

## НАУКОВІ ОСНОВИ АЕРОЗОЛЬНОГО ОЧИЩЕННЯ БІОДИЗЕЛЯ

**В. М. Поліщук, кандидат технічних наук**

**Т. О. Білько, кандидат біологічних наук**

**e-mail: polischuk.v.m@gmail.com**

**Анотація.** Встановлена необхідність видалення із дизельного біопалива після його нейтралізації цитрату калію шляхом водного промивання та подальшого осадження утворених пластинок. Визначені сили, що впливають на частинку (пластинку) в товщі біодизеля: Архімедові сила, сила тяжіння, а також, в певних випадках, бокова сила і сила Магнуса. Проаналізована динаміка дії цих сил при різних режимах осадження: ламінарному, турбулентному, перехідному. Наведене значення коефіцієнту опору для всіх режимів осадження частинки. Здійснене моделювання руху частинки (пластинки) при повільному її осадженні, розглянутий баланс сил, що діють на краплину. Створена математична модель осадження пластинок солей лимонної кислоти та визначена динаміка швидкості та часу їх осадження. Оскільки осадження пластинок водного розчину цитрату калію може продовжуватись протягом від 0,5 до 40 діб, для його пришвидшення рекомендується проводити розпилування в шарі біодизеля крапель води, які приєднуючи до себе частинки цитрату калію осаджують їх на дно реактора. Встановлені раціональні розміри крапель води, призначених для промивання біодизеля, які становлять 500-1000 мкм. При цьому час осадження не перевищує 2 хв.

**Ключові слова:** *нейтралізація, критерій Рейнольдса, цитрат калію, біодизель, швидкість осадження, краплини, сила аеродинамічного опору*

**Постановка проблеми.** При нейтралізації біодизеля водним розчином лимонної кислоти в його шарі з'являються солі (цитрати) калію у вигляді пластинок діаметром 1,5-3 мм, які за формою наближаються до форми циліндра. При технологічному процесі перемішування при нейтралізації біодизеля вони подрібнюються на більш дрібні (діаметром до 50 мкм). Діаметр пластинок цитрату калію більший від їх висоти приблизно в 10 разів.

Утворені пластинки цитрату калію для зниження лужності біодизеля необхідно видалити. Це здійснюється шляхом осадження пластинок цитрату калію [1, 2].

**Аналіз останніх досліджень.** На частинку, що знаходиться у рідині, діють:

- сила тяжіння [3]:

$$P_g = m_q \cdot g = V_q \cdot \rho_q \cdot g ; \quad (1)$$

- Архімедова сила [4]:

$$P_A = V_q \cdot \rho_p \cdot g . \quad (2)$$

де:  $m_q$  – маса частинки, кг;  $V_q$  – об'єм частинки, м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\rho_q, \rho_p$  – густина частинки і рідини, кг/м<sup>3</sup>.

У випадку, якщо  $P_g > P_A$ , частинка буде опускатись в шарі рідини. Сила, що впливає на частинку в цей момент часу, становить:

$$P_g - P_A = V_q \cdot \rho_q \cdot g - V_q \cdot \rho_p \cdot g = V_q \cdot g \cdot (\rho_q - \rho_p) . \quad (3)$$

Під час опускання, на частинку розпочинає свою дію сила опору, що протидіє різниці сил  $P_g - P_A$  [3]:

$$P_o = \zeta \cdot S_q \cdot [(\rho_p v_q^2)/2] , \quad (4)$$

де:  $\zeta$  – коефіцієнт опору;  $S_q$  – площа проекції частинки на горизонтальну площину, м<sup>2</sup>;  $v$  – швидкість руху частинки, м/с.

На початку осадження частинка прискорюється, однак при збільшенні швидкості зростає опір шару рідини, тому знижується прискорення. Швидко процес урівноважується: сили опору середовища  $P_o$  врівноважується силою руху частки  $P_g - P_A$ . Наступає рівновага:  $P_o = P_g - P_A$ .

