

УДК 519.237.5:621.22-225

С.Л. КАРПЕНКО, Г.В. РУДАКОВА, В.М. ПОЛІЩУК
Херсонський національний технічний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ЗОВНІШНІХ ФАКТОРІВ НА ГІДРАВЛІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАКРИТОЇ ЗРОШУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Розглянуто приклад односторонньої спрощеної схеми наявного дощувального обладнання. Виявлені основні гідравлічні характеристики трубопроводів закритої зрошувальної системи, а саме витрат води, дощувальними машинами, втрати тиску по довжині трубопроводу, питомі втрати тиску. Виявлені фізичні властивості рідини (води), які впливають на гідравлічні характеристики в системі. Наведено приклади розрахунку витрат води бруто в зрошувальному трубопроводі та в розподільному трубопроводі з урахуванням коефіцієнту корисної дії трубопроводів. Наведено приклад розрахунку діаметру трубопроводу на окремих ділянках з урахуванням оптимальної швидкості руху рідини. Приведені формули, необхідні для розрахунку втрат тиску по довжині та для питомих втрат тиску. Наведено табличні данні фізичних характеристик води в діапазоні температур 0-50 °С. Були отримані регресійні моделі густини води та динамічної в'язкості для аналітичного опису залежностей фізичних характеристик води від температури. Побудовано графік залежності густини води від температури та виявлено на скільки вона змінюється під впливом температури. Виявлені фізичні властивості води які більші за все впливають на гідравлічні характеристики системи. Доведено що густина води під впливом температури майже не змінюється, а динамічна в'язкість води змінюється суттєво. Побудовано графік залежності динамічної в'язкості води від температури з розрахунком зміни на розглянутому діапазоні. Розраховані значення кінематичної в'язкості води, за якими була отримана функція та побудовано графік залежності від температури. Розраховано число Рейнольдса для діаметрів 250 мм та 500 мм та побудовано графік залежностей його значень від температури. Розраховані коефіцієнти гідравлічного тертя, побудовано графік їх залежності від температури та розраховано на скільки вони змінюються в розглянутому діапазоні температур. Отримані значення питомих втрат тиску та втрат тиску по довжині для різних ділянок трубопроводу, побудовано графіки залежностей втрат тиску від температури.

Ключові слова: зовнішні фактори, закрыта зрошувальна система, дощувальне обладнання, регресійна модель, математична модель, гідравлічні характеристики.

С.Л. КАРПЕНКО А.В. РУДАКОВА, В. М. ПОЛИЩУК
Херсонский национальный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАКРЫТОЙ ОРОСИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрен пример односторонней упрощенной схемы имеющегося дождевального оборудования. Выявлены основные гидравлические характеристики трубопроводов закрытой оросительной системы, а именно расход воды, дождевальными машинами, потери давления по длине трубопровода, удельные потери давления. Обнаружены физические свойства жидкости (воды), которые влияют на гидравлические характеристики в системе. Приведены примеры расчета расхода воды бруто в оросительном трубопроводе и в распределительном трубопроводе с учетом коэффициента полезного действия трубопроводов. Приведен пример расчета диаметра трубопровода на отдельных участках с учетом оптимальной скорости движения жидкости. Приведены формулы необходимые для расчета потерь давления по длине и для удельных потерь давления. Приведены табличные данные физических характеристик воды в диапазоне температур 0-50 °С. Были получены регрессионные модели плотности воды и динамической вязкости для аналитического описания зависимостей физических характеристик воды от температуры. Построен график зависимости плотности воды от температуры и выявлены насколько она меняется под воздействием температуры. Обнаруженные физические свойства воды которые больше всего влияют на гидравлические характеристики системы. Доказано, что плотность воды под воздействием температуры почти не меняется, а динамическая вязкость воды меняется существенно. Построен график зависимости динамической вязкости воды от температуры с расчетом изменения на рассматриваемом диапазоне. Рассчитаны значения кинематической вязкости воды, по которым была получена функция и построен график зависимости от температуры. Рассчитано число Рейнольдса для диаметров 250 мм и 500 мм и

построен график зависимостей его значений температуры. Рассчитаны коэффициенты гидравлического трения, построен график их зависимости от температуры и рассчитан на сколько они меняются в рассматриваемом диапазоне температур. Получены значения удельных потерь давления и потерь давления по длине для различных участков трубопровода, построены графики зависимостей потерь давления от температуры.

