

УДК 621.928.9

DOI: 10.15587/2312-8372.2019.179178

КОМП'ЮТЕРНІ ТА АНАЛІТИЧНІ РОЗРАХУНКИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ЦИКЛУ СЕПАРАЦІЇ ЗОЛИ

Рижов В. І.

1. Вступ

Вловлювання в циклонах високодисперсної золи (з медіанним діаметром частинок 5...7 мкм та з низкою щільністю), при спалюванні лузги соняшнику в котельних агрегатах, пов'язано із значними труднощами. Це пов'язано з тим, що ефективність циклонів в таких умовах незначна та складає, навіть при шаровому спалюванні, в середньому, 45...55 %, а при вихровому спалюванні – ще нижче. Окрім цього, зола від спалювання лузги соняшника має складну несферичну форму у вигляді пластин, що сприяє зниженню ефективності очистки циклонів.

При цьому, кінцева загорошеність золи лузги соняшнику у димових газах складала: при шаровому способі спалювання на колосникових решітках 500...600 мг/м³, а при вихровому спалюванні – 1500 мг/м³. Це значно перевищує вимоги санітарних норм країн ЄС та України (50...100 мг/м³ – в залежності від теплопродуктивності парових котлів). Тому вкрай важлива розробка різних методів та технологій по підвищенню ефективності уловлювання золи в пилоуловлюючих апаратах при спалюванні в котельних агрегатах лузги соняшнику.

2. Об'єкт дослідження та його технологічний аудит

Об'єктом дослідження є ефективність очистки димових газів в групових циклонах типу ЦН-15 діаметром 0,7 м парового котла КЕ 10-14-285 при спалюванні лузги соняшнику на олійно-жировому комбінаті.

У роботі проводиться експериментальна перевірка отриманих результатів – за рахунок використання розроблених аналітичних та комп'ютерних розрахункових моделей та використання комп'ютерної технології CFD – Computational Fluid Dynamic – сертифікованої комп'ютерної програми «SolidWorks–2009», на розрахунковому комплексі (КПІ).

Одним з найбільш проблемних місць різних технологій спалювання лузги соняшнику в котельних агрегатах на олійно-жирових комбінатах є низька ефективність вловлювання в типових циклонах золи лузги соняшнику через значну дисперсність золи та інших факторів. Наприклад, на паровому котлі типу «КЕ 10-14-285» (Україна) паропроодуктивністю 10 т/г при очищенні в сухих циклонах кінцева загорошеність газів складає 500...900 мг/м³. Це є значним недоліком, оскільки в країнах Європейського Союзу (ЄС) та України санітарні норми складають 100 мг/м³ (для старих котлів) та нижче в залежності від реальних фізико-хімічних параметрів золи, що вловлює початкової загорошеності, дисперсності, щільності.

3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є розробка нового методу очищення газів в сухих циклонах при шаровому способі спалювання на колосникових решітках лузги соняшнику в паровому котлі типу «КЕ 10-14-285» паропродуктивністю 10 т/г. Використання цього методу має підвищити ефективність очистки з рівня 45...55 % до рівня майже 90 %.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Провести аналітичні та комп'ютерні розрахунки ефективності очистки для промислових циклонів на олійно-жировому заводі.
2. Провести експериментальну перевірку впровадження нової технології очистки від золи при спалюванні лузги соняшника та адекватність комп'ютерних та аналітичних методів розрахунків ефективності очистки.

4. Дослідження існуючих рішень проблеми

В даний час в сфері очистки димових газів від золи при спалюванні поновлюваних джерел енергії, наприклад, при спалюванні лузги соняшника у парових котлах, мається дуже обмежена інформація по системам очистки від золи:

- в циклонах [1];
- в електрофільтрах [2];
- в рукавних фільтрах [3].

Так, в [2] в котельній ВАТ «ЕФКО» (м. Олексіївка, Росія) в паровому котлі № 1 типу «КЕ-16-23-370» (Україна) паропродуктивністю 16 т/г з вихровим спалюванням лузги соняшнику. При цьому кількість димових газів 47034 м³/год ($t_2=208$ °С), початкової запыленості 3040 мг/м³. Ефективність очистки димових газів в груповому циклоні з дев'яти циклонів типу «ЦН-11» (Україна) діаметром 1 м складала $h=48$ %, а кінцева запыленість складала $K_{fin} = 1580$ мг/м³ при нормі 50 мг/м³ [3, 4].