З даного моменту частинка почне рухатись рівномірно, із постійною швидкістю. Цю швидкість називають швидкістю осадження  $v_{oc}$  і визначається із умови рівності сили, що рухає частку, і сили опору середовища  $P_g - P_A = P_o$  [4]:

$$V_q \cdot g \cdot (\rho_q - \rho_p) = \zeta \cdot S_q \cdot [(\rho_p v_q^2)/2] . \quad (5)$$

Тоді швидкість осадження частинки буде становити:

$$v_{oc} = \sqrt{\frac{2 \cdot V_q \cdot g \cdot (\rho_q - \rho_p)}{\zeta \cdot S_q \cdot \rho_p}} . \quad (6)$$

На коефіцієнт опору  $\zeta$  впливає режим осадження частинки  $\zeta = f(\text{Re})$ , що характеризується числом Рейнольда, яке відображає співвідношення інерційних сил до сил в'язкості (внутрішнього тертя) потоку [4]:

$$\text{Re} = \frac{\rho_p d_q v_{oc}}{\mu_p} , \quad (7)$$

де:  $\text{Re}$  – число Рейнольдса;  $d_q$  – діаметр частинки, м;  $\mu_p$  –

динамічна в'язкість рідини, Па·с.

Число Рейнольдса  $Re$  характеризує головні властивості потоку. Сили інерції вприсяють утворенню місцевих неоднорідностей потоку, сили в'язкості згладжують ці неоднорідності, що призводить до вирівнювання швидкостей [3].

При різних режимах осадження частинки значення числа Рейнольдса  $Re$  відрізняється.

У випадку ламінарного руху (при незначних швидкостях і невеликих розмірах частинок, а також у випадку високої в'язкості середовища) частинка знаходиться в оточенні граничного шару рідини, потік її плавно обтікає. В таких умовах втрати енергії пов'язані лише із здоланням опору тертя. При ламінарному режимі ( $Re < 2$ ) коефіцієнт опору середовища розраховується за формулою [4]:

$$\zeta = 24/Re. \quad (8)$$

Підставивши вирази (8) і (7) в формулу (4), а також з врахуванням того, що площа проекції кулі на площину буде  $S = \pi \cdot d_q^2 / 4$ , опір середовища руху частинки в формі кулі виражений формулою, яка відображає закон Стокса [6]:

$$P_o = 3 \cdot \pi \cdot d_q \cdot \mu_p \cdot v_q. \quad (9)$$

Відповідно до закону Стокса, сила опору, яка впливає на тіло, що має форму кулі, при слабкому русі в необмежено в'язкому середовищі, пропорційна діаметру тіла, швидкості руху і в'язкості середовища. В той же час, закон Стокса використовується лише у випадку ламінарного руху дрібних частинок, які мають форму кулі. Для часток діаметром  $1,6 \cdot 10^{-5} - 3,0 \cdot 10^{-5}$  м неточність визначення буде 1%, а для часток діаметром  $0,16 \cdot 10^{-5} - 7,0 \cdot 10^{-5}$  – 10% [5].

При збільшенні числа Рейнольдса все більший вплив становлять сили інерції, під дією яких від поверхні частинки відривається граничний шар, що призводить до пониження тиску за ним, а також до появи хаотичних місцевих завихрювань у цьому просторі. Це перехідна зона від ламінарного до турбулентного руху, яка характерна при  $Re = 2 - 500$ . Коефіцієнт опору середовища при цьому визначається за формулою [4]:

$$\zeta = 10/Re^{0,5}. \quad (10)$$

При розвинутому турбулентному русі потоку ( $500 < Re < 2 \cdot 10^5$ ) переважає лобовий опір, опір тертя незначний, тому ним можна знехтувати. В турбулентній області коефіцієнт опору становить [4]:

$$\zeta = 0,44 = const. \quad (11)$$

При  $Re \geq 2 \cdot 10^5$  настає криза опору, при цьому значення  $\zeta$  знижується в 4–5 разів [6].

Необхідно відзначити, що приведені значення  $\zeta$  справедливі для частинок, що мають форму кулі, при цьому діаметр кулі значно менший від діаметра місткості, в якій відбувається рух частинки.

Для тіл інших геометричних форм (кубики, плоскі диски, циліндри тощо) дослідні значення  $\zeta$  не піддаються точному узагальненню емпіричними формулами; ряд чисельних значень приведений в технічних довідниках.

