторного газу в інерційному циклоні. Обрано перелік основних геометричних параметрів циклону. Використовуючи метод випадкового балансу, проведено відсіюючі експерименти з метою визначенні величини впливу конкретних параметрів на ефективність очистки генераторного газу від механічних домішок. Виділено геометричні параметри, що здійснюють основний вплив. Проведено комплекс основних числових експериментів спрямованих на визначення оптимальних геометричних співвідношень основних розмірів циклону. Як цільову функцію задачі оптимізації обрано якість очищення  $\eta$ , % генераторного газу від механічних домішок. Отримано залежність впливу основних геометричних параметрів циклона на якість очистки генераторного газу від механічних домішок. Визначено оптимальний розподіл основних геометричних параметрів для циклона малої продуктивності.

**Ключові слова:** генераторний газ, механічні домішки, циклон, математичне моделювання, оптимізація.

**Постановка проблеми.** Процес термохімічної конверсії біомаси з метою отримання газоподібного палива досить відомий та неодноразово досліджений. Проте дані технології не набули широкого розповсюдження в світі. Але в сучасних умовах технології газифікації стрімко розвиваються та їхнє застосування стає все більш обґрунтованим.

Особливої актуальності вони набувають в складній економічній та політичній ситуації, що

має місце в Україні. Повномасштабна військова агресія росії внесла значні корективи в розуміння проблеми забезпечення цивільного населення мінімально достатніми умовами проживання [1, с. 12].

Через значне зростання цін на традиційні паливні енергоресурси, постійні ракетні обстріли енергетичних об'єктів, що призводять до нестабільності забезпечення громадян теплом та електричною енергією на перше місце

виступають альтернативні шляхи подолання цієї проблеми [2, с. 2].

Використання електрогенераторів, що працюють на традиційному паливі (бензині, газі, дизелі) є досить дорогим через значне зростання ціни внаслідок проблем з імпортом [3, с. 1].

Для невеликих приватних господарств та населення сільської місцевості доцільно використовувати альтернативні джерела отримання енергії такі, як біопаливо (деревина, паливні брикети, торф, паливні гранули).

Технологія газогенерації на основі термохімічної конверсії біомаси є досить ефективною для отримання газоподібного палива (синтез-газ), що може бути використано в класичних електрогенераторах [4, с. 17]. Проте для отримання електроенергії на основі генераторного газу необхідне його якісне очищення перед використанням в двигунах внутрішнього згоряння генераторів. Найбільш простим способом очистки генераторного газу від механічних домішок є застосування сухих методів очистки, в першу чергу циклонів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема очистки газів та повітря від механічних домішок гостро стоїть перед багатьма галузями народного господарства.

Так у праці [5, с. 152] авторами представлено результати дослідження ефективності процесу очищення повітряного потоку від деревного пилу та вивчено вплив конструктивних параметрів циклона на процес очищення запиленого потоку повітря. Розглянуто циклон середньої продуктивності з основним діаметром 600 мм та зроблено висновок про доцільність збільшення циліндричної частини циклона.

Робота [6, с. 101] присвячена дослідженню впливу геометричних розмірів циліндричної частини циклона та глибини занурення вихлопної труби на основні експлуатаційні характеристики апарата на основі теоретичних та експериментальних досліджень. Авторами порівняно отримані результати з відомими теоріями пиловловлення. Відмічено, що класичні теорії не враховують у повній мірі геометрію циклона, а розглядають рух частинки пилу тільки в циліндричній частині циклона. Зроблено висновок, що збільшення величини занурення вихлопної труби призводить до підвищення гідравлічного опору циклона.

Збільшенню ефективності роботи центробіжних пиловловників на гірничому виробництві присвячена робота [7, с. 91]. Авторами проведено математичне моделювання процесу пиловловлення та наведено розподіли швидкостей та

густини потоку в вхідній частині циклону, що дозволяють підбирати на стадії проектування раціональні параметри циклонних апаратів.

Варто відмітити, що використання математичного моделювання при дослідженні руху потоків рідини або газу є досить зручним та надійним способом аналізу процесів, що відбуваються в енергетичному обладнанні. Так в роботі [8, с. 193] висвітлено підхід до моделювання поведінки вологого пара в паропроводі енергоблоку з урахуванням крапель рідкої фази, елементи наведеної методики доцільно використати й для моделювання поведінки газу в циклоні.

