

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: 10.25140/2411-5363-2022-2(28)-146-161

УДК 621.577.42

Микола Кізеєв¹, Михайло Куницький²

¹кандидат технічних наук, доцент,

завідувач кафедри теплогазопостачання, вентиляції та санітарної техніки

Національний університет водного господарства та природокористування (Рівне, Україна)

E-mail: m.d.kiziev@nuwm.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1491-1695>

Scopus Author ID: [57218687201](https://orcid.org/0000-0002-1491-1695)

²аспірант

Національний університет водного господарства та природокористування (Рівне, Україна)

E-mail: kunyttskyi_az16@nuwm.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1700-8167>

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ СТИЧНИХ ВОД У КАНАЛІЗАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМИ «TEMPEST» З МЕТОЮ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

Розглянуто стічні води систем водовідведення як джерело теплової енергії для потреб гарячого водопостачання. Кількість теплової енергії в стічних водах залежить насамперед від їх витрати і температури. Застосовано програму «TEMPEST» для аналізу й моделювання процесів тепломасопередачі в стічних водах каналізаційних мереж. Проаналізовані математичні моделі температурного режиму стічних вод. На основі програми «TEMPEST» проведено моделювання температурного режиму стічних вод та розрахунки потенційної кількості теплової енергії, яку можна вилучити з стічних вод на різних ділянках внутрішньодворової мережі каналізації за допомогою теплових насосних установок.

Ключові слова: температурний режим стічних вод; тепла насосна установка; математична модель; рекуперація тепла, TEMPEST.

Рис.: 9. Табл.: 3. Бібл.: 27.

Актуальність теми дослідження. В Україні переважна кількість гарячої води для потреб міського населення готується і транспортується в централізованих системах теплопостачання та гарячого водопостачання (ГВП). Схема приготування гарячої води в таких системах передбачає передачу тепла від джерела (котельні або ТЕЦ) теплоносієм (перегрітою водою або паром) теплофікаційними мережами. Нагріта до температури 90-130 °С вода, наприклад, з котельні надходить у центральний тепловий пункт (ЦТП) мікрорайону або в індивідуальний тепловий пункт (ІТП) житлового будинку, де в теплообмінниках нагрівається холодна вода, що подається із системи водопостачання міста і має температуру 5-15 °С, до температури 55-60 °С.

У неопалюваний період робота котелень неефективна, бо виробляти тепло лише для ГВП теплогенеруючим організаціям не вигідно. Тому в населених пунктах України, навіть у великих містах, практикується зупинка котелень і відключення централізованого ГВП на теплий період року. Це, а також недостатня якість гарячої води із систем централізованого ГВП (низька температура, її перепади та погана робота або відсутність циркуляційного трубопроводу) зумовлює необхідність дублювання централізованого ГВП мешканцями за допомогою децентралізованих систем, зазвичай шляхом встановлення квартирних електропідігрівачів води.

Основними недоліками традиційного централізованого теплопостачання та ГВП є:

- висока вартість природного газу, на якому працює більшість котелень у містах;
- низький коефіцієнт корисної дії переважно старих котлів, які ще експлуатуються;
- втрати тепла і гарячої води в погано ізольованих та зношених теплових мережах;
- великі витрати електроенергії на перекачування теплоносія по теплових мережах.

Можливими шляхами покращення роботи та збільшення енергоефективності систем централізованого теплопостачання є такі заходи:

- заміна старих труб теплотрас на нові попередньоізольовані (сталеві і поліетиле-нові для теплопостачання з низькопотенційним температурним режимом);
- перехід на низькопотенційні температурні режими теплопостачання об'єктів, на яких проведені заходи термомодернізації та влаштовані відповідні системи опалення;
- заміна старих котлів на сучасні з високим ККД;
- заміна старих мережевих насосів на нові більш енергоефективні (з високим ККД);
- використання когенераційних установок;
- використання пільгових тарифів на електроенергію;
- перехід на відновлювані джерела енергії [1].

Перехід на відновлювані джерела енергії передбачає використання таких джерел, як:

- відходи деревооброблення (тріска, тирса, пеллети);
- сонячні колектори на дахах будівель для ГВП;
- фотовольтаїчні установки;
- вітрові енергетичні установки;
- міні- та мікроГЕС;
- низькопотенційне тепло ґрунту, водойм, стічних вод (СВ), атмосферного та викидного повітря тощо за допомогою теплових насосних установок (ТНУ).

Постановка проблеми. Особливо гостро недоліки традиційного централізованого теплопостачання та ГВП проявилися в умовах проведення на території України інтенсивних бойових дій та систематичних ворожих обстрілів інфраструктури населених пунктів (об'єктів систем постачання електричної і теплової енергії, води та газу). Виведення з ладу одного або декількох елементів систем призводить до припинення функціонування практично всієї системи. Причому все відбувається на тлі безпрецедентного зростання цін на газ та інші енергоресурси та їх дефіциту і наближення опалювального сезону, коли цілями ворожих атак можуть бути об'єкти теплоенергетики.

З метою підвищення надійності функціонування вказаних систем інженерної інфраструктури необхідно їх дублювання та резервування автономними джерелами, у тому числі на основі відновлюваних джерел енергії. Наприклад, це можуть бути для систем електропостачання різноманітні генератори та акумулятори, фотовольтаїчні та вітрові енергетичні установки; для систем водопостачання – свердловини та резервуари чистої води, для газу – біогазові установки та газгольдери. Для гарантування екологічного та санітарно-епідеміологічного добробуту цивільного населення разом із системою водопостачання необхідно забезпечити надійну роботу системи каналізації, що може бути джерелом низькопотенційної теплової енергії, яку можна використовувати за допомогою термотрансформаторів (ТНУ), що перетворюють її у високопотенційну.

ТНУ можуть бути резервними і вже стають основними джерелами для систем теплопостачання і ГВП у населених пунктах багатьох країн. Розвинені країни декілька років тому поставили амбіційну мету – довести використання теплової енергії від ТНУ у 2030 році до 75 % від її загальної генерації і поступово, за планом, наближалися до цього показника, а події 2022 року значно інтенсифікували цей процес. В Україні, на жаль, ТНУ, на відміну європейських та інших розвинених країн світу, ще не набули повсякденного широкого застосування через високі інвестиційні затрати, але з кожним роком стають більш досконалими, а з кожним підвищенням цін на газ та електроенергію стають економічно більш привабливими, а інколи й єдиними можливими джерелами теплової енергії. Недостатньо швидкі темпи впровадження ТНУ в практику проєктування, будівництва та реконструкції сучасних енергоефективних систем теплопостачання і ГВП обумовлені також відсутністю достатньої кількості проведених теоретичних та експериментальних досліджень, математичного моделювання і комп'ютерних програм для розрахунків і оптимізації застосування різноманітних видів ТНУ та джерел низькопотенційної енергії.

Одним із найбільш поширених низькопотенційних джерел теплової енергії в межах населених пунктів є побутові і виробничі СВ, які Директивою ЄС 2018/2001 [1] визнані відновлюваним джерелом теплової енергії. СВ мають температуру в колекторах від +10 до +30 °С залежно від їх виду, місця перебування в колекторі та періоду року. Такі температури забезпечують набагато більший коефіцієнт трансформації теплової енергії ТНУ порівняно з повітряними і геотермальними ТНУ, у яких температура зовнішнього повітря протягом року може коливатися від +35 °С влітку до -25 °С взимку, а температура ґрунту на глибині 10 м та глибше стабільна, але не дуже висока – дещо більше за +10 °С. Надходження СВ в систему водовідведення нерівномірно, але, наприклад, для ГВП житлових будівель це ідеальний варіант, так як найбільша кількість тепла в СВ з'являється в години найбільшого споживання гарячої води.

Для оцінки енергетичного потенціалу СВ, що рухаються по колекторах, з метою використання цього потенціалу для потреб опалення та ГВП однієї або декількох будівель, мікрорайону міста або всього міста, необхідно знати їх температурний режим, визначення якого базується на достовірній математичній моделі гідравлічних процесів та процесів теплообміну СВ в колекторі з навколишнім середовищем. Під температурним режимом СВ у цій статті розуміється сукупність низки показників: середньозваженої температури СВ у каналізаційному колекторі, її зміни по мірі руху СВ у ньому та під час змішування потоків СВ з інших колекторів із різними температурами й добових коливань температури СВ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш повний і системний огляд та аналіз 116 публікацій, що присвячені проблемам використання СВ як джерела тепла для ТНУ, був зроблений порівняно нещодавно в роботі [2]. Авторами цього огляду представлено перелік статей про рекуперацію тепла СВ та їхній потенціал на різних рівнях каналізаційної системи. Наданий системний огляд переваг і проблем на кожному з цих рівнів, взявши до уваги технічні, економічні та екологічні аспекти. У цьому дослідженні [2] проаналізовано такі важливі характеристики рекуперації тепла СВ, як температура та динаміка потоку СВ у каналізаційній системі та її вплив на навколишнє середовище. Визначено наявні прогалини у сфері рекуперації тепла СВ, яка має значний потенціал для постачання екологічно чистої енергії як окремим будівлям, так і мікрорайонам.

