

– інтер'єри мали складну багатопланову організацію простору, а в обробці інтер'єрів використовувалися прийоми візантійського стилю: яскраво освітлені куполами величезних розмірів хори, мармурові колони в арках з тонкими рядними капітелями, візерункові парапети, орнаментальна мозаїчна підлога з мармуру, шиферу та ін. порід каменю, а стіни були розписані фресками і прикрашені настінною мозаїкою;

– перші православні храми Київської Русі мали єдність композиційних і стилістичних принципів, не залежно від району будівництва вони відрізнялися лише своїми індивідуальними рисами, а призначення храмів не обмежувалося функціями культової будівлі, там проводили державні церемонії і приймали послів, писали літопис, переписували і зберігали книги.

1. Аксьонов Ю.С. *Архітектура древнього Києва*. – К.: Будівельник – 1982. 2. *Загальна історія архітектури* : в 12 т. – М.: *Литература по строительству*, 1966. – Том. 3., – с. 558. 3. *Історія Російської архітектури*. – М.: *Литература по строительству і архітектурі* – 1956. – С. 15–33. 4. *Раппорт П. А. Староруська архітектура*. – М.: *Наука* – 1970. – С. 7–50. 5. *Раппорт П. А. Староруська архітектура*. – С-Пб: *Строиздат СПб відділення*, 1993. – С. 18–46. 6. *Мистецтво Київської Русі*. – К.: *Мистецтво*, 1989.

УДК 532.517.4:532.135:532.55

В.В. Чернюк

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра гідравліки та сантехніки

ГІДРОДИНАМІЧНО АКТИВНІ ДОДАТКИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТУРБУЛЕНТНИМИ ПОТОКАМИ

© Чернюк В.В., 2012

На основі критичного аналізу вітчизняних і зарубіжних публікацій систематизовано за фізичними характеристиками відомі гідродинамічно активні добавки, що послаблюють турбулентне тертя.

Ключові слова: ефект Томса, послаблення турбулентного тертя, гідродинамічно активні добавки.

On the basis of critical analysis presented in domestic and foreign publications, the known hydrodynamic active additives which reduce turbulent friction have been systematized according to their physical.

Key words: Toms' effect, turbulent friction reduction, hydrodynamic active additives.

Вступ. Енергетична криза спричинила пошук шляхів енергоощадності. Істотним джерелом економії енергії є зменшення гідродинамічного опору [1, 2]. Порівняння ефективності різних методів послаблення турбулентного тертя (ПТТ) таких, як ріблети, піддатливі стінки, полімерні покриття, гідрофобні плівки, мікробульбашки, імплантація волокон, розчини поверхнево-активних речовин (ПАР), добавки полімерів показало перевагу трьох останніх, за яких досягається відносне зменшення гідродинамічного опору на 50-80 % [3].

Гідродинамічно активні добавки (ГДАД), що їх використовують для ПТТ на практиці застосовують у різних технологіях [4]. За допомогою полімерних додатків покращують роботу протипожежної техніки [5], зменшують втрати енергії на подолання сил тертя у нафтопроводах [6], нафтопродуктопроводах (дизельне пальне, бензин) [7]. Наявність полімерних додатків у пальному не впливає на експлуатаційні характеристики автомобілів з бензиновими та дизельними двигунами

[8]. Також ними послаблюють турбулентне тертя у тепломережах, системах холодопостачання, зрошення, каналізації [9] й гідротранспорті [5]. У теплотрасах полімерними додатками зменшують випромінювання теплової енергії у доквілля, причому істотніше послаблюють турбулентне тертя. Спричинюється це пригніченням масообміну між шарами рідини у потоці за рахунок ламінаризації пристінного його поясу [10]. За допомогою полімерних додатків послаблюють кавітацію [9], ріжуть високошвидкісними струменями води різні матеріали, враховуючи метали [5, 9], понижують артеріальний тиск [11], зменшують рівень гідроакустичних шумів військових суден [2, 12] і рідин у їх бортових системах, підвищують швидкохідність суден і торпед [2]. Полімерними розчинами моделюють течію синовіальної рідини у суглобах людини. Виявлено, що найефективніший з вітчизняних полімерів – поліакриламід (ПАА) не токсичний [13]. Він слугує додатком до їжі під час відгодівлі сільськогосподарських тварин [14]. ПАА застосовують також у процесах коагуляції під час очищення питної води [15, с. 219].

Застосуванням ГДАД у комплексі з іншими способами ПТТ отримують результат, який дорівнює сумі гідродинамічних ефектів від дії кожного з цих методів, зокрема, а то й вищий. Застосовують введення у потік рідини полімерів разом з покриттям стінок труб речовинами, що послаблюють їх змочуваність, або з ріблетами, чи з поздовжнім профілюванням, або ж з піддатливими стінками труб [16]. Поєднують вдув газів крізь пористі поверхні з упорскуванням полімерних розчинів у пристінний шар потоку [16]. Аерування потоків із полімерними додатками збільшує їхню ефективність на 15–30 % [17]. Додатками ПАР зменшують затрати енергії на створення вібраційного поля з метою руйнування структури висококонцентрованих суспензій для зменшення гідравлічного опору при їх трубопроводному транспортуванні [18].

Мета роботи – за фізичними характеристиками систематизувати гідродинамічно активні добавки, що застосовуються для керування турбулентними потоками рідин і газів.