Ключевые слова: внешние факторы, закрытая оросительная система, дождевальное оборудование, регрессионная модель, математическая модель, гидравлические характеристики.

S.L. KARPENKO, H.V. RUDAKOVA, V.M. POLISCHUK
Kherson National Technical University

MODELING THE INFLUENCE OF EXTERNAL FACTORS ON THE HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF A CLOSED IRRIGATION SYSTEM

An example of a one-sided simplified scheme of the existing sprinkler equipment is considered. The main hydraulic characteristics of pipelines of a closed irrigation system are revealed, namely, water consumption by sprinklers, pressure losses along the length of the pipeline, and specific pressure losses. The physical properties of the liquid (water) have been discovered, which affect the hydraulic characteristics in the system. Examples of calculating the gross water consumption in the irrigation pipeline and in the distribution pipeline, taking into account the efficiency of the pipelines, are given. An example of calculating the diameter of a pipeline in individual sections, taking into account the optimal speed of fluid movement, is given. The formulas are given for calculating the pressure loss along the length and for the specific pressure loss. The tabular data of the physical characteristics of water in the temperature range 0-50 °C are given. Regression models of water density and dynamic viscosity were obtained for the analytical description of the dependences of the physical characteristics of water on temperature. A graph of the dependence of the density of water on temperature was built and it was revealed how much it changes under the influence of temperature. Discovered physical properties of water that most affect the hydraulic performance of the system. It is proved that the density of water under the influence of temperature hardly changes, and the dynamic viscosity of water changes significantly. A graph of the dependence of the dynamic viscosity of water on temperature is plotted with the calculation of the change in the considered range. The values of the kinematic viscosity of water were calculated, from which the function was obtained and a graph of the dependence on temperature was plotted. The Reynolds number is calculated for diameters of 250 mm and 500 mm and a graph of the dependences of its temperature values is built. The coefficients of hydraulic friction are calculated, a graph of their dependence on temperature is built and it is calculated how much they change in the considered temperature range. The values of specific pressure losses and pressure losses along the length are obtained for various sections of the pipeline, graphs of the dependences of pressure losses on temperature are constructed.

Keywords: external factors, closed irrigation system, sprinkler equipment, regression model, mathematical model, hydraulic characteristics.

Постановка проблеми

Перетворення сільськогосподарського виробництва у високо розвинутий сектор економіки неможливе без послаблення його залежності від несприятливих природно-кліматичних умов. Україна належить до тих країн, де меліорація є одним з визначальних факторів загального стану виробництва продуктів харчування, сировини для промисловості, забезпечення продовольчої безпеки держави та експорту продукції сільськогосподарської галузі [1].

Широке використання сучасних комп'ютерно-інтегрованих технологій у тому числі в сільськогосподарському виробництві, так звані системи точного землеробства [2], обумовлює економне використання водних і енергетичних ресурсів за рахунок впровадження інформаційно-керуючих систем з підсистемами моніторингу та застосування методів адаптивного керування. Важливим аспектом підтримання оптимальних умов процесу вирощування агрокультур є автоматизовані системи поливу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

На території України для забезпечення необхідного додаткового поливу, широкого розповсюдження набули закриті зрошувальні системи (ЗЗС) з використанням

дощувальних машин універсальних (ДМУ) серії «Фрегат», у зв'язку з чим виникають проблеми пов'язані з експлуатацією таких ДМУ [3]. Серійна механізована зрошувальна система серії «Фрегат» передбачає лише механічні методи управління, що виключає дистанційне керування або керування з використанням автоматизованих систем, які є сучасним напрямком розвитку технологій в будь-якій галузі.

Одним з шляхів впровадження методів дистанційного керування в закритих зрошувальних системах є використання сучасних технічних засобів автоматизації, а саме заслінок з електромеханічним приводом для підключення або відключення окремих фрегатів, датчиків тиску, витратомірів для зворотного зв'язку з системою керування, контролерів керування насосним обладнанням. Для покращення режимів поливу та дистанційного контролю стану системи необхідне також наявність відповідного програмного забезпечення для збору статистичних даних та керування. За рахунок керування насосним обладнанням, яке створює тиск у магістралі, можна забезпечити належні режими роботи у магістралі водопостачання ДМУ.