Треба зазначити, що науковцями вже присвячено дуже багато публікацій конструкціям теплообмінних пристроїв для вилучення тепла з СВ для ТНУ та сумісному використанню таких ТНУ з іншими низькопотенційними джерелами теплової енергії. Серед них можна виділити наукові праці вітчизняних авторів, зокрема [3; 4; 15; 16], а також ще більше закордонних науковців [6-14], причому присвячених не лише рекуперації тепла СВ, а й питної води [16; 17]. З кожним роком з'являється дедалі більше статей про інтеграцію ТНУ в системи централізованого тепlopостачання населених пунктів [4; 8; 11; 13].

Набагато менше приділено уваги у вказаних публікаціях теоретичним аспектам ефективності використання тепла СВ [5] та дослідженням математичного опису процесів, що відбуваються в колекторах, резервуарах і спорудах каналізації, серед яких можна виокремити роботи Дюрренматта та Ваннера [18-21] і Абдел-Ала та ін. [26; 27].

Дюрренматт та Ваннер розробили [18; 19], а потім вдосконалили [21] математичну модель температурного режиму СВ в каналізаційній мережі з позицій системного аналізу, з врахуванням багатьох параметрів та коефіцієнтів, що впливають на процеси теплообміну в колекторах (рис. 1). Для розрахунків температур СВ у трубах каналізаційних колекторів Дюрренматт та Ваннер на основі цієї математичної моделі розробили [20] комп'ютерну програму «TEMPEST» (TEMPerature ESTimation), яка пізніше була модифікована і на теперішній час має актуальну поточну версію 1.02.

«TEMPEST» – це програма, яка оцінює динаміку та поздовжні просторові профілі температури СВ у трубопроводах каналізації. Вона базується на балансах тепла та маси в каналізаційних системах [18; 19] і моделює їх у вигляді двох основних елементів сис-

теми: трубопроводів та вузлів. Вузли вводяться для відображення розривів у каналізаційних лініях унаслідок бічних припливів, змін у геометрії труби, властивостей матеріалу й навколишнього ґрунту (рис. 2) і моделюються за рівняннями нерозривності.

Дослідження Дюрренматта та Ваннера [18-21] – математична модель і результати розрахунків програми «TEMPEST», продемонструвало, що передача тепла між СВ та навколишнім ґрунтом через стінки труб є найважливішим процесом при визначенні температурного режиму каналізаційних мереж. Поява програми «TEMPEST», спростила моделювання температурних режимів СВ і полегшила розрахунки їхнього теплового потенціалу при різних комбінаціях параметрів мережі, сприяло великому інтересу з боку науковців до виконання досліджень з моделювання каналізаційних мереж із застосуванням програми «TEMPEST» і розробленню власних програм [26; 27].

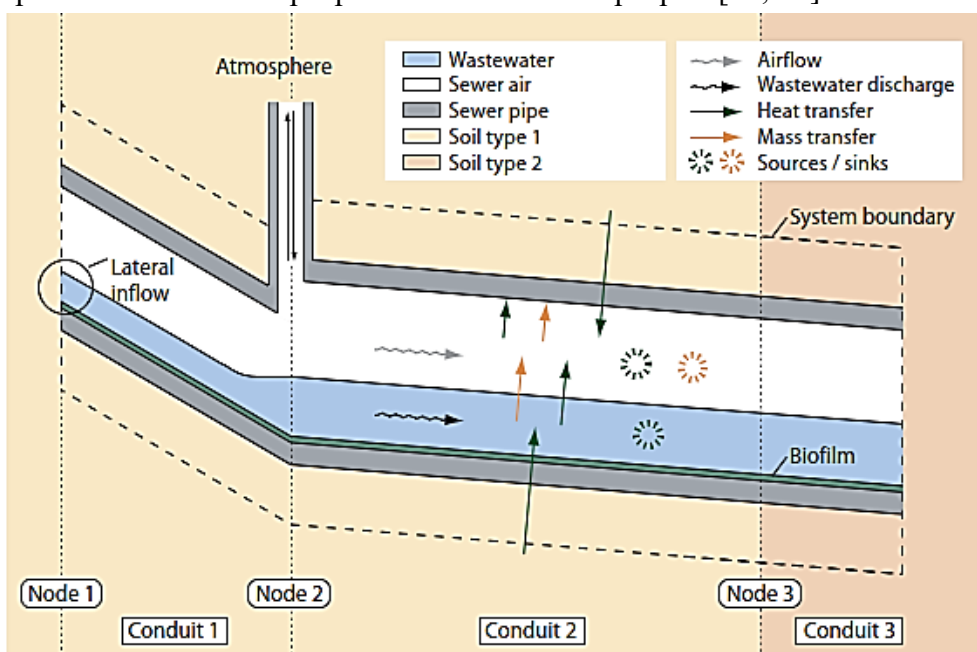


Рис. 1. Ділянки, вузли та процеси, що розглядаються в моделі каналізацій, і реалізовані в програмі «TEMPEST» [20]

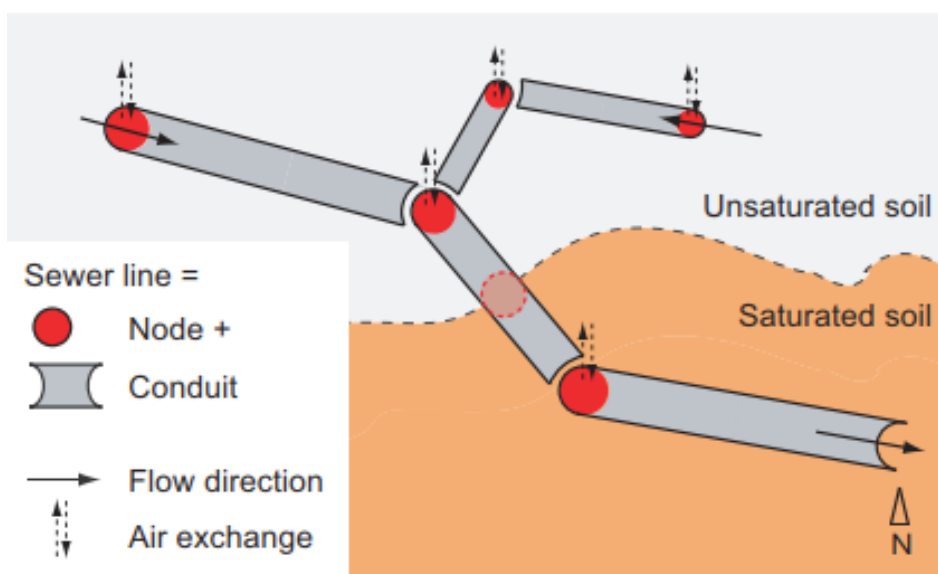


Рис. 2. Введення вузла, який розділяє труби з різними характеристиками [20]

Так, у дослідженні Алі та Гіліча [22] програма «TEMPEST» використовувалася для оцінювання потенціалу рекуперації тепла на каналізаційній ділянці в Лондоні з бічним змішуванням припливу СВ. Хоффман та ін. [23] представили спрощену модель на основі «TEMPEST», враховуючи лише передачу тепла від СВ до навколишнього середовища.

Дослідження, засноване на попередній моделі, було представлено Еліас-Максіл та ін. [24], у результаті якого дійшли висновку, що в нестаціонарних умовах модель була більш ніж удвічі точнішою за «TEMPEST», що було пов'язано з урахуванням гідравлічного впливу технічних отворів, іншого порожнього простору та напірного режиму при моделюванні потоку СВ. Сітзенфрей та ін. [25] використовували програму «TEMPEST» для аналізу взаємодії децентралізованих (рівень будівлі) і централізованих (каналізаційної мережі) систем рекуперації тепла СВ. У процесі дослідження дійшли висновку, що продуктивність централізованих систем рекуперації тепла знижується до 40 %, якщо всі помешкання будівлі оснащені децентралізованими системами рекуперації тепла СВ.