1. Фізична суть ефекту Томса. Явище ПТТ за допомогою ГДАД відоме під назвою ефекту Томса. Послаблюють турбулентне тертя *малі анізотричні частинки*. Найефективнішими з ГДАД є *високомолекулярні сполуки з ланцюжковою будовою молекул* (рис. 1, а) і *міцелотворні поверхнево-активні речовини*. Унаслідок великого градієнта швидкостей у в'язкому підшарі та буферному поясі видовжені частинки орієнтуються більшими осями вздовж потоку (рис. 2, б), спричиняючи анізотропію динамічної в'язкості і нерівномірне поглинання турбулентної енергії за різними напрямками. Випрямлені макромолекули полімеру (рис. 3) утворюють уздовж стінки у потоці рідини еластичну пелену (рис. 2, б). Вихори, що зародились на нерівностях стінки, ударяються об пелену, яка перешкоджає вихорам проникати в ядро потоку. Макромолекули полімеру пригнічують тільки малі турбулентні вихори, сумірні з ними, демпфуючи пульсації у в'язкому підшарі та перехідному поясі. У разі віддалення від стінки масштаб дисипативних вихорів у потоці зростає, а взаємодія макромолекул з вихорами послаблюється і припиняється. Г.Ф. Кобець [19] показав, що важливішим фактором для ПТТ є не розмір частинок, а відносне їх видовження

$$\bar{l} = \frac{l}{d}, \quad (1)$$

де l – довжина частинки, d – її поперечний розмір.

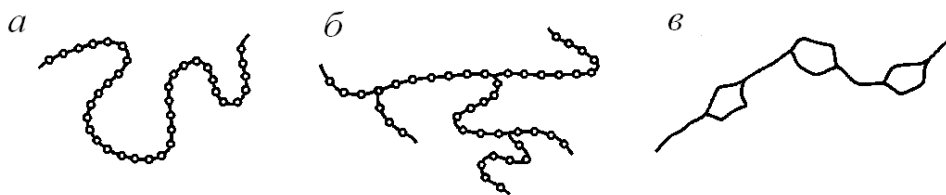


Рис. 1. Структури молекул полімерів, які здатні послаблювати турбулентне тертя:
а – лінійна (ланцюжкова); б – лінійно-розгалужена; в – лінійна зі складними групами [20, с. 12]

2. Високомолекулярні сполуки. 2.1. Синтетичні полімери. Для послаблення турбулентного тертя під час перепомповування рідких вуглеводів широко застосовуються карболанцюжкові полімери: поліметилметакрилат; поліметакрилати; поліакрилати; поліізобутилен; поліолефіни; полістирол; полібутадієн; поліізопрен [21]; поліалкілакрилати. Цю назву вони отримали тому, що основний ланцюг макромолекули складається з вуглеводнів. Наприклад, поліакриламід (ПАА), що утворений із мономера акриламіда $CHCONH_2$ [13]:



За рубежом набули розповсюдження *поліоксидетилени* (ПОЕ). Економічно ефективними полімерні добавки є при їх комплексному використанні. За даними І. Порайка [22], у нафтопроводах вони створюють такі позитивні ефекти: а) збільшують пропускну здатність; б) запобігають відкладенню парафіну на стінках труб; в) зменшують вміст солей у нафті.

Високомолекулярні сполуки піддаються механічному, термічному та хімічному руйнуванню, а їхні розведені розчини – ще й старінню. Висококонцентровані розчини практично не деградують. Механічної деструкції полімерні розчини зазнають за сильних зсувних напружень. При цьому макромолекули розриваються навпіл. Розірвані зв'язки не відновлюються. Запобігають деструкції та деградації полімерних розчинів такими методами. У розчини полімерів вводять стабілізатори, зшивають макромолекули, утворюють суспензії та емульсії, відстоюють полімерні розчини, синтезують стійкі до деструкції полімери та полімери з координаційними зв'язками, що здатні відновлюватись після розриву [21], застосовують у комплексах з іншими добавками.

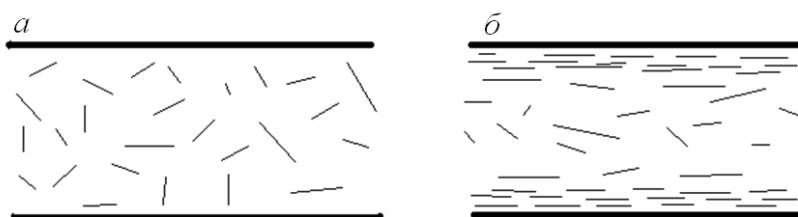


Рис. 2. Схема утворення орієнтаційного ефекту: а – орієнтація анізотричних частинок у нерухомій рідині; б – те саме, в потоці рідини, обмеженому стінками

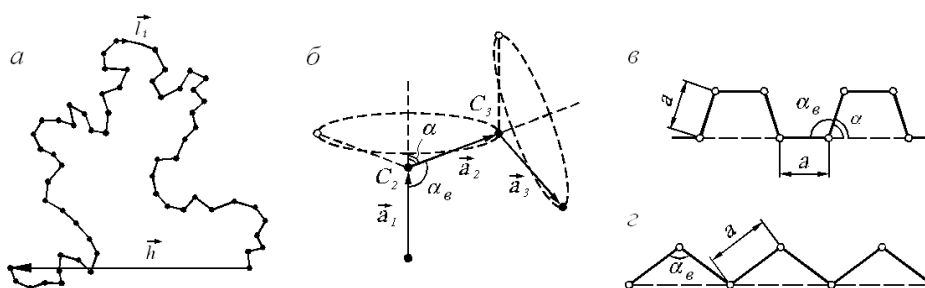


Рис. 3. Елементи полімерних ланцюжків: а – модель із ланцюга вільно сполучених сегментів; б – конуси обертання одиничних зв'язків С-С (вуглецю) в ланцюжку ПОЕ; в, г – можливі конформації ланцюга поліетилену в гранично випрямленому стані: \dot{h} – відстань між кінцями ланцюга; \dot{l}_i – довжина сегмента молекули, що містить декілька ланок; \dot{a}_i – довжина ланки у сегменті; a_a – валентний кут зв'язку С-С; α – додатковий кут [20, с. 85, 89]

Винайдено полімери для застосування у системах гарячого теплопостачання з температурою води до 180 °С [23] і в холодильних контурах [5]. Полімерні добавки є найуживанішими і застосовуються у багатьох галузях техніки (див. вступ).