На аналогічному котлі № 2 типу «КЕ-16-23-370» (м. Олексіївка, Росія), після впровадження високоефективного пиловловлювача типу «КПЗУ-75» (з пилеконцентратором діаметром 1,8 м конструкції ТОВ «Томскгазоочістка», Росія) були отримані наступні результати: $h=73$ %; $K_{fin} = 960$ мг/м³; $\Delta P=1500$ Па [1]. Такі низькі результати по очистці привели авторів даної роботи до висновків о необхідності заміни технології спалювання лузги соняшнику в вихрових топках, наприклад, на її спалювання в кип'ячому шарі чи при використанні піролізу палива.

На ряді олійно-жирових комбінатах України на парових котлах паропродуктивністю 10 т/год (з шаровим спалюванням лузги соняшнику та з перекидаючими колосниками) фірмою КБ «Енергомашпроект» (Київ, Україна) провадилися дослідження кінцевої концентрації золи за циклонами [3].

Після очистки газів в типових циклонах «ЦН-15» діаметром 0,7 м, встановлених після димососів, кінцева запыленість складала $K_{fin} = 450...900$ мг/м³ – в залежності від величини підсосів повітря через бункери системи очистки та дисперсності золи [5, 6].

В м. Олексіївка (Білгородська обл., Росія) на чотирьох котлах при спалюванні лузги соняшника були впроваджені рукавні фільтри фірми «Філкон А/С» (Данія) з використанням високотемпературних склотканевих рукавів з мікропоровими полімерними вставками [2]. По даним ВАТ «ЕФКО» (Україна), яка виконала впровадження нової системи очистки, при очистці газів з високою температурою (180...220 °С) та значними швидкостями газових потоків, були отримані високі ступені надійності та ефективності роботи. При цьому дані о найбільш важливих технічних параметрах системи очистки (запорошеність газів перед та після очистки, ефективність очистки, гідравлічний опір та ін.) не приводились [2].

В 2014 р. в м. Запоріжжі (Україна) на олійно-жировому комбінаті на двох котлах паропродуктивністю по 25 т/г кожний, при спалюванні лузги соняшника були встановлені електричні фільтри конструкції ТОВ «Енергомашекологія» (м. Запоріжжя, Україна) типу «СГУ 43-16-7-6W/S 640-400-2» [3]. На кожному котлі отримані такі дані:

- витрата димових газів – 80000 м³/г;
- температура газів перед електрофільтром – 250 °С;
- запорошеність газів: початкова 6000 мг/м³; кінцева – 50 мг/м³;
- ефективність очистки – 99,17 %.

В 2016 р. в котельній ПрАТ «Пологівський олійноекстракційний завод» (м. Пологи, Україна) на котлі №1 типу «ДКВр 20-23-250 ГМ» (Україна) паропродуктивністю 20 т/г при спалюванні лузги соняшнику був встановлений рукавний фільтр конструкції ТОВ «Енергомашекологія» [3]. По даним акту іспитів отримані наступні результати:

- витрата димових газів – 23500...36030 м³/год;
- паропродуктивність котла – 6...12 т/год;
- середня кінцева запорошеність димових газів – 39,4 мг/нм³.

Викликає значні сумніви можливість використання технології очистки димових газів в рукавних фільтрах при спалюванні лузги соняшнику. Пов'язано це з високою температурою димових газів (більш 200 °С) і тому мається значна вірогідність виникнення пожег при спалюванні лузги соняшнику. Крім цього, найбільш дорогий матеріал рукавів фільтрів при неполадках технології чи при появі іскор може бути знищений при високих температурах, оскільки максимально допустима температура газів матеріалів рукавних фільтрів складає, як правило, не вище 280 °С [7].

Окрім цього, значна ціна рукавних та електричних фільтрів обумовлює використовувати циклони ще значний період часу для уловлювання золи з димових газів при спалюванні в котлах лузги соняшника. Це питання залишається недостатньо висвітленим та потребує подальших наукових досліджень та промислового впровадження.

