



17-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos  
**TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA**,  
vykusios 2014 m. gegužės 8 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'  
**TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 8 May 2014, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 17-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»  
**ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК**, 8 мая 2014 г., Вильнюс, Литва

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД БЕТОННЫМИ ТРУБОПРОВОДАМИ  
ВОДООТВЕДЕНИЯ**

**В. Юрченко<sup>1</sup>, А. Коваленко<sup>2</sup>, Е. Бригада<sup>3</sup>, Е. Лебедева<sup>4</sup>**

*Кафедра безопасности жизнедеятельности и инженерной экологии,  
Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, г. Харьков, Украина  
Эл. почта: kaf-htusa@rambler.ru*

**Аннотация.** На основании количественных расчетов показано, что понижение температуры сточных вод, транспортируемых канализационными трубопроводами при использовании теплообменных установок, снижает образование парниковых газов, экологически опасного газообразного  $H_2S$ , скорость коррозии бетона сводовой части коллектора и предотвратит нитчатое «вспухание» активного ила биологических очистных сооружений.

**Ключевые слова:** канализационные трубопроводы, сероводород, сульфатредукция, биогенная сернокислотная коррозия, «вспухание» активного ила, охлаждение.

**Введение**

Главной функцией сетей водоотведения является безопасный сбор и транспортирование сточных вод на очистные сооружения. Однако самотечный канализационный коллектор является реактором спонтанных химических и микробиологических процессов, причем, очень многие из них приводят к образованию газообразных соединений, выделяющихся из транспортируемых сточных вод в атмосферу подсводового пространства самотечных трубопроводов (Дрозд 2003; Stuetz *et al.* 2001; Юрченко 2007). Газообразные выбросы из канализационных сетей создают экологические проблемы для прилегающих городских регионов.

**Анализ последних исследований и публикаций**

Поскольку, концентрация в них ряда соединений (например, серосодержащих –  $H_2S$ ,  $SO_2$ , меркаптанов, имеющих 2 класс опасности) достигает экологически и рабочей зоны (табл. 1),  $CO_2$ , и  $CH_4$ , опасных концентраций, многократно превышающих ПДК для населенных мест являются газами парникового эффекта, а  $CH_4$  к тому же является взрыво- и пожароопасным газом. Самые большие проблемы для эксплуатационной долговечности бетонных конструкций и экологической безопасности городской атмосферы создает образование в транспортируемых сточных

водах сероводорода в результате спонтанной микробиологической сульфатредукции.

Газообразный  $H_2S$  на сводовой части трубопровода инициирует развитие тионовых бактерий, которые при окислении этого соединения образуют серную кислоту, что создает чрезвычайную проблему для эксплуатационной долговечности бетонных трубопроводов водоотведения и бетонных сооружений на канализационных сетях.

**Таблица 1.** Химические соединения в газообразных выбросах из канализационных сетей

Соединения	Концентрация в газовых выбросах	Кратность превышения
$CO_2$ , об. %	0,1–3,5	До 7 (ОБУВ)
$CO$ , мг/м <sup>3</sup>	0–25	До 1,4 (ПДК в рабочей зоне)
$CH_4$ , об. %	0,2–6,0	До 3 ПДК в рабочей зоне
$H_2S$ , мг/м <sup>3</sup>	0–250	До 25 ПДК в рабочей зоне
$SO_2$ , мг/м <sup>3</sup>	5–30	До 3 ПДК в рабочей зоне
$NH_3$ , мг/м <sup>3</sup>	0–5,0	До 4 ПДК в рабочей зоне
$NO_x$ , мг/м <sup>3</sup>	0–5,0	Не превышает

Скорость коррозии при биогенной сернокислотной агрессии – действия на бетон серной кислоты,

которую образуют тионовые бактерии, может достигать 10 мм/год и сокращать эксплуатационную долговечность бетонных трубопроводов с планируемых 50 лет до 5–8 (Дрозд 2003). Согласно статистическим данным, 75 % аварий на бетонных трубопроводах водоотведения, длина которых составляет 25 % протяженности всей сети (например, в г. Харькове – 310 км) вызваны биогенной сернокислотной агрессией. Частота аварий на них составляет 1,8–4,6, а на трубопроводах из керамики – 0,9, кирпича – 0,09 км/год. Бетонные трубопроводы водоотведения – это бассейновые и главные коллекторы – самые масштабные канализационные сооружения. Поэтому аварии на них, сопровождающиеся обрушениями и провалами на территориях жилой застройки, транспортных систем, разрушением городских коммуникаций и загрязнением почвенных и водных сред имеют крайне негативные экологические и экономические последствия (Дрозд 2003, Юрченко 2007; Бригада 2013).

