

УДК 628.32

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ОЧИЩЕННЯ  
НАФТОВМІСНИХ СТИЧНИХ ВОД ЗАЛІЗНИЦІ**

Асист. Н.Г. Онищенко, кандидати техн. наук С.І. Епштейн, С.Ю. Нікулін

**ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОЧИСТКИ  
НЕФТЕСОДЕРЖАЩИХ СТОЧНЫХ ВОД ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ**

Асист. Н.Г. Онищенко, кандидати техн. наук С.И. Эпштейн, С.Е. Никулин

**RESEARCHES AND DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODEL OIL CONTAINING  
SEWERS WATERS TREATMENTS RAILWAY**

Assist. N.G. Onischenko, candidates of techn. sciences S.I. Epstein, S.E. Nikulin

*Наведено аналіз лабораторних досліджень і промислових технологічних випробувань як окремо удосконаленого модульного пристрою, так і в комбінації з модернізованим електричним апаратом. Виконано технологічні випробування комбінованого методу очищення стічних вод миття цистерн вагонного депо та оцінку отриманих результатів. Розроблено математичну модель на базі гіпотези про укрупнення краплинок у коагулюючому завантаженні в основному за рахунок градієнтної коагуляції. Результати розрахунків підтверджують справедливість прийнятих у моделі припущень.*

***Ключові слова:** нафтові забруднення, завислі частинки, комбінований метод, очищення, електроапарат, модульний пристрій.*

*Приведен анализ лабораторных исследований и промышленных технологических испытаний как отдельно усовершенствованного модульного устройства, так и в комбинации с модернизированным электрическим аппаратом. Выполнены технологические испытания комбинированного метода очистки сточных вод мойки цистерн вагонного депо и оценка полученных результатов. Разработана математическая модель на базе гипотезы об укрупнении капель в коагулирующей загрузке в основном за счет градиентной коагуляции. Результаты расчетов подтверждают справедливость принятых в модели предположений.*

**Ключевые слова:** нефтяные загрязнения, взвешенные частицы, комбинированный метод, очистка, электроаппарат, модульное устройство.

*The ground of necessity of further improvement of equipment is carried out for sewers waters treatment from rough-, finelydisperse oil contaminations and weighed particles. For areas steaming and washing tanks railway from oil, washing vehicles, database storage of fuels and lubricants. Sewage water from steaming railroad tank to the parameters that would allow re-use of treated water is an urgent task of improving the operational efficiency of treatment facilities on the railway by reducing the unit cost of water for this workflow. The analysis of laboratory researches and industrial technological tests of the separately improved module device is resulted, so in combination with the modernized electric vehicle. The technological tests of the combined method of sewers waters treatment are executed washings of cisterns of carriage depot and estimation of the got results. A mathematical model based on the hypothesis of widening the load drops in the coagulating mainly due to the gradient of coagulation. The calculation results confirm the validity of the assumptions made in the model.*

**Keywords:** oil pollution, suspended particles, combined method, treatment, Electric modular unit.

**Вступ.** Існує велика кількість джерел утворення стічних вод, які містять грубо-, дрібнодисперговані нафтові забруднення та завислі речовини. Наприклад, ділянки пропарювання та миття цистерн залізниці від нафтопродуктів; миття автотранспорту; бази зберігання паливно-мастильних матеріалів; замазучені стоки ТЕС тощо. Тому розроблення і впровадження ефективних компактних установок невеликої (1-25 м<sup>3</sup>/год) продуктивності є актуальною проблемою. Так, очищення стічної води від пропарювання цистерн залізниці до параметрів, які б дозволяли використовувати очищену воду повторно, є актуальним завданням підвищення ефективності експлуатації очисних споруд на залізниці за рахунок зменшення питомих витрат води на цей технологічний процес.

**Аналіз публікацій.** Найбільш ефективними пристроями для очищення стічних вод від тяжких мінеральних завислих часток і грубодиспергованих нафтопродуктів є тонкошарові нафтоуловлювачі різних модифікацій [1, 2]. У найбільш досконалій конструкції двосекційного тонкошарового нафтовловлювача застосовуються нерухомі металеві або пластикові тонкошарові модулі [3]. Застосування у схемі очищення додаткових коалесцентних фільтрів з зернистим

завантаженням дозволяє підвищити ефект очищення від дрібно- і середньодиспергованих, а також частини емульсованих нафтозабруднень [3, 4]. Найбільш досконалими спорудами для глибокого доочищення стічних вод після нафтовловлювачів можуть слугувати коалесцентні фільтри вертикального та горизонтального типу французької фірми "Дегремон" [5]. Як коалесцентне завантаження застосовуються поліетилен, поліпропілен, поліуретан та інші полімерні матеріали у вигляді гранул, зерен і т. д.

Загальним недоліком відомих схем при очищенні нафтовмісних стічних вод з нафтовловлювачами та фільтрами, у тому числі і коалесцентними, є проблема біозростань на всіх стадіях очищення, які суттєво погіршують поточні технологічні показники роботи очисного обладнання, зокрема напірних фільтрів. Відомим є апарат для електрохімічного очищення води та засіб стабілізаційного очищення води, основним призначенням яких є пом'якшення води та попередження утворення щільних солевих відкладень [6, 7]. Але звісно, що при використанні електричної обробки води (електрокоагуляція, гальванокоагуляція, електростабілізаційна обробка води) з розчинними або нерозчинними електродами

спостерігається побічний ефект зменшення швидкості біозростань [8-13]. Крім того, загально відомо, що в результаті дії електричного розряду малої потужності вода практично очищується від бактеріального забруднення [14]. Відомі різні математичні моделі процесу фільтрації. Фундаментальний вклад у теорію фільтрування пористими матеріалами внесли вітчизняні науковці Мінц Д.М. [15, 16], Жужіков В.М. [17], Романков П.Г. [18] та ін. Процес моделювання фільтрування зокрема з застосуванням плаваючого завантаження (ФПЗ) докладно вивчений Журбою М.Г., Гиролем Н.Н. та ін. [19, 20, 21, 22, 23]. ФПЗ на підприємствах чорної металургії займалися Мороз С.І. і Мягкий Д.Д. [24, 25].