З певним наближенням можна встановити значення  $\zeta$  для тіл інших геометричних форм за приведеними вище виразами для сферичних частинок з врахуванням коефіцієнта сферичності  $\varphi_c$ , який представляє відношення поверхні кулі, рівновеликої частинці іншої форми  $S_e$ , до дійсної поверхні даної частинки  $S_u$ , тобто [6]:

$$\varphi_c = S_e / S_u. \quad (12)$$

де:  $\varphi_c$  – коефіцієнта сферичності;  $S_e$  – площа поверхні кулі, рівновеликої до частинки іншої форми, м<sup>2</sup>;  $S_u$  – дійсна площа поверхні частинки, м<sup>2</sup>.

У випадку, коли об'єм частинки неправильної форми становить  $V_u$ , то [6]:

$$S_e = \pi \cdot \left( \sqrt{\frac{6 \cdot V_u}{\pi}} \right)^2 = 4,87 \cdot V_u^{2/3}. \quad (13)$$

Значення  $S_u$  рідко можна визначити шляхом вимірювання, тому найчастіше вона встановлюється експериментально зіставленням перепадів тиску при ламінарному русі рідини через нерухомі шари сферичних та досліджуваних частинок. Тому коефіцієнти сферичності приймається із довідкової літератури. Так, коефіцієнти сферичності частинок циліндричної форми для діапазону  $h = (1/2)d \dots (1/30)d$  наведені в [7]. Їх значення апроксимуються виразом:

$$\varphi_c = (0,2233 \cdot \ln(a) + 0,9869) \text{ при } R^2 = 0,9993. \quad (14)$$

де:  $a$  – множник, значення якого знаходиться в межах від 1/2 до 30.

При ламінарному режиму коефіцієнт опору частинки несферичної форми становить [6]:

$$\zeta = \frac{28,47}{\text{Re}_e \cdot \lg\left(\frac{\varphi_c}{0,065}\right)}. \quad (15)$$

де:  $\text{Re}_e$  – еквівалентний критерій Рейнольдса.

Еквівалентний критерій Рейнольдса розраховується за виразом:

$$\text{Re}_e = \frac{\rho_p d_e v_{oc}}{\mu_p}, \quad (16)$$

де:  $d_e$  – еквівалентний діаметр рівновеликої кулі, м; він розраховується за виразом [6]:

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V}{\pi}}. \quad (17)$$

Для турбулентного руху коефіцієнт опору частинки несферичної форми встановлюється як [6]:

$$\zeta = 5,31 - 4,87 \cdot \varphi_c. \quad (18)$$

При перехідному режимі для частинок несферичної форми рекомендуються використовувати значення  $\zeta$ , представлені і [6], які також апроксимуються виразом:

$$\zeta = 19,848 \cdot \text{Re}_e^{-0,3858} \text{ при } R^2 = 0,899. \quad (19)$$

Практично виразом (6) скористатись важко, тому що до неї входить коефіцієнт опору, залежний від критерію Рейнольдса та режиму руху самої частинки. Разом із тим, критерій Рейнольдса і режим руху частинки, залежні від швидкості осадження.

Тому **метою** наших **досліджень** є розробка математичної моделі осадження пластинок водного розчину цитрату калію, яка дозволить визначити та здійснити оптимізацію швидкості і часу їх осадження.

**Результати досліджень.** У зв'язку із складністю застосування виразу (6), осадження частинок в шарі рідини доцільно простежити в динаміці. Згідно [3], вираз, що описує рух частинки в товщі рідини, записується через систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} m_q \frac{dv_q}{dt} = P_o - (P_g - P_A) \\ \frac{dl_\kappa}{dt} = v_q \end{cases}. \quad (20)$$

де:  $l_\kappa$  – відстань, яку проходить частинка під час осадження в шарі біодизеля (довжина каналу), м.

Підставивши вирази (3) і (4) в формулу (20), буде отримана система диференціальних рівнянь, що описує осадження частинок в шарі нерухомої рідини, поміщеної в вертикальному каналі діаметром  $D_\kappa$ :

$$\begin{cases} \frac{dv_q}{dt} = \frac{\zeta \cdot S_q \cdot \rho_p v_q^2 \cdot \left(1 - \left(\frac{d_q}{D_\kappa}\right)^2\right)}{2 \cdot m_q} - \frac{V_q \cdot g \cdot (\rho_q - \rho_p)}{m_q} \\ \frac{dl_\kappa}{dt} = v_q \end{cases}. \quad (21)$$

Інколи при русі рідини потрібно також враховувати вплив на частинку бокових сил: сили  $P_1$ , що виникає при наявності градієнту швидкості потоку, та сили Магнуса  $P_2$ .

