

А.Н. Коваленко<sup>1</sup>, А.В. Коваленко<sup>2</sup>, Е.С. Лебедева<sup>2</sup>, В.А. Юрченко<sup>2</sup><sup>1</sup>КП «Харьковводоканал», Харьков<sup>2</sup>Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков

## ВЛИЯНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДООТВЕДЕНИЯ

На основании количественных расчетов показано, что понижение температуры сточных вод при использовании теплообменных установок в канализационной сети снижает образование парниковых газов, таких как CO<sub>2</sub>, но и экологически опасного газообразного сероводорода, а также скорость коррозии бетона сводовой части коллектора.

Ключевые слова: теплообменные системы, сточные воды, канализационные сети, газообразные выбросы, экологическая безопасность, сероводород, коррозия бетона

**Постановка проблемы.** Стратегическими целями обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования являются: сохранение окружающей природной среды и обеспечение ее защиты, ликвидация экологических последствий хозяйственной деятельности в условиях интенсивного роста экономической активности. Ресурсосбережение и энергоэффективность в различных отраслях коммунального сектора города является перспективным направлением, которое реализует цели экологической безопасности. В рамках данного исследования рассматриваются экологические и эксплуатационные последствия реконструкции системы отопления комплекса сооружений службы сетей водоотведения в г. Харькове.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В настоящее время теплоснабжение объектов КП «Харьковводоканал» осуществляется от газовых котельных. Проектом предлагается для отопления комплекса на сетях водоотведения использовать чиллер/тепловой насос с классом энергоэффективности А. В качестве источника низкопотенциального тепла используются неочищенные сточные воды с забором из камеры канализационного коллектора и сбросом в коллектор ниже камеры по течению. Отбор тепла циркуляционным контуром испарителя теплового насоса производится через коаксиальный теплообменник-утилизатор. Сточные воды имеют температуру около 22<sup>0</sup>С, при использовании теплообменной системы температура снижается на 6-8<sup>0</sup>С. Тепловой насос, работающий по принципу парокомпрессионной холодильной машины на хладагенте R134, переводит низкопотенциальную энергию на более высокий энергетический уровень [1, 2]. Циркуляционный контур конденсатора теплового насоса связан воздушной теплотрассой с существующей котельной. Из котельной

теплоноситель подается на системы-потребители насосной группы. Существующая система отопления комплекса позволяет использовать тепловой насос как единственный источник тепла, или параллельно с котельной, кроме того сохраняется возможность работы только от котельной. Прогнозируемый срок окупаемости проекта составляет 5 лет.

**Формулирование цели статьи.** Целью настоящей работы является количественная оценка влияния охлаждения транспортируемых сточных вод при использовании теплового насоса на образование и выброс экологически опасных газообразных соединений, а также показатели эксплуатационной долговечности бетонных трубопроводов водоотведения.

**Изложение основного материала.** Известно, что при использовании тепловых насосов достигается следующие эффекты, способствующие повышению экологической безопасности водоотведения:

- прекращение использования экологического ресурса - природного газа для отопления объектов КП «Харьковводоканал»;
- ликвидация выбросов парниковых газов в атмосферу.

Расчет ожидаемых сокращений выбросов (ОСВ, т CO<sub>2</sub> – экв), парниковых газов можно рассчитать по формуле (1), рекомендованной ЦЭИ:

$$\text{ОСВ} = 0,63 \cdot V, \quad (1)$$

где V – среднегодовой объем потребленного газа за определенный период.

Ориентировочная стоимость выбросов парниковых газов составляет 100 грн/т CO<sub>2</sub> – экв. В результате реализации данного проекта на одной из насосных станций канализационной сети г.

Харькова достигается экономический эффект 45754 грн. за счет сокращения выбросов парниковых газов. Такой экологический эффект крайне важен, поскольку комитет ООН по обеспечению соблюдения Киотского протокола восстановил статус соответствия Украины требованиям протокола и снял с нее запрет на торговлю квотами на выбросы парниковых газов.

Необходимо отметить, что использование теплообменной установки для отопления позволило техническому объекту (насосная станция) полностью отказаться от потребления газа, таким образом реализовав один из главных принципов экологической безопасности государства и рационального использования природных ресурсов.

Упомянутые выше экологические эффекты хорошо известны и широко рекламируются в предложениях по внедрению тепловых насосов на различных технических объектах. Однако, на сооружениях канализации охлаждение транспортируемых сточных вод позволяет достичь еще ряда положительных результатов, имеющих экологическое и эксплуатационное значение.