2.2. Полімери рослинного походження (ботанікополімери). Першим полімером, який почали застосовувати для ПТТ була *гуарова смола*. Це складний полісахарид, який отримують із тропічної рослини *Cyamopsis tetragonolobus*. Застосовується як приправа до їжі та згущувач рідини. Гуарова смола відносно дешева та має міцні молекули, стійкі до деформації в потоках із великими зсувними напруженнями [24].

Сапропель забезпечує послаблення гідродинамічного опору на 68 % за наявності його у водному потоці у кількості 1 % за масою. *Торф* спричинює такий самий ефект за масової концентрації у потоці, що дорівнює 6–9 %. Сапропелі – це донні відклади прісноводних озер, торф – багатокомпонентна напівколоїдна високомолекулярна система. Обидва стійкі до механічної деструкції та придатні для ПТТ у циркуляційних системах [25].

Послаблюють турбулентне тертя *лляна мука* [24], *дрібні водорості*, *пилки рослин* [4].

2.3. Полімери біологічного походження (біополімери). Досить давно моряки помітили прискорення кораблів на ділянках моря, заселених планктоном. Спричинювали це високомолекулярні речовини, що виділяють мікроорганізми у разі деформування їх корпусом судна [1]. Гідродинамічну активність *проявляють органічні макромолекулярні мікрофібрили* [26], *яєчний білок*. *Слиз, що його виділяють риби*, зменшує їхній гідравлічний опір за час плавання у воді та захищає шкіру від інфекцій. Біополімери у властивих їм природних умовах бездоганно виконують свої функції. Однак у технічних системах для однакового зменшення гідравлічного опору концентрація природного полімеру, переважно, має бути на порядок вища, ніж штучного [4].

2.4. Мінерали. *Азбест*, наприклад, хризоліт, що відомий як гірничий льон, за міцністю у разі розтягування вздовж волокон, перевершує сталь. Азбестові волокна еластичні, стійкі до дії кислот і лугів [27, с. 35]. Вони успішно застосовуються для послаблення турбулентного тертя (див. пункт 7) і ефективні в агресивних рідинах.

3. Міцелотворні поверхнево-активні речовини (МПАР). ПАР накопичуються у поверхневому шарі рідини, оскільки мають поверхневий натяг, менший ніж у розчинника. ПАР виштовхуються на поверхню, де їх концентрація в 10^4 разів більша, ніж у рідині. Поверхнево-активними відносно води є жирні кислоти з великим вуглеводневим радикалом, солі цих кислот (мила), сульфокислоти і їхні солі, спирти, аміни.

Найменше значення поверхневого натягу водного розчину ПАР сягає $25 \cdot 10^{-3}$ Дж/м², майже, як у вуглеводнів [28]. Спосіб ПТТ додатками ПАР був заявлений І. Т. Ельперіним у 1954 р., однак охоронний документ на нього виданий через 20 років [29], що, котрий раз, свідчить про традиційне неприйняття у нас вітчизняного нового.

ПАР, які утворюють у розчині міцелярні системи, називаються *колоїдними* або *міцелотворними ПАР*. Гідродинамічний опір послаблюють тільки колоїдні ПАР у разі концентрації їх у розчині, що однаковий або вищий від критичної концентрації утворення міцел несферичної форми KKM_{II} , молекулярна вага котрих сумірна з молекулярною вагою полімерів, що послаблюють турбулентне тертя [30].

Збільшення концентрації істинного водного розчину МПАР понад KKM_I спричинює утворення в системі з окремих молекул ПАР (рис. 4, а) сферичних міцел Гартлі (рис. 4, б). У разі перевищення KKM_{II} виникають циліндричні (рис. 4, в) і пластинчасті (рис. 4, г) міцели, що складаються з двох шарів молекул ПАР, повернених один до одного вуглеводневими ланцюгами, а іоногенними групами назовні. Ці агрегати, що їх називають міцелами Мак-Бена, нагадують за своєю будовою двовимірний кристал і можуть мати необмежено великі розміри у двох напрямках. У розчині вони переходять у гель [28].

У розчині *метаупону* за наявності електроліту утворюються різні міцелярні структури, які характеризуються не менш ніж чотирма *КММ*. Властивість метаупону послаблювати турбулентне тертя у розчині появляється лише після *КММ_{IV}*. Припускається, що при цьому виникають ниткоподібні міцели [31]. Молекулярна вага молекули ПАР дорівнює 200...500, а міцел – до $10^6...10^8$ [28]. Більшість синтетичних МПАР зменшують гідродинамічний опір лише за наявності електролітів [32], наприклад, кухонної солі. Оптимальні значення її концентрації у водних розчинах МПАР наведено у табл. 1 [33, 34].

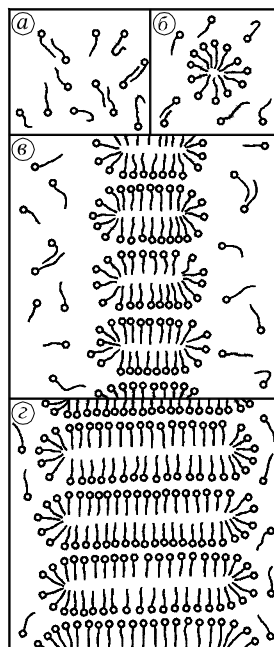


Рис. 4. Схема утворення міцел у розчинах мила:
 а – розведений розчин, який містить окремі молекули мила та іони;
 б – концентрованіший розчин, який має сферичні міцели;
 в, г – концентровані розчини, що містить пластинчасті міцели [28]

Таблиця 1

Оптимальні значення концентрацій мицелотворних ПАР й електролітів у водних розчинах для послаблення турбулентного тертя