При побудові математичної моделі для аналізу гідравлічних процесів в закритій зрошувальній гідравлічній системі, по-перше, проводиться розрахунок розмірів всіх її трубопроводів; далі – характеристик насосної станції [3]. Розрахунок трубопроводу проводиться з огляду на специфіку роботи ЗЗС. Структуру наявного активного дощувального обладнання більшості ЗЗС можна привести у вигляді уніфікованої спрощеної односторонньої схеми (рис.1), як представлено в [4].

Для гідравлічного розрахунку насосної станції, що працює на закриту зрошувальну систему, необхідно попередньо оцінити передбачувані: витрати води на розподільному трубопроводі і можливі втрати тиску. Окрім вмикання та вимикання дощувального обладнання на тиск в системі впливають фізичні явища, повзанні з втратами тиску у трубопроводі по довжині через тертя рідини о стінки трубопроводу, які в свою чергу залежать від характеристик обладнання ЗЗС та властивостей рідини, яка змінюється під впливом температури оточуючого середовища.

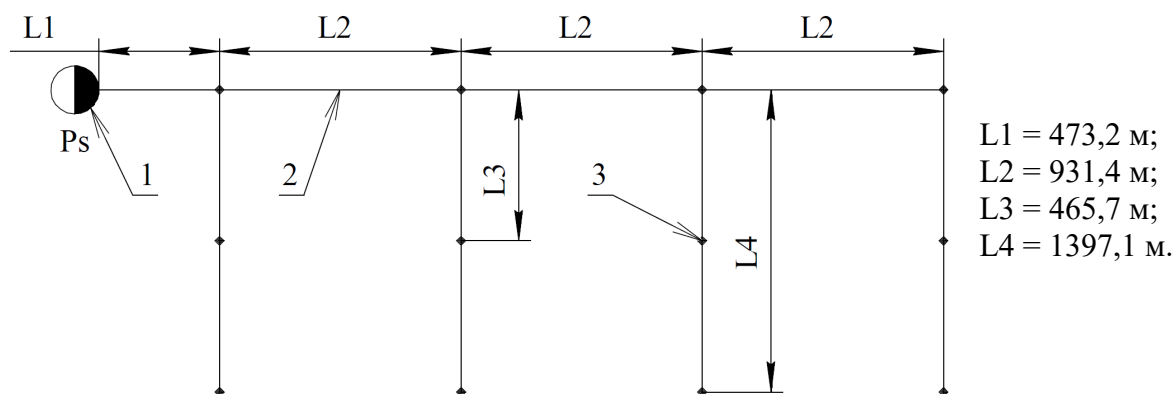


Рис. 1. Одностороння спрощена схема:

1 – насосна станція; 2 – розподільний трубопровід; 3 – зрошувальний трубопровід

Мета дослідження

Метою дослідження є моделювання зміни значень гідравлічних характеристик в закритій зрошувальній системі під впливом зовнішніх факторів для визначення найсуттєвіших з них.

Викладення основного матеріалу дослідження

До гідравлічних характеристик в ЗЗС відносяться: витрати води дощувальними машинами, втрати тиску по довжині трубопроводів, які безпосередньо залежать від

різних фізичних властивостей рідини, а також від коефіцієнтів корисної дії трубопроводів, коефіцієнтів гідравлічного тертя трубопроводів.

1. Визначення витрати води зрошувального і розподільного трубопроводу.

При відомих фактичних розмірах трубопроводів в системі, можна зробити розрахунок витрати води бруто в зрошувальному трубопроводі за формулою [5]:

$$Q_b^{i.p.} = \frac{nQ_m}{\eta_{i.p.}} \text{ [л/с]}, \quad (1)$$

де n – кількість дощувальних машин, одночасно працюючих на зрошувальному трубопроводі; Q_m – витрати дощувальної машини, л/с; $\eta_{i.p.}$ – коефіцієнт корисної дії зрошувального трубопроводу (приймається рівним 0,99).