Абдель Аал та ін. [26; 27] запропонували спрощену модель динаміки температури СВ, розуміючи, що багато вхідних параметрів у «TEMPEST» мають незначний вплив на зміну температури СВ. Модель включала енергетичний баланс СВ вздовж труби та оцінку коефіцієнтів теплопередачі і припускала, що зміна температури СВ спричинена втратами тепла в повітря всередині каналізаційних труб та навколишній ґрунт. Абдель Аал та ін. показали, що температура повітря в каналізаційній трубі має більший вплив на температуру СВ, а вже потім за впливом йде температура ґрунту навколо труби.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на відмінну роботу програми «TEMPEST» для лінійних колекторів різної довжини, діаметрів, матеріалів труб та типів ґрунтів при під'єднанні до колекторів бокових підключень програма, що використовує числові методи для розв'язку нестаціонарних диференціальних рівнянь, інколи дає коливання температур при перемішуванні СВ у місцях підключень (колодязях). Для цього в програмі передбачено згладжування таких явищ за допомогою спеціального фільтра. Такі коливання тривають деякий час на відносно невеличкій довжині колектора. Заради справедливості треба зазначити, що в наших експериментах це спостерігалось лише на початковому етапі (змішування в колодязі № 2). На подальших ділянках, де були колодязі зі змішуванням СВ, майже одразу відбувалося підвищення температури суміші на 0,5-1,5 °C залежно від співвідношення витрат СВ, що змішуються, за рахунок припливу потоку більш «гарячих» СВ. З метою уникнення цього явища в результатах нами було запропоновано застосувати відносно прості та зрозумілі заходи, послідовність яких утворила методику проведення і оброблення результатів комп'ютерного експерименту.

Мета й завдання досліджень. Метою цієї статті є ознайомлення з можливостями програмного продукту «TEMPEST» версії 1.02 [20] для дослідження температурного режиму СВ в каналізаційних колекторах. Також метою досліджень було розроблення методики визначення потенціалу теплової енергії СВ у каналізаційних колекторах із застосуванням програми «TEMPEST» та електронної таблиці «MS Excel».

Виклад основного матеріалу. Дослідження на основі програмного продукту TEMPEST, версія 1.02 якого була люб'язно надана Національному університету водного господарства та природокористування (НУВГП) науковцями з Швейцарського федерального інституту водних наук та технологій (EAWAG, Цюрих) було проведено моделювання температурного режиму СВ на прикладі внутрішньодворової мережі каналізації гуртожитків № 7 та 8 НУВГП у місті Рівне по вул. Студентській, 6 та 8 (рис. 3) з метою розрахунку потенційної кількості тепла СВ у каналізаційній мережі для утилізації на потреби ГВП для мешканців гуртожитків.

На рис. 3 зображена схема дворової каналізаційної мережі К1 гуртожитків № 7 (поз. 2) та № 8 (поз. 1), яка була об'єктом дослідження. На схемі нанесені номери колодязів та діаметри трубопроводів. Висотні відмітки люків колодязів, верху та низу (лотків)

труб каналізації, що були отримані з матеріалів топогеодезичних вишукувань, довжини ділянок та витрати СВ, на схемі (рис. 3) не нанесені, щоб не захащувати її, але всі вони були використані як вихідні дані для програми «TEMPEST».

Вводилися змінні – витрата і температура СВ на ділянці, коефіцієнт повітрообміну, температура і вологість повітря в каналізаційному просторі, температура навколишнього ґрунту. Гідравліка СВ моделюється рівняннями Сент-Венана, а аеродинаміка потоку повітря - розробленою моделлю для круглих труб. Розглянуті в моделі процеси тепло- і масообміну наведені на рис. 2. Складні за конфігурацією каналізаційні мережі моделювалися серією елементів «вузол + канал». Процеси, що використовуються в рівняннях балансу математичної моделі, докладно описані в таблиці А.2 [20]. Повна математична модель, яка реалізована в «TEMPEST», описана та обговорена в публікаціях [18; 19; 21], а її огляд наведено в [20].

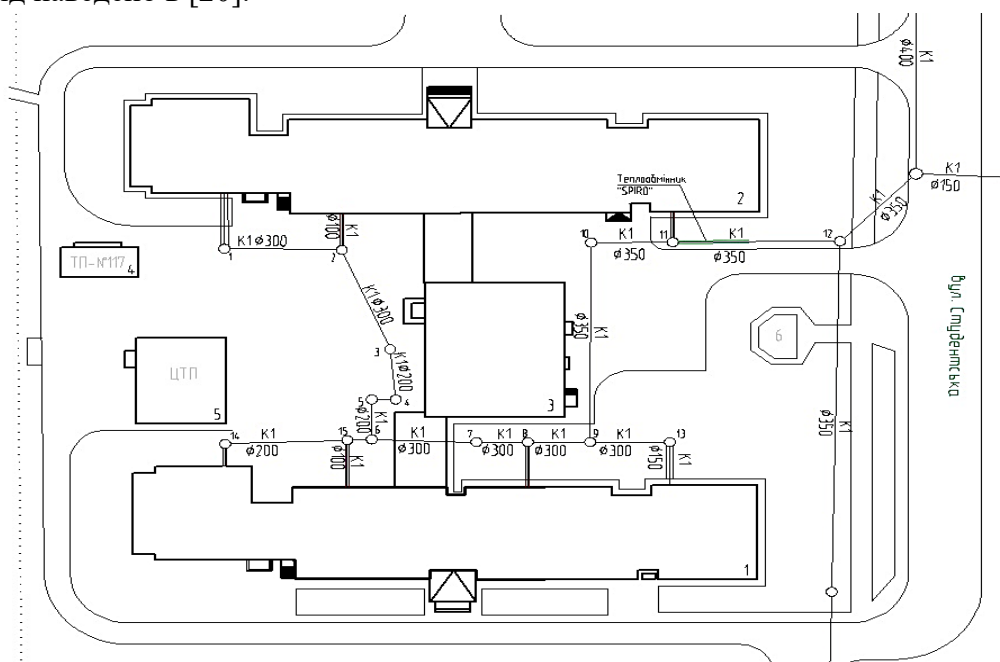


Рис. 3. План-схема дворової каналізаційної мережі гуртожитків № 7 та 8 НУВГП

Для холодного та теплого періодів року було відібрано параметри, що наведені в таблиці 1. Ці дані вводяться як вихідні в діалогове вікно програми «TEMPEST» (рис. 4).

Таблиця 1 – Вихідні параметри для розрахунків в холодний та теплий період

Показники	Значення	
	холодний	теплий
Температура вихідних СВ з випусків гуртожитків, °C	30	
Температура повітря навколишнього середовища, °C	5	15
Коефіцієнт вологості, ρh A	0,9	
Атмосферний тиск, мбар	786	
Коефіцієнт повітрообміну, b	0,001	
Швидкість розкладання ХПК, mg COD/(m ³ *s), r	2,8	
Глибина проникнення тепла в ґрунт (навколо труби), м, ΔS	0,1	
Температура ґрунту (навколо труби), °C, TS	6	11

Джерело: розроблено авторами.

Коефіцієнт повітрообміну в колодязях прийнятий 0,001, тому що на цих ділянках мережі всі каналізаційні колодязі перекриті люками, які не мають отворів, тому повітрообмін і відповідно втрати тепла з повітрям із колодязя є мінімальними. Крім того, рельєф ділянки рівний, а ухили трубопроводів на ділянках не дуже великі, що не створює для повітря в каналізаційних трубах природної витяжки і руху повітря в них.