МПАР	Масова концентрація у розчині, кг/кг			Літературні джерела
	МПАР при різних середовищах		NaCl	
	кисле, pH = 2	нейтральне		
Мило МРТУ 18/233-68		$3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	[33]
Ditalan OTS		10^{-2}	$(3...5) \cdot 10^{-2}$	[33, 34]
Metaupon	$3 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$(7...8) \cdot 10^{-2}$	[34]

Водні розчини *диталану OTS*, на відміну від метаупону піддаються деградації. Уведення гідрохінону в розчини диталану зупиняє процес старіння. *Мило МРТУ 18/233-68* зменшує гідродинамічний опір і без електроліту. Однак без нього для ефективного ПТТ мила у водному розчині потрібно вдвічі більше [33]. ПАР утворюють міцели й у вуглеводневих розчинах [28, с. 410]. Розчинність іоногенних ПАР поступово збільшується з підвищенням температури до значення, що відоме як точка Крафта, після якої в істинному розчині з'являється міцелярна фаза речовини та різко зростає розчинність із подальшим збільшенням температури. Точка Крафта визначається

перетином кривих залежностей розчинності та KKM_f від температури [32]. Розчинність довголанцюжкових ПАР зростає за наявності коротколанцюжкових ПАР, завдяки утворенню змішаних міцел [32]. МПАР ефективні у циркуляційних потоках. Міцели, деструктовані на місцевих гідравлічних опорах, відновлюються на ділянках потоку з меншими зсувними напруженнями, за рахунок сил електричного взаємопритягання молекул.

Для ПТТ у багатофазних водонафтових емульсіях, застосовують неіоногенну ПАР *дисолван* у кількості $(4...6) \cdot 10^{-5}$ кг/кг і створюють турбулентний режим течії, що задовольняє умову [35]:

$$Re_e We^{1,2} \frac{r\phi}{r_e} > 0,46, \quad (3)$$

де $Re = vDr_e/m_e$ – критерій Рейнольдса для емульсії; $We = s/r_e u^2 D$ – число Вебера; u – середня швидкість потоку, м/с; D – діаметр труби; r_o , r_n та r_e – густини відповідно дисперсної фази, дисперсного середовища й емульсії, кг/м³; m_e – динамічна в'язкість емульсії, Па·с; s – міжфазний натяг, Н/м. Дисолван у цьому разі слугує ще й деемульгатором [35]. ПАР-деемульгатори запобігають утворенню водопаливних емульсій у процесі транспортування рідких палив і в десятки разів зменшують в'язкість нафти, наближаючи її до в'язкості води [36].

4. Отверділі частинки транспортованої рідини. *Заморожені анізотрично сформовані частинки.* Перевага ГДАД, сформованих із транспортованої рідини, полягає в тому, що в потік не вносяться чужорідні тіла та у порівняно простому й дешевому способі їх отримання. У разі сумісного транспортування природного газу й нафти останню протискають крізь філь'єри у ємність із переохолодженим скрапленим газом, розрізаючи заморожені нафтові нитки на частинки завдовжки 0,5...2,0 мм. Видовження їх $\bar{l} = l/d \geq 20...70$, а об'ємна концентрація у суспензії – 0,02...0,08 %. Під час перепомповування цієї системи підтримують температуру, необхідну для перебування природного газу у рідкому стані [37].

Кристалогідрати перепомповуваної рідини характеризуються стійкістю до термічної та механічної деструкції. При перепомповуванні скрапленого природного газу кристалогідрати одержують подачею останнього у кристалізатор під тиском $5 \cdot 10^6$ Па, зустрічно якому розбризкують холодну воду. У газоконверторі водну суспензію кристалогідратів протискають крізь філь'єри з отворами $d = 50...100$ мкм і ріжуть на частинки з $\bar{l} = 10...70$, а їхня необхідна концентрація у потоці 0,02...0,08 %. У кінці трубопроводу після перетоплення кристалогідрати знову перетворюються на газ і воду [38].

5. Пилюваті частинки. Турбулентне тертя у газових потоках послаблюють уведенням у потік твердих пилюватих частинок: *тальку* [39], *скла* [40], *вугільного пилу*. Необхідний для зменшення гідродинамічного опору діаметр частинок [40]

$$20_{\text{мкм}} \leq d \leq \sqrt{18 \frac{r}{r_o} \frac{nR}{u}}. \quad (4)$$

Оптимальну концентрацію C_{opt} пилюватих частинок у потоці обчислюють за виразом

$$C_{opt} = \kappa \frac{\left(1 - \frac{224,6}{Re^{0,75}}\right) \cdot \sqrt[3]{ng} \cdot R}{45\sqrt{p} \frac{n}{2}} \pm 20\%. \quad (5)$$

Транспортування системи здійснюють за швидкостей

$$u \gg \frac{r_o d_{\max}^2 g}{18rn}, \quad (6)$$

де ν – кінематична в'язкість газу; R – внутрішній радіус магістралі; ρ , ρ_a – густини газу та дисперсної фази; u – середня швидкість потоку; $k = 0,34 \dots 1,2$, коефіцієнт [40]. На магістралі перед проміжними компресорами циклони-сепаратори відбирають частинки і подають їх у потік після компресора [40]. Турбулентність послаблюється інтенсивніше за наявності у потоці великих і дрібних частинок порівняно з використанням тільки дрібних [41].

6. Асфальтени та нафтові смоли. Введення асфальтенів або нафтових смол у трубу провідний потік нафти чи керосину в кількості 0,5...1,0 % зменшує гідравлічне тертя на 45 %. Асфальтени і смоли практично не піддаються деградації й деструкції. Ймовірно, що їхня дія на пристінну турбулентність така сама, як і МПАР [34, с. 213].

7. Волокна. Природні та штучні волокна за значної їх видовженості \bar{l} (1) є стійкими до деструкції. Дослідження течій водних суспензій *дерев'яних волокон* і *дерев'яних трісок* були викликані запитами целюлозно-паперового виробництва. При гідротранспорті останніх не виявлено зменшення гідравлічного опору [42].