Вирішенням системи рівнянь (21) одержана динаміка зміни в часі швидкості осадження частинки, її критерію Рейнольдса і час осадження.

Динаміка швидкості осадження частинок водного розчину солі лимонної кислоти в часі приведена на рис. 1. Як видно із табл. 1, пластинки цитрату калію з діаметром 10-100 мкм осаджуються в ламінарному режимі, тому що  $Re < 2$ .

### 1. Параметри осадження пластинок водного розчину солей лимонної кислоти в товщі біодизеля.

Показник	Діаметр пластинки, мкм		
	10	50	100
Re	$2,39 \cdot 10^{-13}$	$7,47 \cdot 10^{-10}$	$2,39 \cdot 10^{-8}$
$v_{oc}$ , м/с	$2,25 \cdot 10^{-7}$	$7,82 \cdot 10^{-6}$	$3,125 \cdot 10^{-5}$
$t_{oc}^*$ , діб	37	1,48	0,37

\* час осадження пластинок водного розчину солей лимонної кислоти в шарі біодизеля висотою 1 м.

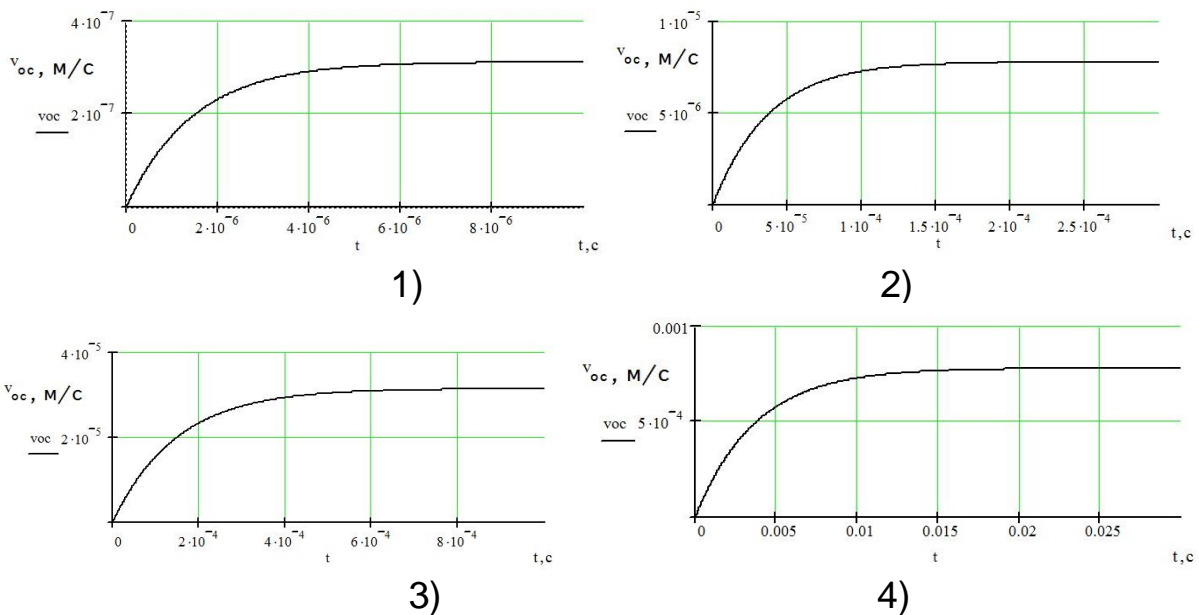


Рис. 1. Швидкість осадження пластинок (відношення висоти до діаметра 1/10) водного розчину цитрату калію в шарі біодизеля при діаметрі пластинки: 1 – 10 мкм; 2 – 50 мкм; 3 – 100 мкм; 4 – 500 мкм.

