

В.Ю. Балюк, аспір.
А.В. Ільченко, к.т.н., доц.
М.М. Маяк, проф., д.т.н.
В.М. Михайленко, магістр

Житомирський державний технологічний університет

ГАЗОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Проведено газодинамічний аналіз прототипу системи очищення відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згорання, запропоновано варіанти зміни конструкції для модернізації системи.

Вступ. Очищення відпрацьованих газів (ВГ), у тому числі від часток сажі, дизельних двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) автомобілів, є однією з найважливіших екологічних проблем і складним технічним завданням, вирішення яких залежить від різних факторів. Для оптимізації конструкції, врахування різних факторів і виключення їх впливу на отримані результати на стадії натурних випробувань, потрібно до їхнього виконання провести аналітичний аналіз роботи розроблювальної системи. Для вирішення даного завдання сьогодні в руках наукових й інженерних співробітників є ряд комплексів для комп'ютерного моделювання різних процесів, у тому числі й таких, як моделювання потоку рідини або газу. У статті розглянуто модель процесу фільтрації в розроблювальній системі очищення ВГ з використанням пористих матеріалів і зміною температури ВГ.

Постановка завдання. Провести моделювання роботи прототипу системи очищення ВГ для автомобіля КамАЗ в CFD-Комплексі COSMOSFloWorks, визначити параметри його роботи, конструктивно забезпечити можливість регулювання температури при фільтрації часток сажі у фільтрах грубого й тонкого очищення.

Викладення основного матеріалу й результати дослідження. Прототип призначений замінити стандартний глушник (розроблювальний фільтр призначений для установки замість стандартного глушника та може виконувати його функцію [1]) автомобіля й забезпечити поліпшення показників його екологічної безпеки шляхом очищення й нейтралізації шкідливих речовин у ВГ. Конструкція розроблена на основі пристрою для очищення ВГ ДВЗ, описаної в [1]. При проведенні модернізації конструкції системи очищення ВГ ДВЗ було запропоновано використовувати електронагрівальний елемент, який присутній у конструкції, не тільки для регенерації сажових фільтрів, а й для постійної підтримки температури оптимальною для фільтрації ВГ [2]. Для оптимізації конструкції прототипу перед натурними випробуваннями було прийняте рішення провести його газодинамічний аналіз, тобто розрахувати фізичні процеси, які відбуваються під час його роботи та шляхом внесення змін у конструкцію оптимізувати їхнє протікання.

Щоб розрахувати зазначені фізичні процеси, тобто зміну фізичних параметрів у просторі та часі, спочатку треба їх математично змоделювати. Оскільки фізичні процеси – результат дії законів фізики, то найбільш адекватні фізичним процесам математичні моделі є системою диференціальних і/або інтегральних рівнянь, що описують закони фізики, із граничними й початковими умовами, що прив'язують дану математичну модель до поставленої конкретної фізичної задачі, тобто визначають дані фізичні процеси в цій задачі. На рисунку 1 представлено модель прототипу системи очищення ВГ автомобіля КамАЗ із відображеними граничними й початковими умовами.

Оскільки використовувані в моделі системи диференціальних і/або інтегральних рівнянь звичайно не мають аналітичного розв'язку, вони приводяться до дискретного виду та вирішуються на деякій розрахунковій прямокутній сітці, яка розрізняє області нелінійної поведінки розв'язку даних рівнянь. Саме така методика використовується COSMOSFloWorks [3].

В COSMOSFloWorks ВГ представляються як текуче середовище, рух і теплообмін якого моделюються за допомогою рівнянь Нав'є–Стокса, які описують у нестационарній постановці

закони збереження маси, імпульсу та енергії цього середовища. Крім того, використовуються рівняння стану компонентів текучого середовища, а також емпіричні залежності в'язкості й теплопровідності цих компонентів середовища від температури. Для моделювання турбулентного протікання ВГ згадані рівняння Нав'є–Стокса в CosmosFlowworks осереднюються за Рейнольдсом, тобто використовується осереднений за малим масштабом часу вплив турбулентності на параметри потоку, а великомасштабні тимчасові зміни осереднених за малим масштабом часу складових газодинамічних параметрів потоку (тиску, швидкостей, температури) враховуються введенням відповідних похідних за часом. У результаті рівняння мають додаткові члени – напруги за Рейнольдсом, а для замикання цієї системи рівнянь в COSMOSFloWorks використовуються рівняння переносу кінетичної енергії турбулентності та її дисипації в межах k - ε моделі турбулентності.