Течія водних суспензій дерев'яних волокон із масовою концентрацією $C = 0,21 \dots 1,17$ % в трубах супроводжується послабленням турбулентного тертя. Вважається, що дерев'яні волокна утворюють пластівці, які гасять турбулентність у ядрі потоку. Послаблення впливу волокон на турбулентність при великій швидкості течії пов'язується зі зменшенням розмірів пластівців [34, с. 215], чи клубків волокон [43], які руйнуються в турбулентній течії. За фіксованого числа Рейнольда гідродинамічна ефективність дерев'яних волокон зростає зі збільшенням діаметра труби. У шорстких трубах дерев'яні волокна можуть збільшувати опір [34, с. 215–216]. Гідродинамічні характеристики потоку суспензії функціонально залежать від ступеня подрібнення волокон [43]. Ефективність дії твердих волокон прямо пропорційна до їх видовження \bar{l} і концентрації у потоці [44].

Азбестові волокна при $d = 10^{-2} \dots 10^{-1}$ мкм мають $\bar{l} = 10^4$. При концентраціях азбестових суспензій $10^{-4} - 10^{-4}$ кг/кг та $Re = 2 \cdot 10^4$ отримано послаблення турбулентного тертя у трубах на 40...60 % [34, с. 214]. Азбестові добавки в шорсткій трубі ефективніші, ніж у гладкій, однак із зростанням значення критерію Рейнольда їхня дія загасає [34, с. 216].

Стійкими до деструкції є **нейлонові волокна і волокна, нарізані з ниток штучного шовку** із $\bar{l} = 50$. Необхідна масова концентрація їхніх суспензій $C \approx 4$ %. У трубопроводному потоці з волокон утворюються пластівці, розміри яких зростають із віддаленням від стінки [34, с. 214–215].

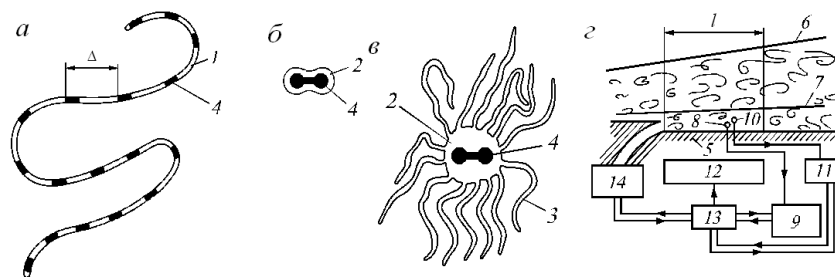


Рис. 5. Система керування турбулентним примезовим: а – нитка; б – гантелеподібна частинка; в – частинка з пружними нитками; г – виконавчий пристрій: 1 – полімерна нитка; 2 – тверда частинка; 3 – пружні нитки; 4 – феромагнітні елементи; 5 – стінка; 6 – турбулентний примезовий шар; 7 – ламінарний підшар; 8 і 9 – відповідно давач і пристрій для вимірювання характеристик потоку; 10 і 11 – відповідно давач і пристрій для вимірювання параметрів магнітного поля; 12 – пристрій для створення магнітного поля; 13 – керівний комп'ютер; 14 – пристрій для уведення ГДАД; D – крок феромагнітних частинок; l – довжина робочої ділянки [45]

Для зменшення гідравлічного опору у потоках рідин запропоновано виготовляти **полімерні нитки, що містять феромагнітні елементи**, періодично вшиті по довжині нитки (рис. 5, а). Для газових потоків рекомендується застосовувати гантелеподібні частинки з феромагнітними елементами

(рис. 5, б). Діючи на такі ГДАД магнітним полем, керують за допомогою комп'ютера турбулентним пограничним шаром (рис. 5, з) [45]. Подібні системи з комп'ютерами та мініатюрними насосами застосовують для керування потоком рідини методом відсмоктування турбулентного прилежового шару крізь отвори у стінці або ж вдуванням рідини під прилежовий шар [46].

8. Інші ГДАД. Стійкі до деградації та деструкції при тривалому використанні суспензії утворюють з таких матеріалів: глинисті мінерали: монтморилоніт, іліт, каолініт, палигорскит; природні волокна: шовкові, бавовняні; штучні волокна: базальтові, графітові й ін. [47].

Глинисті фракції послаблюють турбулентне тертя у водному потоці, залежно від концентрації суспензії та критерію Рейнольдса. Зменшення опору пов'язується з їх асиметричністю та здатністю утворювати агломерати, що змінюють свою форму в турбулентному потоці [34, с. 217].

9. Комплекс додатків. Для відвертання механічної деструкції макромолекул розчинних полімерів їх уводять у потік рідини разом із нерозчинними волокнами, що добре диспергують у ній і мають $\bar{l} \geq 100$, а густину, як у транспортованій рідині. Застосовують органічні, мінеральні або штучні (нейлонові з $d < 20$ мкм) волокна [34, с. 216–217, 47]. Останні обробляють концентрованим розчином полімеру або ПАР. Масова концентрація пружних ниток $C = 5 \cdot 10^{-4} \dots 5 \cdot 10^{-2}$, а ПАР – $10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-3}$ кг/кг. Виділяють нитки з рідини фільтруванням.

Стійкість до деструкції дорогих полімерів підвищують додатками дешевих і менш ефективних, але міцних полімерів і волокон [48]. Волокна та полімери сумісно послаблюють турбулентне тертя на 90...95 % [34, с. 216]. Полімер-азбестові композиції ефективні при гідротранспорті [49].

У циркуляційних системах гідроустановок, контур яких містить відкриту водойму, економічними є комплекси синтетичних і природних полімерів. Для цього, за пропозицією І. Т. Ельперіна, у водосховищі сіють одноклітинні прісноводні мікроорганізми, які внаслідок своєї життєдіяльності виділяють у воду ПАР. Оптимальна концентрація одноклітинних у воді $5 \cdot 10^{-6} \dots 8 \cdot 10^{-4}$ кг/кг [50].

