

А.В. Ільченко, к.т.н, доц.  
В.П. Кур'ята, аспір.

Житомирський державний технологічний університет

### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВІДКЛАДЕННЯ САЖІ У ВИПУСКНОМУ ТРАКТІ ДВИГУНА АВТОМОБІЛЯ

*Наведено результати експериментальних досліджень модуля пружності першого роду, максимальних напружень розтягу та зрізу сажі як складової шкідливих викидів двигуна автомобіля в діапазоні температур, що мають місце у його випускному тракті. Встановлено зв'язок між температурою відпрацьованих газів та їх швидкістю біля відкритого кінця випускного тракту в повному діапазоні обертів колінчастого вала дизеля. Отримані дані дозволяють описати в аналітичному вигляді процес відкладання сажі у випускному тракті двигуна.*

**Аналіз процесу утворення та руху сажі у випускному тракті двигуна автомобіля.** В Європі на долю автомобільного транспорту припадає значна частка токсичних викидів. З них дрібні частинки складають до 25 % [1].

Під впливом високої температури вуглеводневі утворюють дисперсні частинки. Формування частинок сажі, щодо теорії Теснера, складається з етапів виникнення зародків та їх росту і розвитку. Первинні зародки формуються в результаті процесів виникнення з молекул вільних радикалів і їх взаємодії. Процес сажоутворення відбувається на надмолекулярному рівні і має такі фази [2]:

- формування складних структурних одиниць в рідинній фазі з нагріванням і розпилюванням рідкої фази палива в об'ємі;
- взаємодія складних структурних одиниць з гарячими газами, перехід складних структурних одиниць в кристаліти та їх ріст;
- гетерогенна взаємодія кристалітів з реакційноспроможними газами;
- формування при зіткненні сажевих кристалітів просторових структур та внутрішня перебудова структури кристалітів.

На кожен з цих фаз впливає молекулярна структура палива, якість паливо-повітряної суміші, температура. При високих температурах виникає велика кількість зародків, ріст яких залежить від якості (складу) вуглеводневої сировини. При цьому одночасно інтенсифікуються процеси взаємодії сажевих частинок з реакційноспроможними газами, що сприяє утворенню їх більш дисперсними.

Сажеві частинки на своїй поверхні адсорбують велику кількість вуглеводневих сполук, в тому числі поліциклічні ароматичні вуглеводні і серед них – бенз(б)пірен. Утворення поліциклічних ароматичних вуглеводнів та адсорбція їх на поверхні частинок сажі відбувається внаслідок неповноти згоряння робочої суміші, а також попадання масла в камеру згоряння двигуна [3]. Процес випуску характеризується широким діапазоном швидкостей руху частинок сажі. Середня швидкість їх руху в процесі випуску на номінальному режимі роботи двигуна знаходиться в діапазоні 60–150 м/с, а температура початку процесу випуску відпрацьованих газів двигуна складає 727–927 °С [4] та знижується впродовж випускного тракту і особливо біля відкритого його кінця.

Як механічна складова шкідливих викидів двигуна автомобіля сажа впливає на прозорість атмосфери. Таким чином, **актуальною науковою задачею** є створення досконалих способів фільтрації (уловлювання, осадження тощо) сажі з метою зменшення її впливу на навколишнє середовище. Це потребує вивчення процесу руху та відкладання частинок сажі на стінках випускного тракту двигуна.

**Метою даного дослідження** є побудова математичної моделі відкладання сажі у випускному тракті двигуна автомобіля в усьому діапазоні температур та швидкостей її руху для удосконалення існуючих способів її фільтрації.

Для досягнення мети, були поставлені та вирішені наступні завдання:

- експериментальне визначення модуля пружності першого роду  $E$  від сили взаємодії частинок сажі та температури, напружень зрізу  $\phi_{зр}$  та розтягу  $u_p$  від сили взаємодії частинок сажі та температури;
- дослідження процесу взаємодії частинок сажі зі стінками випускного тракту двигуна автомобіля.

Побудова математичної моделі відкладання сажі на стінках випускного тракту потребує дослідження деяких її механічних властивостей. Механічні властивості, а також пружні постійні визначено шляхом випробувань зразків сажі, яка збиралася за допомогою спеціальних уловлювачів, що встановлювалися на відкритих кінцях випускних трактів дизельних двигунів.