При значеннях $n=1$, $Q_m=60$, за формулою (1) отримаємо, що витрата води бруто в зрошувальному трубопроводі:

$$Q_b^{i.p.} = \frac{160}{0.99} = 60.6 \text{ л/с.}$$

Розрахункова витрата води бруто $Q_b^{i.p.}$ розподільного трубопроводу (див рис. 1) дорівнює сумі витрат одночасно працюючих на ньому дощувальних машин і визначається за формулою [5]:

$$Q_b^{d.p.} = \frac{nQ_m}{\eta_{d.p.}} \text{ [л/с]}, \quad (2)$$

де n – кількість дощувальних машин, одночасно працюючих на розподільному трубопроводі; Q_m – витрати дощувальної машини, л/с; $\eta_{d.p.}$ – коефіцієнт корисної дії розподільного трубопроводу (приймається рівним 0,98).

Підставивши значення у формулу (2) при $n=4$ отримаємо:

$$Q_b^{d.p.} = \frac{460}{0.98} = 244.9 \text{ л/с.}$$

2. Визначення втрат тиску по довжині трубопроводу.

При русі води по трубопроводу виникають сили опору або тертя, внаслідок чого частина напору втрачається на подолання цих опорів. Тому необхідно розраховувати втрати напору по довжині трубопроводу.

Втрати тиску в трубопроводі на тертя потоку води о стінки трубопроводу визначаються діаметром трубопроводу, матеріалом з якого він виготовлений і витратою води через трубопровід. Для розрахунку втрат по довжині трубопроводу використовуємо формулу Вейсбаха-Дарсі [6] для турбулентного усталеного рівномірного тиску рідини. Для круглих труб загальна залежність для визначення втрат по довжині має вигляд:

$$\Delta h_l = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \text{ [м]}, \quad (3)$$

де L – довжина трубопроводу, м; V – середня швидкість, м/с; D – діаметр трубопроводу, м; λ – коефіцієнт гідравлічного тертя; g – прискорення вільного падіння, м/с².

Для визначення питомих гідравлічних втрат різних трубопроводів для систем водопостачання, зазвичай використовують рівняння Вейсбаха-Дарсі [6]:

$$\Delta P = \lambda \frac{1}{D} \frac{V^2}{2} \rho \text{ [Па/м]}, \quad (4)$$

де ΔP – питомі втрати тиску, Па/м; λ – коефіцієнт гідравлічного тертя; V – швидкість переміщення рідини, м/с; D – внутрішній діаметр трубопроводу, м; ρ – густина рідини, кг/м³.

Діаметри трубопроводів на окремих ділянках мережі розраховуються за їх розрахунковими витратами і оптимальними швидкостями руху води, наступним чином:

$$D = 1000 \sqrt{\frac{4QQ_0}{\pi V_0}} \text{ [мм]},$$

де Q – розрахункова витрата води в трубопроводі, м³/с; V_0 – оптимальна швидкість руху води в трубопроводі, м/с. Для трубопроводів ЗЗС в [7] рекомендовано $V_0 = 1.5$.

При відповідному реальному внутрішньому діаметрі труб можна визначити фактичну швидкість потоку води в трубопроводі V_ϕ [5]:

$$V_\phi = \frac{1000 \cdot Q}{\pi \cdot (D^2 / 4)} \text{ [м/с]}, \quad (5)$$

де Q – витрати води, л/с; D – внутрішній діаметр труби, мм.

Коефіцієнт гідравлічного тертя λ , який потрібно визначити для розрахунку за формулою (3), залежить від режиму течії та для ламінарного або турбулентного потоку визначається по-різному. В трубопроводах ЗЗС зазвичай вважають, що рух рідини здійснюється в сталому турбулентному потоці. При значеннях числа Рейнольдса $Re = 3 \cdot 10^3 \dots 1 \cdot 10^8$ застосовують рівняння Конакова [8]:

$$\lambda = \frac{1}{(1.81 \lg Re - 1.5)^2}. \quad (6)$$

Число Рейнольдса яке характеризує режим руху рідини всередині трубопроводу, виходить з співвідношення [6]:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}, \quad (7)$$

де V – швидкість, м/с; D – внутрішній діаметр труби, м; ν – кінематична в'язкість води, м²/с.