Відомими є роботи, де автори дослідили вплив таких параметрів, як швидкість фільтрування, діаметр та висота завантаження з гранульованого полістиролу і поліетилену, на величину коалесценції дрібно- і середньодиспергованих (20-30 мкм) краплинок нафтових забруднень [26, 27]. Однак отримані результати збільшення розмірів краплинок у 2-2,5 разу до 40-55 мкм недостатні для забезпечення потрібної якості очищеної води. У наведених прикладах напрямок фільтрації через ФПЗ – знизу догори. У роботах [28, 29] наведено результати досліджень і розроблено математичну модель очищення нафтовмісних стічних вод у коалесцентному фільтрі з напрямком фільтрації згори-вниз з застосуванням кварцового гідрофобізованого піску з медіанним діаметром 1,0 мм. Наведена в роботі модель отримана в результаті статистичної обробки даних експериментів для таких умов: наявність завислих речовин – менше 100 мг/л; концентрація нафтопродуктів ~ 1000 мг/л; тиск у фільтрі 0,2-0,8 м; швидкість фільтрування – 1-4 м/год. На жаль, наведена модель не дозволяє скласти теоретичну уяву з впливу різних факторів на процес коалесценції. Проте дозволяє розрахувати раціональні значення експлуатаційних і конструктивних параметрів фільтроелементів з кварцовим піском. Аналіз указаних та інших робіт, наприклад Шеренкова І.А., Архипова О.В. [30, 31], показує, що якщо технологічні аспекти та математичне моделювання процесу фільтрування через ФПЗ в основному набуло статусу вивченої проблеми і потребує лише уточнення для різних умов

застосування, то для процесу коалесцентної контактної фільтрації через ФПЗ та інші матеріали вирішення цих завдань залишається актуальним до цього часу.

**Мета і постановка завдання.** Мета підвищення ефективності очищення води в основному від нафтозабруднень можна вирішити за допомогою комбінованого методу очищення нафтовмісних стічних вод, який передбачає послідовну обробку стічних вод в електричному апараті та модернізованому модульному пристрої, а саме попередження біозростань за допомогою електрообробки, а потім доочищення в модульному пристрої, де суміщаються процеси тонкошарового відстоювання більш великих нафтових краплинок у тонкому шарі і сепарації з ефектом коалесценції більш дрібних, у тому числі частини емульгованих, нафтових умовних краплинок при фільтрації води через плаваюче завантаження.

Мета повинна була бути досягнута за рахунок вирішення таких завдань: проведенням лабораторних експериментів і досліджень на установці очищення в промислових умовах; теоретичне осмислення процесу коалесценції, а саме розроблення математичної моделі процесу коалесценції для запропонованих умов, яка дозволить узагальнити результати досліджень і спрогнозувати ефективність очищення при зміні основних параметрів процесу.

**Лабораторні та промислові дослідження.** Авторами раніше були виконані дослідження в лабораторних і промислових умовах впливу електричної обробки на інтенсивність біозростань як окремо, так і в комбінації з модульним пристроєм [32, 33, 34]. У дослідженнях використано модернізований електричний апарат з нерозчинними сталевими і графітовими електродами. Позитивні результати отримано виключно при застосуванні комбінації удосконалених пристроїв [35]. Найбільша ефективність очищення від нафтопродуктів і завислих твердих часток 75-95 % та 83-98 % відповідно отримано при таких показниках: щільність струму на електродах - 4-25 А/м<sup>2</sup>, імпульсний принцип дії електрообробки, а саме питома тривалість переривання подачі напруги на пластини електродів 250-350 мс/с; швидкість фільтрування в модулях до 10-15 м/год. Виконані в промислових умовах випробування модульного пристрою здійснювалося в умовах

напірної подачі води з тиском у діапазоні 0,1-0,25 МПа. Комбінація пристроїв дозволила отримати воду II і III (небіогенна і допустимо біогенна) груп при 2 і 3 балах біогенності відповідно згідно зі стандартною методикою [36]. Тобто отримана вода зі слабким і середнім ступенем біогенності.

Останні позитивні результати лабораторних експериментів отримано при застосуванні в якості плаваючого завантаження коалесцентного фільтра модульного апарата зернистого матеріалу – підготовленого антрациту-фільтранта (ПАФ) крупністю зернин 0,8-1,2 мм, який вироблено за допомогою сучасної технології [37].

Конструкція апарата (модульного пристрою), яка випробовувалася в промисловодослідній установці, розроблена авторами і співавторами і захищена патентом України на винахід [38].

Таким чином, проведені раніше дослідження стали основою для проведення досліджень комбінованого методу очищення стічних вод на промисловодослідній установці очищення стічної води вагонного депо – очищення цистерн від нафтопродуктів (пропарювання цистерн і гідрозмивання) з метою визначення оптимальних технологічних параметрів роботи останньої [39].

Останні результати досліджень у промислових умовах отримано виключно для оптимальних діапазонів параметрів: переривання дії електростатичного поля 250 мс/с і питома навантаження на електроди 4 і 10 А/м<sup>2</sup>, при яких спостерігаються мінімальні питомі витрати електроенергії, і достатня ефективність (95,9-97,5 %) зменшення біозростання порівняно з випробуваннями без електрообробки. Отримані результати підтвердили ефективність запропонованої установки при застосуванні в якості плаваючого завантаження коалесцентного фільтра модульного апарата зернистого матеріалу – підготовленого антрациту-фільтранта (ПАФ) крупністю зернин 0,8-1,2 мм (медіанний діаметр ~ 1 мм, пористість ~ 28 %) для витрат стічної води в діапазоні 1,5-18 м<sup>3</sup>/год, середньої тривалості фільтроциклу між промивками модулів – 30-32 год, швидкості фільтрування 0,95-13 м/год [8].

Нижче на рис. 1-3 наведено усереднені результати аналізу експериментів у промислових умовах у вигляді графіків залежності ефективності очищення стічних вод

від нафтопродуктів, завислих речовин та швидкості фільтрування від тривалості випробувань, яка в сумі складала 48 діб (1152 год) при різних витратах стічної води.

Аналіз приведених графіків свідчить про таке:

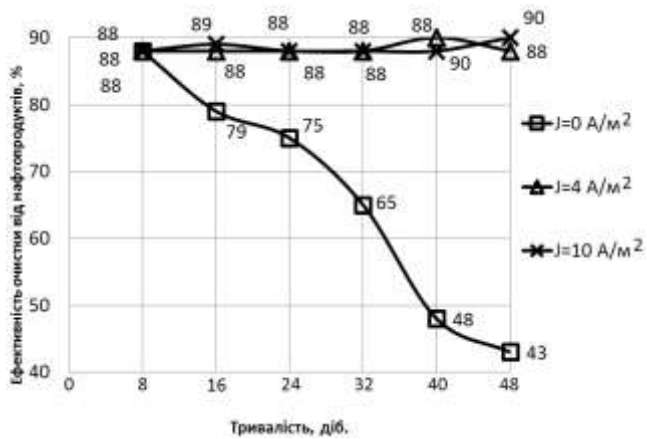
1. Ефективність очищення стічних вод від нафтопродуктів при витратах стічної води 1,5; 10 та 18 м<sup>3</sup>/год є стабільною при електричній обробці (питоме навантаження 4 і 10 А/м<sup>2</sup>) стічної води і становить 88-94 % протягом всього періоду випробувань – 48 діб (1152 год). За відсутності електрообробки ефективність очищення постійно зменшується від 88-90 до 43-56 % наприкінці періоду випробувань.