По питанням розробки теорії циклонної очистки від золи та пилу, а також розробки та впровадження нових конструкцій циклонів, в останні роки мається інформація в наступних роботах:

В роботі [8] наведено дані аналізу та практичної оцінки ефективності циклонів з жалюзійним відводом газу. Наведено метод розрахунку

ефективності очистки таких циклонів від пилу. Недоліком роботи є те, що висновки можливо використовувати тільки для циклонів з жалюзійним відводом газу.

В роботі [9] розглядаються моделі для опису поля потоку зворотної течії всередині циклону і залежності для прогнозування ступеня очищення від пилу. Відзначається, що хоча методи, які розглядатимуться, мають успіх, необхідно розвивати методи розрахунку циклонів та методи їх модернізації.

В роботі [10] наведені результати чисельного дослідження течії пило-газового потоку в одному з відомих циклонів. Показано, що частинки входять в циклон з різних місць розташування, мають різну ефективність очищення. Недоліком роботи є те, що висновки можливо використовувати тільки для наведеного типу циклонів.

Таким чином, результати літературного аналізу дозволяють зробити висновок, що проблема підвищення ефективності очистки в циклонах димових газів від золи при спалюванні лузги соняшника в парових котлах практично дуже мало висвітлена. Причиною цього є той факт, що дана технологія спалювання знайшла застосування тільки в Росії та Україні всього декілька років тому. А по важливому питанню підвищення ступеня очистки газів від золи в циклонах з рівня 45...55 % до рівня, необхідного по санітарним нормам, 89...90 %, публікацій взагалі немає. Тобто практично існує проблема необхідності зниження кінцевої загороженості газів при спалюванні в котлах лузги соняшнику на колосниковій решітці з рівня 500...900 мг/м³ до рівня, діючих в країнах Європейського Союзу та України санітарних норм – 50–100 мг/м³ [4]. Це потребує подальших наукових досліджень та промислового впровадження.

5. Методи досліджень

У даній роботі за допомогою комп'ютерних та нових аналітичних розрахунків обґрунтована можливість підвищення загальної ефективності очистки димових газів від золи при спалюванні в котлах лузги соняшнику до рівня 90 % замість 45...55 %. Для цього підвищується турбулентність у зонах взаємодії часток золи з поверхнею циклону та з «джгутом» золи на його поверхні. Додатково використовуються встановлені на струменевій ділянці у вхідному патрубку циклону різні турбулізатори потоку.

Для аналітичних розрахунків циклонів був розроблений і використаний новий метод, заснований на значному впливі на ефективність очистки величин внутрішнього колмогорівського масштабу турбулентності; пульсаційної динамічної швидкості газового потоку. Комп'ютерні розрахунки виконувались за допомогою комп'ютерної технології CFD – Computational Fluid Dynamic сертифікованої комп'ютерної програми «SolidWorks-2009» [6], на розрахунковому комплексі (КП). Предметом досліджень були розрахунки оптимальних параметрів генераторів турбулентності газового потоку, місць їх розташування у вхідному патрубку циклону, ефективності очистки типового та модернізованого циклонів. Верифікація результатів провадилась з використанням натурального експерименту у виробничих умовах олійно-жирового комбінату в циклонах ЦН-15 діаметром 0,7 м.

Так, система санітарної очистки димових газів працюючого на лузі соняшнику парового котла «КЕ 10-14-285» Вінницького олійно-жирового комбінату (Україна) складається з:

- групових циклонів типу «ЦН-15» (6 штук діаметром 0,7 м) з загальним бункером та шлюзовим постачальником, димососом «ДН-15» (Україна) ($n=1000$ об/хв, $N=75$ кВт з частотним регулюванням обертів);
- системи газоходів та димової труби.

6. Результати дослідження

Наведемо дані іспитів та розрахунків комп'ютерних та аналітичних ефективності типового циклона «ЦН-15» та реконструйованого циклона «ЦН-15-ТР» (Україна).