Накопление сероводорода в транспортируемых сточных водах создает серьезные проблемы и для последующей обработке сточных вод на биологических очистных сооружениях. Сероводород инициирует активное развитие в активном иле различных нитчатых серобактерий – нитчатое «вспухание» активно-активного ила, которое нарушает процесс отделения активного ила от очищенной сточной жидкости. Это приводит к увеличению выноса взвешенных веществ, в первую очередь активного ила, из вторичных отстойников и потери надежности работы всего комплекса очистки сточных вод в целом.

Для подавления образования сероводорода в канализационных сетях предложено довольно большое количество методов (инъекция кислорода или воздуха, дозирование нитратов, хлорида или сульфата железа, регулирование pH, понижение температуры сточной воды и т. д.), основная часть которых не вышла за рамки лабораторных экспериментов (Дрозд 2003). Новые технические решения в области эксплуатации трубопроводов водоотведения позволяют реализовать и задачи подавления неблагоприятных процессов образования газообразных соединений при транспортировании сточных вод.

### Цель настоящей работы

Рассмотрение экологических и эксплуатационных последствий подавления образования сероводорода в канализационных трубопроводах путем охлаждения транспортируемых сточных вод при использовании теплового насоса.

### Результаты экспериментальных исследований

На комплексах КП «Харьковводоканал» предлагается в качестве источника низкопотенциального тепла использовать неочищенные сточные воды при заборе из камеры канализационного коллектора и сбросом в коллектор ниже камеры по течению. Сточные воды имеют температуру около 22 °С, которая

после использования в теплообменной системе снижается на 6–8 °С. Тепловой насос, работающий по принципу парокомпрессионной холодильной машины на хладагенте R134, переводит низкопотенциальную энергию на более высокий энергетический уровень. Существующая система отопления комплексов позволяет использовать тепловой насос как единственный или параллельный источник тепла.

Известно, что при использовании тепловых насосов достигается экологический эффект, обусловленный уменьшением потребления природного газа для отопления и как следствия – снижения выбросов парниковых газов в атмосферу. В результате реализации данного проекта на одной из насосных станций канализационной сети г. Харькова достигается экономический эффект 45 754 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.

Этот экологический эффект хорошо известен и широко рекламируется 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. Так, снижение температуры сточных вод приводит к торможению процессов микробиологической сульфатредукции в сточной воде, согласно формуле (1) (Юрченко 2007):

$$\rho = \rho_{\max} \left( \frac{S}{K_m + S} \right) \cdot K_{O_2} \cdot K_t \cdot K_{pH}, \quad (1)$$

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

$$K_t = 10^{k_T(T - T_{opt})}, \quad (2)$$

где  $k_T$  – коэффициент для иммобилизованной микрофлоры – 0,03;  $T$  – температура среды, °С,  $T_{opt}$  – оптимальная температура среды, 25 °С.

Исходя из этой формулы, при понижении температуры на 6–8 градусов, скорость образования  $H_2S$  снижается ~ на 25–30 %. 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 (Дрозд 2003; Stuetz *et al.* 2001; Юрченко 2007).

Снижение температуры сточных вод приведет также к повышению растворимости  $H_2S$  в воде и снижению его элюирования в газообразную среду. При снижении температуры воды с 22 до 16–14 °С растворимость  $H_2S$  повысится ~ на 20 %, т. е. ~ на 20 % снизится выброс этого газа в атмосферу.

Таким образом, если суммировать эти эффекты, то в целом, концентрация  $H_2S$  в подсводовом пространстве коллекторов после снижения температуры транспортируемой сточной воды на 6–8 °С снизится ~ на 44 % от исходной.

$$OK_{н.п.} = C_{исх.} \cdot \frac{100-a}{100} \cdot \frac{100-b}{100} = 56 \%, \quad (3)$$

где ОК – остаточная концентрация  $H_2S$  в подсводовом пространстве коллекторов после снижения температуры транспортируемой сточной воды от исходной, %,  $C_{исх.}$  – исходная концентрация  $H_2S$ ,  $a$  – эффект снижения концентрации  $H_2S$  в сточной воде, 30 %,  $b$  – эффект задержания  $H_2S$  в сточной воде, 20 %.