2. Ефективність очищення стічних вод від завислих речовин при витратах стічної води 1,5; 10 та 18 м<sup>3</sup>/год є стабільною при електричній обробці (питоме навантаження 4 і 10 А/м<sup>2</sup>) стічної води і становить 71-86 % протягом всього періоду випробувань – 48 діб (1152 год). За відсутності електрообробки ефективність очищення постійно зменшується від 71-82 до 47-56 % наприкінці періоду випробувань.

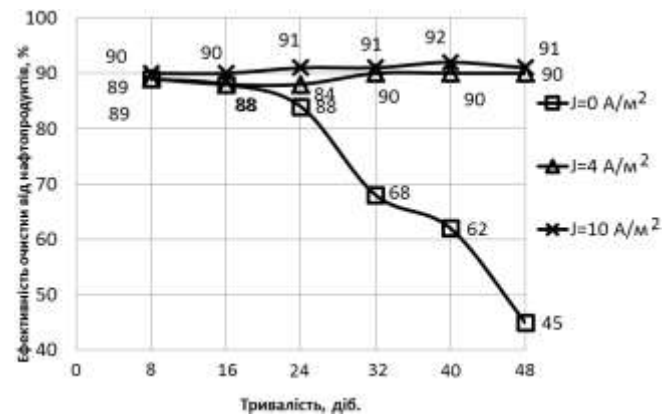
3. Швидкість фільтрування при витратах стічної води 1,5; 10 та 18 м<sup>3</sup>/год є стабільною при електричній обробці (питоме навантаження 4 і 10 А/м<sup>2</sup>) стічної води і становить 0,95-1,0; 6,0-7,0 та 11-13 м/год відповідно протягом всього періоду випробувань – 48 діб (1152 год). За відсутності електрообробки швидкість фільтрування постійно зменшується від 0,95; 7,0 та 12 м/год відповідно до 0,4; 4,0; 5,0 м/год наприкінці періоду випробувань.

**Розроблення математичної моделі.** Розглянемо загальні умови процесу коалесценції. Передбачається, що при пропусканні води, що очищається, через коалесціююче завантаження краплинки мастила, що знаходяться у воді, укрупнюються і потім з достатньо високою ефективністю можуть бути виділені за допомогою відстоювання, фільтрування або флоатції.

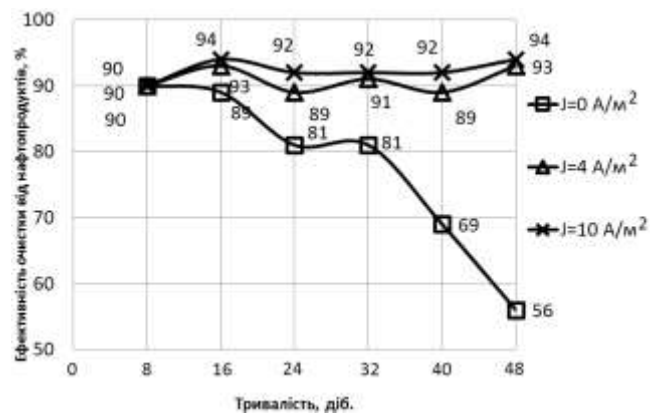
Слід, проте, зазначити, що фізична картина цього процесу не цілком зрозуміла, що ускладнює побудову його математичної моделі. Можна подати декілька фізичних моделей даного явища. Не виключено, що в реальності всі вони мають місце, і описувані ними фізичні процеси відбуваються одночасно.



(а)

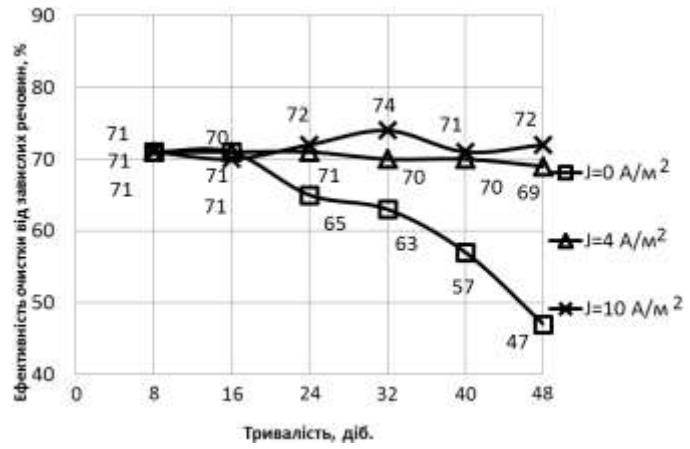


(б)

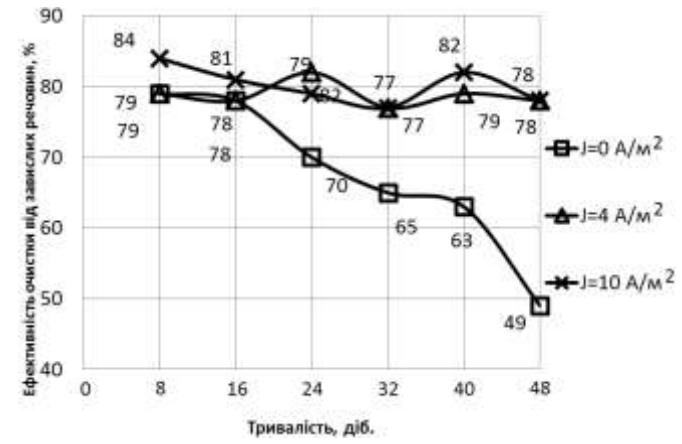


(в)

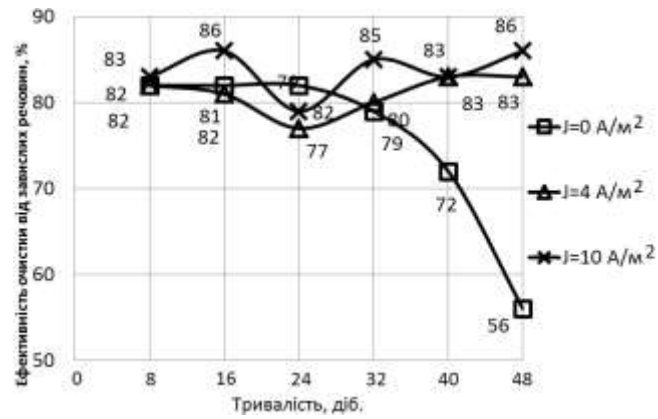
Рис. 1. Эффективность очищения сточных вод від нафтопродуктів при витраті:  
а – 18 м³/год; б – 10 м³/год; в – 1,5 м³/год



(a)