Розрахунки провадились при наступних конструктивних параметрах циклонів, технологічних параметрах газового потоку та фізико-хімічних властивостей золи при спалюванні лузги соняшника:

- діаметр циклонів «ЦН-15» (6 шт.) – $D_{cyc} = 0,7$ м;
- температура газу – $t_g = 200$ °С;
- швидкість газу у вхідному патрубку циклона – $V_{inp} = 18$ м/с;
- середня швидкість газу в горизонтальному перерізі циклона – $V_{av} = 3,95$ м/с;
- щільність золи – $\rho_{as} = 1500$ кг/м³;
- медіанний діаметр золи $d_{50} = 7$ мкм;
- дисперсія розподілу частинок золи по розмірам – $\sigma_{II} = 2$ (безрозмірна величина);
- початкова запыленість золи в газі перед циклоном – $K_{in} = 842$ мг/м³.

Аналітичний розрахунок типового циклона «ЦН-15» [5]:

- щільність газу:

$$\rho_g = 1,29 \left(\frac{273}{273 + t_g} \right) = 0,745 \text{ кг/м}^3; \quad (1)$$

- гідравлічний опір циклона:

$$\Delta P_{cyc} = \zeta \rho_g \left(\frac{V_{inp}^2}{2} \right) = 160 \cdot 0,745 \left(\frac{3,95^2}{2} \right) = 930 \text{ Па}; \quad (2)$$

- динамічна в'язкість газу:

$$\mu_g = (18,2 + 0,035 \cdot t_g) = 25 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}; \quad (3)$$

- кінематична в'язкість газу:

$$\nu_g = \frac{\mu_g}{\rho_g} = 33,6 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}; \quad (4)$$

– еквівалентний діаметр вхідного патрубку циклона:

$$d_{eqv} = \frac{2ab}{(a+b)} D_{cyc} = \frac{2 \cdot 0,26 \cdot 0,66 \cdot 0,7}{(0,26 + 0,66)} = 0,261 \text{ м}; \quad (5)$$

– колмогорівський мікромасштаб турбулентності [5]:

$$\lambda_0 = \left(\frac{v_g}{V_{in}} \right)^{3/4} (d_{eqv})^{1/4} = \left(\frac{33,6 \cdot 10^{-6}}{18} \right)^{3/4} (0,261)^{1/4} = 36,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}; \quad (6)$$

– пульсаційна динамічна швидкість потоку газу у вхідному патрубці типового циклону – розраховується по встановленій автором емпіричній залежності:

$$u = \frac{23}{\lambda_0} = \frac{23}{36} = 0,64 \text{ м/с}; \quad (7)$$

– діаметр частинок золи вловлюються з ефективністю 50 % (діаметр «відсікання»):

$$\begin{aligned} d_{\eta=50} &= 8,5(0,42)^u \left(\frac{D_{cyc}}{0,6} \right)^{1/4} \left(\frac{\mu_g \cdot 1930}{22 \cdot 10^{-6} \cdot p_{as}} \right)^{1/2} = \\ &= 8,5(0,42)^{0,64} \left(\frac{0,7}{0,6} \right)^{1/4} \left(\frac{25 \cdot 10^{-6} \cdot 1930}{22 \cdot 10^{-6} \cdot 1500} \right)^{1/2} = 6,13 \text{ мкм}; \end{aligned} \quad (8)$$

– величина параметра пофракційного ступеня очистки « t » [5]:

$$t = \frac{\lg d_{50} - \lg d_{\eta=50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{as} + \lg^2 \sigma_{II}}} = 0,125; \quad (9)$$

– величина загального ступеня очистки [5]:

$$\eta_{com} = \Phi(t) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt; \quad (10)$$

яка визначається по наступним емпіричним залежностям [5]:

$$\eta_{com} = 50 + 44t - 10(t)^2, \quad (\text{для } 50 \% < \eta_{com} < 98 \%), \quad (11)$$

$$\eta_{com} = 105,4 - \frac{15}{t}, \quad (\text{для } \eta_{com} > 98 \%), \quad (12)$$

$$\eta_{com} = 50 + 44(0,125) - 10(0,125)^2 = 55,34 \%; \quad (13)$$

– кінцева загорошеність газів золою після очистки в типових циклонах «ЦН-15»:

$$K_{fin} = K_{in}(1 - \eta_{com}) = 842(1 - 0,5534) = 376 \text{ мг/м}^3. \quad (14)$$

В табл. 1 наведені аналітичні розрахункові значення ефективності очистки в типовому циклоні «ЦН-15» (при $K_{in} = 842 \text{ мг/м}^3$) для більш широкого діапазону дисперсності золи.