Канализационный коллектор представляет собой «биологический реактор», в котором происходят спонтанные микробиологические процессы, приводящие к целому ряду негативных последствий [2-9]:

- образование высокотоксичных газообразных соединений в экологически опасных концентрациях:  $H_2S$  (сероводорода),  $NH_3$  (аммиака),  $CO$  (оксида углерода),  $CO_2$  (диоксида углерода),  $NO_2$  (диоксида азота),  $CH_4$  (метана),  $CH_3CH_2SH$  (этилмеркаптана),  $CH_3SH$  (метилмеркаптана) и др.), выброс которых в городскую атмосферу создает угрозу экологической безопасности населения;

- коррозионное разрушение сводовой части, которое на некоторых участках сети создает угрозу обрушения с чрезвычайно опасными последствиями как для городской среды и населения, так и для надежности водоотведения.

Наиболее опасным процессом для эксплуатационной долговечности бетонных конструкций и экологической безопасности городской атмосферы является микробиологическая сульфатредукция в транспортируемых сточных водах [2-9]. При восстановлении сульфатов протонами органических соединений сульфатредуцирующие бактерии продуцируют газообразный  $H_2S$  (соединение 2 класса опасности), который на сводовой части коллектора инициирует микробиологическую коррозию бетона [2, 3, 10, 11].

Снижение температуры сточных вод приводит к замедлению процессов микробиологической сульфатредукции в сточной воде, согласно формуле (2) [12, 13]:

$$\rho = \rho_{max} \left( \frac{S}{K_m + S} \right) \cdot K_{O_2} \cdot K_t \cdot K_{pH}; \quad (2)$$

где,  $\rho_{max}$  – максимальная удельная скорость образования  $H_2S$ ,  $S$  – концентрация исходного субстрата  $SO_4^{2-}$ ,  $K_m$  – константа полунасыщения субстратом,  $K_{O_2}$ ,  $K_t$ ,  $K_{pH}$  – мультипликативные коэффициенты, учитывающие влияние на процесс кислородного режима, температуры, кислотности среды.

$$K_t = 10^{k_T(T-T_{opt})}, \quad (3)$$

где  $k_T$  – коэффициент, равный для иммобилизованной микрофлоры – 0,03;  $T$  – температура среды,  $^{\circ}C$ ,  $T_{opt}$  – оптимальная температура среды,  $25^{\circ}C$ .

Исходя из этой формулы, при понижении температуры на 6 градусов, скорость образования  $H_2S$  снижается ~ на 30%. Эти расчетные данные, а также данные [2, 13] подтвердили и результаты собственных экспериментальных исследований. В экспериментах моделировали влияние температуры на активность образования  $H_2S$  в лабораторных культиваторах при инкубации без встряхивания. Все культиваторы имели водные затворы. Использовали 3 культиватора:

- первый помещали в холодильник (температура  $6^{\circ}C$ );
- второй инкубировали при комнатной температуре (температура  $17^{\circ}C$ );
- третий инкубировали в термостате (температура  $27^{\circ}C$ ).

Результаты контроля процесса приведенные на рис.

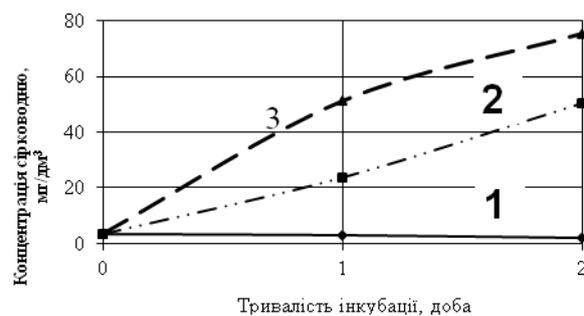


Рис. Влияние температуры на накопление  $H_2S$  в сточных водах: 1 -  $6^{\circ}C$ , 2 -  $17^{\circ}C$ , 3 -  $28^{\circ}C$

Как видно, наибольшая скорость накопления сероводорода в сточной воде наблюдалась при температуре  $28^{\circ}C$ , несмотря на то, что растворимость газов при повышении температуры воды уменьшается. Причем, на первые сутки инкубации при увеличении температуры среды приблизительно на  $10^{\circ}C$ , концентрация  $H_2S$  в сточной воде увеличивалась: в интервале  $6-17^{\circ}C$  – в 4,2 раза, в интервале  $17-28^{\circ}C$  – в 2,2 раза.