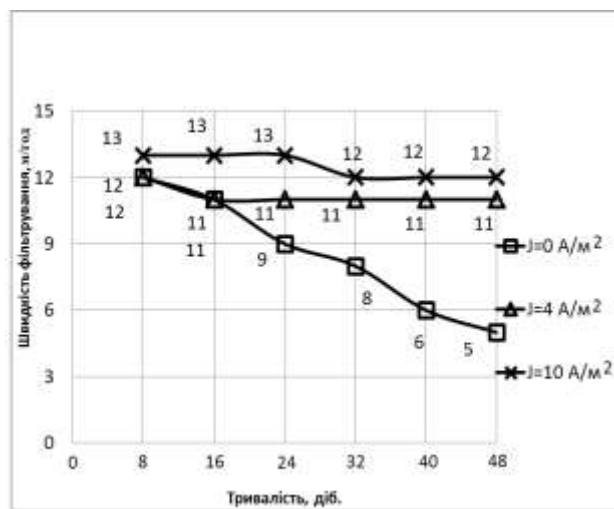


(б)

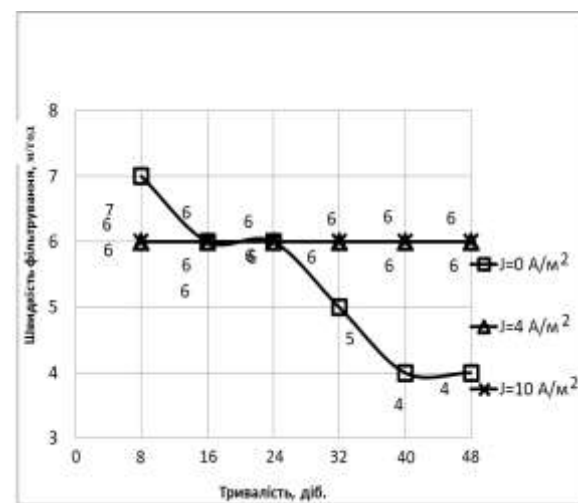


(в)

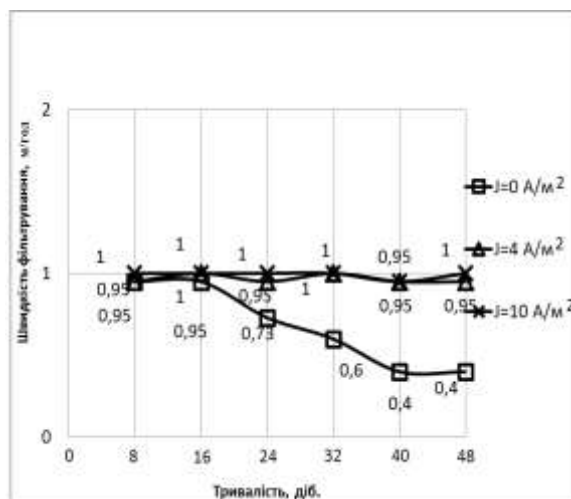
Рис. 2. Ефективність очищення стічних вод від завислих речовин при витраті:  
 а – 18 м³/год; б – 10 м³/год; в – 1,5 м³/год



(a)



(б)



(в)

Рис. 3. Швидкість фільтрування стічних вод при витраті: а – 18 м³/год; б – 10 м³/год; в – 1,5 м³/год

Нижче ми розглянемо один з можливих фізичних процесів укрупнення краплинок у коагулісциючому завантаженні – градієнтну коагуляцію, який, на наш погляд, повинен домінувати, і подамо його математичний опис.

При протіканні рідини через зернисте завантаження мають місце втрати тиску по ходу руху рідини, тобто втрати енергії. Як відомо з курсів гідравліки і гідродинаміки, тиск, під яким знаходиться рідина, можна розглядати як запас потенційної енергії одиниці об'єму рідини.

Розглянемо елемент об'єму коалесціуючого завантаження, що має форму кубика зі стороною, що дорівнює одиниці. Об'єм пор у цьому кубіку називається порізністю завантаження (позначимо його через  $\varepsilon$ ). Хай через кубик пропускається рідина, і при цьому мають місце втрати тиску  $\Delta P$ . Отже, втрати енергії  $E_1$  одиниці об'єму рідини, що протікає, віднесені до одиниці вільного об'єму цього кубика,

$$E_1 = \frac{\Delta P_1}{\varepsilon}. \quad (1)$$

Але в одиницю часу через кубик проходить  $W$  об'ємів рідини,

$$Q = W \cdot S,$$

де  $W$  – середня швидкість рідини через кубик;

$S$  – поверхня грані, через яку входить рідина і яка для даного кубика дорівнює одиниці.

Таким чином, повні втрати енергії при протіканні рідини через кубик, віднесені до одиниці вільного об'єму (тобто об'єму пор)

$$E = \frac{\Delta P_1 \cdot W}{\varepsilon}. \quad (2)$$

Величина  $E$  називається дисипацією енергії в одиниці об'єму. Ця енергія витрачається на подолання сил в'язкості при деформації елементів об'єму рідини (деформації, яка майже завжди має місце при русі рідини). У спрощеному вигляді це можна подати так. Розглянемо елементарний об'єм рідини – кубик зі сторонами, що дорівнюють  $h$  (рис. 4). Якщо по верхній грані кубика діє дотична напруга  $\tau$ , вона викликає деформацію кубика.

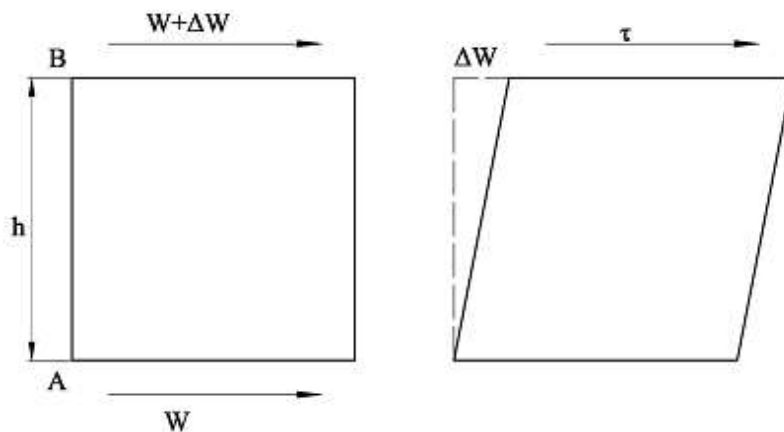


Рис. 4. Деформація елементарного об'єму рідини в потоці із здвигом

Згідно з законом Ньютона

$$\tau = \mu \cdot \frac{\Delta W}{h} = \mu \cdot G, \quad (3)$$

де  $G$  – градієнт швидкості,  $G = \frac{\Delta W}{h}$ ;

$\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості.

