

УДК 614.844

*Д. В. Колесніков, канд. техн. наук, доцент, С. В. Стась, канд. техн. наук, доцент,
К. І. Мигаленко, канд. техн. наук, доцент,
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України*

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОТОКІВ РІДИНИ ВЗДОВЖ КАНАЛІВ У СТАЦІОНАРНИХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО ВОДЯНОГО ПОЖЕЖОГАСІННЯ

Прогнозування гідродинаміки потоків зі змінними за довжиною витратами з урахуванням як реологічного фактора, так і геометричних особливостей трубопроводу, а також розробка сучасних методів розрахунку подібних систем протипожежного водопостачання базується на сучасному уявленні про фізичні процеси в них, та з урахуванням фізичного і математичного моделювання є актуальним і перспективним напрямком досліджень. Окрім того, подальший прогрес розв'язання окреслених задач неможливий без розкриття особливостей впливу чинників розподілу рідини вздовж трубопроводу на ефективність функціонування стаціонарних систем водяного і пінного пожежогасіння.

Створення засобів та технологій пожежогасіння пов'язано з розробкою різного роду розподільчих пристроїв, які забезпечують необхідні витрати водної вогнегасної речовини, з вирішенням задачі перепаду тиску в'язких рідин зі змінною за довжиною витратою. Подібного роду дослідження можуть бути корисними в системах зрошення, що використовуються у системах охолодження різноманітних небезпечних об'єктів, в протипожежній техніці (стаціонарних системах водяного і пінного пожежогасіння), протипожежних автомобілях, пожежному устаткуванні тощо. Складність вирішення подібного типу задач полягає в тому, що при розподілі рідини вздовж трубопроводу, рух у його магістральній частині є нестабілізованим, тобто при розрахунку втрат енергії виникає необхідність враховувати вплив сил інерції від конвективного прискорення.

В роботі наведені результати експериментів дослідження потоків в'язких рідин у стаціонарних системах автоматичного водяного пожежогасіння з дискретним відбором рідини по довжині трубопроводу, експериментально підтверджене припущення наявності, крім сил в'язкого тертя, сил інерції від конвективного прискорення, що не дозволяє досягти стабілізації водяного потоку у трубопроводах, наведені висновки про вплив криволінійної частини трубопроводу на гідравлічні втрати.

Ключові слова: *водяний потік, в'язкість, витрати рідини, гідравлічний опір, конвективне прискорення.*

Постановка проблеми. Створення засобів та технологій пожежогасіння пов'язане з розробкою різного роду розподільчих пристроїв, які забезпечують необхідну витрату водної вогнегасної речовини. Подібного роду дослідження можуть бути корисними в системах зрошення, що використовуються для охолодження різноманітних небезпечних об'єктів, а також у протипожежній техніці (стаціонарних системах водяного і пінного пожежогасіння), протипожежних автомобілях, пожежному устаткуванні тощо.

Знання у галузі гідродинаміки потоків зі змінною за довжиною витратою безпосередньо впливають на якість спроектованих систем автоматичного водяного пожежогасіння. Прогнозування гідродинаміки потоків зі змінною за довжиною витратою з урахуванням як реологічного фактора, так і геометричних особливостей трубопроводу, а також розробка сучасних методів розрахунку подібних систем протипожежного водопостачання базується на сучасному уявленні про фізичні процеси в них, та з

урахуванням фізичного і математичного моделювання.

Важливо, що для зазначених систем у якості рідини може бути застосована не тільки вода, але й розчини поверхнево-активних рідин низької концентрації. Особливістю функціонування стаціонарних систем водяного і пінного пожежогасіння у таких випадках є зміна гідравлічного опору, як у магістралі, так й в установлених уздовж неї насадках, що позначається на характері, розмірах та параметрах створюваних струменів і хмар. Зазначена зміна суттєво залежить від декількох факторів, а складність розв'язання задачі перепаду тиску в'язких рідин зі змінною за довжиною витратою полягає в тому, що при розподілі рідини вздовж трубопроводу, рух у його магістральній частині є нестабілізованим, тобто при розрахунку втрат енергії виникає необхідність враховувати вплив сил інерції від конвективного прискорення. Справедливість зазначеного може бути підтверджена чи спростована у результаті проведення відповідних експериментальних досліджень, що можуть бути підґрунтям для розробки пропозицій з проектування та подальшого створення ефективних систем автоматичного водяного пожежогасіння.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Експериментальні дослідження течій рідин зі змінною за довжиною витратою (вздовж трубопроводу) проводилися багатьма авторами, в тому числі вони представлені в роботі Федорця А. А. і Маланчука С. М. [1]. Проте, досліди проводилися тільки при рівномірному відборі рідини по довжині трубопроводу. Ґрунтовними є дослідження, наведені Кравчуком А. М. [2], де розглянуті декілька схем трубопроводів, у яких робочою рідиною є вода. Окрім того, у роботі [2] запропоновані рівняння, що описують гідравлічну систему та розроблені критерії, які характеризують рух води в каналі зі змінною за довжиною витратою. Використовуючи отримані критерії, Кравчук А. М. запропонував формули для розрахунку відносної витрати з відносним перепадом тиску.