Для отримання електроенергії в досліджуваній установці використовується двигун внутрішнього згоряння в поєднанні з генератором. Паливом для ДВЗ є генераторний газ, що на виході з газогенератора має досить значну температуру 400–700 °С (в залежності від типу сировини) та високий вміст механічних домішок (до 100 г/м<sup>3</sup>) таких, як пил, зола та сажа. Також значну проблему викликає забруднення генераторного газу смолами [9, с. 72].

Найбільш простим та часто вживаним для очистки генераторного газу від механічних домішок є застосування двоступеневих систем, що складаються з фільтра грубої (попередньої) очистки та тонкої (остаточної) очистки. Для попередньої очистки в більшості випадків використовуються сухі методи очистки, в першу чергу циклони. Це пояснюється тим, що інерційний (з використанням відцентрової сили) принцип є досить простим та ефективним способом уловлення твердих механічних домішок з високим ступенем очищення газу, невисоким аеродинамічним опором системи, простотою конструкції та невисокою вартістю обладнання.

Циклонні пиловловлювачі складають найбільш масову групу серед усіх видів пиловловлюючої апаратури та застосовуються у всіх галузях промисловості.

Проте, при експлуатації газогенераторних установок малої потужності (до 40 м<sup>3</sup>/год газу) виникають значні проблеми саме з вибором конструкції та типорозмірів циклонних фільтрів. Класичні методи розрахунку та підбору циклонів [10, с. 527; 11, с. 130] призначені та дають адекватні результати тільки для пристроїв середньої та великої продуктивності.

Не зважаючи на важливість очищення генераторного газу від механічних домішок, дослідженням спрямованих на раціоналізацію конструкцій циклонних систем для газогенераторів малої про-

дуктивності, що забезпечують роботу ДВЗ присвячено недостатньо уваги.

**Постановка завдання.** Метою статті є проведення таких досліджень, а саме вивчення особливостей системи інерційного очищення генераторного газу отриманого з біопалива та оптимізація конструктивних параметрів обладнання з метою розробки циклона раціональної конструкції для газогенераторів малої потужності.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянуто класичний циклон основними елементами якого є корпус, вихідна труба та бункер. Генераторний газ надходить у верхню частину корпусу, через вхідний патрубок, приварений до корпусу тангенційно. Уловлювання механічних домішок (пилу, золи та сажі) відбувається під дією відцентрової сили, що виникає при обертвовому русі газу між корпусом і вихідною трубою. Уловлені тверді дисперсні частки зсипаються в бункер, а очищений газ викидається через вихідну трубу. Ефективність очищення газу циклонами залежить від їх типу та співвідношення основних розмірів.

Залежно від конструкції циклони мають різні кути нахилу завихрювачів, різні співвідношення внутрішнього діаметра до їх довжини, ширини та висоти вхідного патрубку, висоти циліндричної та конічної частин циклону, діаметру вихідної труби та інших визначальних розмірів. Всі ці співвідношення впливають на технічні характеристики циклонів, такі як: продуктивність, питомі енерговитрати, ефективність уловлювання пилу, фракційний склад уловлюваного пилу, втрати тиску в апараті.

Зважаючи на відсутність достовірної методики для розрахунку співвідношень вказаних вище геометричних характеристик для циклонів малої потужності (до 40 м<sup>3</sup>/год), прийнято рішення про доцільність створення математичної моделі процесу фільтрації генераторного газу в інерційному циклоні класичної конструкції та проведення комплексу числових експериментів спрямованих на визначення оптимальних геометричних співвідношень основних розмірів циклону для максимальної якості очищення генераторного газу від механічних домішок.

Наведемо базові закономірності, що є основою математичної моделі руху частинки (пил, зола, сажа) в потоці стисливої рідини (генераторного газу).

Для моделювання течій генераторного газу в циклоні використовувалися усереднені за Фавром рівняння Нав'є-Стокса [12, с. 125], де враховуються усереднені за часом впливи турбулентності потоку на параметри потоку, а також рівняння

переносу для турбулентної кінетичної енергії та швидкості її дисипації (k-ε модель).

Поставлена задача розглядалася як течія двофазних потоків де одна фаза (тверді частинки) рухаються у стаціонарному полі потоку другої (газової) фази. При цьому припускається, що вплив твердих частинок на потік газу (включаючи температуру) є незначним. Також вважалося, що масова витрата твердої фази (частинок) повинна бути не більше ніж 30% від масової витрати газової фази.

Для моделювання таких двофазних потоків, де потік газу забруднено частинками, використовувався підхід Лагранжа [13, с. 107].