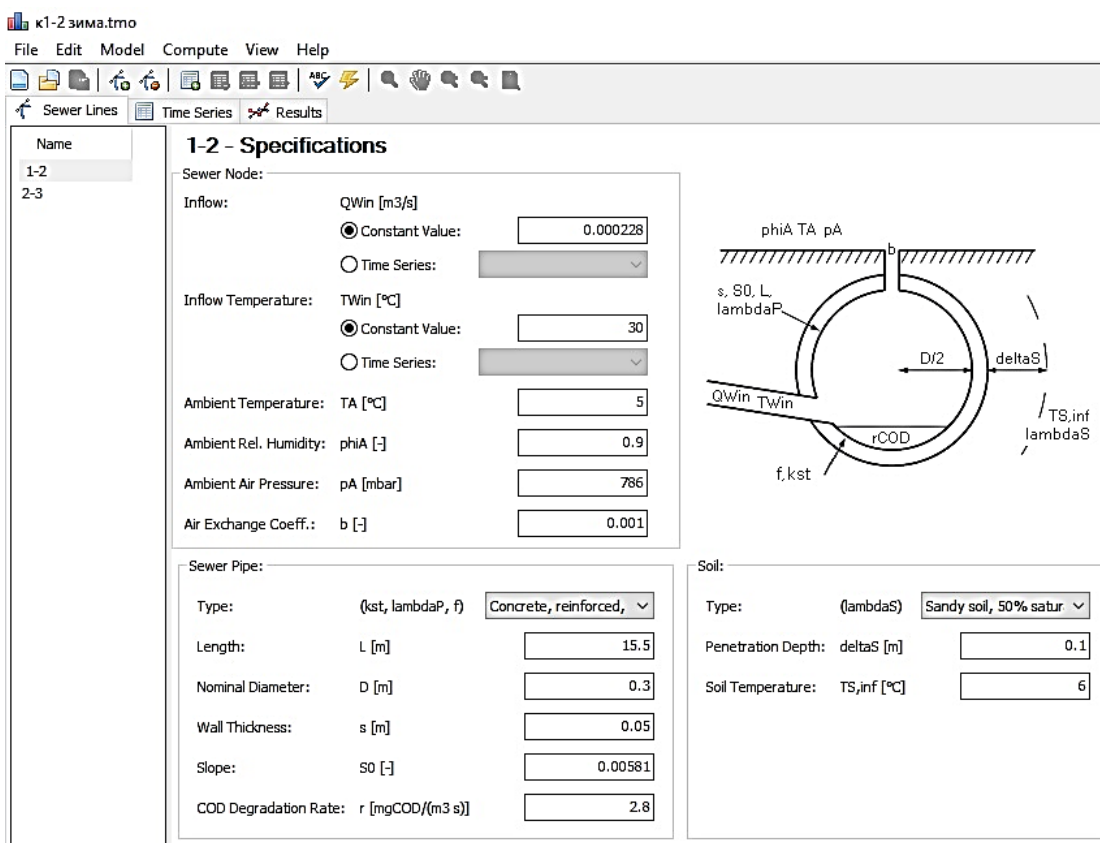


Рис. 4. Вікно «Sewer Lines» програми «TEMPEST» з вихідними даними ділянки 1-2

Далі наводиться детальний опис проходження СВ по найдовшому маршруту дворової мережі – від колодязя № 1, через колодязі 2-11, до колодязя № 12 (рис. 3) з одночасним занесенням вихідних даних для розрахунку температур СВ для кожної новоствореної ділянки дворової каналізації або групи ділянок у програму «TEMPEST» (рис. 4). Після введення даних проводився розрахунок в розділі *Compute* і перегляд результатів в розділі *Results*. Результати розрахунків заносилися у відповідні комірки електронних таблиць «MS Excel» (табл. 2, 3).

Таблиця 2 – Результати розрахунків температур СВ і потужності теплової енергії, яку можна рекуперувати на ділянках каналізаційної мережі в холодний період року

№	Довжина, м	Витрата СВ, дм ³ /с	Діаметр труби, мм	Температура стічних вод T, °C			Потужність теплової енергії, кВт що може бути рекуперована,			
				початок	закінчення	зменшення	втрачається	ΔT =		
								5°C	10°C	15°C
1-2	15,5	0,228	300	30,00	27,60	2,40	2,3	4,8	9,6	14,3
2-3	17,0	0,456	300	29,00	27,50	1,50	2,9	9,6	19,1	28,7
3-6	19,0	0,456	200	27,50	25,70	1,80	3,4	9,6	19,1	28,7
14-15	16,5	0,171	200	30,00	28,20	1,80	1,3	3,6	7,2	10,7
15-6	3,5	0,342	200	29,10	28,30	0,80	1,1	7,2	14,3	21,5
6-8	21,0	0,798	300	26,80	25,80	1,01	3,4	16,7	33,4	50,2
8-9	8,5	0,969	300	26,50	26,20	0,34	1,4	20,3	40,6	60,9
13-9	11,0	0,171	300	30,00	28,50	1,50	1,1	3,6	7,2	10,7
9-10	43,0	1,140	350	26,50	25,00	1,55	7,4	23,9	47,8	71,6
10-12	22,5	1,368	350	25,80	24,70	1,13	6,5	28,7	57,3	86,0

Таблиця 3 – Результати розрахунків температур СВ та потужності теплової енергії, яку можна рекуперувати на ділянках каналізаційної мережі в теплий період року

№	Довжина, м	Витрата СВ, дм ³ /с	Діаметр труби, мм	Температура стічних вод Т, °С			Потужність теплової енергії, кВт що			
				початок	закінчення	зменшення	втрачається	може бути рекуперована,		
								ΔТ = 5° С	ΔТ = 10° С	ΔТ = 15° С
1-2	15,5	0,228	300	30,0	28,7	1,30	1,2	4,8	9,6	14,3
2-3	17,0	0,456	300	29,1	27,9	1,20	2,3	9,6	19,1	28,7
3-6	19,0	0,456	200	27,9	26,5	1,40	2,7	9,6	19,1	28,7
14-15	16,5	0,171	200	30,0	28,1	1,90	1,4	3,6	7,2	10,7
15-6	3,5	0,342	200	29,1	28,7	1,30	0,5	7,2	14,3	21,5
6-8	21,0	0,798	300	27,4	27,1	0,34	1,1	16,7	33,4	50,2
8-9	8,5	0,969	300	28,1	27,9	0,20	0,8	20,3	40,6	60,9
13-9	11,0	0,171	300	30,0	28,9	1,10	0,8	3,6	7,2	10,7
9-10	43,0	1,140	350	28,1	26,9	1,15	5,5	23,9	47,8	71,6
10-12	22,5	1,368	350	27,4	26,5	0,92	5,3	28,7	57,3	86,0

У гуртожитках НУВГП № 7 та 8 є 7 каналізаційних випусків (з двох будинків). За розподілом споживачів води в гуртожитках середньодобова витрата СВ по кожному з трьох випусків гуртожитку № 7 становила 0,228 дм³/с, а по кожному з чотирьох випусків гуртожитку № 8 – 0,171 дм³/с. В каналізаційний колодезь № 1 з випуску гуртожитку № 7 (рис. 2, поз. 2 на генплані) надходять СВ з витратою 0,228 дм³/с. Температура СВ на виході з будинку приймається – 30 °С. Далі СВ проходять дистанцію 15,5 м до колодезя № 2 по трубі Ø 300 мм. За результатами розрахунків в програмі «TEMPEST» наприкінці ділянки 1-2 температура СВ у холодний період року становить 27,6 °С, що відображено на рис. 5, а в теплий – 28,7 °С (табл. 3).

На рис. 4 видно, що у вікні «Sewer Lines» знаходяться дві ділянки 1-2 та 2-3. Програма «TEMPEST» дозволяє додавати до попередніх ділянок нові, які є їхнім продовженням, якщо їхні конструктивні та інші параметри математичної моделі однакові, а витрата та температура СВ можуть відрізнятися. Витрата суміші СВ у міру просування по колектору постійно зростає, а температура коливається – остигає і знижується або зростає коли до неї додаються СВ з більшою температурою ніж у суміші. Змішування потоків СВ, у мережі, що розглядається (рис. 3), відбувається в колодезях 2, 15, 6, 8, 9 і 11. На рис. 5, 6 та 8 можна побачити характерні «стрибки» температури суміші СВ у колодезях, у яких відбувається змішування.

У колодезь № 2 підведена труба Ø 100 мм випуску гуртожитку № 7 з вихідною температурою СВ 30 °С і витратою 0,228 дм³/с. Потоки СВ змішуються та прямують далі до колодезя № 3 по трубопроводу Ø 300 мм довжиною 17 м. За результатами розрахунків в програмі «TEMPEST» на виході з колодезя № 2 температура суміші СВ, у холодний період року становить 29,0 °С, що видно на рис. 5 та 6, а в теплий – 29,1 °С (табл. 3).

На рис. 5 наведена комбінована інформація у вікні «Results» з максимальною кількістю графіків та «легенди» для неї (9 параметрів), а також частина табличної інформації (всього 17 параметрів) з цифровими результатами розрахунку для стаціонарного випадку ділянки 1-3 з кроком 0,1 м по довжині колектору в холодний період року. Оскільки нас цікавить переважно температура СВ у мережі (шкала зліва в °С), то на наступних графіках буде наводитися лише вона на різних ділянках. Більш детально про всі параметри, які можна вивести в результатах, можна прочитати в [20].