Питання зменшення турбулентного в'язкісного тертя по довжині трубопроводів

для розчинів високомолекулярних полімерів із ланцюжковою будовою молекул описані Жуком В. М. [3]. Він розглянув питання економічної доцільності введення додатків у потік з метою зменшення втрат енергії на гідравлічне тертя, а саме оцінив вплив різних техніко-економічних факторів на величину економічного ефекту при використанні зменшення турбулентного тертя за рахунок використання полімерів з великою молекулярною масою, відомого як ефект Томса. Для трубопроводів, якими є стаціонарні системи водяного пожежогасіння, окрім зменшення втрат енергії на транспортування рідини серед виділених ефектів [3] суттєвим у нашому випадку є підвищення ступеня рівномірності витрати рідини та можливість регулювання витрати в трубопроводі у разі відповідної необхідності.

Разом з тим, експериментальних досліджень в даній області недостатньо для отримання коректних висновків про фактори, що впливають на характер руху рідини вздовж каналу, особливо, якщо мова йде про випадки з її дискретним відбором та використанні аномально в'язких рідин. Таким чином, виникає необхідність фізичного моделювання гідродинаміки течії рідини з метою коригування результатів досліджень стаціонарних потоків. Перспектива розв'язання окреслених задач передбачає розкриття особливостей впливу чинників розподілу рідини вздовж трубопроводу на ефективність функціонування стаціонарних систем водяного і пінного пожежогасіння.

Фактично, експериментальні дослідження мають бути проведені на базі розроблених установок й надати уявлення про гідродинаміку нестабілізованих течій в потоках при наявності дискретного відбору рідини крізь насадки.

Постановка задачі та її розв'язання. Відповідно до викладеного, у якості цілі обрано визначення справедливості припущення про те, що в потоках рідини вздовж каналу, особливо, якщо мова йде про випадки з її дискретним відбором, течія є нестабілізованою, тобто крім сил в'язкого тертя діють сили інерції від конвективного прискорення. Для досягнення цілі та

проведення повноцінного дослідження виникла необхідність створення декількох стендів, які дозволили провести вивчення гідродинаміки потоку як в насадках, встановлених в розподільному трубопроводі вздовж потоку, так і в самому трубопроводі.

Дослідження дестабілізації потоку за рахунок зміни витрат за довжиною. Експериментальний стенд для проведення досліджень течії рідини дозволяє проводити дослідження, пов'язані з плинном в'язких рідин в насадках різного типу та в пожежних стволах. Основним елементом стенду є насосна установка, яка включає в себе асинхронний трифазний електричний двигун потужністю 18 кВт і відцентровий

рідинний насос, який може забезпечити витрати до 800 л/хв з напором до 100 м і дозволяє проводити дослідження, як при ламінарному, так і при турбулентному режимах течії. Насосна установка через гідравлічну систему (витратомір, датчик тиску, напірні трубопроводи) пов'язана з струминоформувальними насадками (пожежними стволами), які можуть бути встановлені під різними кутами нахилу до горизонту за допомогою штатива. На рис. 1 наведені зовнішній вигляд експериментального стенда та блок моделювання течій в'язких та аномально-в'язких рідин із змінною вздовж потоку масою.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд стенда і його елементів

Робочою частиною стенду є трубопровід, що дозволяє моделювати потоки в'язкої або аномально в'язкої рідини із змінною вздовж потоку масою. Витрата рідини з насадок вимірюється об'ємним методом, а використання манометрів дозволяє побудувати залежності змін тиску в насадках від фіксованої витрати рідини вздовж трубопроводу.