Частинки твердого матеріалу вважалися сферичними та такими, що мають постійну масу. Траєкторії частинок визначалися шляхом чисельного інтегрування рівняння:

$$m_{\text{част}} \frac{d\vec{U}_{\text{част}}}{dt} = \frac{1}{8} \pi \mu d \operatorname{Re} C_{on} (\vec{U} - \vec{U}_{\text{част}}) - \frac{1}{6} \pi d^3 \nabla P + m_{\text{част}} \vec{g}$$

де  $m_{\text{част}}$  – маса частинки,  $\vec{U}_{\text{част}}$  – вектор швидкості частинки,  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості,  $d$  – діаметр частинки,  $C_{on}$  – коефіцієнт опору частинки,  $\vec{g}$  – вектор гравітаційного прискорення,  $\operatorname{Re}$  – число Рейнольдса, яке залежить від діаметра частинки, відносної швидкості, густини та в'язкості потоку.

Коефіцієнт опору частинок  $C_{on}$  розраховувався за формулою Хендерсона [14, с. 707], отриманою для безперервних, розріджених, дозвукових ( $M \leq 1$ ) ламінарних, перехідних і турбулентних потоків, що діють на частинки. Також враховано різниці температур між генераторним газом і частинкою. Обертання частинок, їх взаємодія одна з одною та броунівський рух не враховуються.

$$C_{on} = 24 \left[ \operatorname{Re} + S \left( 4.33 + \frac{3.65 - 1.53 \frac{T_{\text{част}}}{T}}{1 + 0.353 \frac{T_{\text{част}}}{T}} \exp(-0.247 \frac{\operatorname{Re}}{S}) \right) \right]^{-1} + \exp\left(-\frac{0.5M}{\sqrt{\operatorname{Re}}}\right) \times \left[ \frac{4.5 + 0.38(0.03 \operatorname{Re} + 0.48 \sqrt{\operatorname{Re}})}{1 + 0.03 \operatorname{Re} + 0.48 \sqrt{\operatorname{Re}}} + 0.1M^2 + 0.2M^8 \right] + \left[ 1 - \exp\left(-\frac{M}{\operatorname{Re}}\right) \right] 0.6S$$

де  $M$  – число Маха, що базується на відносній швидкості між частинкою і потоком газу,

$S = M \sqrt{\frac{\gamma}{2}}$  – відношення молекулярних швидкостей,  $\gamma$  – питома теплоємність,  $T$  – температура газу у потоці,  $T_{\text{част}}$  – температура частинок.

Рівняння теплової енергії для частинки мало наступний вигляд:

$$m_{\text{част}} C_{\text{част}} \frac{dT_{\text{част}}}{dt} = \pi d \cdot k \cdot \operatorname{Nu} (T - T_{\text{част}}),$$

де  $C_{част}$  – питома теплоємність частинки,  $T_{част}$  – температура частинки,  $k$  – теплопровідність газу,  $Nu$  – число Нуссельта.

Коефіцієнт теплопередачі між частинкою та газом розраховувався за формулою запропонованою в [15, с. 1980]:

$$Nu = \frac{2 + 0,459 Re^{0,55} Pr^{0,33}}{1 + 3,42 \frac{M}{Re Pr} (2 + 0,459 Re^{0,55} Pr^{0,33})}$$

Також враховувалася сила тяжіння. Оскільки маса частинок вважалася постійною, частинки, охолоджені або нагріті навколишнім газом, змінювали свій розмір.

Взаємодія частинок з внутрішніми поверхнями стінок циклона враховувалася шляхом визначення неідеального відбиття (що є типовим для таких механічних домішок, як пил та зола). Неідеальне відбиття визначалося нормальним  $e_N$  та тангенціальним  $e_\tau$  коефіцієнтами відбивання частинок:

$$e_N = \frac{V_{2,N}}{V_{1,N}}, \quad e_\tau = \frac{V_{2,\tau}}{V_{1,\tau}},$$

де  $V_{2,N}$  і  $V_{2,\tau}$  – нормальна та тангенціальна складові швидкості частинки після зіткнення, а  $V_{1,N}$  та  $V_{1,\tau}$  до зіткнення.

Вирішення поставленої задачі визначення оптимальних геометричних співвідношень основних розмірів циклону запропоновано здійснити за допомогою проведення активного числового експерименту.

Першим етапом є планування активного експерименту з метою отримання нормалізованого вигляду функції відгуку процесу:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n),$$

де  $X_1, X_2, \dots, X_n$  – найсуттєвіші вхідні фактори процесу, які можна варіювати в запланованих інтервалах при реалізації експерименту на математичній моделі циклона.