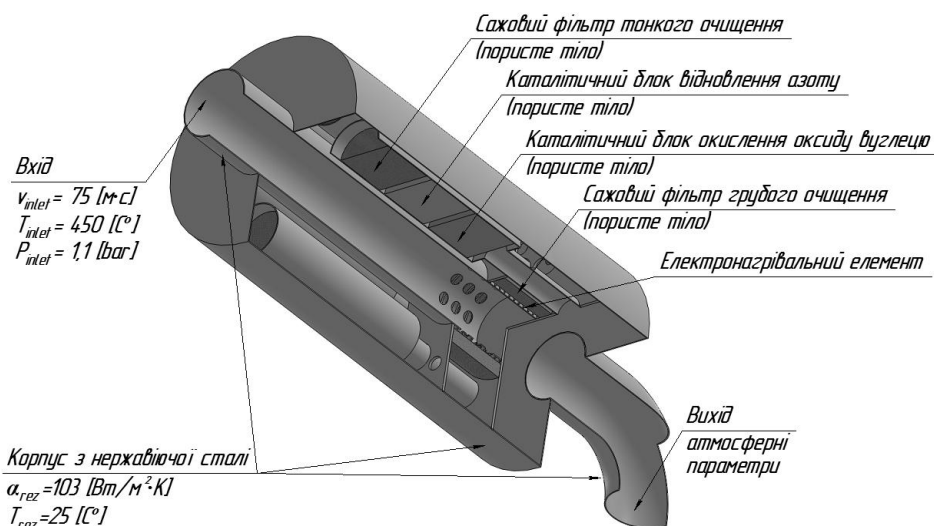


Рис. 1. Модель системи очищення ВГ для автомобіля КамАЗ в CFD-Комплексі COSMOSFloWorks

Ця система рівнянь збереження маси, імпульсу й енергії нестационарного просторового протікання у рамках підходу Ейлера в декартовій системі координат має такий вигляд ($x_i, i = 1, 2, 3$):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i; \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((\rho E + P) u_k + q_k - \tau_i k_{ii}) = S_k u_k + Q_H, \quad (3)$$

де t – час, с; u – швидкість текучого середовища, м/с; ρ – густина текучого середовища, кг/м³; P – тиск текучого середовища, Па; S_i – зовнішні масові сили, що діють на одиничну масу текучого середовища, Н; $S_{iporous}$ – сила опору пористого тіла, $S_{igravity}$ – сила гравітації, $S_{irotation}$ – сила обертання системи координат, тобто:

$$S_i = S_{iporous} + S_{igravity} + S_{irotation}, \quad (4)$$

E – повна енергія одиничної маси текучого середовища, Дж; Q_H – тепло, виділене тепловим джерелом в одиничному об'ємі текучого середовища, Вт; τ_{ik} – тензор в'язких напруг зсуву; q_i – дифузійний тепловий потік, Вт/м²; нижні індекси означають підсумовування за трьома координатними напрямками.

Дифузійний тепловий потік моделюється за допомогою рівняння:

$$q_k = - \left(\frac{\mu_l}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) c_p \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad k = 1, 2, 3, \quad (5)$$

де $\sigma_c = 0,9$; Pr – число Прандтля; c_p – питома теплоємність при постійному тиску, Дж/(кг·К); T – температура текучого середовища, К.

Для моделювання ламінарного протікання дана система рівнянь трохи модифікується, а саме припускається $\mu_i = 0$ і $k = 0$. За допомогою функції f_μ моделюється перехід ламінарного протікання в турбулентне та турбулентного в ламінарне.

Поряд з дифузійною теплою в ВГ у розробленій математичній моделі враховується також теплопередача у твердих тілах (стінках і перегородках) і в зовнішній простір (обдів потоком повітря). В COSMOSFloWorks теплопередача у твердих тілах моделюється за допомогою такого рівняння:

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H, \quad (6)$$

де $e = cT$; z – питома теплоємність, Дж/(кг·К), T – температура, К; λ – теплопровідність, Вт/(м·К); Q_H – питома (в одиниці об'єму) тепловиділення джерела тепла, Вт/м³.