Як видно із рис. 1, швидкість осадження пластинок цитрату калію збільшується поступово. Сила тяжіння, що впливає на пластинку, поступово стає більшою за силу опору і архімедову силу, швидкість осадження при цьому зростає за законом, близьким до

лінійного. Однак починаючи з певного моменту при зростанні сили опору уповільнюється прискорення пластинки і в деякий момент, коли сила тяжіння зрівноважується силою опору і архімедовою силою, швидкість осадження стабілізується.

Якби пластини водного розчину солей лимонної кислоти зберігали той же розмір, який вони мали під час нейтралізації біодизеля розчином лимонної кислоти в воді (0,5–1,5 мм), час осадження в шарі біодизеля висотою 1 м становив би від 2–20 хв. Однак під час нейтралізації біодизеля пластинки розбиваються механічною мішалкою на більш дрібні, час осадження яких значно збільшується. І якщо час осадження пластинок діаметром 100 мкм становить приблизно 10 год., то пластинки діаметром 50 мкм осідають вже протягом 1,5 діб, а пластинки діаметром 10 мкм – до 40 діб. Ситуація також ускладнюється тим, що є широка полідисперсність частинок водного розчину солей лимонної кислоти в біодизелі після нейтралізації, що призводить до неповного очищення біодизеля від КОН.