10. Вплив ГДАД на місцеві втрати напору у трубах. Гідродинамічна дія полімерів і міцелотворних ПАР якісно однакова і посилюється зі зменшенням діаметрів труб. У звуженнях труб енергія потоку витрачається на розтягування макромолекул полімерів і на подолання великих вихорів, утворюваних на ділянці потоку після звуження; у розширеннях труб – на переборення великих вихорів, інтенсивно генерованих на ділянці розширення. Якщо у місцевому гідравлічному опорі домінують втрати напору на в'язкісне тертя, то ГДАД їх зменшують. У випадку переважання втрат енергії на опір форми місцеві втрати напору за наявності ГДАД зростають. Вищій концентрації C розчину ГДАД, що не перевищує ефективного значення C_{eff} , відповідає більше змінювання значення коефіцієнта місцевого гідравлічного опору як у випадку послаблення опору так і у випадку його посилення [51, 52]. Цю особливість ГДАД автор статті застосував до розробки низки енергоощадних засобів керування напірними потоками рідин [52].

Висновки. Найефективнішими і відповідно найуживанішими гідродинамічно активними додатками, що їх застосовують для керування турбулентними потоками, є високомолекулярні сполуки з ланцюжковою будовою молекул. Оскільки вони зазнають деструкції, то їх застосування обмежується розімкнутими гідравлічними системами. Міцелотворні ПАР ефективні у циркуляційних потоках, оскільки вони не піддаються незворотним механічним деструкціям. Для зменшення гідравлічного опору у газових потоках застосовують тверді анізотричні частинки. На основі критичного аналізу вітчизняних і зарубіжних публікацій систематизовано за фізичними характеристиками відомі гідродинамічно активні додатки та наведено їхні властивості стосовно впливу на гідравлічний опір турбулентних потоків рідин і газів.

1. Повх І. Л. Зменшення турбулентного тертя – основне джерело економії енергії / І. Л. Повх // Вісн. АН УРСР. – 1982. – № 11. – С. 66–74. 2. Корнилов В. И. Проблемы снижения турбулентного

трения активными и пассивными методами (обзор) / В. И. Корнилов // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – Т. 12, № 2. – С. 183–208. 3. Usui Hiromoto. Прогресс уменьшения сопротивления в новом веке / Usui Hiromoto, Suzuki Hiroshi // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. B. – 2001. – V. 67, № 568. – P. 1305–1310. 4. Козлов Л. П. Гідродинамічний ефект Томса і його можливі технічні застосування / Л. П. Козлов // Вісн. АН УРСР. – 1987. – № 1. – С. 23–33. 5. Применение гидродинамически активных добавок полимеров и поверхностно-активных веществ в энергосберегающих технологиях / А. Б. Ступин, П. В. Асланов, А. П. Симоненко и др. // Прикладна гідромеханіка. – 2001. – Т. 3 (75), № 1. – С. 74–81. 6. Макаров С. П. Опыт применения противотурбулентной присадки на нефтепродуктопроводах ОАО “АК “Транснефтепродукт” / [С. П. Макаров, С. М. Фокин, И. И. Ерошкина и др.] // Трансп. и хранение нефтепродуктов. – 2000. – № 4. – С. 14–17. 7. Прохоров А. Д. Гидравлическая эффективность применения противотурбулентной присадки при транспортировке дизельного топлива / А. Д. Прохоров, С. Н. Челинцев, А. В. Черников и др. // Трансп. и хранение нефтепродуктов. – 2000. – № 3. – С. 8–9. 8. Polymeric drag reduction in petroleum products / [Motier J. F., Prilutski D., Shanti In Z. J., Kostelnik R. J.] // Drag Reduct. 3rd Int. Conf. – Bristol. – 1984. – P. F3/1–F3/23. 9. Pollert J. Today and future possibilities of industrial applications of drag reduction / J. Pollert // Proc. Fields. Symp. “Influence Polym. Addit. Velocity and Temp. Univ.-GH, Essen, 1984”. – Berlin. – 1985. – P. 371–395. 10. Перепелица Б. В. Статические характеристики пульсаций температуры в турбулентном потоке воды с добавкой полимера / Б. В. Перепелица // Труды Междунар. форума “Тепломассообмен-ММФ”. – Минск. – 1988. – Секц. 6. Тепломассообмен в реологических системах. – С. 7–9. 11. Биомеханические аспекты действия снижающих гидродинамическое сопротивление полимеров / [С. С. Григорян, И. А. Соколова, А. А. Шахназаров, В. В. Смирнов] // Проблемы современной механики. К юбилею Л. И. Седова. – М.: Ин-т мех. МГУ, 1998. – С. 47–51. 12. Воскобойник В. А. Снижение гидродинамических шумов растворами высокомолекулярных полимеров / В. А. Воскобойник, В. Т. Гринченко, А. П. Макаренко // Акустичний вісник. – 2007. – Т. 10, № 2. – С. 33–42. 13. Савицкая М. Н. Полиакриламид / М. Н. Савицкая, Ю. Д. Холодова. – К.: Техника, 1969. – 187 с. 14. Полиакриламид в животноводстве / Фабуляк Ф. Г., Кулик М. Ф., Левинтон Ж. Б. и др.; под ред. Кухаря В. П.; АН УССР, Ин-т химии высокомолекулярн. соединений. – Киев: Наук. думка, 1990. – 256 с. – (Ученые Украины – нар. хоз-ву). 15. Абрамов Н. Н. Водоснабжение: Учебник для вузов / Н. Н. Абрамов – М.: Стройиздат, 1982. – 440 с. 16. Коробов В. И. Комплексное влияние податливости поверхности и высокомолекулярных полимерных добавок на турбулентное трение / В. И. Коробов // Прикладна гідромеханіка. – 2000. – № 2. – С. 59–63. 17. Снижение турбулентного трения при течении аэрированных пузырьками воздуха полимерных растворов / [А. Г. Малюга, В. И. Микута, О. И. Стояновский, С. П. Кравченко] // Пристенные и свободные турбулентные течения. – Новосибирск. – 1988. – С. 121–130. 18. Урьев Н. Б. О двух типах кривых течения структурированных дисперсных систем / Н. Б. Урьев, С. В. Чой // Коллоид. ж. – 1993. – Т. 55, № 3 – С. 183–191. 19. Кобец Г. Ф. Объяснение эффекта Томса анизотропией вязкости раствора / Г. Ф. Кобец // Прикладная механика и техническая физика. – 1969. – № 1. – С. 107–111. 20. Бартенев Г. М. Физика и механика полимеров. / Г. М. Бартенев., Ю. В. Зеленов – Учебное пособие для вузов. М.: Высш. Школа, 1983. – 391 с. 21. Белоусов Ю. П. Противотурбулентные присадки для углеводородных жидкостей. – Новосибирск: Наука, 1986. – 145 с. 22. А. с. 393535 СССР, МКИ F 17D 1/16. Способ предотвращения образования парафинистых отложений в трубопроводах / А. И. Арутюнов, И. Н. Порайко, А. М. Гнатюк (СССР). – № 1618209/23-4; Заявлено 28.12.70; Опубл. 10.08.73, Бюл. № 33. 23. Заявка 4018303 ФРГ, МКИ F 17D 1/17. Verfahren zur Reibungsminderung in strömenden Medien / Köhls Ingrid, Pollock Norbert, Haenschke Lothar [und andere] (ФРГ); VEB Wärmeanlagenbau “DSF”. – № F 15D/329436; Заявлено 09.06.89; Опубл. 13.12.90. – РЖ Изобретения... Вып. 71. 1991, № 12. – С. 4. 24. Хойт (Hoyt J. W.). Влияние добавок на сопротивление трения в жидкости / Хойт (J. W. Hoyt) // Теоретическ. основы инженерн. расчетов. Труды американского общества инж.-механиков. – М.: Мир, 1972. – № 2. –