Перемножимо обидві частини рівності (2)

на  $\frac{\Delta W}{h}$ :

$$\tau \cdot \frac{\Delta W}{h} = \mu \cdot \left(\frac{\Delta W}{h}\right)^2 = \mu \cdot q^2. \quad (4)$$



Але якщо прийняти  $h=1$ , то градієнт швидкості чисельно дорівнює швидкості точки А відносно точки В, тобто швидкості  $\Delta W$  переміщення верхньої грані відносно нижньої, а  $\tau$  – це сила, що діє уздовж верхньої грані. У свою чергу добуток сили  $\tau$  на швидкість  $\Delta W$  – це потужність, тобто витрата енергії в одиницю часу, а оскільки в даному випадку розглядався елемент одиничного об'єму, то це втрати енергії в одиницю часу в одиниці об'єму, тобто  $E$ .

Отже,

$$E = \mu \cdot G^2. \quad (5)$$

Звідси

$$G = \sqrt{\frac{E}{\mu}} = \sqrt{\frac{W}{\mu \cdot V}}, \quad (6)$$

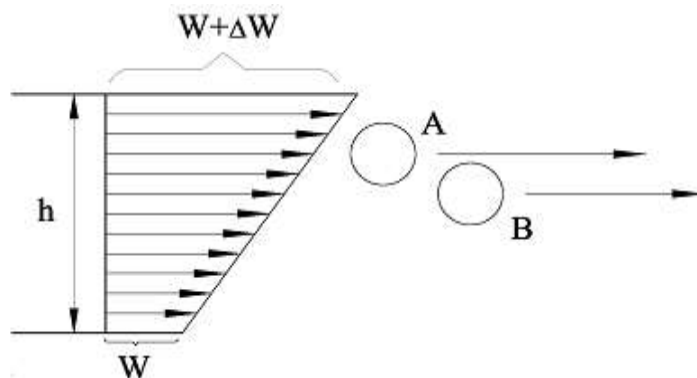


Рис. 5. Пояснення до механізму зіткнення краплинок при градієнтній коагуляції (градієнт швидкості  $G = \frac{\Delta W}{h}$ )

Крапля А знаходиться в точці А, де швидкість рідини більша, ніж швидкість у точці В. Оскільки краплинки переміщуються зі швидкістю навколишньої рідини, то швидкість краплинки А більше, ніж швидкість краплинки В. Внаслідок цього краплинка А через деякий час “наздожене” краплинку В, зіткнеться з нею і з'єднається, утворивши краплинку об'ємом  $(V_A + V_B)$ , де  $V_A$  і  $V_B$  – первинні об'єми краплинок А і В. Якщо в одиниці об'єму води є  $n_1$  частинок А, радіус яких дорівнює  $r_1$  і  $n_2$ , частинок В, радіус яких дорівнює  $r_2$ , то відповідно до роботи [40] кількість зіткнень частинок А і В в одиницю часу дорівнює

$$N_{CT1,2} = \frac{4}{3} \cdot (r_1 + r_2)^3 \cdot G \cdot n_1 \cdot n_2, \quad (7)$$

де  $V$  – даний об'єм (це може бути об'єм споруди або частина об'єму фільтруючого завантаження і т. п.);

$W$  – енергія, що втрачається в даному об'ємі.

Увага, яка була приділена поняттю і обчисленню градієнта швидкості, обумовлена тим, що в моделі коалесценції, що розглядається тут, основну роль відіграє так звана градієнтна коагуляція. Відомості про градієнтну коагуляцію, так само як і про обчислення градієнта швидкості, можна знайти в цілому ряді джерел [40, 41, 42].

Розглянемо сукупність частинок (у даному випадку – крапельінок рідини) у потоці з зсувом (рис. 5).

де  $G$  – градієнт швидкості.

Такою була б кількість зіткнень цих частинок у безповітряному просторі. У рідині ж траєкторії частинок при їх зближенні відхиляються від прямолінійних, і тому у формулу (7) необхідно ввести так званий “коефіцієнт захоплення”  $\alpha$ , з урахуванням якого формула (6) набуде вигляду

$$N_{1,2} = \frac{4}{3} \cdot (r_1 + r_2)^3 \cdot G \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot \alpha. \quad (8)$$

“Коефіцієнт захоплення”  $\alpha$  близький до одиниці, коли  $V_1 \approx V_2$ , і малий, якщо  $V_1 < V_2$  або, навпаки  $V_1 > V_2$ . Тому, як це прийнято в

роботі [43], вважатимемо, що стикаються між собою тільки частинки рівних розмірів. Отже, для частинок радіуса  $r_i$  кількість зіткнень  $N_{CTi}$

$$N_{CTi} = \frac{4}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot (2r_i)^3 \cdot G \cdot n_i^2 = \frac{4}{\pi} \cdot V_i \cdot G \cdot n_i^2, \quad (9)$$

$$\frac{dn_1}{dt} = -2N_{CT1} = -2 \cdot \frac{4}{\pi} \cdot V_1 \cdot G \cdot n_1^2 = -\frac{8}{\pi} \cdot V_1 \cdot G \cdot n_1^2. \quad (10)$$

Коефіцієнт 2 у формулу (10) введений тому, що в результаті кожного зіткнення “зникають” дві частинки об’єму  $V_1$ , утворюючи одну частинку об’єму  $V_2$ . Якщо пригадати, що множення  $V_i \cdot n_i$  – це сумарний об’єм частинок, об’єм кожній з яких дорівнює  $V_i$ , в одиниці об’єму рідини, тобто об’ємна концентрація

де  $V_i$  – об’єм частинок, радіус яких дорівнює  $r_i$ .

Якщо в початковий момент часу у воді є тільки частинки об’ємом  $V_1$  у кількості  $n_1$ , то рівняння для зміни кількості частинок з часом має такий вигляд

( $V_i \cdot n_i = C_i$ ), і перемножити рівняння (10) на  $V_1$ , то отримаємо рівняння

$$\frac{dC_1}{dt} = -\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_1^2. \quad (11)$$

Зміна в одиницю часу кількості частинок, об’єм яких дорівнює  $V_2$ , описується таким рівнянням:

$$\frac{dC_2}{dt} = -\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_2^2 + N_{CT1} \cdot V_2 = -\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_2^2 + \frac{4}{\pi} \cdot V_1 \cdot G \cdot n_1^2 \cdot V_2. \quad (12)$$

Останній доданок у правій частині – це приріст загального об’єму частинок, об’єм кожній з яких дорівнює  $V_2$ , за рахунок утворення їх з частинок об’ємом  $V_1$ .