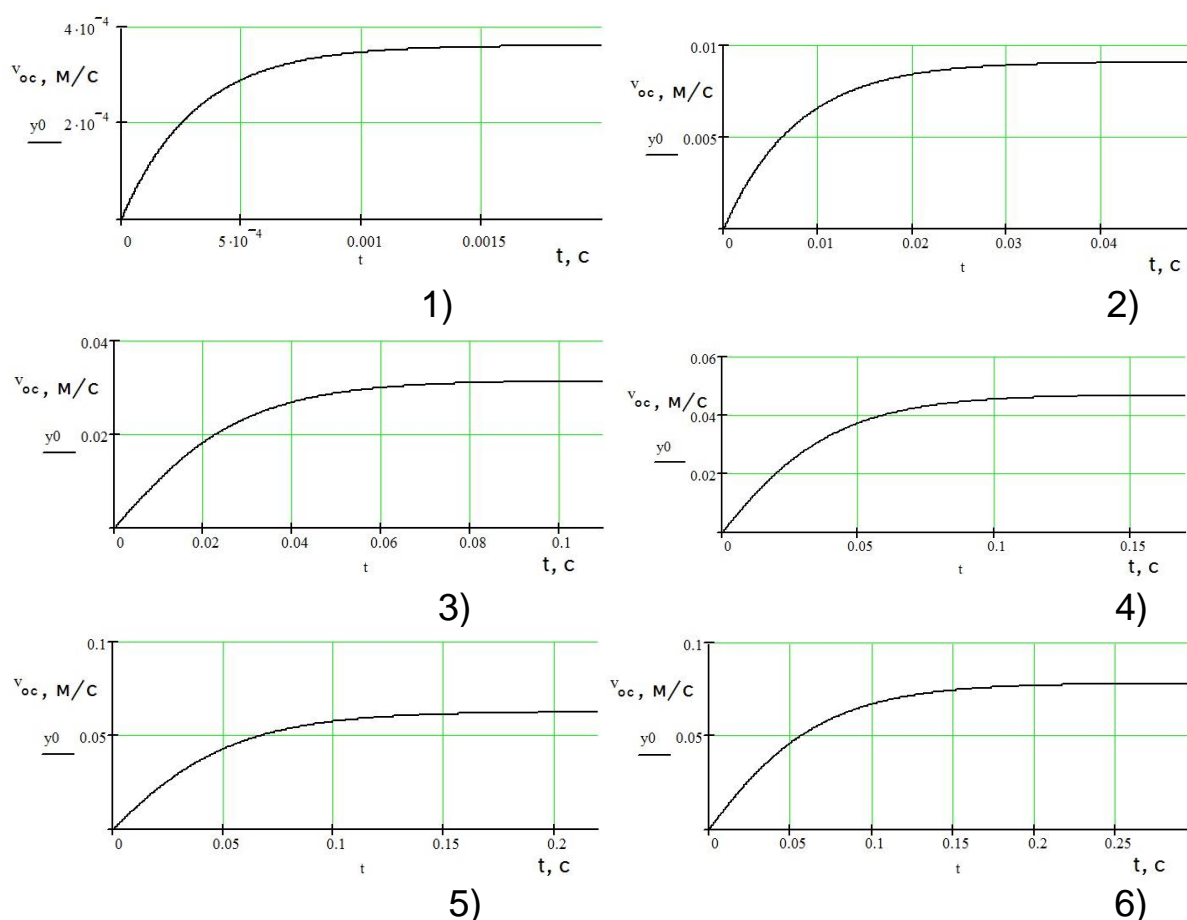


Рис. 2. Швидкість осідання краплин води в товщі біодизеля при їх діаметрі: 1 – 100 мкм; 2 – 500 мкм; 3 – 1000 мкм; 4 – 1500 мкм; 5 – 2000 мкм; 6 – 2500 мкм.

Як спосіб збільшення ефективності очищення біодизеля є його промивання водою розбризкування над поверхнею біодизеля із наступним осадженням краплин на дно місткості. Під час осадження краплини води з'єднуються із пластинками цитрату калію і захоплюють їх із собою.

Динаміка швидкості осадження крапель води в часі без наявності початкової швидкості приведена на рис. 2. Із табл. 2 видно, що краплини діаметром від 2 мкм осідають в ламінарному режимі ( $Re < 2$ ), якщо ж діаметр краплин перевищує 2000 мкм їх осідання відбувається в перехідному режимі.

## 2. Показники осідання краплин води в шарі біодизеля.

Показник	Діаметр пластинки, мкм					
	100	500	1000	1500	2000	2500
$Re$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	0,01	0,24	0,8	1,9	3,7
$v_{oc}$ , м/с	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-3}$	0,031	0,047	0,062	0,078
$t_{oc}^*$ , хв.	46,3	1,8	0,54	0,35	0,27	0,21

\* час осадження крапель води в шарі біодизеля висотою 1 м.

Механізм дій сил тяжіння, Архімеда і опору на краплину аналогічний до дій цих сил на пластинку циліндричної форми, що описаний вище.

### Висновки

1. Осадження пластинок водного розчину солей лимонної кислоти може продовжуватись протягом від 0,5 до 40 діб. Тому для його пришвидшення рекомендується проводити розпилювання в шарі біодизеля крапель води, які приєднуючи до себе частинки цитрату калію осаджують їх на дно реактора.

2. Починаючи із діаметра крапель води 1000 мкм подальше збільшення їх діаметру не суттєво впливає на швидкість осадження. Тому рекомендовано здійснювати промивання біодизеля розпилюванням в ньому крапель води діаметром 500–1000 мкм. При цьому час осадження не перевищує 2 хв. У випадку зниження дисперсності крапель швидкість їх осадження суттєво збільшується.

### Список літератури

1. Поліщук В. М., Мельничук М. Д., Дубровін В. О., Мироненко В. Г. Перспективи застосування дизельних біопалив в народному господарстві // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування. Серія: техніка та енергетика АПК. 2010. № 144. Ч. 1. С. 33—43.
2. Поліщук В. М., Білик І. О., Драгнєв С. В., Поліщук О. В. Проблеми розвитку виробництва дизельного біопалива в Україні // Продуктивність агропромислового виробництва. 2007. Вип. 6. С. 110—117.



3. Зуев Ф. Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. Москва. 1976. 344 с.
4. Шалугін В. С., Шмандій В. М. Процеси та апарати промислових технологій. Київ. Центр учбової літератури. 2008. 392 с.
5. Ветошкин А. Г. Теоретические основы защиты окружающей среды. Пенза. ПГАСА. 2002. 290 с.
6. Гальперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Москва. Химия. 1981. 812 с.
7. Свойства материалов // Prosushka [Электронный ресурс]. 2017. Режим дост. к журн.: <http://www.prosushka.ru/53-svoystva-sypuchix-materialov.html>. Дата дост. 07/04/2017.