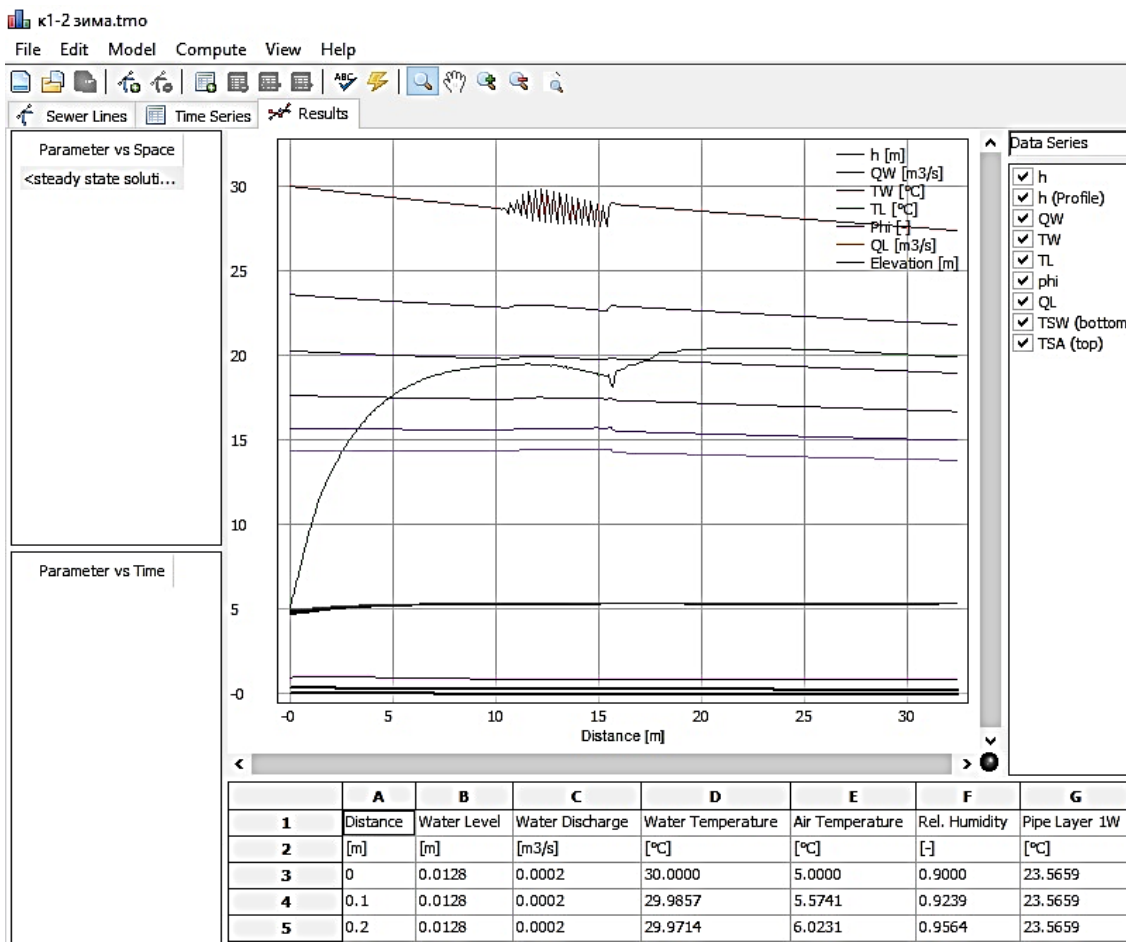
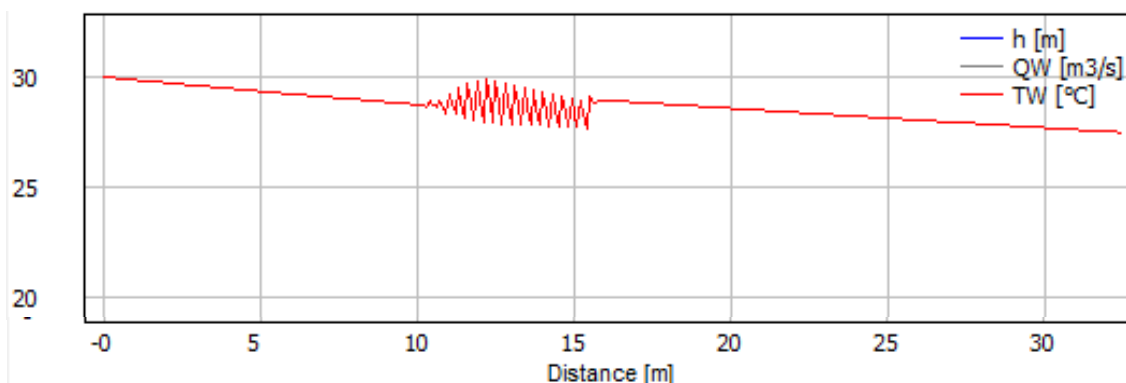


Рис. 5. Вигляд вікна «Results» результатами розрахунку ділянки 1-2



Довжина ділянки каналізаційної мережі, м

Рис. 6. Температура СВ у мережі (шкала зліва) на ділянці 1-3 в холодний період року

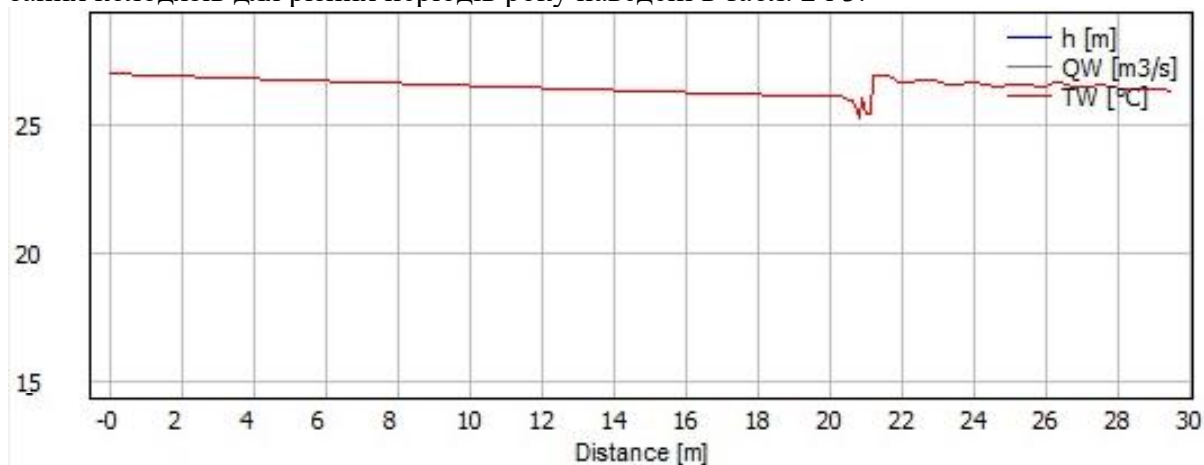
Як видно з рис. 5, 6 майже посередині графіка спостерігаються коливання значень температури СВ протягом 5 м - з 11 по 16 м траси колектору. Цифрові значення температур СВ також свідчать про це. Наприкінці цієї зони розташований колодязь № 2, у якому відбувається перемішування двох однакових за витратою потоків СВ з ділянки 1-2 та випуску №2. Оразу за колодязем № 2 коливання параметрів температур припиняються, значення температури суміші СВ дещо зростає, бо з випуску № 2 додалися більш «гарячі» СВ, ніж «охолоджені» СВ з ділянки 1-2, а потім температура суміші СВ починає зменшуватися по мірі просування і охолодження на ділянці 2-3.

Вслід за цим у програмі обраховується зміна температури СВ на ділянці 3-6. Оскільки колодязі № 4 та 5 є поворотними і транзитними (без випусків СВ у них), ділянки мають однаковий діаметр, нахил труб, повітрообмін тощо, тому дана частина мережі К1 (3–6) розраховується, як одна ділянка без під'єднань. Витрата СВ на виході і виході з колодязя № 3 становить $0,456 \text{ дм}^3/\text{с}$, температура СВ у холодний період року $27,5 \text{ }^\circ\text{C}$, а в теплий – $27,9 \text{ }^\circ\text{C}$. СВ проходять шлях довжиною в 19 м до колодязя № 6 (рис. 3). Розрахована температура СВ на вході в колодязь № 6 у холодний період року (табл. 2, рис. 6) становить $25,7 \text{ }^\circ\text{C}$ та в теплий – $26,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 3).

Оскільки жодних потоків СВ на трасі 3-6 не додається, то графік температури СВ є суцільною спадаючою лінією без коливань і перепадів температури і в цій статті не наводиться. Розрахована температура СВ на вході в колодязь № 6 у холодний період року (табл. 2) становить $25,7 \text{ }^\circ\text{C}$ та в теплий – $26,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (табл. 3).

СВ каналізаційної мережі гуртожитку № 7 змішуються з СВ системи каналізації гуртожитку № 8 (колодязі № 14 і 15) спочатку в колодязі № 6, що дає збільшення витрати та температури СВ. Випуск, спрямований у колодязь № 14, має витрату $0,171 \text{ дм}^3/\text{с}$. Цей потік проходить по трубі $\varnothing 200 \text{ мм}$ відстань в 16,5 м до колодязя № 15, в який здійснюється ще один випуск СВ. Потік суміші СВ з витратою $0,342 \text{ дм}^3/\text{с}$ з колодязя № 15 через 3,5 м потрапляє в колодязь № 6 і перемішується з потоком СВ, що надходить з гуртожитку № 7 з витратою $0,456 \text{ дм}^3/\text{с}$. Температури потоків СВ на входах та виходах вказаних колодязів наведені у табл. 2 і 3.