Оскільки  $V_2 = 2V_1$ , отримаємо рівняння

$$\frac{dC_2}{dt} = -\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_2^2 + \frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_1^2. \quad (13)$$

Аналогічно, для будь-якого  $i$

$$\frac{dC_i}{dt} = -\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_i^2 + \frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_{i-1}^2. \quad (14)$$

Розділимо обидві частини рівнянь (11) і (14) на  $\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_0^2$ :

$$\frac{1}{\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_0^2} \cdot \frac{dC_1}{dt} = -\left(\frac{C_1}{C_0}\right)^2. \quad (15)$$

$$\frac{dC_i}{\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_0^2 \cdot dt} = -\left(\frac{C_i}{C_0}\right)^2 + \left(\frac{C_{i-1}}{C_0}\right)^2, \quad (16)$$

де  $C_0$  – загальна об’ємна концентрація частинок, яка в процесі коагуляції (коалесценції) залишається незмінною.

Введемо позначення:  $\frac{C_i}{C_0} = \bar{C}_i$ .

Ліву частину рівняння (15) запишемо в такому вигляді:

$$\frac{1}{\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_0^2} \cdot \frac{dC_i}{dt} = \frac{d \cdot \left(\frac{C_i}{C_0}\right)}{\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_0 \cdot dt} = \frac{d \cdot \left(\frac{dC_i}{dC_0}\right)}{d \cdot \left(\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_0 \cdot t\right)}. \quad (17)$$

Введемо позначення  $\frac{8}{\pi} \cdot G \cdot C_0 \cdot t = \bar{t}$ , тоді система рівнянь набуде такого безрозмірного вигляду:

$$\frac{d\bar{C}_1}{d\bar{t}} = -\bar{C}_1^2; \quad (18)$$

$$\frac{d\bar{C}_2}{d\bar{t}} = -\bar{C}_2^2 + \bar{C}_1^2;$$

$$\frac{d\bar{C}_i}{d\bar{t}} = -\bar{C}_i^2 + \bar{C}_{i-1}^2. \quad (19)$$

З початковими умовами

$$\bar{C}_{0,i} = \frac{C_{0,i}}{C_0},$$

де  $C_{0,i}$  – початкова концентрація частинок, об'єм кожної з яких дорівнює  $V_{i,}$ , розв'язок рівняння (18) має вигляд рівняння 20:

$$\bar{C}_i = \frac{\bar{C}_{0,1}}{1 + \bar{C}_{0,1} \cdot \bar{t}}, \quad (20)$$

де  $\bar{C}_{0,1} = \frac{C_{0,1}}{C_0}$ ;

$C_{0,1}$  – початкова об'ємна концентрація частинок, об'єм кожної з яких дорівнює  $V_1$ .

Що стосується рівнянь (19), то це рівняння Ріккати, які в загальному вигляді не мають аналітичного розв'язку. Систему рівнянь (19) краще всього розв'язувати чисельними методами, наприклад методом Ейлера або точнішими (метод Адамса, метод Рунге-Кутта).

Для подальшого викладення необхідно визначити величину  $G$  і час перебування  $t$  при протіканні рідини через зернисте завантаження.

Втрати тиску при русі через пористе середовище (зернистий шар) можна визначити за формулою Козені-Кармана [44]:

$$\Delta P = K \cdot \frac{\mu \cdot W_0}{\varphi^2 \cdot d^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot L, \quad (21)$$

де  $K$  – константа Козені ( $K \approx 180$ );

$\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості;

$W_0$  – швидкість потоку з розрахунку на поперечний перетин “порожнього” апарата, тобто апарата без зернистого завантаження;

$d$  – середній розмір частинок фільтруючого матеріалу;

$\varphi$  – коефіцієнт форми;

$\varepsilon$  – пористість зернистого шару;

$L$  – товщина зернистого шару.

У даній формулі для частинок завантаження можна прийняти  $\varphi \approx 0,7$  і пористість зернистого шару  $\varepsilon \approx 0,28$ .

Втрати тиску (при незмінній швидкості) – це втрати енергії одиниці об'єму рідин при протіканні через зернистий шар. Повні втрати енергії при протіканні через шар з одиничним поперечним перетином  $\Delta E = \Delta P \cdot V_0$ .

Об'єм, у якому відбувається втрата енергії, дорівнює  $\varepsilon \cdot L$ .

Отже, за формулою (6):

$$G = \sqrt{\frac{\Delta P \cdot W_0}{\mu \cdot \varepsilon \cdot L}}. \quad (22)$$

Час перебування води в цьому об'ємі дорівнює  $t$ :

$$t = \frac{\varepsilon \cdot L}{Q} = \frac{\varepsilon \cdot L}{W_0} \quad (23)$$

(оскільки витрата через одиничний поперечний переріз дорівнює  $W_0$ ).

Розглянемо, як зміниться об'єм початкових дрібних частинок мастила в монодисперсній емульсії після того, як вона протікла через коалесцююче завантаження. Прийемо середній розмір зерен матеріалу, через який протікає рідина,  $d \approx 1,0$  мм = 0,001 м,  $\mu \approx 0,001$ ,  $L \approx 0,5$  м,  $W_0 = 7,2$  м/год = 0,002 м/с, концентрацію нафтопродуктів у воді – 100 мг/дм<sup>3</sup> = 100 г/м<sup>3</sup> = 0,1 кг/м<sup>3</sup>, щільність мастил  $\rho \approx 900$  кг/м<sup>3</sup> ( $C_1 = \frac{0,1}{900} = 0,00011 = C_0$ ).

За формулою (21)

$$\Delta P = 180 \cdot \frac{0,001 \cdot 0,002 \cdot (1 - 0,28)^2}{0,7^2 \cdot 0,001^2 \cdot 0,28^3} \cdot 0,5 = 17349 \text{ Па.}$$

За формулою (22)

$$G = \sqrt{\frac{17349 \cdot 0,002}{0,001 \cdot 0,25 \cdot 0,5}} = 497 \cdot$$

Час протікання води через шар завантаження

$$t = \frac{0,5 \cdot 0,25}{0,002} = 70 \text{ с.}$$

$$\bar{t} = \frac{8}{\pi} \cdot C_0 \cdot G \cdot t = 0,00011 \cdot 497 \cdot 70 = 9,75 \cdot$$

Оскільки прийнято, що в початковий момент часу всі частинки мають рівні розміри (емульсія монодисперсна), початкова концентрація цих “первинних” частинок – це загальна концентрація частинок, тобто їх сукупний об’єм рівний  $C_0$ , тоді:

$$\frac{\bar{C}_0}{C_0} = \frac{C_0}{C_0} = 1.$$

Тоді до моменту  $t = 70$  с (тобто  $\bar{t} = 9,75$ ):

$$\bar{C}_1 = \frac{1}{1 + \bar{t}} = \frac{1}{1 + 9,75} = 0,093 \cdot$$

$$\frac{\bar{C}_0}{\bar{C}_1} = \frac{1}{0,093} \approx 10,75 \cdot$$

Отже, за рахунок коалесценції кількість “первинних” дрібних частинок зменшиться в 10,75 разу. Вони перейдуть у “категорію” крупніших частинок, які легше буде видалити з води.