Зразки для дослідження виготовлялися за допомогою матриці і пуансону пресуванням з зусиллями від 150 Н до 3000 Н циліндричної форми діаметром 5 мм. Загалом було використано 420 зразків. Така кількість обумовлена необхідною величиною середньоквадратичного відхилення для аналізу стабільності величин, що вимірювалися.

Випробування на стиск проводилися для знаходження модуля пружності першого роду  $E$ . Для вимірювання зміни розмірів зразків сажі від навантаження використовувався індикатор ИЧ-10, сила взаємодії частинок сажі визначалася динамометрами ДПУ-01-2 з граничними навантаженнями 1000 і 100 Н (ГОСТ 9409-60), нагрів зразків до певних температур здійснювався в муфельній печі МП-2УМ.

На основі отриманих експериментальних даних побудована залежність модуля пружності першого роду  $E$  від сили взаємодії частинок сажі та температури (достовірність апроксимації  $R^2 = 1$ ), МПа:

$$E = (0,07 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot t) \cdot F - 0,01 \cdot t + 7,83, \quad (1)$$

де  $t$  – температура, °С;

$F$  – сила взаємодії частинок сажі, нН.

Перерахунок сили взаємодії частинок сажі зроблений для частинок з діаметром 40 нм в зв'язку з тим, що саме з таким розміром найбільша кількість частинок сажі знаходиться у відпрацьованих газах двигуна автомобіля [2].

Дослідження зразків сажі на зріз проводили для знаходження максимальних напружень  $\phi_{zp}$ , які витримують зразки сажі залежно від сили взаємодії частинок сажі та температури. Перерахунок сили взаємодії частинок сажі також зроблений для частинок з діаметром 40 нм.

Отримані дані дали змогу побудувати рівняння зміни величин напружень зрізу  $\phi_{zp}$  (достовірність апроксимації  $R^2 = 0,97$ ), МПа:

$$\tau_{zp} = (0,002 - 3 \cdot 10^{-6} \cdot t) \cdot F + 10^{-5} \cdot t + 0,02. \quad (2)$$

Для дослідження поведінки сажі в процесі розтягу використовували зразки з силами попереднього пресування 500 та 1000 Н, що відповідає силам взаємодії частинок сажі діаметром 40 нм у зразку 12,5 та 25 нН.

Аналогічно отримано рівняння зміни максимальних напружень розтягу  $\sigma_p$  від температури і сил взаємодії частинок сажі (достовірність апроксимації  $R^2 = 0,99$ ):

$$\sigma_p = 6 \cdot 10^{-5} \cdot F - 0,0002 \cdot t + 0,08, \quad (3)$$

У процесі зіткнення частинки сажі з поверхнею труби випускного тракта кінетична енергія частинки переходить в енергію її деформації. Якщо знехтувати силами тертя в плямі контакту під час деформації частинки, в зоні контакту виникають тільки пружні деформації [5]. Виходячи з закону збереження енергії, кінетична енергія в момент зіткнення дорівнює енергії пружної деформації, яка залежить від сили, з якою діє частинка сажі в момент зіткнення зі стінкою випускного тракту та зближення частинки сажі в процесі зіткнення.

Якщо припустити, що частинка сажі має круглу форму, то зближення  $S$  частинки сажі в результаті зіткнення можна описати відомим рівнянням, м [5]:

$$S = \frac{10^{-2}}{2} \sqrt[3]{\frac{9\Theta^2 F^2}{2 \cdot 10^{-2} R}}, \quad (4)$$

де  $\Theta$  – пружна стала тіл, що взаємодіють, МПа<sup>-1</sup>;

$R$  – середній радіус частинки сажі, м.

Зрозуміло, що площа взаємодії частинки сажі у процесі зближення максимальна, коли  $S = 50\%$ .

Пружна стала для зіткнення частинки сажі й стінки випускного тракту двигуна [5]:

$$\Theta = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}, \quad (5)$$

де  $\mu_1$  і  $\mu_2$  – коефіцієнти Пуассона сажі та сталі;

$E_1$  і  $E_2$  – модулі повздовжньої пружності сажі та сталі, МПа.

За допомогою (4) та (5) знайдено величину зближення залежно від температури та радіальної швидкості частинок сажі різних діаметрів (рис. 1). Як показав аналіз, на величину зближення розміри частинок сажі впливають незначно у порівнянні з їх швидкістю та температурою.