Кінематичну в'язкість можна виразити наступним чином [8]:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \text{ [м}^2\text{/с]}, \quad (8)$$

де η – динамічна в'язкість середовища; ρ – густина води.

Фізичні властивості рідини можуть змінюватись в залежності від її температури, значення яких наведено в таблиці 1 для діапазону температур 0-50 °С.

Табл. 1

Фізичні властивості води при різних температурах

Температура, T, °C	Густина води, ρ, кг·м ³	Динамічна в'язкість, η·10 ⁻³ , Па·с	Кінематична в'язкість, ν·10 ⁻⁶ , м ² /с
0	999,8	1,787	1,787
5	999,9	1,519	1,519
10	999,7	1,307	1,307
20	998,2	1,002	1,004
30	995,6	0,798	0,801
40	992,2	0,653	0,658
50	988	0,547	0,554

За наведеними в табл. 1 даними було отримано регресійні моделі для аналітичного опису залежностей фізичних характеристик води від температури виду:

– для густини води:

$$\rho(T) = 3.3002 \cdot 10^{-5} T^3 - 0.0074 T^2 + 0.0523 T + 999.8715; \quad (9)$$

– для динамічної в'язкості:

$$\eta(T) = (-6.8544 \cdot 10^{-6} T^3 + 9.4051 \cdot 10^{-4} T^2 - 0.0546 T + 1.7789) \cdot 10^{-3}. \quad (10)$$

Порівняння табличних даних та аналітичних залежностей приведено на рис.2.

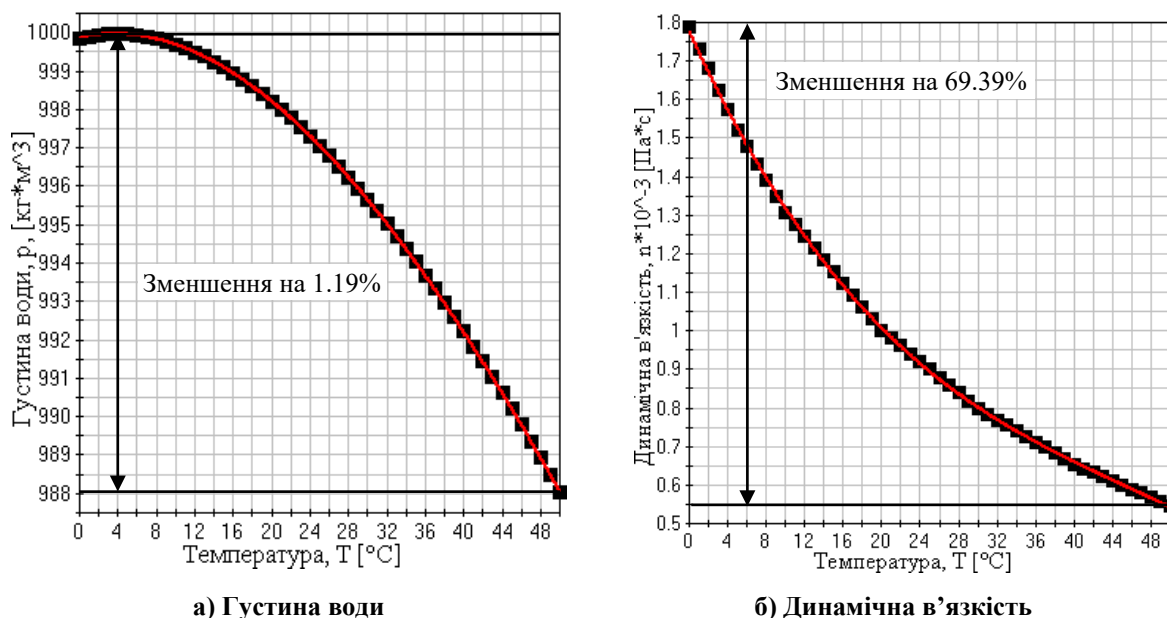


Рис. 2. Графіки залежності від температури:
 ■ ■ ■ табличні дані; — аналітична залежність

Можна відзначити, що в діапазоні температур, який розглядається, значення динамічної в'язкості η змінюються дуже суттєво (на 69,4%), в той час як значення