Таким чином, ефективність очищення води від дрібно- та середньодисперсних краплин нафтопродуктів, а саме 5-10 та 10-30 мкм відповідно, теоретично може досягати 90 %. Цей висновок добре кореспондується з отриманими промисловими та лабораторними дослідженнями.

### Висновки.

1. Підтверджено лабораторними дослідженнями та на дослідно-промисловій установці ефективність комбінованого методу доочищення стічної води миття цистерн вагонного депо залізниці від дрібно- та середньодиспергованих нафтових забруднень і завислих частинок, а саме послідовною обробкою в модернізованому електричному апараті та модульному пристрої з коалесцентним типом фільтрування через щільно-фіксоване плаваюче завантаження.

2. Досягнута стабільність ефекту очищення стічної води від нафтопродуктів 88-94 % від завислих речовин 71-86 % при таких оптимальних параметрах дослідно-промислової установки: щільність струму на електродах 4-10 А/м<sup>2</sup>, питома тривалість імпульсної електрообробки – переривання електрообробки 250 мс/с; швидкість фільтрування в коалесцентних модулях – 0,95-13 м/год, дозволяє рекомендувати їх при розробленні рекомендацій на проектування.

3. Отримані графіки залежності ефективності очищення стічних вод від нафтових забруднень і завислих речовин дозволяють розробити рекомендації для виконання інженерних розрахунків при проектуванні очисних систем.

4. Розроблено математичну модель на базі гіпотези про укрупнення краплинок у коагулюючій завантаженні в основному за рахунок градієнтної коагуляції. Результати розрахунків підтверджують справедливості прийнятих у моделі припущень.

5. Результати роботи дозволять оптимізувати очищення стічних вод залізниці: підвищити економічну ефективність використання рухомого складу, за рахунок можливості оборотного використання частини доочищеної води в установках пропарювання цистерн; можливість подачі очищеної води на установку глибокого знесолення (наприклад зворотний осмос) з подальшим використанням у системах охолодження двигунів локомотивів; припинення платежів за скидання недостатньо очищених стічних вод залізниці у міську каналізацію або в поверхневі водойми.

### Список використаних джерел

1. Перевалов, В.Г. Очистка сточных вод нефтепромыслов [Текст] / В.Г. Перевалов, В.А. Алексеева. – М.: Недра, 1969. – 224 с.

2. Карелин, А.Я. Очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов [Текст] / А.Я. Карелин, И.А. Попова, Л.А. Евсева, О.Я. Евсева. – М.: Стройиздат, 1982. – 184 с.
3. Роев, Г.А. Очистка сточных вод и вторичное использование нефтепродуктов [Текст] / Г.А. Роев, В.А. Юфин. – М.: Недра, 1987. – 224 с.
4. Шеренков, И.А. Очистка воды от полидисперсной взвеси в комбинированном тонкослойном отстойнике-фильтре с плавающей загрузкой [Текст] / И.А. Шеренков, О.В. Архипов // Науковий вісник будівництва. – Харків, ХДТУБА-ХОТВ, 1999. – Вип. 6. – С. 137-141.
5. Берне, Ф. Водоочистка. Очистка сточных вод нефтепереработки [Текст] / Ф. Берне, Ж. Кордонье; пер. с фр. – М.: Химия, 1973. – 57 с.
6. А.с. № 1623971, СССР, МКИ С 02 F 1/46. Аппарат для электрохимической очистки воды [Текст] / Муха В.И., Шварц В.Р., Пантелют Г.С., Хвостак Л.Л., Гончаренко В.И. - № 4313896/26; заявл. 06.10.1987; опубл. 30.01.1990, Бюл. № 4. – 8 с.
7. А.с. № 1675214, СССР, МКИ С 02 F 1/46. Способ стабилизации воды [Текст] / Муха В.И., Хвостак Л.Л., Пантелют Г.С., Гончаренко В.И., Летуновская Т.Г., Чернявская Т.В., Широков В.Н. - № 4689631/26; заявл. 10.05.1989; опубл. 07.09.1991, Бюл. № 33. – 11 с.
8. Яковлев, С.В. Технология электрохимической очистки воды [Текст] / С.В. Яковлев, Н.Г. Краснобородько, В.М. Рогов. – Л.: Стройиздат, Ленинградское отделение, 1987. – 312 с.
9. Остроушко, И.А. Электролитическая очистка сточных вод обогатительных фабрик [Текст] / И.А. Остроушко, Р.И. Остроушко // Цветная металлургия. – 1972. – № 20. – С. 46 - 48.
10. Чантурия, В.А. Электрохимическая технология в обогатительно-гидрометаллургических процессах [Текст] / В.А. Чантурия, Г.Н. Назарова. – М.: Наука, 1977. – 160 с.
11. Назарова, Г.Н. Применение электрохимической технологии для очистки отработанных промышленных растворов и сточных вод обогатительных и металлургических предприятий с одновременным доизвлечением ценных компонентов [Текст] / Г.Н. Назарова, Л.В. Костина // В кн.: Переработки минерального сырья. – М.: Наука, 1977. – С. 211 - 225.
12. Дорохина, Л.И. О возможности использования электрохимической технологии для обезвреживания цианидсодержащих растворов обогатительных фабрик с одновременным доизвлечением металлов [Текст] / Л.И. Дорохина, Н.В. Попурова // В кн.: Технология разработки и обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1975. – С. 97 - 99.
13. Найманов, А.Я. Противонакипная электрообработка воды в системах оборотного водоснабжения [Текст]: дисс. д-ра техн. наук / А.Я. Найманов. – Макеевка: ДИСИ, 1994. – 370 с.
14. Проскураков, В.А. Очистка сточных вод в химической промышленности [Текст] / В.А. Проскураков, Л.И. Шмидт. – Л.: Химия, 1977. – 464 с.
15. Минц, Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды [Текст] / Д.М. Минц. – М.: Стройиздат, 1964. – 155 с.
16. Николадзе, Г.И. Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения [Текст]: учеб. пособие по спец. «Водоснабжение и канализация» для вузов / Г.И. Николадзе, Д.М. Минц, А.А. Кастальский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1984. – 368 с.
17. Жужиков, В.А. Фильтрование: Теория и практика разделения суспензий [Текст] / В.А. Жужиков. - 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1980. – 400 с.
18. Романков, П.Г. Гидравлические процессы химической технологии [Текст] / П.Г. Романков, М.И. Курочкина. – Л.: Химия, 1982. – С. 289.
19. Журба, М.Г. Водоочистные фильтры с плавающим фильтрующим слоем [Текст]: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.04 / М.Г. Журба. – М., 1985.
20. Журба, М.Г. О взаимодействии сил на границе фаз при фильтрационном осветлении суспензий в зернистой среде [Текст] / М.Г. Журба. – М.: ДАН СССР, 1987. – Т. 292, №4. – С. 986-989.
21. Гироль, Н.Н. Гидравлические закономерности процесса промывки плавающей загрузки водоочистных фильтров [Текст] / Н.Н. Гироль // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1978. – № 9. – С. 135-140.
22. Кургаев, Е.Ф. Пристенный эффект в моделях осветлителей и фильтров [Текст] / Е.Ф. Кургаев. // Водоснабжение и санитарная техника. – 1971. – № 9. – С. 4-7.
23. Мельцер, В.З. Исследование пористости зернистых фильтрующих материалов. [Текст] / В.З. Мельцер // Науч. труды АКХ им К.Д. Памфилова. Водоснабжение. – 1973. – Вып. 98, №7. – С.97-99.