Як видно з рисунка 1, у розробленій моделі ВГ проходять через пористі тіла сажових фільтрів і каталітичних блоків. Вплив цих тіл на параметри протікання ВГ моделюється як розосереджений гідравлічний опір, а саме $S_{iporous}$ у сумі (4) і визначається як:

$$S_{iporous} = -k \delta_{ij} \rho u_{ij}, \quad (7)$$

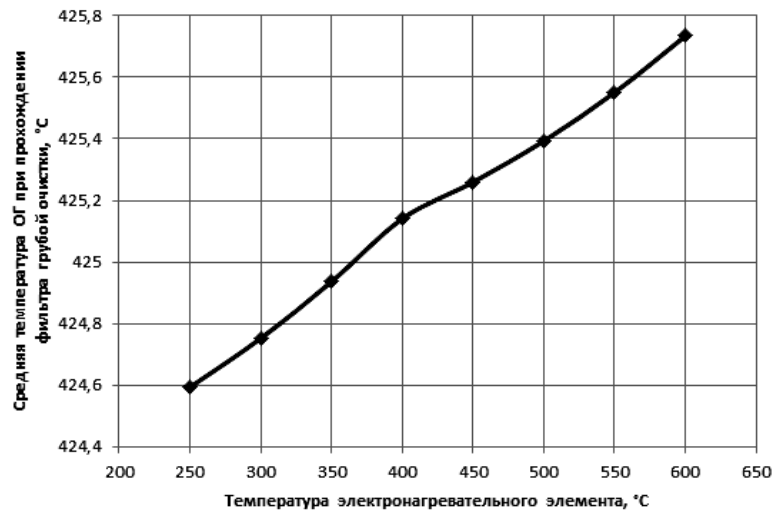
де k – вектор сили опору пористого тіла, який визначається властивостями пористого матеріалу, а саме типом проникності й гідравлічним опором за характерними напрямками проникності. У даній математичній моделі пористі матеріали моделюються з таким типом проникності, як ізотропна – проникність матеріалу однакова в усіх напрямках.

За визначенням $k = -\text{grad}(P)/(\rho V)$, де P, ρ, V – відповідно тиск, щільність і швидкість текучого середовища, grad береться за характерними напрямками проникності. Із запропонованих в COSMOSFloWorks залежностей для визначення вектора сили опору k була обрана залежність:

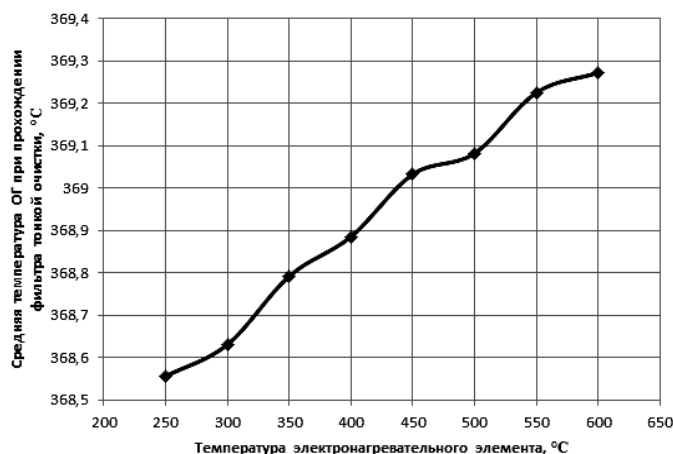
$$k = \Delta P S / (m L), \quad (8)$$

де ΔP – перепад тиску між протилежними сторонами пористого тіла в заданому напрямку; m – масова витрата ВГ у заданому напрямку; S і L – відповідно площа поперечного перерізу; м² і довжина пористого тіла в заданому напрямку, м. Величина k задавалася залежністю ΔP від v , де $v = m / \rho$ – об'ємна витрата ВГ, м³/с і константами S і L .