Таблиця 1

Ефективність очистки золи в типовому циклоні «ЦН-15» парового котла «КЕ 10-14-285» при спалюванні лузги соняшника олійно-жирового комбінату

d_{50} , мкм	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25
η_{com} , %	43	50	55	60	64,4	68	73,9	80	86,9	90,5
K_{inu} , мг/м ³	842	842	842	842	842	842	842	842	842	842
K_{fin} , мг/м ³	480	421	376	337	300	270	220	168	110	80

Примітка: наведені дані іспитів в промислових умовах для $d_{50}=7$ мкм; $\sigma_{as} = 2$

З даних табл. 1 слідує, що в типовому циклоні «ЦН-15» ефективність очистки недостатня для досягнення нормативних значень $K_{fin} = 50 \text{ мг/м}^3$ [4], тому була виконана мало затратна модернізація циклонів «ЦН-5» з діаметром 0,7 м на нагнітанні – після димососа для умов олійно-жирового комбінату при спалюванні в котлі «КЕ 10-14-285» лузги соняшника.

Аналітичний розрахунок модернізованого циклона «ЦН-15-ТР» з турбулізатором типу «РАМА» (Україна). Модернізація циклонів «ЦН-15» (діаметром 0,7 м) для умов олійно-жирового комбінату при спалюванні в котлі «КЕ 10-14-285» лузги соняшника полягала у встановленні на струйній ділянці циклонів генераторів турбулентності типу «РАМА». Останні оздоблені перетинами з полосового металу шириною 25 мм і товщиною 5 мм – трьома вертикальними та п'ятьма горизонтальними перетинами, з площею живого перерізу (віднесена до площі вхідного патрубку циклону) $f_{liv.cyc} = 0,317$ [5, 7].

Розрахунок модернізованого циклона «ЦН-15-ТР» (Україна) виконано для умов олійно-жирового комбінату при спалюванні в котлі «КЕ 10-14-285» (Україна) лузги соняшника. Температура газів перед циклонами складає 200 °С, середня швидкість газу в горизонтальному січенні циклонів – 3,95 м/с, щільність золи 1500 кг/м³, $d_{\eta 50} = 7$ мкм; $\sigma_{II} = 2$. Розрахунок виконується в наступній послідовності:

– коефіцієнт гідравлічного опору циклона:

$$\zeta_{t.g.ЦН-15} = \frac{\zeta_{типЦН-15}(0,78 f_{liv.cyc} + 0,22)}{f_{liv.cyc}} = \frac{160(0,78 \cdot 0,317 + 0,22)}{0,317} = 236; \quad (15)$$

– щільність газу:

$$\rho_g = 1,29 \left(\frac{273}{273 + t_g} \right) = 1,29 \left(\frac{273}{273 + 200} \right) = 0,745 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}; \quad (16)$$

– гідравлічний опір циклона:

$$\Delta P_{\text{цик}} = \zeta \rho_g \frac{(V_{\text{ав}})^2}{2} = 236 \cdot 0,745 \frac{(3,95)^2}{2} = 1370 \text{ Па}; \quad (17)$$

– ступінь турбулентності газового потоку у вхідному патрубку з генератором турбулентності зі встановленої автором при комп'ютерному моделюванні залежності:

$$T_{\text{ut.g}} = 93 \cdot (0,065)^{f_{\text{тв.цик}}} = 39,1 \%; \quad (18)$$

– діаметр «відсікання» або діаметр частинок золи, що уловлюються з ефективністю 50 %, розраховується по встановленої автором при комп'ютерному моделюванні залежності:

$$\begin{aligned} (d_{\eta=50})_{\text{т.г.}} &= (d_{\eta=50})_{\text{тип}} \left(\frac{T_{\text{ут.г.}}}{T_{\text{тип}}} \right)^{0,52} \left(\frac{D_{\text{цик}}}{0,6} \right)^{1/4} \left(\frac{v_g \cdot 1930 \cdot 3,5}{22 \cdot 10^{-6} \cdot p_{\text{ас}} \cdot V_{\text{ав}}} \right)^{1/2} = \\ &= 6,13 \left(\frac{3,56}{39,1} \right)^{0,52} \left(\frac{0,7}{0,6} \right)^{1/4} \left(\frac{25 \cdot 10^{-6} \cdot 1930 \cdot 3,5}{22 \cdot 10^{-6} \cdot 1500 \cdot 3,95} \right)^{1/2} = 2,196 \text{ мкм}; \end{aligned} \quad (19)$$