Оптимальне значення функції відгуку та відповідні йому значення вхідних факторів, які забезпечують такий екстремум функції відгуку й будуть шуканим розв'язком задачі оптимізації.

Як цільову функцію задачі оптимізації обрано ефективність очистки газу від дрібнодисперсних механічних домішок (пил, зола, сажа) в циклоні.

Необхідно вирішити питання – які саме конструктивні (геометричні) фактори впливають на шукану функцію.

В промисловості найбільше розповсюдження набули циклони типу ЦН, СДК-ЦН та СК-ЦН, що мають схожу конструкцію та відрізняються різними пропорціями основних геометричних

розмірів. Виробники рекомендують використовувати для очистки димових газів котелень від механічних домішок циклони типу СДК-ЦН, що краще пристосовані для уловлення дрібнодисперсних частинок золи та сажі з розміром фракції 5–10 мкм завдяки видовженій конусній частині циклона. Проте не існує стандартних типорозмірів таких циклонів надмалої продуктивності (до 40 м³/год). Найменші з циклонів типу СДК-ЦН, що виробляються серійно мають продуктивність більше 100 м³/год та основний діаметр, що перевищує 150 мм.

При використанні класичної залежності з визначення конструктивних розмірів циклонів маємо:

$$D = \sqrt{\frac{Q_g}{0,785w}} = \sqrt{\frac{0,00388}{0,785 \cdot 2}} = 0,0497 \text{ м} \approx 50 \text{ мм},$$

де  $Q_g$  – об'ємна витрата генераторного газу, м³/с;  $w$  – умовна швидкість газу в циклоні, що забезпечує найвищий рівень очистки, м/с (для циклонів типу СДК-ЦН обирається в діапазоні 2–2,3 м/с).

Складемо статистичну математичну модель процесу фільтрації газу в циклоні типу СДК-ЦН.

Обираємо як параметр оптимізації  $Y$  ефективність очистки газу  $\eta$ , %.

Проведемо вибір незалежних вхідних (геометричних) параметрів процесу:  $X_1$  – діаметр циклону  $D$ , мм;  $X_2$  – висота циліндричної частини циклону  $H_1$ , мм;  $X_3$  – відношення висоти конічної частини циклону  $H_2$  до діаметра циклону  $D$ ;  $X_4$  – кут нахилу конічної частини циклон  $\beta$ , град.;  $X_5$  – відношення діаметру вихідного патрубку  $d$  до діаметра циклону  $D$ ;  $X_6$  – відношення висоти вихідного патрубку  $h$  до висоти циліндричної частини циклону  $H_1$ ;  $X_7$  – відношення висоти вхідного патрубку  $a$  до висоти циліндричної частини циклону  $H_1$ ;  $X_8$  – відношення ширини вхідного патрубку  $b$  до діаметра циклону  $D$ ;  $X_9$  – кут нахилу вхідного патрубку до горизонту  $\gamma$ , град. Всі вказані фактори є сумісні між собою та незалежними й, на думку авторів, є суттєвими.

Проведення повного багатофакторного експерименту за наявності 9 факторів є занадто трудомістким та тривалим процесом, тому доцільно здійснити відсіюючі експерименти з метою визначення незначущості окремих факторів.

Опираючись на попередні розрахунки, літературні джерела та технічні характеристики існуючих серійних циклонів, у відповідності з рекомендаціями методу «випадкового балансу», виберемо нижні та верхні рівні варіювання для всіх вказаних вище факторів (табл. 1).

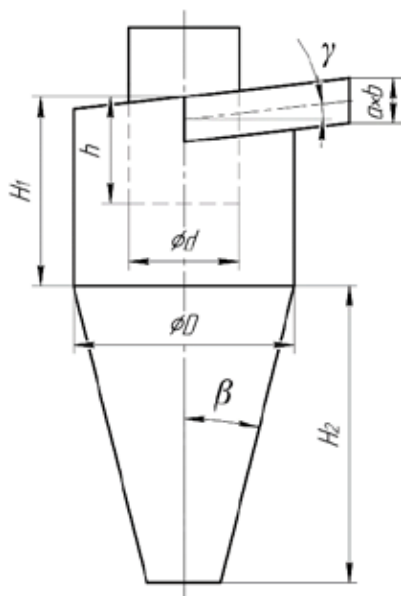


Рис. 1. Схема циклона та основні геометричні фактори

Створимо ряд розрахункових схем (моделей циклона) з відповідним варіюванням факторів (геометричних розмірів), що наведені в таблиці 1 (рис. 2, а).