На першому етапі розробки конструкції прототипу системи очищення ВГ електронагрівальний елемент був спіраллю із дроту, що намотана між перфорованою трубою та сажовим фільтром грубого очищення. Результати моделювання роботи даної конфігурації прототипу представлено на рисунку 2, які відображають залежність температури ВГ у фільтрах грубого й тонкого очищення від температури електронагрівального елемента.



a)



б)

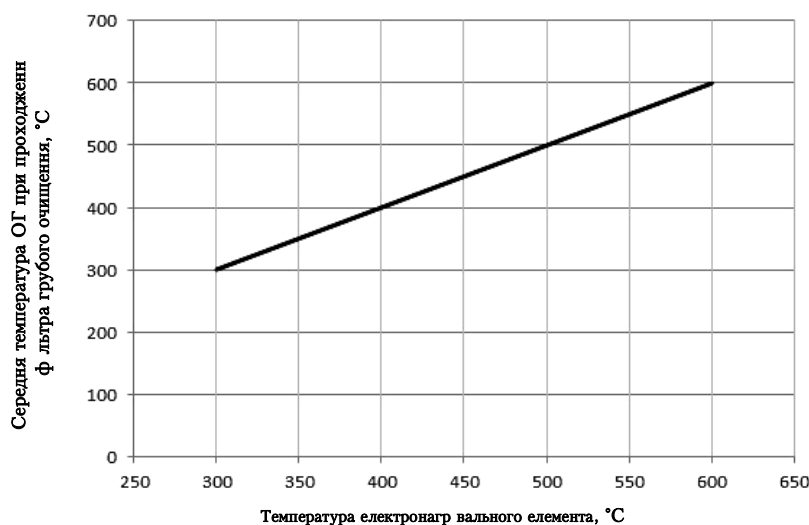
Рис. 2. Результати моделювання роботи прототипу системи очищення ВГ зі спіралевидним електронагрівальним елементом, що відображають залежність температури ВГ у фільтрах грубого (а) й тонкого (б) очищення від температури електронагрівального елемента

Із представлених на рисунку 2 результатів можна зробити висновок, що дана конструкція системи очищення дає можливість лише незначно коректувати температуру ВГ при проходженні ними фільтрів грубого й тонкого очищення, отже при подальшій розробці конструкції даного прототипу має місце виконання таких дій:

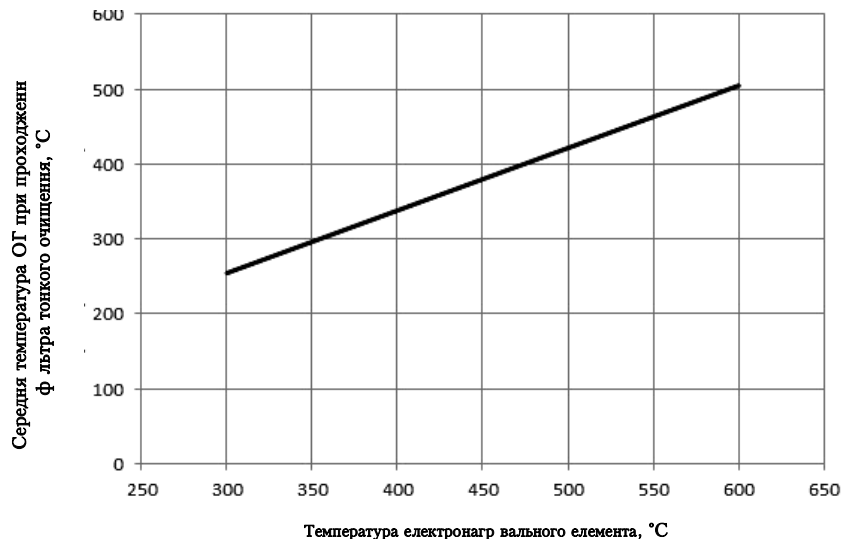
- 1) потрібно внести зміни в конструкцію системи очищення для затримки ВГ у зоні нагрівання;
- 2) збільшити кількість витків нагрівача, оскільки при моделюванні він мав форму спіралі, або замінити його сітчастим матеріалом для збільшення площі контакту з ОГ;
- 3) перенести нагрівальний елемент у зону камери перед фільтрами тонкого очищення.

Зміни в конструкції системи очищення для затримки ОГ у зоні нагрівання призведуть до значного збільшення гідравлічного опору всієї випускної системи автомобіля, що негативно позначиться на показниках роботи ДВЗ. У зв'язку із цим дану пропозицію було виключено.