де

$$T_{\text{ут.г.}} = \left(\frac{u}{V_{\text{ex}}} \right) \cdot 100 = \left(\frac{0,64}{18} \right) \cdot 100 = 3,56 \%;$$

– параметр « t » пофракційної ступені очистки [5] розраховується по залежності:

$$t = \frac{\lg d_{50} - \lg (d_{\eta=50})_{\text{т.г.}}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\text{ас}} + \lg^2 \sigma_{\eta}}} = 1,0907; \quad (20)$$

– величина загального ступеня очистки розраховується по залежності [5]:

$$\eta_{\text{com}} = 50 + 44t - 10(t)^2, \quad (\text{для } t < 2,054), \quad (21)$$

$$\eta_{\text{com}} = 105,4 - \frac{15}{t}, \quad (\text{для } t > 2,054),$$

$$\eta_{\text{com}} = 50 + 44(0,125) - 10(0,125)^2 = 55,34 \%; \quad (22)$$

– кінцева запыленість газів золою після очистки в циклоні «ЦН-15-ТР»:

$$K_{\text{fin}} = K_{\text{in}} (1 - \eta_{\text{com}}) = 842(1 - 0,861) = 117 \text{ мг/м}^3. \quad (23)$$

Після очистки газів в типовому циклоні «ЦН-15» кінцева запыленість складала 379 мг/м^3 , а в модернізованому циклоні «ЦН-15-ТР» – 117 мг/м^3 , тобто в 3,2 рази менша. По кінцевій запыленості газів в циклоні «ЦН-15-ТР», практично, виконуються вимоги країн Європейського Союзу та України, які складають для старих котлів 100 мг/м^3 [4].

На рис. 1, 2 наведені результати комп'ютерного CFD-моделювання за допомогою ліцензійного прикладного пакета програм для чисельного моделювання турбулентних потоків «COSMOS Flo Works» в Національному технічному університеті «Київський політехнічний інститут». Дані використовуються для визначення ефективності очищення газового потоку від аерозолів в типовому циклоні «ЦН-15» (Україна) та в модернізованому по [5, 7] циклоні «ЦН-15-ТР» (Україна).