Проведені експерименти дали змогу отримати дані по всіх основних характеристиках потоку при заданих геометричних параметрах, а саме: витраті Q в магістралі, витраті q в насадках, тиску P в різних точках системи, даних розрахунку зміни середньої швидкості потоку $U_{сер}$ уздовж розподільного трубопроводу і, як наслідок, градієнту швидкості γ , що є надзвичайно важливим для ньютонівського

середовища. Точність проведених вимірювань визначалася за даними використаних засобів вимірювання. Для ротаційного віскозиметра «Rheostet-2», який вимірює в'язкість в межах від 10^2 до 10^3 пуаз при швидкостях зсуву

$$0,2 \text{ с}^{-1} \leq \gamma \leq 1,8 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1} \text{ похибка}$$

склала 3-4%. За даними аналізу отримані наступні похибки вимірювань: витрата – 4-7%; визначення в'язкості суміші – до 4%; визначення тиску – 3-4%.

Планування експерименту, пов'язане з дослідженнями течії в'язкого середовища в потоках зі змінною масою, здійснювалося на основі досліджень, наведених в роботах [4-7]. При проведенні експериментальних досліджень основним завданням були виявлення залежностей між тиском P і витратою рідини Q по довжині на різних

ділянках трубопроводу. Дані значення залежать від цілого ряду факторів: геометричних характеристик каналів, реологічних і температурних властивостей рідини та розчинів, витрати насадки.

Результати проведення експериментів, можна прогнозувати на

основі спрощеної схеми потоку, представленій на рис. 2 і описаної в роботах В. М. Жука (d – діаметр каналу, Q_0 – початкова витрата, q_1, q_2, q_3 – витрати дренчерів, l – відстані між ними, x – напрямок течії вздовж каналу).

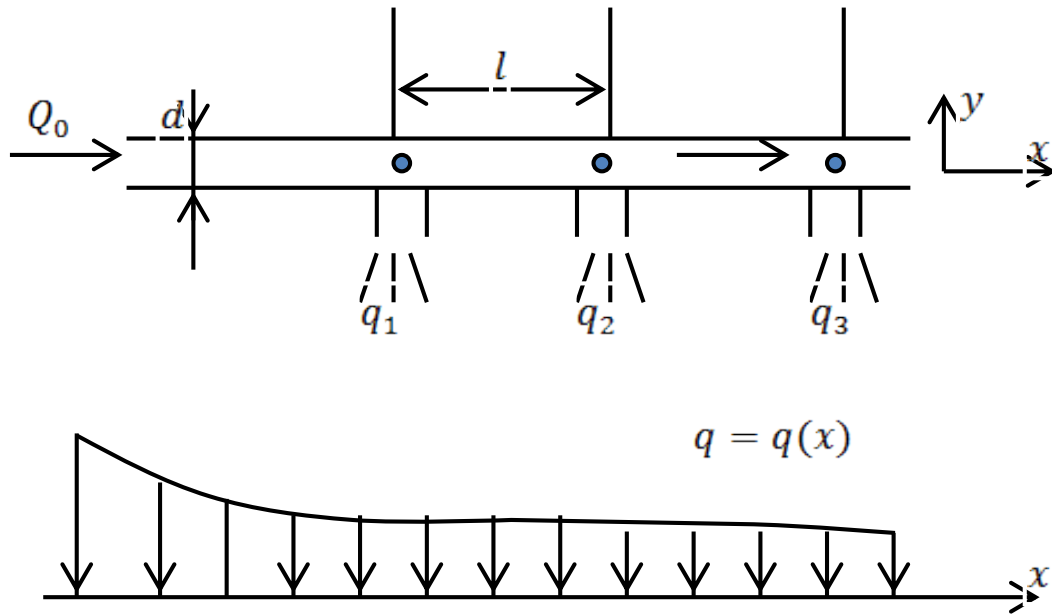


Рисунок 2 – Схема прогнозування течії у потоці зі змінною масою [3]

Для потоку, зображеного на рис. 2, зміна значення $q(x)$ по довжині має нелінійний характер. Тоді [3]

$$q(x) = \mu S \sqrt{2gH(x)};$$

$$Q(x) = \frac{1}{e} \int_0^x q(x) dx$$

й, відповідно до закону Дарсі-Вейсбаха, для напору H маємо

На основі проведених експериментальних досліджень було встановлено, що в залежності від відстані між насадками, розміщеними по довжині трубопроводу, відповідним чином змінюються витрата і тиск. Ступінь зміни даних величин залежить від відбору від основного потоку і режиму течії рідини, тобто числа Рейнольдса. Таким чином, експерименти показали, як змінюється по

$$dH = \frac{8\lambda Q^2(x)}{\pi^2 q d^5} dx.$$

Важливо, що для випадку застосування поверхнево-активних добавок, результати експериментів можуть суттєво відрізнитися від випадків застосування води. Окрім того, явище аномалії в'язкості буде по різному проявлятися для ламінарного й турбулентного режимів течії.