Поскольку каждый участок канализационной сети можно рассматривать как квазистационарную систему с установившейся скоростью потока  $H_2S$  из сточных вод через атмосферу подсводового пространства в конденсатную влагу на своде, то ожидаемо аналогичное снижение концентрации  $H_2S$  в атмосфере коллектора и конденсатной влаге [1,2]. Снижение температуры сточных вод приведет к повышению растворимости  $H_2S$  в воде и снижению его элюирования в газообразную среду. При снижении температуры воды на  $6^{\circ}C$  (с  $22^{\circ}C$  до  $16^{\circ}C$ ) растворимость  $H_2S$  повысится на 20 %, т.е. на 20% снизится выброс в атмосферу. Суммарный эффект (СЭ) снижения концентрации  $H_2S$  в газообразных выбросах из канализационных сетей в результате охлаждения сточных вод был посчитан по формуле (4):

$$CЭ = C_{исх.} \cdot \frac{100-a}{100} \cdot \frac{100-b}{100}$$

$$C_{исх.} \cdot \frac{100-30}{100} \cdot \frac{100-20}{100} \approx 0,45 \quad (4)$$

где,  $C_{исх.}$  - исходная концентрация  $H_2S$ ,  $a$  - эффект снижения концентрации  $H_2S$  в сточной воде, %,  $b$  - эффект задержания  $H_2S$  в сточной воде, %.

Таким образом, при охлаждении транспортируемой сточной воды с  $22^{\circ}C$  до  $16^{\circ}C$  концентрация  $H_2S$  в подсводовом пространстве коллекторов может снизиться ~ на 45%.

Скорость коррозии зависит от концентрации  $H_2S$  в конденсатной влаге, которая пропорциональна потоку  $H_2S$  из воздушной среды. Поскольку концентрация  $H_2S$  в воздухе после снижения температуры воды снизится ~ на 45 %, то его концентрация в конденсатной влаге снизится также ~ на 45 %, а значит и на столько же - концентрация образуемой из него серной кислоты.

Глубина коррозии бетона сводовой части коллектора зависит от концентрации серной кислоты на его своде согласно уравнению. Глубина коррозии бетона (5):

$$h_k = \sqrt{2\tilde{D}_k \frac{C_1^0}{C_1^*} t + \delta^2} - \delta \quad (5)$$

где,  $Dk$  - коэффициент молекулярной диффузии кислоты в порах бетона,  $C_1^0$  - концентрации серной кислоты на поверхности бетона,  $C_1^*$  - концентрация серной кислоты на фронте коррозии,  $\delta$  - расстояния диффузии серной кислоты вглубь неповрежденного бетона впереди фронта коррозии [2, 14].

Скорость коррозии бетона  $V_{корр.}$  можно определить из зависимости (6):

$$V_{корр.} = \frac{h_k}{t} \quad (6)$$

где,  $h_k$  - глубина коррозии, см,  $t$  - продолжительность кислотной агрессии

При снижении концентрации  $H_2S$  в конденсатной влаге до 0,6  $C_{исх.}$ , глубина коррозии будет составлять приблизительно  $\sqrt{0,6}=0,77$  от исходной глубины.

**Выводы.** В целом, снижение глубины и скорости коррозии на сводовой части составит около 23%. Прямой расчет не отображает всех особенностей коррозии бетона сводовой части коллектора: снижение концентрации серной кислоты в области pH 5,5 - 6,5 приведет к переводу процесса в чрезвычайно замедленную фазу. Кроме того, снижение температуры в лотковой части понизит температуру на сводовой части коллектора, что также снизит активность микробиологических коррозионных процессов.

Таким образом, выполненные расчеты свидетельствуют, что охлаждение сточных вод на участках канализационной сети на  $6-8^{\circ}C$  понизит выброс экологически опасных газообразных веществ ~ 40 % и скорость коррозии бетона сводовой части коллектора ~ 25 %.