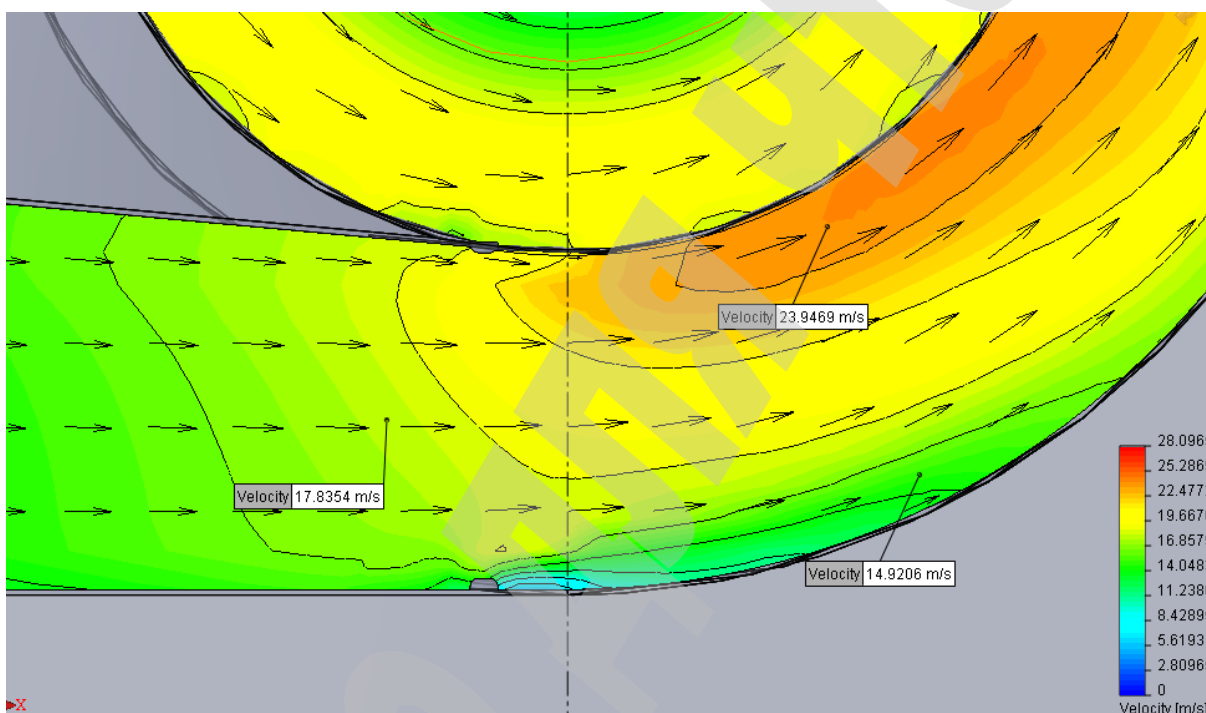


Рис. 1. Розподіл швидкості газового потоку типового циклона «ЦН-15» (діаметром 0,7 м) для умов олійно-жирового комбінату

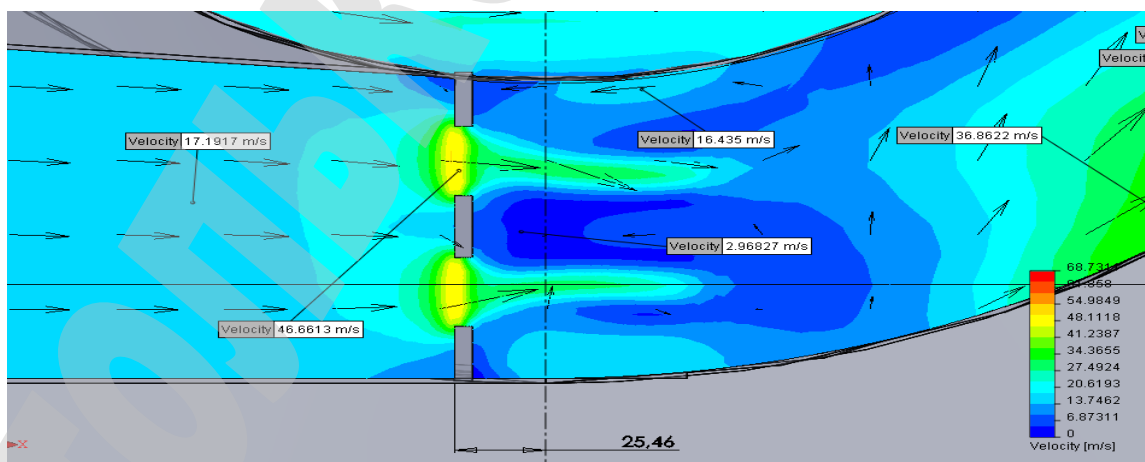


Рис. 2. Розподіл швидкості газового потоку модернізованого по [7] циклона «ЦН-15-ТР» (діаметром 0,7 м) для умов олійно-жирового комбінату

Загальний уніс частинок золи в модернізованому циклоні «ЦН-15-ТР», у порівнянні з типовим циклоном «ЦН-15», зменшився у 3,2 рази.

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. До переваг запропонованої у роботі технології очищення можна віднести наступне:

- практичну відсутність капітальних витрат;
- можливість її впровадження навіть при роботі котла;
- відсутність необхідності заміни малоєфективних циклонів на більш ефективне, але і більш коштовне устаткування;
- незмінність металоємності і продуктивності системи очищення;
- зниження більш, ніж в 3 рази виносу золи з циклонів на високодисперсійній золі четвертої групи дисперсності з медіанним діаметром частинок золи 1...10 мкм;
- значне скорочення часу виконання аналітичних і комп'ютерних розрахунків циклонів і підвищення їх точності.