довжині трубопроводу величина $\frac{dQ}{dx}$, а

значить і $\frac{\partial U}{\partial x}$. Зміна цієї величини

призводить до дестабілізації течії в потоці за насадкою. Результати досліджень, представлені на рис. 3 були отримані методом фотографування. Вони показали, що структура потоку при великих числах Рейнольдса ($Re > 1500$) суттєво змінюється, особливо при турбулентному режимі течії.

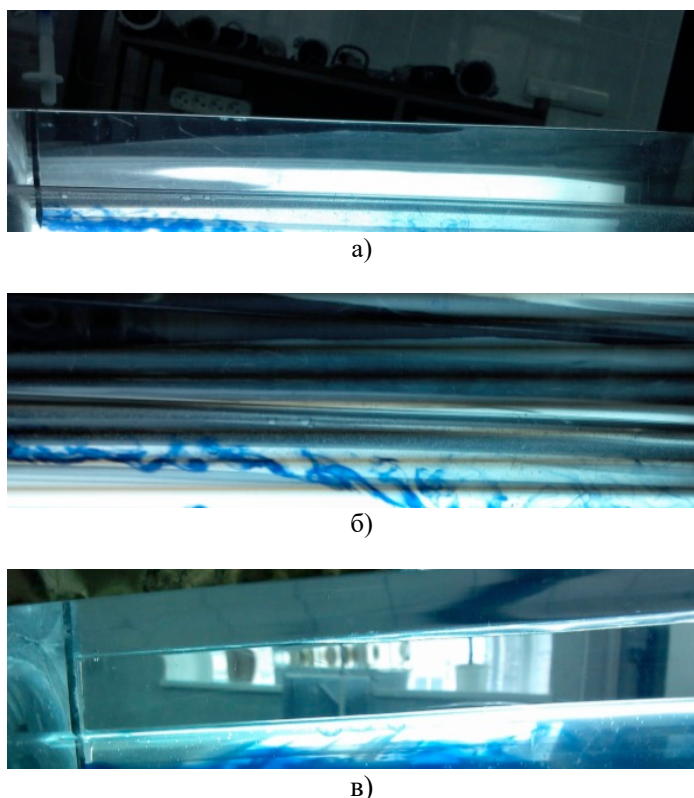


Рисунок 3 – Дестабілізація течії в потоці за насадкою, а – при мінімальній витраті; б – при числах Рейнольдса $Re > 1500$; в – при турбулентному режимі

Таким чином, течії в трубопроводі на ділянках між насадками в ряді випадків можна описувати з позицій гідродинамічної початкової ділянки, тобто, припускаючи, що за областю відбору рідини епюра швидкостей відрізняється від параболічної, якщо режим течії ламінарний. Далі проходить процес перетворення її до виду, який відповідає стабілізованій течії.

На наступному етапі здійснювалися дослідження течій у криволінійних трубопроводах, а саме: загальна витрата; тиск; витрата рідини, відібраної через насадки вздовж потоку при заданих в'язкості, щільності та температурі рідини.

Оскільки у проведених експериментах відбір рідини був дискретним через насадки, встановлені на відстані 4 м один від одного, то функція $Q(x)$ мала б мати ступінчастий характер. Однак, при обробці отриманих даних побудована суцільна лінія функції $Q(x)$ (рис. 4), а похибка такої апроксимації не перевищувала 10%, що дало можливість дати оцінку системі дестабілізації течії у зв'язку із змінною по довжині масою потоку. На рис. 4 представлений характер такої залежності для різних значень витрати Q , при цьому нижчі

графіки відповідають нижчим значенням тиску у вхідній зоні системи (верхній графік рисунків а) і б) побудований за результатами експериментів при значенні тиску 0,6 МПа, крок експерименту складає 0,05 МПа).