густини ρ майже не змінюється (на 1,12%), тому в подальших розрахунках густину води можна вважати постійною та прийняти $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Підставивши у формулу (8) наявні значення густини та динамічної в'язкості з табл. 1, можна розрахувати кінематичну в'язкість води. Результат також представлений в табл. 1. За знайденими значеннями для кінематичної в'язкості була отримана наступна функція (рис. 3):

$$\nu(T) = (-6.9111 \cdot 10^{-6} T^3 + 9.4594 \cdot 10^{-4} T^2 - 0.0546 T + 1.7788) \cdot 10^{-6}. \quad (11)$$

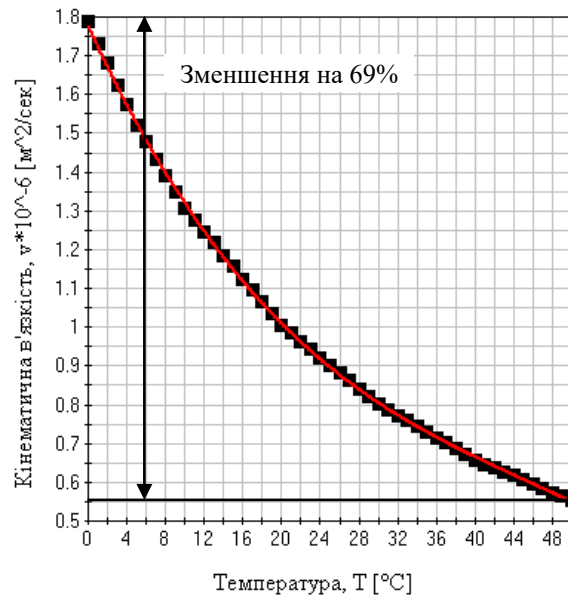


Рис. 3. Графік залежності кінематичної в'язкості від температури:
 ■ ■ ■ табличні данні; — аналітична залежність

Підстановкою у формулу (7) функції (11) можемо отримати відповідні значення числа Рейнольдса.

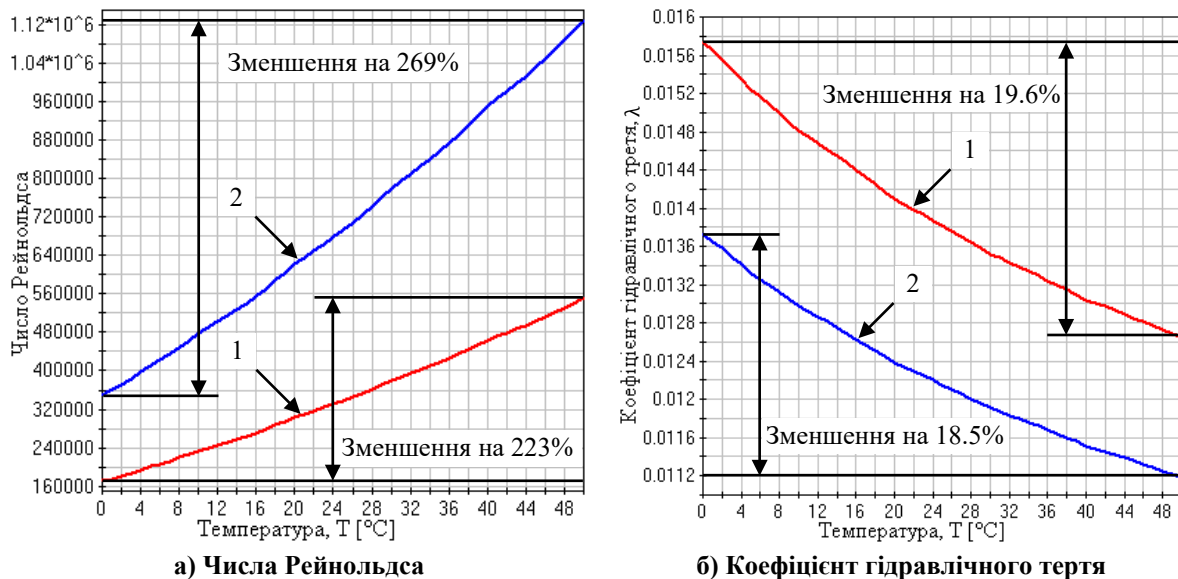


Рис. 4. Графік залежності від температури: 1 – для труби $\varnothing 250 \text{ мм}$; 2 – для труби $\varnothing 500 \text{ мм}$