24. Мягкий, Д.Д. Очистка сточных вод прокатных станов методом фильтрования [Текст] / Д.Д. Мягкий, С.И. Мороз // Пром. Энергетика. – 1976. – №3. – С. 29-31.
25. Мягкий, Д.Д. Исследование процессов глубокой очистки отработанных вод станов горячей прокатки в фильтрах с пенополистирольной загрузкой [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Д.Д. Мягкий. – М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1978. – 18 с.
26. Шеренков, И.А. Исследование гидродинамики входных участков тонкослойных отстойников [Текст] / И.А. Шеренков, О.В. Архипов // Межвед. науч.-техн. сб. «Гидравлика и гидротехника». – К.: «Техника», 1999. – № 60. – С. 15-20.
27. Седлухо, Ю.П. Механизм разделения эмульсии типа “масло в воде” методом контактной коалесценции [Текст] / Ю.П. Седлухо // Вода и экология: проблемы и решения. – 2001. – № 1. – С. 24-32.
28. Истомин, В.И. Комплексная очистка судовых нефтесодержащих вод [Текст] / В.И. Истомин. – Севастополь: Сев.НТУ, 2004. – 202 с.
29. Истомин, М.В. Математическая модель процесса очистки нефтесодержащих вод энергетических установок в фильтроэлементах с кварцевым песком. Авиационно-космическая техника и технология [Текст] / М.В. Истомин. – М., 2008. – № 7. – С. 192-194.
30. Приходько, В.П. Интенсификация процесса безреагентного объемного фильтрования суспензии природных и сточных вод путем применения неоднородной плавающей загрузки из гранул модифицированного пенополистирола [Текст]: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / В.П. Приходько. – Л., 1983. – 25 с.
31. Шеренков, И.А. Архипов О.В. Моделирование фильтрования суспензий через плавающие загрузки [Текст] / И.А. Шеренков, О.В. Архипов // Науковий вісник будівництва. –Харків: ХДТУБА-ХОТВ, 2001. – Вип. 12. – С. 108-115.
32. Никулин, С.Е. Перспективы совершенствования электрической обработки в промышленном водоснабжении [Текст] / С.Е. Никулин, Н.Г. Онищенко // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ 2009. – Вип. 52. – С.159-162.
33. Онищенко, Н.Г. Розробка та випробування модульного пристрою комбінованої очистки стічних вод [Текст] / Н.Г. Онищенко // Науковий вісник будівництва. –Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ 2009. – Вип. 55. – С. 152-156.
34. Нікулін, С.Ю. Промислові випробування модульного пристрою комбінованої очистки стічних вод [Текст] / С.Ю. Нікулін, Н.Г. Онищенко // Коммунальное хозяйство городов: научн.-техн. сб. – К.: Техніка, 2010. – Вып. 93. – С. 120-125.
35. Нікулін, С.Ю. Експериментальні дослідження комбінованого методу очистки стічних вод [Текст] / С.Ю. Нікулін, Н.Г. Онищенко // Науковий вісник будівництва. –Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ 2010. – Вип. 57. – С. 355-361.
36. Шабалин, А.Ф. Обратное водоснабжение промышленных предприятий [Текст] / А.Ф. Шабалин. – М.: Стройиздат, 1972. – С. 127-129.
37. Вуглецевмісний зернистий фільтрант та спосіб його виготовлення [Текст]: пат. 49950 Україна: МКИ С02F 1/28 В01 J20/20 / Нікулін С.Ю., Прокопов О.А., Соловйов Є.М., Дурнев М.О. – UA 99020945A1; заявл. 15.12.2000; опубл. 15.10.2002, Бюл. № 10. – 22 с.
38. Модульний пристрій комбінованої очистки стічних вод від завислих речовин та диспергованих нафтових забруднень [Текст]: пат. 94302 Україна: МКИ С 02 F 1/40, 3/06 / Шеренков І.А., Архипов О.В., Нікулін С.Ю., Онищенко Н.Г., Осика Н.В.; а 200907061; заявл. 06.07.2009; опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8. – 11 с.
39. Нікулін, С.Ю. Онищенко Н.Г. Промислові випробування комбінованого методу очистки стічних вод [Текст] / С.Ю. Нікулін // Коммунальное хозяйство городов: научн.-техн. сб. – К.: Техніка, 2011. – Вип. 99. – С. 272-279.
40. Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика [Текст] / В.Г. Левич. – М.: Физматгиз, - 1959. – 700 с.
41. Бабенков, Е.Д. Очистка воды коагулянтами [Текст] / Е.Д. Бабенков. – М.: Наука, 1977. – 356 с.
42. Клячко, В.А. Подготовка воды для промышленного и городского водоснабжения [Текст] / В.А. Клячко, И.Э. Апельцин. – М.: Стройиздат, 1962. – 820 с.
-

43. Эпштейн, С.И. Определение оптимального объема камеры флокуляции [Текст] / С.И. Эпштейн // Журнал прикладной химии, – 1978. – № 4. – С. 812-816.

44. Романов, П.Г. Гидромеханические процессы химической технологии [Текст] / П.Г. Романов, М.И. Курочкина. – Л.: Химия, 1974. – 288 с.

Рецензент д-р техн. наук, профессор В.О. Юрченко

---

Онищенко Наталія Григоріївна, асистент кафедри безпеки життєдіяльності та інженерної екології Харківського державного технічного університету будівництва та архітектури. Тел. (057) 700-30-08.

Епштейн Семен Іосифович, канд. техн. наук, Державне підприємство «Український науково-технічний Центр «Енергосталь»».

Нікулін Сергій Юхимович, канд. техн. наук, кафедра водопостачання та водовідведення Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова.

Onishchenko N.G., assist. Kharkiv National University of Construction and Architecture.

Epstein S.I., cand. of techn. sciences of Ukrainian State Enterprise Scientific-Technical Center "ENERGOSTAL".

Nikulin, S.E., cand. of techn. sciences of A.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.