Характер зміни дискретного відбору в'язкої рідини через насадки по довжині криволінійного трубопроводу для випадків, коли рідина - 0,5%, 1% або 2,5% водний розчин піноутворювача, буде подібним до випадків використання води й 5% водного розчину піноутворювача (рис.4).

Характер зміни тиску в'язкої рідини через насадки по довжині криволінійного трубопроводу, коли рідина - 0,5%, 1%, 2,5% або 5% водний розчин піноутворювача, буде схожим, до поданого на рис. 5 (верхній графік побудований за результатами експериментів при значенні тиску 0,65 МПа, крок експерименту складає 0,05 МПа). Нелінійність функції $P(x)$, пов'язана з тим, що локальний відбір рідини через насадки призводить до певної дестабілізації течії, оскільки проявляється вплив сил інерції від конвективного прискорення. Таким чином, з'являється відмінність між перепадом тиску $\Delta P_{\text{м}}$ стабілізованої течії, де функція $P(x)$ має

лінійний характер, та випадком реальної досліджуваної течії. Зазначені результати підтверджуються як візуально (рис. 3) так й за

даними вимірювань, проведених під час експериментів (рис. 4, 5).

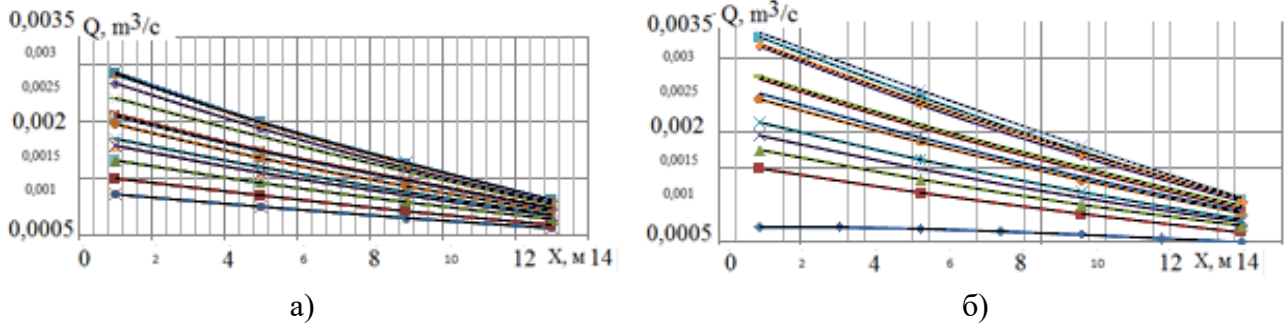


Рисунок 4 – Характер зміни дискретного відбору в'язкої рідини через насадки по довжині криволінійного трубопроводу для випадків, коли рідина – вода (а) та 5% водний розчин піноутворювача (б).

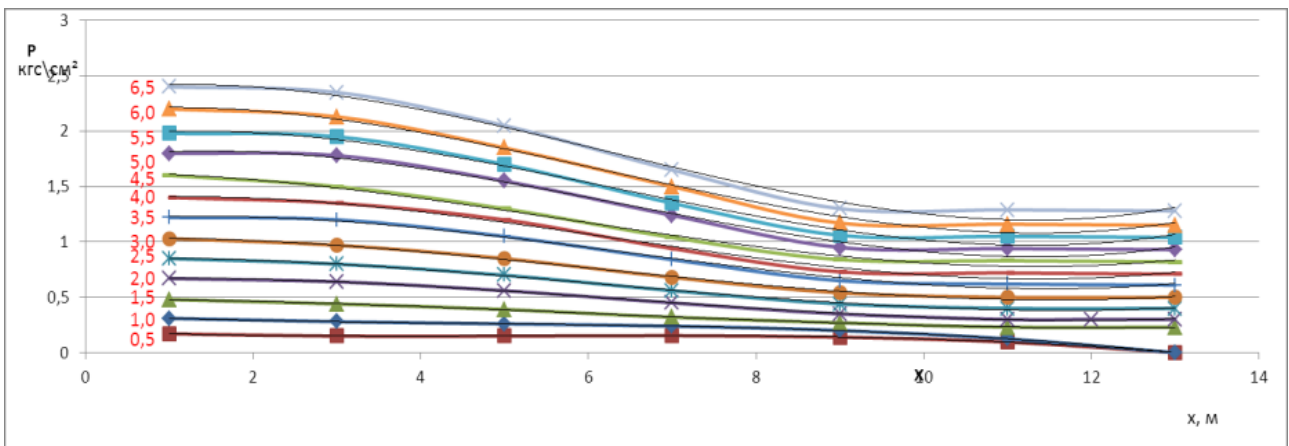


Рисунок 5 – Характер зміни тиску в'язкої рідини через насадки по довжині криволінійного трубопроводу (для води)