На рис. 4а наведено, як змінюється число Рейнольда Re в залежності від температури для труб з різним внутрішнім діаметром (250 мм для зрощувального трубопроводу та 500 мм для розподільного). Знайдені значення дозволяють отримати коефіцієнти гідравлічного третя (рис. 4б) за формулою (6).

З графіків, наведених на рис. 4 видно, що відхилення значень при зміні температури рідини в аналізованому діапазоні, складає: для числа Рейнольдса, а для коефіцієнту гідравлічного третя. На основі виявлених аналітичних виразів можна розрахувати за виразом (3) витрати тиску по довжині трубопроводу з урахуванням зміни температур, або за виразом (4) питомі витрати тиску, що наведено на рис. 5.

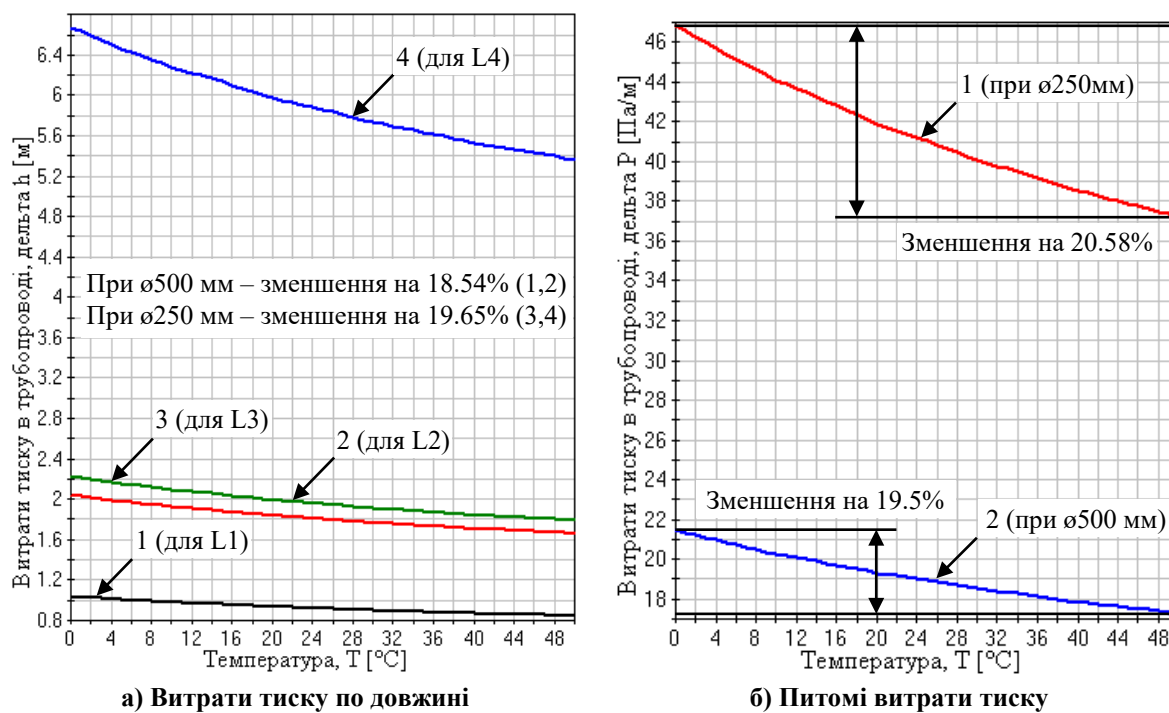


Рис. 5. Графік залежності від температури

Розглянувши результати розрахунків представлених на рис.5а видно, що втрати тиску у трубопроводі по довжині суттєво змінюються у діапазоні температур що розглядається, а саме зменшення на 18,54% та 19,65% для діаметрів 250 мм та 500 мм відповідно. З графіку наведеного на рис. 5б видно, що зменшення втрат у трубопроводі під впливом температури носить доволі лінійний та гарно прогнозований характер.