Кроме того, понижение температуры транспортируемых сточных вод до 16 °С существенно снизит тягу в коллекторе и выброс газообразных веществ через колодцы, а особенно – через глубокие шахты.

Кроме экологического эффекта понижение температуры сточной воды снизит и скорость коррозии бетона сводовой части коллектора. Она 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 44 %, то его концентрация в конденсатной влаге снизится также ~ на 44 %, 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 (Юрченко 2007; Рекомендации... 1986):

$$h_K = \sqrt{2\tilde{D}_K \frac{C_1^0}{C_1^*} t + \delta^2} - \delta, \quad (4)$$

где,  $D_K$  – 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.

## Литература

Stuetz, R.; Frechen, F-B. 2001. Odours in Wastewater Treatment. Published by IWA Publishing, Alliance House, 12 Caxton Street (London SW1H 0QS, UK). 437 p.

Бригада, Е. В. 2013. Мониторинг показателей эксплуатации водоотводящих сооружений из железобетона: [Monitoring operation of drainage structures made of reinforced concrete]: дис.... кандидата техн. наук: 05.23.04 / Бригада Елена Владимировна. ХНУСА, Харьков. 168 с.

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

$$V_{корр.} = \frac{h_K}{t}, \quad (5)$$

где,  $h_K$  – глубина коррозии, см,  $t$  – продолжительность кислотной агрессии

При снижении концентрации  $H_2S$  в конденсатной влаге до 0,56  $C_{исх.}$ , глубина коррозии будет пропорциональна приблизительно  $\sqrt{0,56} \cdot C_{исх.} = 0,75 \cdot C_{исх.}$

Таким образом, в целом, снижение глубины и скорости коррозии на сводовой части составит около 25 %. Прямой расчет не отображает всех особенностей коррозии бетона сводовой части коллектора: снижение концентрации серной кислоты в области рН 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.

Для расчета остаточного содержания  $H_2S$  в транспортируемых сточных водах ( $OC_{с.в.}$ , %) от исходной после охлаждения участков трубопроводов учитывали снижение его накопления в процессе сульфатредукции и повышение содержания за счет повышения растворимости:

$$OK = C_{исх.} \cdot \frac{100-a}{100} \cdot 100 + b = 84 \%, \quad (6)$$

где  $a$  и  $b$  – те же, что в формуле (3).

Таким образом, охлаждение транспортируемых сточных вод понижает накопление  $H_2S$ , чрезвычайно опасное для надежности биологической очистки сточных вод.

## Выводы

Выполненные расчеты свидетельствуют, что охлаждение сточных вод в канализационных трубопроводах на 6–8 °С с помощью тепловых насосов позволяет понизить:

- выброс газообразного  $H_2S$  ~ на 44 %,
- скорость коррозии бетона сводовой части коллектора ~ на 25 %,
- накопление сероводорода в сточных водах, транспортируемых на биологические очистные сооружения ~ на 16 %.

- Дрозд, Г. Я. 2003. Канализационные трубопроводы: надежность, диагностика, санация. [Sewers: reliability, diagnostics, sanitation] / Г. Я. Дрозд, Н. И. Зотов, В. Н. Маслак. Донецк: ИЭП НАН Украины. 260 с.
- Рекомендации по оценке степени коррозионного воздействия слабоагрессивных кислых сред на бетон [Recommendations for evaluation of the degree of corrosion attack slightly aggressive acidic environments on concrete]. 1986. М.: НИИЖБ. 14 с.
- Юрченко, В. А. 2007. Развитие научно-технологических основ эксплуатации сооружений канализации в условиях биохимического окисления неорганических соединений: [Development of scientific and technological bases operation of sewage treatment plant in terms of biochemical oxidation of inorganic compounds]: дисс.... доктора техн. наук: 05.23.04 / Юрченко Валентина Александровна. ХГТУСА. Харьков. 426 с.