Висновки. В роботі наведені результати проведених експериментів та здійснений їх аналіз для випадку течії в'язких рідин в трубопроводах у стаціонарних системах автоматичного водяного пожежогасіння при наявності дискретного відбору рідини. Результати експериментів підтвердили припущення про те, що в описаних потоках течія є нестабілізованою, тобто окрім сил в'язкого тертя діють сили інерції від конвективного прискорення. У зв'язку з цим, втрати енергії в потоці відрізняються від втрат для стабілізованої течії, що необхідно враховувати при гідравлічних розрахунках. Результати експериментів дозволяють також зробити певні висновки щодо впливу криволінійності трубопроводу на гідравлічні втрати, коли нелінійність зміни тиску й витрати рідини посилюється відносно

прямолінійних ділянок трубопроводу. Отримані в роботі дані можуть бути корисними при розробці методик і алгоритмів розрахунку розглянутого типу течій, наприклад, при проектуванні автоматичних систем водяного пожежогасіння. Так, як приклад, застосуванням низьковідсоткових водних розчинів піноутворювача можна досягти більш рівномірної витрати насадок вздовж трубопроводу. Разом з тим, отримані у роботі результати потребують подальшого вивчення для найбільш ефективного їх застосування при проектуванні та експлуатації стаціонарних систем водяного пожежогасіння за рахунок отримання залежностей, що максимально точно характеризують гідравлічні втрати у досліджуваних системах й особливості витікання рідини крізь насадки за умов зміни тиску по довжині.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Федорец А. А. Определение коэффициента гидравлического трения в трубопроводах при отсоединении расхода / А. А. Федорец, З. Р. Маланчук // Гидравлика и гидротехника. – 1980. – Вып. 31. – С.58–62.
2. Кравчук А. М. Гидравлика переменной массы напорных перфорированных трубопроводов технических систем / А. М. Кравчук // Автореф. д-ра техн. наук. – К., 2004. – 35 с.
3. Жук Володимир Михайлович. Регулювання витрати рідини в трубопроводах введенням у потік гідродинамічно активних додатків [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.23.16 / Жук Володимир Михайлович. – Львів, 1999. – 157 с. – Бібліогр.: С.139-151.
4. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента / Ю. П. Адлер. – М.: Металлургия, 1969. – 513 с.
5. Красовский Г. И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов. – Минск: БГУ, 1982. – 302 с.
6. Atkinson A. C. Optimum experimental designs / A. C. Atkinson, A.N. Donev, R. D. Tobias. With SAS Oxford University Press, Oxford, 2007. – 511 p.
7. Монтгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д. К. Монтгомери. – М.: Мир, 1981. – 520 с.

REFERENCES

1. Fedorets A. A. Opredelenye koefyitsyenta hydravlycheskoho treniya v truboprovodakh pry otsoedynenyy raskhoda / A. A. Fedorets, Z. R. Malanchuk // Hydravlyka y hydrotekhnika. – 1980. – Вып. 31. – S.58–62.
2. Kravchuk A. M. Hydravlyka peremenoї massy napornykh perforirovannykh truboprovodov tekhnicheskyykh system / A. M. Kravchuk // Avtoref. d-ra tekhn. nauk. – K., 2004. – 35 s.
3. Zhuk Volodymyr Mykhailovych. Rehulivuvannya vytraty ridyny v truboprovodakh vvedenniam u potik hidrodynamichno aktyvnykh dodatktiv [Tekst]: dys. kand. tekhn. nauk: 05.23.16 / Zhuk Volodymyr Mykhailovych. – Lviv, 1999. – 157 s. – Bibliohr.: S.139-151.
4. Adler Yu. P. Vvedenye v planirovaniye eksperymenta / Yu. P. Adler. – M.: Metallurhyia, 1969. – 513 s.
5. Krasovskiy H. Y. Planirovaniye eksperymenta / H.Y. Krasovskiy, H.F. Fylaretov. – Mynsk: BHU, 1982. – 302 s.
6. Atkinson A. C. Optimum experimental designs / A. C. Atkinson, A.N. Donev, R. D. Tobias. With SAS Oxford University Press, Oxford, 2007. – 511 r.
7. Monthomery D. K. Planirovaniye eksperymenta y analiz dannykh / D. K. Monthomery. – M.: Myr, 1981. – 520 s.