Висновки

В результаті моделювання гідравлічних характеристик ЗЗС під впливом зовнішніх факторів, а саме температури рідини, що транспортуються, виявлено наступне:

1. Густина води ρ в діапазоні зміни температури рідини у ЗЗС від 0 до 50 °C змінюється не суттєво (на 1,12%), тому її можна вважати постійною.
2. Найбільш суттєво змінюється динамічна в'язкість води η (на 69,39%), що призводить до зміни гідравлічних характеристик Δh та ΔP май же на 20%.

Врахування впливу зовнішніх факторів на гідравлічні характеристики ЗЗС надає можливості здійснювати більш адекватні розрахунки при моделюванні динамічних процесів, що відбуваються при роботі поливних установок.

Список використаної літератури

1. Загальнодержавна цільова програма розвитку водного господарства та екологічного оздоровлення басейну річки Дніпро на період до 2021 року. *Указ Президента України від 24.05.2012 р. № 4836*
2. Циганенко М., Макаренко М. Система точного землеробства економить ваші гроші. *Пропозиція*. 2017. Вип. 2. С. 56–60.
3. Гурін В. А., Степаненко М.Г., Степаненко М. П. Технологія зрошування. Рівне: НУВГП, 2013. 382 с.
4. Карпенко С. Л., Лебеденко Ю. О., Рудакова Г. В., Рудакова А. А., Моделювання схеми розташування активного дощувального обладнання закритої зрошувальної системи. *Системні технології*. 2021. Вип. 2(133). С. 89–96.
5. Дикаревский В.С. и др. Устройство закрытых оросительных систем: Трубы, арматура, оборудование. Справочник / под ред. В. С. Дикаревского. Москва: Агропромиздат, 1986. 255 с.
6. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Ленинград: Энергоиздат, 1982. 672 с.
7. ДБН В.2.5-74:2013 Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. [Чинні від 2014-01-01] Вид. офіц. Київ: Укрархбудінформ, 2013. 172 с.
8. Кудинов В.А., Карташов Э.М. Гидравлика. Москва: Высшая школа, 2006. 175 с.

References

1. Zahalnoderzhavna tsilova prohrama rozvytku vodnoho hospodarstva ta ekolohichnoho ozdorovlennia baseinu richky Dnipro na period do 2021 roku. *Ukaz Prezydenta Ukrainy vid 24.05.2012 r. № 4836*
2. Tsyhanenko, M., & Makarenko, M. (2017). Systema tochnoho zemlerobstva ekonomyt vashi hrohi. *Propozytsiia*. 2, 56-60.
3. Gurin, V. A., Stepanenko, M.G., & Stepanenko, M. P. (2013). Tehnologiya zroshuvannya. Rivne: NUVGP.
4. Karpenko, S. L., Lebedenko, Y. O., Rudakova, H. V., & Rudakova, A. A. (2021). Modeliuvannya skhemy roztashuvannya aktyvnoho doshchuvalnoho obladdnannia zakrytoi zroshuvalnoi systemy. *Systemni tekhnolohii*. 2(133), 89–96.
5. Dikarevskiy, V.S. (Ed.). (1986). Ustroystvo zakrytyiyh orositelnyih sistem: Trubyi, armatura, oborudovanie. Spravochnik. Moskva: Agropromizdat.
6. Chugaev, R.R. (1982). Gidravlika. Leningrad: Energoizdat.
7. DBN V.2.5-74:2013 Vodopostachannia. Zovnishni merezhi ta sporudy. Osnovni polozhennia proektuvannia. [Chynni vid 2014-01-01] Vyd. ofits. Kyiv: Ukrarkhbudinform, 2013. 172 s.
8. Kudinov, V.A., & Kartashov, E.M. (2006). Gidravlika. Moskva: Vyisshaya shkola.

Карпенко Сергій Леонідович – аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету, e-mail: karpenkoserhiiofficial@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2566-6592.

Рудакова Ганна Володимирівна – д.т.н., професор, професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету, e-mail: rudakovaanna25@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8053-4218.

Поліщук Валентин Мойсейович – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету, e-mail: Galulia13@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8775-4977