Для об'єктивності суджень при розробці системи очищення було ухвалено рішення на наступному етапі не вносити істотних змін у конструкцію. Електронагрівальний елемент був замінений на сітчастий матеріал. Запропонований матеріал був сіткою товщиною 2 мм із квадратними гніздами (сторона квадрата 2 мм) через кожні 2 мм. У розрахунковій моделі системи очищення даний матеріал був описаний як пористе тіло, параметри якого були визначені згідно зі способом, описаним в [4]. Результати моделювання роботи прототипу після описаних змін представлено на рисунку 3.



а)



б)

Рис. 3. Результати моделювання роботи прототипу системи очищення ВГ із сітчастим електронагрівальним елементом, що відображають залежність температури ВГ у фільтрах грубого (а) й тонкого (б) очищення від температури електронагрівального елемента

Як видно із представлених на рисунку 3 результатів, дана конструкція системи очищення дозволяє регулювати температуру ВГ при їхньому проходженні через фільтри грубого й тонкого очищення в широкому діапазоні, якого повинно бути достатньо для поліпшення показників його роботи, згідно з [2].

За допомогою розробленої розрахункової моделі системи очищення в програмному комплексі COSMOSFloWorks також будуть визначені показники гідравлічного опору. Після аналізу отриманих даних будуть визначені напрямки в змінах конструкції прототипу для зниження гідравлічного опору системи випуску. Останнє покликане виключити погіршення показників роботи ДВЗ за рахунок мінімізації втрат крутного моменту, розвиненого на колінчатому валу, на подолання опору при випуску ВГ.

Висновки:

1. Описано систему рівнянь, що використовується при розв'язанні задач термодинаміки в програмному комплексі COSMOSFloWorks.
2. Представлено розрахункову модель прототипу системи очищення ВГ.
3. Наведено результати моделювання роботи системи очищення ВГ.
4. За допомогою моделювання роботи системи очищення визначено напрямки в зміні конструкції для модернізації розроблювальної системи.
5. Описано подальші кроки розробки конструкції системи очищення ВГ ДВЗ.

Список використаної літератури:

1. Устройство для очистки отработавших газов двигателя внутреннего сгорания : пат. 2023175 Рос. Федерация : МПК F01N3/02, B01D45/14 / Карминский В.Д., Соломин В.А., Филь Е.С., Калинин С.Ю. ; заявитель Ростовский институт инженеров железнодорожного транспорта ; патентообладатель Карминский В.Д., Соломин В.А., Филь Е.С., Калинин С.Ю. – № 4928455/06 ; заявл. 18.04.1991 ; опубл. 15.11.1994. – 4 с.
2. Спосіб очищення відпрацьованих газів двигуна внутрішнього згорання від частинок сажі : пат. 97611 Україна, МПК F01N 3/027 (2006.1), F01N 3/033 (2006.1) / Ильченко А.В., Балюк В.Ю. ; заявник і патентовласник Житомирський державний технологічний університет. – № а 2011 06793 ; заявл. 30.05.2011 ; опубл. 26.12.2011. – 3 с. : ил.
3. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов и др. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
4. Ильченко А.В. Спосіб визначення гідравлічного опору пористого матеріалу фільтруючого елемента фільтра відпрацьованих газів / А.В. Ильченко, В.Ю. Балюк // Автомобильный транспорт. – 2011. – Вып. 29. – С. 148–151.

БАЛЮК Владислав Юрійович – аспірант кафедри автомобілів та механіки технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- програмно-апаратні комплекси для вимірювань;
- системи автоматизованого проектування;
- підвищення показників екологічної безпеки автомобіля.

E-mail: mailbv@gmail.com

ІЛЬЧЕНКО Андрій Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів та механіки технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- екологічна безпека автомобіля;
- використання альтернативних видів енергії на транспорті.

E-mail: avi_7@ Rambler.ru

МАЯК Микола Михайлович – доктор технічних наук, професор кафедри автомобілів та механіки технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- програмно-апаратні комплекси для вимірювань;
- екологічна безпека автомобіля.

МИХАЙЛЕНКО Василь Миколайович – магістр кафедри автомобілів та механіки технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- підвищення екологічної безпеки автомобіля;
- гідродинамічні процеси у фільтрі-нейтралізаторі.

E-mail: vasilij-mihaylenko@mail.ru

Стаття надійшла до редакції 15.05.2012