Проведемо комплекс числових експериментів, використовуючи наведену вище математичну модель, згідно з планом відсіюючих дослідів та занесемо результати визначення ефективності очистки газу  $\eta$ , % в таблицю 2.

$$\eta = \frac{C_{\text{поч}}}{C_{\text{вих}}} 100\%$$

де  $C_{\text{поч}}$  та  $C_{\text{вих}}$  – вміст механічних домішок у генераторному газі на вході та на виході з циклону, г/м<sup>3</sup>.

Опираючись на результати відсіюючих числових експериментів, визначимо медіани та зсув медіан функції відгуку  $Y$  для кожного з дев'яти факторів при нижньому та верхньому рівні його варіювання (табл. 3).

Таблиця 1

Початкові значення факторів для відсіюючих дослідів

Фактор $X_i$	Нульовий рівень	Інтервал варіювання	Верхній рівень	Нижній рівень
$X_1$	100	50	150	50
$X_2$	100	50	150	50
$X_3$	2	1	3	1
$X_4$	8	1,5	9,5	6,5
$X_5$	0,4	0,1	0,5	0,3
$X_6$	0,5	0,3	0,8	0,2
$X_7$	0,55	0,25	0,8	0,3
$X_8$	0,2	0,1	0,3	0,1
$X_9$	17,5	6,5	24	11

Таблиця 2

Матриця планування відсіюючих дослідів

№ дослідів	Безрозмірні фактори									Функція
	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$	$Y$
1	-	-	-	-	+	-	+	-	-	42,25
2	+	-	-	-	-	+	-	-	+	45,31
3	-	+	-	-	-	+	-	-	+	41,00
4	+	+	-	-	+	-	+	+	+	45,38
5	-	-	+	-	+	-	-	+	-	46,08
6	+	-	+	-	-	+	+	-	-	48,47
7	-	+	+	-	-	+	+	+	-	45,64
8	+	+	+	-	+	-	-	+	+	47,10
9	-	-	-	+	+	-	-	+	-	37,25
10	+	-	-	+	-	+	+	+	+	45,99
11	-	+	-	+	-	+	+	-	-	41,89
12	+	+	-	+	+	-	-	-	+	43,35
13	-	-	+	+	+	-	+	-	-	41,62
14	+	-	+	+	-	+	-	+	+	47,71
15	-	+	+	+	-	+	-	-	-	43,61
16	+	+	+	+	+	-	+	+	+	46,31