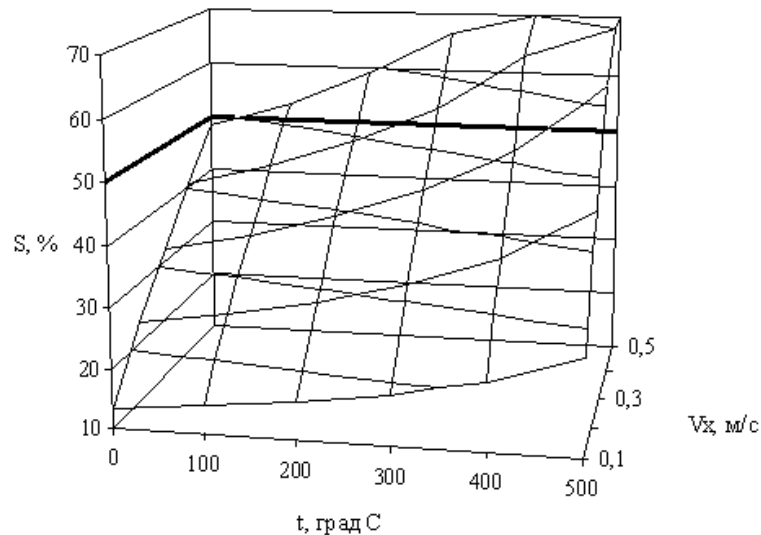


Рис. 1. Зміна величини зближення від температури та радіальної швидкості частинки сажі

Перетини поверхні для деяких значень радіальної швидкості показують, що максимальне зближення  $S = 50\%$  досягається при радіальних швидкостях від  $0,3\text{ м/с}$  до  $0,5\text{ м/с}$  та при температурах від  $44\text{ }^\circ\text{C}$  до  $370\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 2).

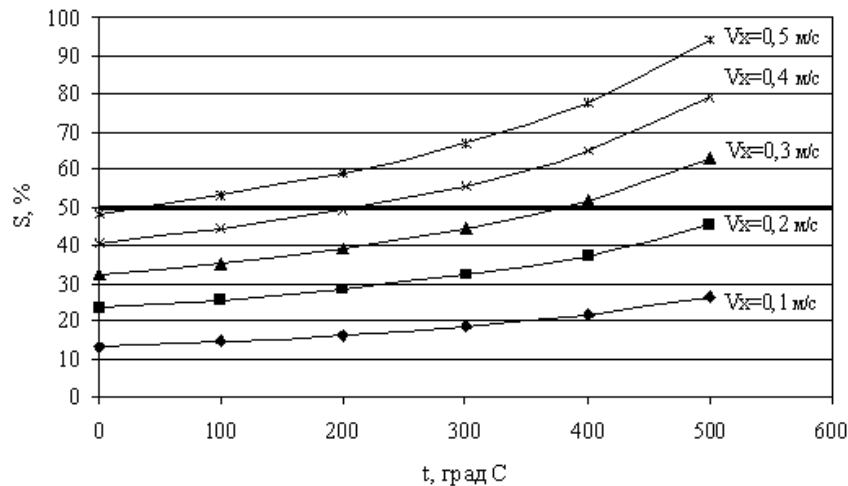


Рис. 2. Перетини поверхні величин зближень у залежності від температури та радіальної швидкості частинки сажі

Очевидно, що величина зближення пов’язана з площею контакту частинки сажі зі стінкою випускного тракта. Максимальна площа контакту ( $100\%$ ) частинки сажі буде при величині зближення саме в  $50\%$ . Нескладний аналіз дозволяє отримати залежність площі контакту від величини зближення частинки сажі,  $\%$ :

$$F_s = -0,04 \cdot S^2 + 4 \cdot S - 0,004. \tag{6}$$

З (6) встановлено, що в діапазоні зближень  $S = 30\text{--}70\%$  площа контакту частинки сажі дорівнює  $F_s = 84\text{--}100\%$ . Неважко дійти висновку, що більш ефективне утримання частинки сажі на стінці випускного тракта буде відбуватися для величин зближень  $S = 50\%$ , а діапазон зближень  $S = 30\text{--}70\%$  можна використовувати для удосконалення існуючих фільтрів, у зв’язку із зміною площі контакту  $F_s$  в межах  $16\%$ .

На основі (1, 4–6) отримано залежність величин температур та швидкостей частинок сажі для величин зближень  $30\text{--}70\%$  (рис. 3).