Weaknesses. До недоліків запропонованої у роботі технології очищення можна віднести тільки незначне підвищення енергозатрат, які, однак, не перевищують, як правило, 40...50 % від існуючих.

Opportunities. Перспективним напрямом подальших досліджень вбачається у вивченні можливого застосування запропонованої технології модернізації систем очищення для потреб інших виробництв. Наприклад, коагулятори Вентурі можуть використовуватися на теплових електростанціях при спалюванні в парових котлах різних видів палива, в мокрих і сухих пиловловлювачах різних виробництв тощо.

Використання отриманих у пропонованій роботі результатів дослідження може бути цікавим не лише для України, оскільки дозволяє модернізувати типові циклони, що використовуються для очистки газів у багатьох країнах.

Threats. При впровадженні результатів проведених досліджень знадобляться додаткові витрати, але вони будуть мінімальними.

8. Висновки

1. Проведено розрахунки оптимальних параметрів генераторів турбулентності газового потоку, місць їх розташування у вхідному патрубці нового циклону, ефективності очистки типового та модернізованого циклонів. Розроблено метод модернізації циклонів «ЦН-15» для умов олійно-жирового комбінату при спалюванні в котлі «КЕ 10-14-285» лузги. Він полягає у встановленні на струйній ділянці циклонів генераторів турбулентності типу «РАМА». Останні оздоблені трьома вертикальними та п'ятьма горизонтальними перетинами з полосового металу шириною 25 мм і товщиною 5 мм.

2. Проведено експериментальну перевірку впровадження нової технології очистки від золи при спалюванні лузги соняшника та адекватність комп'ютерних та аналітичних методів розрахунків ефективності очистки. До модернізації в типовому циклоні «ЦН-15» після очистки газів кінцева

запоорошеність складала 379 мг/м^3 . В модернізованому за запропонованою технологією циклоні «ЦН-15-ТР» – 117 мг/м^3 , тобто в 3,2 рази менша.

Література

1. Василевский, М. В., Разва, А. С., Зыков, Е. Г. и др. (2013). Особенности очистки дымовых газов от золы–уноса инерционными аппаратами за котлом КЕ-16-23-370 ГДВ с вихревой топкой сжигания лузги подсолнечника. *Промышленная энергетика*, 1, 49–53.
2. «ЭФКО» модернизирует производство в соответствии с мировыми экологическими стандартами (2013). Available at: <http://www.efko.ru/press-centr/relizy/2750/>
3. Строительство двух газоочисток за котлами № 10, 11, сжигающими лузгу подсолнечника (2008). *Энергомашиэкология*. Available at: <http://www.em-eco.net.ua/vnedreniya/szhiganie-biomassy/zmzhk-kratko/>
4. Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел (2006). Наказ Мінприроди України №309 від 27.06.2006. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/card/z0912-06>
5. Приемов, С. И. (2014). *Методы расчета и повышения эффективности очистки циклонных пылеуловителей*. Киев: Кафедра, 132.
6. Алямовский, А., Собачкин, А., Одинцов, Е., Харитонович, А., Пономарев, Н. (2008). *SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике*. Санкт-Петербург, 1040.
7. Приёмов, С. И., Шульга, С. М., Рижов, И. М., Рижов, В. И. (2014). Патент № 105368 UA. *Пиловловлювальний пристрій та порожниста вставка для пиловловлювального пристрою*. МПК: B01D 45/12. № а 2011 05185. Заявл.: 26.04.2011; опубл.: 12.05.2014, Бюл. № 9.
8. Слободян, С. М., Куц, В. П. (2014). Системы пылеулавливания с инерционными аппаратами в производстве строительных материалов. *Безопасность жизнедеятельности*, 8, 55– 59.
9. Cortes, C., Gil, A. (2007). Modeling the gas and particle flow inside cyclone separators. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33 (5), 409–452. doi: <http://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.001>
10. Wang, B., Xu, D. L., Chu, K. W., Yu, A. B. (2006). Numerical study of gas–solid flow in a cyclone separator. *Applied Mathematical Modelling*, 30 (11), 1326–1342. doi: <http://doi.org/10.1016/j.apm.2006.03.011>