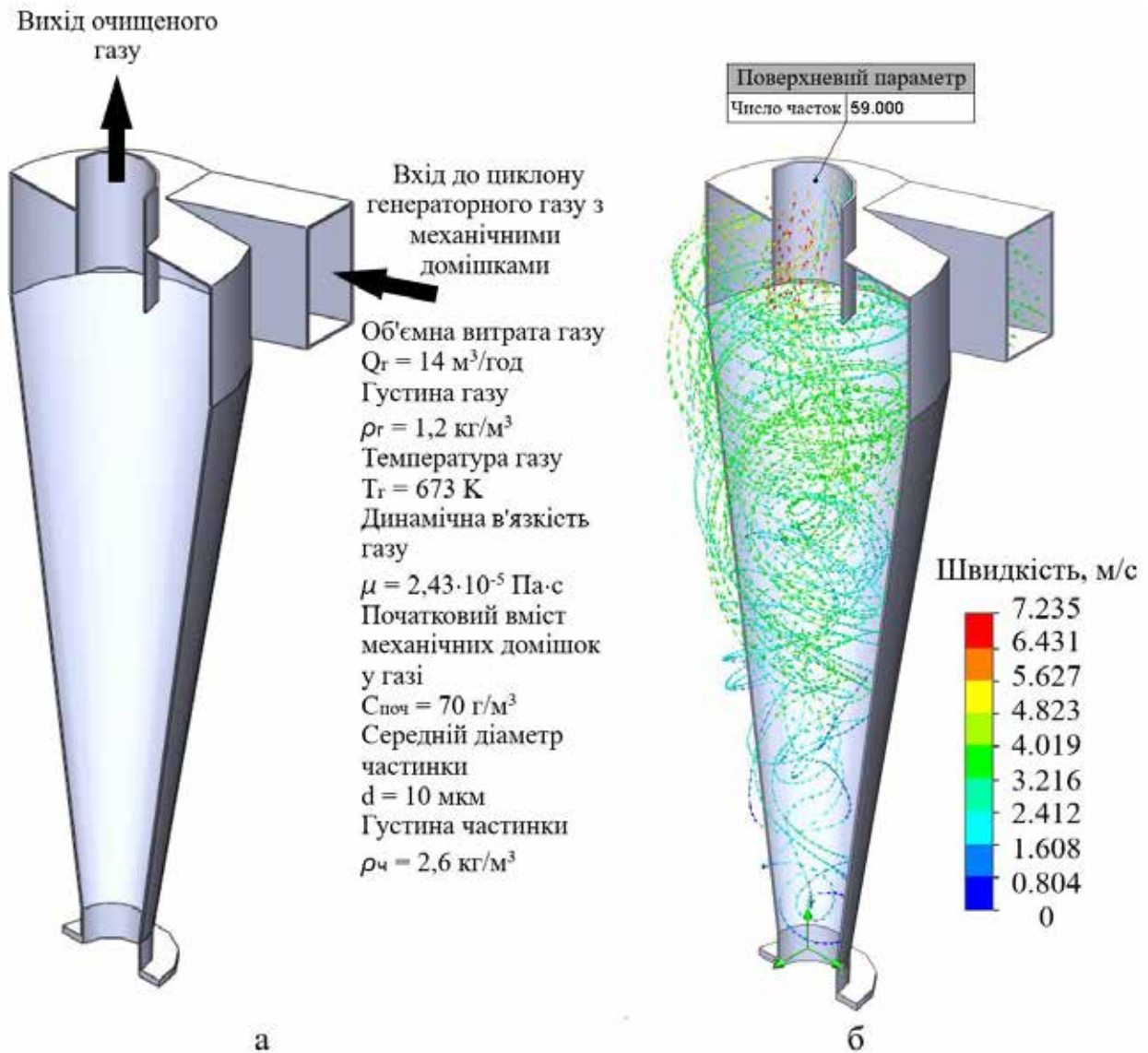


Рис. 2. Розрахункова схема (а) та приклад розподілу швидкостей руху твердих часток й ефективності очищення при одному з числових експериментів (б)

Відомо, що найбільший вплив на функцію відгуку надають ті фактори, які мають найбільшу величину зсуву [16, с. 112]. Отже можна зробити висновок, що найбільший вплив на функцію відгуку в нашому випадку надають фактори  $X_1$ ,  $X_3$ , фактори  $X_9$ ,  $X_8$ ,  $X_4$  теж мають досить чутливий вплив, а фактори  $X_2$ ,  $X_5$ ,  $X_6$ ,  $X_7$  мають несуттєвий вплив.

Для проведення основного експерименту, на думку авторів, доцільно враховувати вплив факторів  $X_1$ ,  $X_3$ ,  $X_9$ , а саме діаметру циклону  $D$ , відношення висоти конічної частини циклону  $H_2$  до діаметра циклону  $D$  та кута нахилу вхідного патрубку до горизонту  $\gamma$ .

Необхідно планувати варіювання вказаних факторів, а інші фактори підтримувати на одному

з сталих рівнів. Залишаємо незмінними нижній рівень фактору  $X_4$ , верхній рівень фактору  $X_8$ , а фактори  $X_2$ ,  $X_5$ ,  $X_6$ ,  $X_7$  зафіксуємо на нульовому рівні.

Аналізуючи конструктивно-технологічні особливості циклонів типу СДК-ЦН, а також результати попередніх числових експериментів, було зроблено висновок, про доцільність зменшення діапазону варіювання факторів для основного експерименту:

- фактор  $X_1$  – підіймаємо нижній рівень до 100 мм не змінюючи верхній рівень;
- фактор  $X_3$  – підіймаємо нижній рівень до 2 не змінюючи верхній рівень;
- фактор  $X_9$  – опускаємо верхній рівень до 17 град. не змінюючи нижній рівень.

Таблиця 3

Функція відгуку  $Y$  для відповідного фактору та його рівнів

	Фактори								
	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$
Медіана $Y$ для нижнього рівня	42,42	44,34	42,80	45,15	44,95	43,67	43,93	43,44	43,35
Медіана $Y$ для верхнього рівня	46,20	44,29	45,82	43,47	43,67	44,95	44,69	45,18	45,27
Зсув медіани $Y$	3,79	0,05	3,02	1,69	1,28	1,28	0,77	1,75	1,92

Таблиця 4

## Коефіцієнти рівняння регресії

Коефіцієнти рівняння регресії							
$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_{11}$	$a_{22}$	$a_{33}$	$a_{123}$
-26.208	0.867	-0.131	3.760	-0.003	0.368	-0.121	3.139

З метою знаходження екстремальної області існування функції відгуку  $\eta$  необхідне застосування планування другого порядку, тому для отримання математичної моделі другого порядку використаємо класичну матрицю та план ортогонального центрального композиційного планування (ОЦКП) для 3-х факторного експерименту [17, с. 61].