### References

1. Polishchuk V. M., Melnychuk M. D. Dubrovin V. A., Mironenko V. G. (2010). Perspektyvy zastosuvannya dyzelnykh biopalyv v narodnomu hospodarstvi [Prospects of biodiesel in the economy]. Scientific Bulletin of National University of Life and Environmental Sciences. 144-I. 33-43.
2. Polishchuk V. M., Bilyk I. A., Dragnev S. V., Polishchuk A. V. (2007). Problemy rozvytku vyrobnytstva dyzelnoho biopalyva v Ukraini [Problems for biodiesel production in Ukraine]. Performance agroindustrial production. 6. 110-117.
3. Zuev F. G. (1976). Pnevmaticheskoe transportirovanie na zernopererabatyivayuschih predpriyatiyah [Pneumatic transportation at grain processing enterprises]. Moscow. Ear. 344.
4. Shaluhin V. S., Shmandiy V. M. (2008). Protsesy ta aparaty promyslovykh tekhnolohii [Industrial processes and equipment technologies]. Kyiv. Ukraine. Center of educational literature. 392.
5. Vetoshkin A. G. (2002). Teoreticheskie osnovyi zaschityi okruzhayushey sredyi [Theoretical basis of environmental protection]. Penza. Russia. PGASA. 290.
6. Galperin N. I. (1981). Osnovnyie protsessyi i apparaty himicheskoy tehнологii [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow. Chemistry, 812.
7. Prosushka. Available at: <http://www.prosushka.ru/53-svoystva-sypuchix-materialov.html>.

## НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ АЕРОЗОЛЬНОЙ ОЧИСТКИ БИОДИЗЕЛЯ

**В. Н. Полищук, Т. А. Билько**

**Аннотация.** Установлена необходимость удаления из дизельного биотоплива после его нейтрализации цитрата калия путем водяной промывки и дальнейшего осаждения образованных пластинок. Определены силы, влияющие на частицу (пластинку) в толще биодизеля: Архимедова сила, сила притяжения, а также в определенных случаях, боковая сила и сила Магнуса. Проанализирована динамика действия этих сил при различных режимах осаждения: ламинарном, турбулентном, переходном. Приведены значение коэффициента сопротивления для всех режимов осаждения частицы. Осуществлено моделирование движения частицы (пластинки) при медленном ее осаждении,

рассмотрен баланс сил, действующих на каплю. Создана математическая модель осаждения пластинок солей лимонной кислоты и определена динамика скорости и времени их осаждения. Поскольку осаждение пластинок водного раствора цитрата калия может продолжаться в течение от 0,5 до 40 суток, для его ускорения рекомендуется проводить распыление в слое биодизеля капель воды, которые присоединяя к себе частицы цитрата калия осаждают их на дно реактора. Установлены рациональные размеры капель воды, предназначенных для промывки биодизеля, которые составляют 500-1000 мкм. При этом время осаждения не превышает 2 мин.

**Ключевые слова:** *нейтрализация, критерий Рейнольдса, цитрат калия, биодизель, скорость осаждения, капли, сила аэродинамического сопротивления*

## **SCIENTIFIC BASES OF AEROSOL CLEANING OF BIODIESEL**

**V. M. Polishchuk, T. O. Bilko**

**Abstract.** *The necessity of removal of potassium citrate from diesel biofuel after its neutralization by water washing and further precipitation of the formed plates is established. The forces influencing the particle (plate) in the thickness of biodiesel are determined: Archimedean force, gravitational force, and also in certain cases, lateral force and Magnus force. The dynamics of the action of these forces under different deposition regimes is analyzed: laminar, turbulent, transitional. The value of the coefficient of resistance for all modes of particle deposition is given. Simulation of the motion of a particle (plate) is carried out with its slow deposition, the balance of forces acting on a droplet is considered. A mathematical model for the precipitation of slabs of citric acid salts has been developed and the dynamics of the rate and time of their precipitation have been determined. Since the precipitation of plates of an aqueous solution of potassium citrate can last for 0,5 to 40 days, it is recommended to spray the droplets of water in the biodiesel layer to accelerate it, which, by adding potassium citrate particles, precipitate them to the bottom of the reactor. The rational sizes of water droplets intended for washing biodiesel, which are 500-1000 microns, are established. The deposition time does not exceed 2 min.*

**Key words:** *neutralization, Reynolds criterion, potassium citrate, biodiesel, sedimentation rate, drop, aerodynamic drag force*