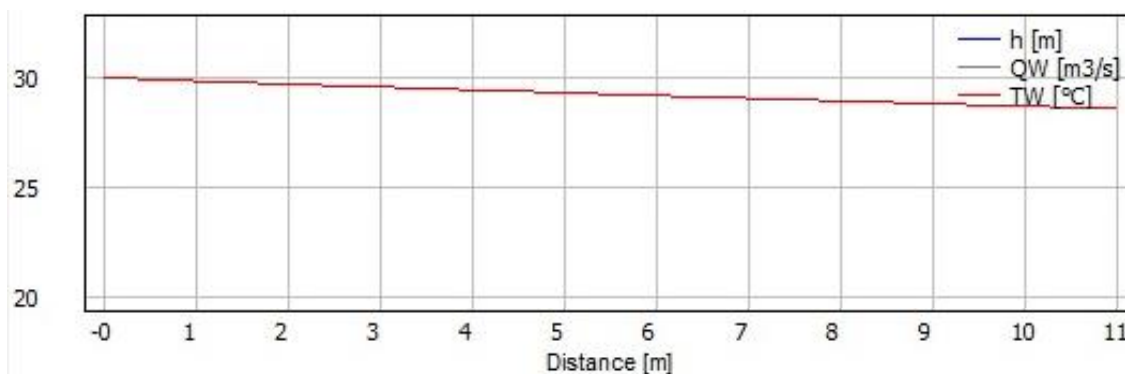
Потоки СВ з колодязів № 14, 15 та 3 об'єднуються в колодязі № 6 і далі розраховуються як один потік з витратою $0,798 \text{ дм}^3/\text{с}$, що прямує до колодязя № 8 по ділянці довжиною 21 м. Колодязь № 7 – проміжний (оглядовий). Даний потік СВ перемішується в колодязі № 8 з випуском СВ з витратою $0,171 \text{ дм}^3/\text{с}$. Для подальших розрахунків приймаємо на виході з нього витрату суміші СВ $0,969 \text{ дм}^3/\text{с}$. Далі СВ прямують по трубі $\varnothing 300 \text{ мм}$ і протяжністю 8,5 м до колодязя № 9. Результати розрахунку по ділянці 6-9 каналізаційної мережі наведено на рис. 7. Температури потоків СВ на входах та виходах вказаних колодязів для різних періодів року наведені в табл. 2 і 3.



Довжина ділянки каналізаційної мережі, м

Рис. 7. Температура СВ у мережі (шкала зліва) на ділянці 6-9 в холодний період року

Наступна ділянка розрахунку 13-9 має випуск, спрямований у колодязь № 13 з початковою температурою СВ $30 \text{ }^\circ\text{C}$ і витратою $0,171 \text{ дм}^3/\text{с}$. Від колодязя № 13 СВ проходять дистанцію 11 м до колодязя № 9 по трубі $\varnothing 300 \text{ мм}$. Жодних потоків СВ по трасі не додається. Графік температури СВ є суцільною спадаючою лінією. Результати розрахунків відображено на рис. 8 та в табл. 2 і 3.

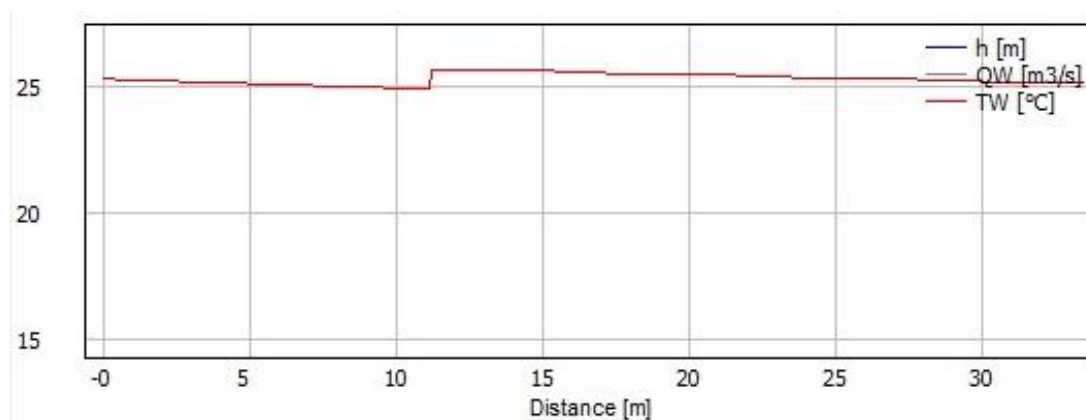


Довжина ділянки каналізаційної мережі, м

Рис. 8. Температура СВ у мережі (шкала зліва) на ділянці 13-9 у холодний період року

Вслід за цим у колодязі № 9 відбувається перемішування потоків СВ від колодязів № 8 і № 13. Сумарна витрата потоків складає $1,140 \text{ дм}^3/\text{с}$. Від колодязя № 9 до колодязя № 10 СВ проходять дистанцію 32 м по трубі $\text{Ø} 350 \text{ мм}$. Жодних потоків СВ по трасі не додається, тому графік температури СВ є суцільною спадаючою лінією. Результати розрахунків відображено в табл. 2 і 3.

Відстань від колодязя № 10 до колодязя № 11 становить 11 м, діаметр труб – 350 мм, витрата СВ – $1,140 \text{ дм}^3/\text{с}$. У колодязь № 11 під'єднаний випуск СВ з гуртожитку № 7 з температурою СВ $30 \text{ }^\circ\text{C}$ та витратою $0,228 \text{ дм}^3/\text{с}$, що призведе до перемішування СВ, а відповідно й до підвищення температури їх суміші. Діаметр труб на ділянці 11-12 становить 350 мм, а довжина 22,5 м. На ділянці відбувається злиття потоків СВ від обох гуртожитків, що видно на рис. 9. Загальна розрахункова витрата СВ становить $1,368 \text{ дм}^3/\text{с}$.



Довжина ділянки каналізаційної мережі, м

Рис. 9. Температура СВ у мережі (шкала зліва) на ділянці 10-12 в холодний період року

Як показує розрахунок, температура суміші СВ на вході в колодязь № 12 становить $25,0 \text{ }^\circ\text{C}$ у холодний період року та $26,5 \text{ }^\circ\text{C}$ – у теплий.

У таблицях 2 і 3 представлені основні вихідні дані для ділянок, що необхідні для розрахунків температури СВ, пораховані програмою «ТЕМPEСТ» значення температури СВ в характерних точках ділянок мережі (початок і закінчення), а також величини теплових потужностей, які втрачаються під час руху СВ по даній ділянці, та можуть бути використані для потреб ГВП гуртожитків при різних рівнях вилучення тепла з СВ (зменшення їх температури на 5 ; 10 та $15 \text{ }^\circ\text{C}$ теплообмінником холодного контуру ТНУ) пораховані за допомогою «MS Excel».

Висновки. Виконаний аналіз математичних моделей та комп'ютерних програм для розрахунку температурного режиму СВ у каналізаційних мережах.

Визначені температурні профілі СВ у каналізаційній мережі для холодного й теплого періодів року.

На основі моделювання в програмі «TEMPEST» та з допомогою «MS Excel» визначені потужності і втрати теплової енергії на всіх ділянках дворової каналізаційної мережі та можливі потужності для рекуперації низькопотенційного тепла і перетворення його в ТНУ у високопотенційне для потреб ГВП двох гуртожитків НУВГП.

Результати досліджень будуть використані для проектування теплогенеруючого пункту на базі ТНУ, баків-акумуляторів гарячої води тощо, для якого джерелом тепла будуть СВ дворової каналізаційної мережі двох гуртожитків. В теплий період року з неї можна отримати близько 86 кВт теплової енергії при відборі тепла і зниженні температури СВ на останній, найбільш заповнений СВ, ділянці мережі на 15 °С.

У подальших дослідженнях планується перевірка адекватності математичної моделі, яку використовує програма «TEMPEST», шляхом проведення натурних обстежень температурного режиму СВ дворової каналізаційної мережі гуртожитків та визначення теплового потенціалу об'єктів каналізації, передусім колекторів, населених пунктів України, які були збудовані або реконструйовані за проектами НУВГП.

Перехід на відновлювані джерела енергії дасть можливість зекономити значні об'єми природного газу, від якого можна відмовитись, якщо використовувати теплову енергію СВ за допомогою ТНУ.