Основні числові експерименти проводимо аналогічно описаним вище відсіюючим експериментам.

За результатами спланованих дослідів (числових експериментів), методом найменших квадратів, з виконанням вимог регресійного аналізу, визначимо коефіцієнти рівняння (табл. 4):

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i + \sum_{i=1}^n a_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n a_{ij} X_i^2 + \sum_{i=1}^n a_{ji} X_j^2,$$

де  $i$  – номер фактору,  $j$  – номер дослідів згідно плану ОЦКП,  $a$  – відповідні коефіцієнти рівняння.

Визначимо екстремум функції відгуку  $\eta$ , % та оптимальний розподіл факторів (геометричних параметрів циклона) в межах області факторного простору ( $100 \leq D \leq 150$ ;  $2 \leq H_2 / D \leq 3$ ;  $11 \leq \gamma \leq 17$ ):

$$\eta(D, \frac{H_2}{D}, \gamma) \rightarrow \max;$$

$$D_{opt} = 126 \text{ мм}; \left( \frac{H_2}{D} \right)_{opt} = 3; \gamma_{opt} = 15,5 \text{ град};$$

$$\eta_{opt} = 60,486\%.$$

**Висновок.** Для невеликих приватних домогосподарств і мешканців сільської місцевості можна ефективно використовувати альтернативні технології отримання теплової та електричної енергії. В сучасних умовах технології газифікації біопалива швидко розвиваються, і їх використання стає все більш обґрунтованим й для газогенераторів малої потужності. Для отримання електроенергії на основі генераторного газу необхідне його

якісне очищення перед використанням в двигунах внутрішнього згоряння генераторів. На виході з газогенератора генераторний газ має високий вміст механічних домішок (до  $100 \text{ г/м}^3$ ) таких, як пил, зола та сажа. Найбільш простим способом очистки генераторного газу від механічних домішок є застосування сухих методів очистки, в першу чергу циклонів.

При експлуатації газогенераторних установок малої потужності (до  $40 \text{ м}^3/\text{год}$  газу) виникають значні проблеми з вибором конструкції та типорозмірів циклонів. Класичні методи розрахунку не дають адекватних результатів.

Зважаючи на відсутність достовірної методики для розрахунку геометричних розмірів циклонів малої потужності, створено математичну модель процесу фільтрації генераторного газу в інерційному циклоні та проведено комплекс числових експериментів спрямованих на визначення оптимальних геометричних співвідношень основних розмірів циклону. Як цільову функцію задачі оптимізації обрано якість очищення  $\eta$ , % генераторного газу від механічних домішок.

На основі ОЦКП встановлено зв'язок та отримано залежність впливу основних геометричних параметрів циклона на якість очистки генераторного газу від механічних домішок. Визначено оптимальний розподіл основних геометричних параметрів циклона малої продуктивності.

Проведені дослідження показали недостатню якість очистки ( $\eta_{opt} = 60,486\%$ ) генераторного газу в циклонах при сухому методі очистки. Для використання генераторного газу в двигунах внутрішнього згоряння необхідне додаткове очищення, тобто використання двостадійної очистки. В наступних роботах автори планують проведення досліджень спрямованих на розробку оптимальної конструкції фільтрів тонкої очистки для газогенераторів малої потужності.