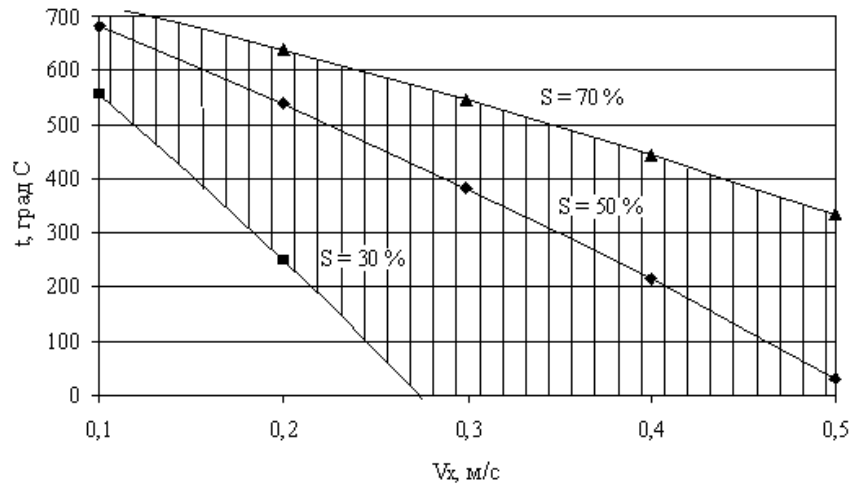


Рис. 3. Залежність температури та швидкості частинки сажі для величини зближень 30–70 % (заштрихована зона відповідає площам контакту 84–100 %)

Апроксимація даних зони, що заштрихована, дозволяє описати залежність температур та швидкостей частинок сажі ( $R^2 = 0,98$ ), °C:

$$t = -1,18 \cdot S^2 \cdot V_x + 174 \cdot S \cdot V_x - 1,33 \cdot S - 7382 \cdot V_x + 924. \quad (7)$$

Експериментальні дослідження температур  $t_g$  біля відкритого кінця випускного тракту та швидкостей відпрацьованих газів  $V$  дизельного двигуна автомобіля Mercedes-Benz 124 (рік випуску – 1989, пробіг – 248000 км) показали, що вони пов'язані між собою таким чином:

$$t_g = 6 \cdot V + 28,03, \text{ °C} \quad (8)$$

За результатами представлених досліджень можна зробити такі **основні висновки**:

1. Побудовано математичну модель відкладання частинок сажі у випускному тракту двигуна автомобіля, яка описує величини зближень  $S$  частинок сажі, що рухаються у випускному тракту двигуна, від їх температур  $t$  та радіальних швидкостей  $V_x$ . Аналіз отриманих даних показує, що на величину зближення  $S$  вагомий вплив здійснюють температура  $t$  та радіальна швидкість  $V_x$ , а розміри частинок сажі впливають незначно. Максимальна площа контакту частинки сажі має місце в діапазоні зближень 30–70 %, які можна використовувати для вдосконалення існуючих фільтрів сажі.

2. Отримані результати експериментальних досліджень можуть бути обрані для описання процесу руйнування шару сажі, що відкладений.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. [www.proagro.com.ua](http://www.proagro.com.ua)
2. Сюняев З.И. Нефтяной углерод. – М.: Химия, 1980. – 271 с.
3. [www.enwl.net.ru](http://www.enwl.net.ru)
4. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1980. – 400 с.
5. Фесик С.П. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Будівельник, 1982. – 280 с.
6. [avtomarket.ru](http://avtomarket.ru)
7. Свойства конструкционных материалов на основе углерода: Справочник / Под ред. В.П. Соседова. – М.: Металлургия, 1975. – 335 с.

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

Наукові інтереси:

- паливна економічність та екологічна безпека автомобільного транспорту;
- мікропроцесорні засоби та комп'ютерні системи в автомобілі;
- діагностика автомобілів.

E-mail: [ilchenko@ztu.edu.ua](mailto:ilchenko@ztu.edu.ua)

КУР'ЯТА Володимир Петрович – аспірант Житомирського державного технологічного університету.  
Наукові інтереси:

- паливна економічність та екологічна безпека автомобільного транспорту;
- альтернативні моторні палива.

E-mail: [amts\\_kv@us.ztu.edu.ua](mailto:amts_kv@us.ztu.edu.ua)

Подано 14.06.2006