Д. В. Колесников, канд. техн. наук, доцент, С. В. Стась, канд. техн. наук, доцент,

К. И. Мигаленко, канд. техн. наук, доцент,

*Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля
Национального университета гражданской защиты Украины*

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ ВДОЛЬ КАНАЛОВ В СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВОДЯНОГО ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Прогнозирование гидродинамики потоков с переменными по длине затратами с учетом как реологического фактора, так и геометрических особенностей трубопровода, а также разработка современных методов расчета подобных систем противопожарного водоснабжения базируется на современном представлении о

физических процессах в них, и с учетом физического и математического моделирования является актуальным и перспективным направлением исследований. Кроме того, дальнейший прогресс решения определенных задач невозможно без раскрытия особенностей влияния факторов распределения жидкости вдоль

трубопровода на ефективность функционирования стационарных систем водяного и пенного пожаротушения.

Создание средств и технологий пожаротушения связано с разработкой различного рода распределительных устройств, обеспечивающих необходимые расходы водного огнетушащего вещества, с решением задачи перепада давления вязких жидкостей с переменной по длине расходом. Подобного рода исследования могут быть полезными в системах орошения, используемых в системах охлаждения различных опасных объектов, в противопожарной технике (стационарных системах водяного и пенного пожаротушения), противопожарных автомобилях, пожарном оборудовании и тому подобное. Сложность решения подобного типа задач заключается в том, что при распределении жидкости вдоль трубопровода, движение в его

магистральной части является нестабилизированным, то есть при расчете потерь энергии возникает необходимость учитывать влияние сил инерции от конвективного ускорения.

В работе приведены результаты экспериментов исследования потоков вязких жидкостей в стационарных системах автоматического водяного пожаротушения с дискретным отбором жидкости по длине трубопровода, экспериментально подтверждено предположение наличия, кроме сил вязкого трения, сил инерции от конвективного ускорения, не позволяет достичь стабилизации водного потока в трубопроводах, приведенные выводы о влиянии криволинейной части трубопровода на гидравлические потери.

Ключевые слова: водной поток, гражданская помощь, региональная политика, конвенционное ускорение.

UDC 614.844

D. Kolesnikov, PhD in technical sciences, docent, S. Stas, PhD in technical sciences, docent, K. Myhalenko, PhD in technical sciences, docent, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of National University of Civil Defence of Ukraine

EXPERIMENTAL RESEARCH OF LIQUID FLOWS ALONG THE PIPES IN FIXED SYSTEMS OF AUTOMATIC WATER FIRE EXTINGUISHMENT

Forecasting the hydrodynamics of fluxes with variable length flow, taking into account both the rheological factor and the geometric features of the pipeline, as well as the development of modern methods of calculation of similar fire-fighting water supply systems is based on a modern understanding of physical processes in them and taking into account the actual and physical modeling perspective direction of research. In addition, further progress in solving the outlined tasks is not possible without revealing the peculiarities of the influence of fluid distribution factors along the pipeline on the performance of the stationary water and foam fire extinguishing systems.

The creation of fire extinguishing tools and technologies is associated with the development of various types of switchgear that provide the required flow of water extinguishing agent, with the solution of the problem of pressure differential viscous fluids with variable

length flow. This kind of research can be useful in irrigation systems used in cooling systems of various dangerous objects, in fire-fighting equipment (fixed water and foam fire extinguishing systems), fire-fighting vehicles, fire-fighting equipment, etc. The difficulty of solving this type of problem is that when the fluid is distributed along the pipeline, the movement in its backbone is unstable, ie, when calculating energy losses, there is a need to take into account the influence of inertia forces from convective acceleration.

The results of the experiments of the study of viscous fluid flows in stationary systems of automatic water fire extinguishing with discrete fluid selection along the length of the pipeline are experimentally confirmed in the pipelines, the conclusions about the influence of the curved part of the pipeline on hydraulic losses are given.

Key words: water flow, high speed, low speed, high speed, convection accelerated.