С. 1–31. 25. А. с. 1693315 СССР, МКИ F 17D 1/16. Способ снижения гидродинамического сопротивления потока жидкости / [И. И. Лиштван, Ю. А. Бухман, И. В. Косаревич, А. Ц. Матевосян] (СССР). – № 4611791/05; заявл. 01.12.88; опубл. 23.11.91, Бюл. № 43. 26. Заявка 0197152 ЕПВ, МКИ F 15D 1/06, C 09K 3/00. Method of lowering flow resistance of liquids / Webb Frederick Ronald et al. (Великобритания); Nippon Oil Co. LTD. – № 85904296.2; Заявлено 03.09.85; Опубл. 15.10.86. – РЖ Изобретения... Вып. 92. – 1987. – № 8. – С. 12. 27. Политехнический словарь / Под общ. ред. А. Ю. Ишлинского – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1989. – 656 с. 28. Воюцкий С. С. Курс коллоидной химии / С. С. Воюцкий. – М.: Химия, 1976. – 512 с. 29. А. с. 436962 СССР, МКИ F 17D 1/10, B 36B 1/34. Способ уменьшения гидродинамического сопротивления при внутренней и внешней задаче течения / И. Т. Эльперин (СССР). – № 575255/27-11 и № 1325878/27-11; заявл. 06.12.54; опубл. 25.07.74, Бюл. № 27. 30. Снижение гидродинамического сопротивления добавками поверхностно-активных веществ / [И. Л. Повх, А. Б. Ступин, В. Н. Добрыченко, Максютенко С. Н.] // Инж.-физ. журн. – 1974. – Т. 24, № 4. – С. 682–686. 31. Повх И. Л. Исследование критических концентраций мицеллообразования водных растворов поверхностно-активных веществ / [И. Л. Повх, Р. В. Кучер, И. А. Шевчук и др.] // Журн. прикл. хим. – 1978. – Т. 51, № 5. – С. 1045–1048. 32. Асланов П. В. Турбулентные течения растворов поверхностно-активных веществ / [П. В. Асланов, С. И. Максютенко, И. Л. Повх и др.] // Механика жидкости и газа. – 1980. – № 1. – С. 36–43. 33. Снижение турбулентного сопротивления трения добавками поверхностно-активных веществ: Отчет о НИР / МГУ им. М. В. Ломоносова. Ин-т механики; № ГР б/н; Инв. № 2142. – М., 1978. – 37 с. 34. Пилипенко В. Н. Влияние добавок на пристенные турбулентные течения / В. Н. Пилипенко // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Мех. жидкости и газа. – 1980. – Т. 15. – С. 156–257. 35. А. с. 1055940 СССР, МКИ F 17D 1/16. Способ перекачки многофазной жидкости по трубопроводу / А. И. Гужов, В. Ф. Медведев, Л. П. Медведева (СССР). – № 3248223/25-08; заявл. 18.02.81; опубл. 23.11.83, Бюл. № 43. 36. А. с. 1550262 СССР, МКИ F 17D 1/16. Способ транспортировки по трубопроводу вязких нефтей и нефтепродуктов / [Е. И. Жирнов, В. Ф. Алексеров, А. И. Тихонов, Т. М. Гасанов] (СССР). – № 4433606/23-29; заявл. 25.04.88; опубл. 15.03.90, Бюл. № 10. 37. А. с. 804994 СССР, МКИ F 17D 1/16. Способ совместного транспортирования природного газа и нефти / [Л. Ф. Бондаренко, З. Р. Горбис, А. И. Ильченко и др.] (СССР). – № 2652614/25-08; заявл. 28.07.78; опубл. 15.02.81, Бюл. № 6. 38. А. с. 1027467 СССР, МКИ F 17D 1/20. Способ трубопроводного транспорта жидкости и система для его осуществления / [Л. Ф. Бондаренко, А. И. Ильченко, С. И. Красноокый и др.] (СССР). – № 3007731/25-08; заявл. 14.11.80; опубл. 07.07.83, Бюл. № 25. 39. Баландин С. М. Влияние примесей твердых частиц на перепад давления при турбулентных течениях в каналах постоянного и переменного сечения / С. М. Баландин, А. Ф. Вахгельт, А. В. Шваб // Труды научно-практ. конф. “Молодые ученые и специалисты Томск. обл. в 9-ой пятилетке” (Секц. мех.-мат.). – Томск. – 1975. – С. 58–60. 40. А. с. 1617221 СССР, МКИ F 15D 1/02. Система для транспорта газа / Л. В. Захаров, Н. А. Николаев, А. А. Овчинников (СССР). – № 4657014/31-29; заявл. 28.02.89; опубл. 30.12.90. – Бюл. № 48. 41. Tashiro Hiroyuki. Влияние твердых частиц на характеристики турбулентного потока в горизонтальных трубах при совместном течении в газовом потоке мелких и крупных частиц / Tashiro Hiroyuki, Tomita Yuji, Funatsu Katsuya // Nihonikai gakkai ronbunshu. B=Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. B. – 2000. – Vol. 66, № 644. – P. 1074–1078. 42. Проскураков П. А. О гидравлических сопротивлениях при движении древесноводной пульпы по трубопроводам / П. А. Проскураков // Труды науч.-техн. конф. Лесинж. фак. Ленингр. лесотехн. акад. – 1971. – С. 31–34. 43. Tichonov J. A. Rheologische und hydrodynamische Verhältnisse beim Dispergieren von Faserstoffsuspensionen / J. A. Tichonov, O. A. Terentjev, W. S. Kurov // Zellst. und Pap. – 1991. – 40, № 2. – S. 67–71. 44. Lin Jianzhong. Stability in channel flow with fiber suspensions / Lin Jianzhong, You Zhenjiang // Progr. Nat. Sci. – 2003. – Vol. 13, № 2. – P. 95–99. 45. А. с. 909384 СССР, МКИ F 15D 1/06. Способ управления турбулентным пограничным слоем / В. Ф. Потемкин, Г. А. Дрейцер (СССР). – № 2906801/25-06; заявл. 14.03.80; опубл. 28.02.82, Бюл. № 8. 46. Mohamed Gad-el-Hak.