#### Литература

1. Рей Д., Макмайкл. Тепловые насосы: Пер. с англ. - М.: Энергоиздат, 1982. - 224 с.
2. Дрозд Г.Я. Канализационные трубопроводы: надежность, диагностика, санация / Г.Я. Дрозд, Н.И. Зотов, В.Н. Маслак - Донецк: ИЭП НАН Украины, 2000. - 260 с.
3. Юрченко В.А. Развитие научно-технологических основ эксплуатации сооружений канализации в условиях биохимического окисления неорганических соединений: дисс.... доктора техн. наук: 05.23.04 / Юрченко Валентина Александровна. ХГТУСА. - Харьков, 2007. - 426 с.
4. Бригада Е.В. Мониторинг показателей эксплуатации водоотводящих сооружений из железобетона: дис.... кандидата техн. наук: 05.23.04 / Бригада Елена Владимировна. ХНУСА, Харьков, 2013 - 168 с.
5. C. Yongsiri, J. Vollertsen and T. Hvitved-Jacobsen. Hydrogen sulfide emission in sewer networks: a two-phase modeling approach to the sulfur cycle. // Water Science and Technology. 2004 - V. 50, n. 4. P. 161-168.
6. Process design manual for sulfide control in sanitary sewerage systems / U.S. Environmental protection agency, Center for Environmental research information, Cincinnati, 1974. - 136 p.
7. Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Yongsiri C., Nielsen A.H., Abdul-Talib S. Sewer microbial processes, emissions and impacts // Sewer processes and networks - Paris, France, 2002. - 13 p.
8. Yongsiri, C., Vollertsen, J., Rasmussen, M., and Hvitved-Jacobsen, T. Air-water transfer of hydrogen sulfide—an approach for application in sewer networks // Water Environ. Res. 2004.- 76. - V. 12, n. 2., P. 81-88.
9. Кофман В.Я. Сероводород и метан в канализационных сетях (обзор) // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. - №11. - С.72-78.

10. Васильев В.М., Панкова Г.А., Столбихин Ю.В. Разрушение канализационных тоннелей и сооружений на них вследствие микробиологической коррозии // Водоснабжение и санитарная техника. - 2013. - № 9. - С.67-76.
11. Sadurska I., Kowalik R. Experiments on Control of Sulphur Bacteria Active in Biological Corrosion of Stone // Acta Microbiol. Polonica. - 1966. - V. 15, n. 2. - P. 199-201.
12. Васильев В.Б., Вавилин В.А., Рытов С.В., Пономарев А.В. Имитационная модель анаэробного разложения органических веществ сообществом микроорганизмов. Основные уравнения // Водные ресурсы. 1993. - Т. 20. - №6. - С. 714-725.
13. C., Vollertsen, J., and Hvited-Jacobsen, T. Effect of temperature on air-water transfer of hydrogen sulfide // J. Environ. Eng. 2004. - 130. - V. 15, n. 1., P. 104-109.
14. Рекомендации по оценке степени коррозионного воздействия слабоагрессивных кислых сред на бетон. - М.: НИИЖБ, 1986. - 14 с.

**Автор: КОВАЛЕНКО Александр Николаевич**

Первый заместитель генерального директора КП «Харковводоканал», к.т.н., доц. Кафедры водоснабжения, водоотведения и очистки вод, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н.Бекетова, Харьков

**Автор: ЮРЧЕНКО Валентина Александровна**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков

**Автор: КОВАЛЕНКО Алина Васильевна**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков

**Автор: ЛЕБЕДЕВА Елена Сергеевна**

аспирант кафедры Безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, Харьков

## ВПЛИВ ОХОЛОДЖЕННЯ СТИЧНИХ ВОД НА ЕКОЛОГІЧНІ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОВІДВЕДЕННЯ

А.Н. Коваленко, В.А. Юрченко, А.В. Коваленко, Е.С. Лебедева

На підставі кількісних розрахунків показано, що зниження температури стічних вод при використанні теплообмінних установок в каналізаційній мережі знижує утворення парникових газів, таких як CO<sub>2</sub>, екологічно небезпечного газоподібного сірководню та швидкість корозії бетону сводової частини колектора.

**Ключові слова:** теплообмінні системи, стічні води, каналізаційні мережі, газоподібні викиди, екологічна безпека, сірководень, корозія бетону

## COOLING INFLUENCE OF WASTEWATER ON ENVIRONMENTAL AND OPERATIONAL CHARACTERISTICS SEWERAGE

A. Kovalenko, V. Yurchenko, A. Kovalenko, E. Lebedeva

The cooling influence of transporting sewage water with the help of a heat pump unit was assessed quantitative for formation and emission of environmentally hazardous gas compoundings from sewer nets to urban environment, and also indices of operational life of sewerage cement ducts – speed and corrosion depth were assessed. It is determined that cooling of sewage water on the prototype site of the sewer net for 6-8°C allows to obtain high ecological effect due to: efficient use of resources – decrease of natural gas usage for heating, reduction of emission of greenhouse gases (economic effect 45754 hryvnas per year), decrease of approximately for 40% of emission of hydrogen sulphide in the atmosphere. Besides that, in the result of cooling speed of cement corrosion of the up structure portion of the collector is decreased approximately for 25%, and therefore its operational life is increased by that much.

**Keywords:** heat exchange systems, wastewater, sewer networks, gaseous emissions, environmental safety, hydrogen sulfide, corrosion of concrete