**Список літератури:**

1. Thomas Laffitte and Ihor Moshenets, «Synchronized: The Impact of the War on Ukraine's Energy Landscape», December 5, 2023, URL: <https://issuu.com>.
2. «Ukrainian energy sector evaluation and damage assessment – VI», January 24, 2023, URL: <https://www.energycharter.org>. (дата звернення 17.03.2024).
3. Ціни на бензин, дизпаливо, газ на АЗС України, URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/markets/fuel/2024-01> (дата звернення 17.03.2024).
4. Negoda O., Sobchenko V. and Orailo O. Gasification in eddies devices as promising direction development gas generators technologies, Energy-saving technologies and equipment, 2013, pp. 17–20.
5. Дорундяк Л.М. Результати дослідження ефективності процесу пиловловлення у циклоні для системи перекачування деревних відходів. Науковий вісник НЛТУ України 22.14 (2012): с. 152–157.
6. Ляшеник А.В. та ін. Вплив висоти циліндричної частини та глибини занурення вихлопної труби на характеристики циклона. Науковий вісник НЛТУ України 21.3 (2011), с. 101–106.
7. Очеретько А.В., Черембячко І.М. Збільшення ефективності роботи центробіжних пиловловників на гірничому виробництві / А. В. Очеретько, Молодь: наука та інновації: матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 11–12 листопада 2021 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2021 – с. 91–92.
8. Беднарська І.С., Риндюк Д.В. Визначення напружено-деформованого стану стопорно-регулюючого клапана АЕС з урахуванням газодинаміки робочого тіла. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки, Том 33(72), № 5, 2022. С. 193–198. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/28>
9. Tsyvenkova N., Golubenko A., Mulyar A., Los L., Romanyshyn A. The investigation of the technical specifications of gas generator purification system MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2016. Vol.18. No.1. 71–80.
10. David Leith, Dilip Mehta, Cyclone performance and design, Atmospheric Environment, Volume 7, Issue 5, 1973, Pages 527–549, ISSN 0004-6981.
11. Muhammad I. Taiwo, Mohammed A. Namadi and James B. Mokwa, Design and analysis of cyclone dust separator / American Journal of Engineering Research (AJER), Volume-5, Issue-4, pp-130–134, e-ISSN: 2320-0847, p-ISSN: 2320-0936.
12. Hirsch Ch. Numerical Computation of Internal and External Flows: The Fundamentals of Computational Fluid Dynamics. 2nd Edition – June 4, 2007, p. 700. ISBN: 9780750665940.
13. Del Castello L., and Clercx H. J. H. Lagrangian acceleration of passive tracers in statistically steady rotating turbulence, Physical Review Letters, 2011. pp. 107–502.
14. Henderson, C. B. Drag coefficients of spheres in continuum and rarefied flows. AIAA Journal, 14(6), 1976. pp. 707–708.
15. Carlson, D. J., & Hognlund, R. F. Particle drag and heat transfer in rocket nozzles. AIAA Journal, 2(11), 1964. pp. 1980–1984.
16. Методи оптимізації та математична статистика / уклад. Т.Г. Мисюра, Т.М. Погорілий, В.Л. Зав'ялов – К.: НУХТ, 2017. – 169 с.
17. Методи оптимізації та математична статистика: курс лекцій для студентів освітнього ступеня «Магістр» / Бодров В.С., Зав'ялов В.Л., Мисюра Т.Г. та інші. – К.: НУХТ, 2016. – 103 с.

**Rindyuk D.V., Stepanchenko A.A. DETERMINATION OF OPTIMAL DESIGN PARAMETERS OF AN AIR CYCLONE FOR A LOW-POWER GAS GENERATOR**

*In the current difficult economic and political situation in Ukraine, small private households and farmers in rural areas are looking for alternative technologies for generating heat and electricity. The technology of biofuel gasification may be a reasonable and inexpensive option. Its use is justified from the point of view of using it in low-power power supply systems. To obtain electricity on the basis of generator gas, it is necessary to clean it properly before using it in internal combustion engines of generators. The simplest way to clean generator gas from mechanical impurities is to use dry cleaning methods, primarily cyclones. However, when designing low-capacity gas generating units (up to 40 m<sup>3</sup>/h of gas), significant problems arise with the choice of design and size of cyclones. The efficiency of generator gas purification by cyclones, the design and technological parameters of which were chosen using classical calculation methods, is low. Given the lack of a reliable methodology for calculating the geometric dimensions of low-power cyclones, a mathematical model of the process of filtering generator gas in an inertial cyclone was created. A list of the main geometric parameters of the cyclone was selected. Using the method of random balance, screening experiments were*



---

*conducted to determine the magnitude of the influence of specific parameters on the efficiency of cleaning the generator gas from mechanical impurities. The geometric parameters that have the main influence are highlighted. A set of basic numerical experiments aimed at determining the optimal geometric ratios of the main dimensions of the cyclone was carried out. As the objective function of the optimization problem, the quality of purification  $\eta$ , % of the generator gas from mechanical impurities, was chosen. The dependence of the influence of the main geometric parameters of the cyclone on the quality of purification of generator gas from mechanical impurities was obtained. The optimal distribution of the main geometric parameters for a low-capacity cyclone is determined.*

**Key words:** generator gas, mechanical impurities, cyclone, mathematical modeling, optimization.