The Fluid Mechanics of The Freeman Scholar Lecture / Journal of Fluids Engineering. – March 1999. – Vl. 121. – P. 5–33. 47. Седов Л. И. Снижение турбулентного сопротивления при течении суспензий и эмульсий / Л. И. Седов, В. Н. Пулипенко // *Мех. неоднород. и турбулентн. потоков.* – М., 1989. – С. 5–15. 48. Malhotra J. P. Shear stability studies on polymer-polymer and polymer-libre mixtures / Malhotra J. P., Chaturvedi P. N., Singh R. P. // *Rheol. Acta.* – 1987. – V. 26. – № 1. – P. 31–39. 49. Singh R. P. Characteristics of some polymer-polymer, polymer-fibre combinations and grafted polymers as drag reducing agents and their industrial applications / [Singh R. P., Chang P., Reddy G.V., etc.] // *Drag Reduct. 3rd Int. Conf., Bristol.* – Bristol. – 1984. – P. D4/1-D4/5. 50. А. с. 654828 СССР, МКИ F 17D 1/20. Способ уменьшения гидродинамического сопротивления при внутренней и внешней задаче течения / И. Т. Эльперин (СССР). – № 2506886/25-08; Заявлено 05.07.77; Опубл. 30.03.79, Бюл. № 12. 51. Чернюк В. В. Влияние добавок полиакриламида на потери напора во внезапных сужениях и расширениях труб / В. В. Чернюк, Б. С. Піцишин, В. И. Орел, В. М. Жук // *Инж.-физ. журн.* – 2002. – Т. 75, № 4. – С. 115–122. 52. Чернюк В. В. Регулювання інтегральних параметрів напірних потоків рідин гідродинамічно активними додатками: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.23.16 “Гідравліка і інженерна гідрологія” / В. В. Чернюк. – К. 2010. – 36 с.

УДК 620.97: 697.329

С.П. Шаповал

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра теплогазопостачання і вентиляції

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АКУМУЛЯЦІЇ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ КОМБІНОВАНИМ ГЕЛІОНАГРІВНИКОМ

© Шаповал С.П., 2012

Розглянено спосіб підвищення ефективності використання сонячної енергії комбінованим геліонагрівником. Виконання комбінованого геліонагрівника із орієнтацією теплопоглинача на південний схід, південь і південний захід дає можливість ефективніше використовувати сонячну енергію в ранішні та вечірні години. Описано результати досліджень надходження сонячної радіації на комбінований геліонагрівник. Встановлено залежності між різними орієнтаціями комбінованого геліонагрівника і ефективністю роботи геліосистеми.

Ключові слова: сонячний колектор, сонячна енергія, сонячна енергетика.

This article studies the method of efficiency increase of solar energy using by combined solar collector. The making of combined solar collector with orientation on southeast, south and southwest gives a chance to use solar energy in morning and evening hours more efficiently. The results of investigation of solar radiation incoming on the combined solar collectors are described. The dependence between different orientations of the absorber and different constructional overall dimensions are determined.

Key words: solar collector, solar energy, solar energetics.

Вступ. У середині ХХ ст. використання відновних джерел енергії було незначним, проте енергетична криза 70-х років минулого століття, Чорнобильська катастрофа 1986 року та катастрофа на АЕС “Фукусіма-1” в Японії 2011 року докорінно змінили погляди людства на відновлювальні джерела енергії. Європейська Спільнота вимагає від країн, які прагнуть до неї