Список використаних джерел

1. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. (2018). *PE/48/2018/REV/1*, pp. 82–209. – Accessed mode: <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>.
2. Heat Recovery from wastewater - a review of available resource [Electronic resource] / Н. Nagpal, J. Spriet, М.К. Murali, А. McNabola // *Water*. – 2021. – Vol. 13. – Accessed mode: <https://doi.org/10.3390/w13091274>.
3. Титарь С. С. Использование сбросного тепла в системе автономного теплоснабжения жилых зданий / С. С. Титарь, А. А. Климчук // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2011. – № 6. – С. 121-125.
4. Денисова А. Є. Перспективи використання скидних вод для тепlopостачання / А. Є. Денисова, О. М. Троїцький // *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2011. – № 6. – С. 126-131.
5. Meggers F. The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump [Electronic resource] / F. Meggers, Н. Leibundgut // *Energy and Buildings*. – 2011. – № 43. – Pp. 897–886. Accessed mode: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.008>.
6. A renewable heat solution for water ingress in the Glasgow subway tunnel system [Electronic resource] / Н. Nicholas, N. Konstantinos, E. Rohinton, A. Bjorn, Y. Paul // *Conference: Energy and sustainability*. – 2014. – Accessed mode: <https://doi.org/10.2495/ESUS140141>.
7. A heat energy recovery system from tunnel wastewater [Electronic resource] / N. Hytiris, K. Ninikas, R. Emmanuel, B. Aaen, P.L. Younger // *Environmental Geotechnics*. – 2018. № 5(5). – Pp. 300–308. – Accessed mode: <https://doi.org/10.1680/jenge.15.00087>.
8. An experimental setup for the analysis of an energy recovery system from wastewater for heat pumps in civil buildings [Electronic resource] / L. Postrioti, G. Baldinelli, F. Bianchi, G. Buitoni, F.D. Maria, F. Asdrubali // *Applied Thermal Engineering*. – 2016. – № 102. – Pp. 961-971. – Accessed mode: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.016>.
9. Technologies for recovery of energy from wastewaters: Applicability and potential in South Africa [Electronic resource] / Stafford W., Cohen B., Pather-Elias S., von Blottnitz H., van Hille R., Harrison S. T. L., Burton S. G. // *Journal of energy in Southern Africa*. – 2013. – № 24(1). – Pp. 15-26. – Accessed mode: <https://dx.doi.org/10.17159/2413-305-1/2014/v24i1a3003>.

10. Zhu J.J. Modeling and spatial optimization of wastewater-source heat pump implementation in a wastewater collection system [Electronic resource] / J.J. Zhu, X. Wang, P.R. Anderson // *Urban Water Journal*. – 2019. – № 16(10). – Pp. 698-708. – Accessed mode: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1726410>.
11. Energy Recovery from Wastewater: A Study on Heating and Cooling of a Multipurpose Building with Sewage-Reclaimed Heat Energy [Electronic resource] / D. Cecconet, J. Racek, A. Callegari, P. Hlavínek // *Sustainability*. – 2020. – № 12(116). – Accessed mode: <https://doi.org/10.3390/su12010116>.
12. A review on potential use of low-temperature water in the urban environment as a thermal-energy source [Electronic resource] / J. Laanearu, A. Borodinecs, M. Rimeika, B. Palm // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – № 251. – Accessed mode: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012054>.
13. From the Wastewater Treatment Plant to the Turnstiles of Urban Water and District Heating Networks [Electronic resource] / W. Gruber-Glatzl, C. Brunner, S. Meitz, H. Schnitzer // *Frontiers in Sustainable Cities*. – 2020. – Accessed mode: <https://doi.org/10.3389/frsc.2020.523698>.
14. Suitability Pre-Assessment of in-Sewer Heat Recovery Sites Combining Energy and Wastewater Perspectives [Electronic resource] / F. Huber, G. Neugebauer, T. Ertl, F. Kretschmer // *Energies*. – 2020. – № 13. – Accessed mode: <https://doi.org/10.3390/en13246680>.
15. Кізеєв М. Д. Використання теплових насосів при реконструкції систем опалення будівель фільтрів станцій водопідготовки / М. Д. Кізеєв, І. В. Чабан // *Вісник Одеської державної академії будівництва*. – 2015. – № 59. – С. 64-69.
16. Кожушко О. Д. Утилізація теплової енергії стічних вод та питної води в системах водопостачання і каналізації населених пунктів [Електронний ресурс] / О. Д. Кожушко, М. Д. Кізеєв // *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. – 2017. – № 7. – С. 94-100. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb_2017_7_16.
17. Energy recovery from the water cycle: Thermal energy from drinking water [Electronic resource] / van der Hoek, J. P., Mol, S., Giorgi, S, Ahmad, J, I., Liu, G., & Medema, G. // *Energy*. – 2018. – № 162. – Pp. 977-987. – Accessed mode: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.097>.
18. Dürrenmatt D. J. Berechnung des Verlaufs der Abwassertemperatur im Kanalisationsrohr : Master's Thesis [Electronic resource] / Dürrenmatt D.J. – Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2006. – Accessed mode: <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:12981>.
19. Dürrenmatt D. Simulation of the wastewater temperature in sewers with TEMPEST [Electronic resource] / Dürrenmatt, D., & Wanner, O. // *Water Science & Technology*. – 2008. – № 57(11). – Pp. 1809-1815. – Accessed mode: <https://doi.org/10.2166/wst.2008.291>.
20. Dürrenmatt D. TEMPEST. Computer Program for the Simulation of the Wastewater Temperature in Sewers. Version 1.02 [Electronic resource] / D. Dürrenmatt, O. Wanner // *User Manual*. – 2012. – Accessed mode: <https://www.eawag.ch/en/departement/eng/software/>.
21. Dürrenmatt D. A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers [Electronic resource] / D. Dürrenmatt, O. Wanner // *Water Research*. – 2014. – № 48. – Pp. 548-558. – Accessed mode: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.017>.
22. Ali S. Determining the UK's potential for heat recovery from wastewater using steady state and dynamic modelling-preliminary results [Electronic resource] / S. Ali, A. Gillich // *Proceedings in Energy*. – 2018. – № 5. – Pp. 107-121. – Accessed mode: https://openresearch.lsbu.ac.uk/download/27833bbc077813a232059703d7f32a847dbf30b1a8c7f92a8da6c1a65437e2ba/787271/Determining%20the%20UKs%20potential%20for%20heat%20recovery%20from%20wastewater%20using%20steady%20state%20and%20dynamic%20modelling%20-%20preliminary%20results_%20%2800000002%29.pdf.
23. Modelling of Thermal Energy Balance in Sewer Systems / J. Hofman, M. Bloemendal, B. Wols, C. Agudelo-Vera, J. Elias Maxil, P. Boderie, M. Nijman, J.P. van der Hoek. – 2014. – Accessed mode: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:e31f2cc8-a39b-49a2-bd41-c0685bea369d>.
24. Development and performance of a parsimonious model to estimate temperature in sewer networks [Electronic resource] / J.A. Elías-Maxil, J. Hofman, B. Wols, F. Clemens, J.P. van der Hoek, L. Rietveld // *Urban Water Journal*. – 2017. – № 14. – Pp. 829–838. – Accessed mode: <https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1276811>.

25. Sitzenfrei R. Investigating the interactions of decentralized and centralized wastewater heat recovery systems [Electronic resource] / R. Sitzenfrei, S. Hillebrand, W. Rauch // *Water Science & Technology*. – 2017. – № 75. – Pp. 1243–1250. – Accessed mode: <https://doi.org/10.2166/wst.2016.598>.

26. Modelling the viability of heat recovery from combined sewers [Electronic resource] / M. Abdel-Aal, R. Smits, M. Mohamed, K. De Gussem, A. Schellart, S. Tait // *Water Science & Technology*. – 2014. – № 70(2). – Pp. 297–306. – Accessed mode: <https://doi.org/10.2166/wst.2014.218>.

27. Using Long Term Simulations to Understand Heat Transfer Processes during Steady Flow Conditions in Combined Sewers [Electronic resource] / M. Abdel-Aal, S. Tait, M. Mohamed, A. Schellart // *Water*. – 2021. – № 13(570). – Accessed mode: <https://doi.org/10.3390/w13040570>.

References

1. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources. (2018). *PE/48/2018/REV/1*, 82–209. <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>

2. Nagpal, H., Spriet, J., Murali, M.K., & McNabola, A. (2021). Heat Recovery from wastewater - a review of available resource. *Water*, 13. <https://doi.org/10.3390/w13091274>

3. Titar, S.S. & Klimchuk, A.A. (2011). Ispolzovanie sbrosnogo tepla v sisteme avtonomnogo teplosnabzheniya zhilih zdani. [The use of waste heat in the system of autonomous heating of residential buildings]. *Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu "Kharkivskii politehnicnii institut". Energetichni ta teplotehnicni procesi i ustatkuvannya - Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Energy and heat engineering processes and equipment*, 6, 121–125.

4. Denysova, A.Ie. & Troitskyi, O.M. (2011). Perspektyvy vykorystannia skydnykh vod dlia teplopostachannia. [Prospects for the use of wastewater for heat supply]. *Visnik Nacionalnogo tehnicnogo universitetu "Kharkivskii politehnicnii institut". Energetichni ta teplotehnicni procesi i ustatkuvannya - Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Energy and heat engineering processes and equipment*, 6, 126–131.

5. Meggers, F., & Leibundgut, H. (2011). The potential of wastewater heat and exergy: Decentralized high-temperature recovery with a heat pump. *Energy and Buildings*, 43, 897–886. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.008>.

6. Nicholas, H., Konstantinos, N., Rohinton, E., Bjorn, A., & Paul, Y. (2014). A renewable heat solution for water ingress in the Glasgow subway tunnel system. *Conference: Energy and sustainability*. <https://doi.org/10.2495/ESUS140141>.

7. Hytiris, N., Ninikas, K., Emmanuel, R., Aaen, B., & Younger, P.L. (2018). A heat energy recovery system from tunnel wastewater. *Environmental Geotechnics*, 5(5), 300–308. <https://doi.org/10.1680/jenge.15.00087>.

8. Postrioti, L., Baldinelli, G., Bianchi, F., Buitoni, G., Maria, F.D., & Asdrubali, F. (2016). An experimental setup for the analysis of an energy recovery system from wastewater for heat pumps in civil buildings. *Applied Thermal Engineering*. 102, 961–971. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.016>.

9. Stafford, W., Cohen, B., Pather-Elias, S., von Blottnitz, H., van Hille, R., Harrison, S. T. L., & Burton, S. G. (2013). Technologies for recovery of energy from wastewaters: Applicability and potential in South Africa. *Journal of energy in Southern Africa*, 24(1), 15–26. <https://dx.doi.org/10.17159/2413-305-1/2014/v24i1a3003>.

10. Zhu, J.J., Wang, X., & Anderson, P.R. (2019). Modeling and spatial optimization of wastewater-source heat pump implementation in a wastewater collection system. *Urban Water Journal*, 16(10), 698–708. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1726410>.

11. Ceconet, D., Racek, J., Callegari, A. & Hlavínek, P. (2020). Energy Recovery from Wastewater: A Study on Heating and Cooling of a Multipurpose Building with Sewage-Reclaimed Heat Energy, *Sustainability*, 12(116). <https://doi.org/10.3390/su12010116>.

12. Laanearu, J., Borodinets, A., Rimeika, M., & Palm, B. (2017). A review on potential use of low-temperature water in the urban environment as a thermal-energy source. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/251/1/012054>.

13. Gruber-Glatzl, W., Brunner, C., Meitz, S. & Schnitzer, H. (2020). From the Wastewater Treatment Plant to the Turnstiles of Urban Water and District Heating Networks, *Frontiers in Sustainable Cities*. <https://doi.org/10.3389/frsc.2020.523698>.
14. Huber, F., Neugebauer, G., Ertl, T. & Kretschmer, F. (2020). Suitability Pre-Assessment of in-Sewer Heat Recovery Sites Combining Energy and Wastewater Perspectives. *Energies*, 13. <https://doi.org/10.3390/en13246680>.
15. Kizyeyev, M.D., & Chaban, I.V. (2015). Vykorystannia teplovykh nasosiv pry rekonstruktsii system opalennia budivel filtriv stantsii vodopidhotovky [The use of heat pumps in the reconstruction of heating systems of filter buildings of water treatment stations]. *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva – Bulletin of the Odessa State Academy of Construction*, 59, 64-69.
16. Kozhushko, O. D., & Kizyeyev, M. D. (2017). Utylizatsiia teplovoi enerhii stichnykh vod ta pytnoi vody v systemakh vodopostachannia i kanalizatsii naselenykh punktiv. [Utilization of thermal energy of waste water and drinking water in water supply and sewage systems of settlements]. *Suchasni tekhnologii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi – Modern technologies and calculation methods in construction*, 7, 94-100. http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb_2017_7_16.
17. van der Hoek, J. P., Mol, S., Giorgi, S, Ahmad, J, I., Liu, G., & Medema, G. (2018). Energy recovery from the water cycle: Thermal energy from drinking water, *Energy*, 162, 977-987. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.097>.
18. Dürrenmatt, D.J. (2006). Berechnung des Verlaufs der Abwassertemperatur im Kanalisationsrohr. *Master's Thesis, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich*. <https://www.dora.lib4ri.ch/eawag/islandora/object/eawag:12981>.
19. Dürrenmatt, D., & Wanner, O. (2008). Simulation of the wastewater temperature in sewers with TEMPEST. *Water Science & Technology*, 57(11), 1809-1815. <https://doi.org/10.2166/wst.2008.291>.
20. Dürrenmatt, D., & Wanner, O. (2012). TEMPEST. Computer Program for the Simulation of the Wastewater Temperature in Sewers. Version 1.02. *User Manual*. <https://www.eawag.ch/en/department/eng/software/>.
21. Durrenmatt, D., & Wanner, O. (2014). A mathematical model to predict the effect of heat recovery on the wastewater temperature in sewers. *Water Research*, 48, 548-558. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.10.017>.
22. Ali, S., & Gillich, A. (2018). Determining the UK's potential for heat recovery from wastewater using steady state and dynamic modelling-preliminary results. *Proceedings in Energy*, 5, 107-121. https://openresearch.lsbu.ac.uk/download/27833bbc077813a232059703d7f32a847dbf30b1a8c7f92a8da6c1a65437e2ba/787271/Determining%20the%20UKs%20potential%20for%20heat%20recovery%20from%20wastewater%20using%20steady%20state%20and%20dynamic%20modelling%20-%20preliminary%20results_%20%2800000002%29.pdf.
23. Hofman, J., Bloemendal, M., Wols, B., Agudelo-Vera, C., Elias Maxil, J., Boderie, P., Nijman, M., & van der Hoek, J.P. (2014). Modelling of Thermal Energy Balance in Sewer Systems. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:e31f2cc8-a39b-49a2-bd41-c0685bea369d>.
24. Elías-Maxil, J.A., Hofman, J., Wols, B., Clemens, F., van der Hoek, J.P., & Rietveld, L. (2017). Development and performance of a parsimonious model to estimate temperature in sewer networks. *Urban Water Journal*, 14, 829–838. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2016.1276811>.
25. Sitzenfrei, R., Hillebrand, S., & Rauch, W. (2017). Investigating the interactions of decentralized and centralized wastewater heat recovery systems. *Water Science & Technology*, 75, 1243–1250. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.598>.
26. Abdel-Aal, M., Smits, R., Mohamed, M., De Gussem, K., Schellart, A., & Tait, S. (2014). Modelling the viability of heat recovery from combined sewers. *Water Science & Technology*, 70(2), 297–306. <https://doi.org/10.2166/wst.2014.218>.
27. Abdel-Aal, M., Tait, S., Mohamed, M. & Schellart, A. (2021). Using Long Term Simulations to Understand Heat Transfer Processes during Steady Flow Conditions in Combined Sewers. *Water*, 13(570). <https://doi.org/10.3390/w13040570>.

Mykola Kizyeyev¹, Mykhailo Kunytskyi²

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor

Head of Heat, Gas Supply, Ventilation and Sanitary Engineering Department
National University of Water and Environmental Engineering (Rivne, Ukraine)

E-mail: m.d.kizieiev@nuwm.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1491-1695>

Scopus Author ID: [57218687201](https://orcid.org/57218687201)

²postgraduate

E-mail: kunytskyi_az16@nuwm.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1700-8167>

DETERMINATION OF TEMPERATURE REGIME OF WASTEWATER IN SEWAGE NETWORKS USING THE “TEMPEST” PROGRAM WITH PURPOSE OF HEAT ENERGY RECOVERY

In Ukraine, the operation of boiler houses in the unheated period is inefficient. Therefore, it is practiced to shut down boilers at this time in settlements of Ukraine. This makes it necessary for residents to install apartment heaters for hot water supply.

The shortcomings of the traditional systems of centralized heating and hot water supply were aggravated in the conditions of intense hostilities and systematic enemy shelling of the infrastructure of populated areas. Moreover, everything is happening against the background of rising prices for energy resources, their shortage and the approach of the heating season.

To increase the reliability of the functioning of the energy infrastructure, it is necessary to duplicate centralized sources with autonomous ones, including those based on renewable energy. In order to guarantee the sanitary and epidemiological well-being of the population, together with water supply systems, reliable operation of water drainage systems and heat pumps, which should become sources of low-potential heat in cities, is also necessary.

The purpose of the article is to get acquainted with the possibilities of the «TEMPEST» program for the study of the temperature regime of wastewater, as well as the development of a methodology for determining the thermal energy potential of wastewater in sewage collectors.

A study based on the «TEMPEST» program for calculating the potential amount of thermal energy in the sewer network was conducted on the example of modeling the temperature regime of the yard sewer network of dormitories No. 7 and No. 8 of the National University of Water and Environmental Engineering (Rivne, Ukraine). The aim of the study was to determine the amount of thermal energy of wastewater that can be recovered for the needs of hot water supply for residents of dormitories with the help of heat pumps.

Keywords: temperature regime of wastewater; heat pump; mathematical model; heat recovery, TEMPEST.

Fig.: 9. Table: 3. References: 27.