

УДК 504.054

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ СЕРОВОДОРОДА В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ РАБОТЕ НАСОСОВ КАНАЛИЗАЦИОННЫХ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

Л.И. Лейбович, доц., к.т.н., П.А. Пацурковский, асп.,  
Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев

*Аннотация.* Выполнено математическое моделирование процесса откачки стоков на канализационной насосной станции. Получена совокупность регрессионных зависимостей, позволяющая определять динамику поступлений сероводорода из канализационных стоков в воздух при включении перекачивающих насосов.

*Ключевые слова:* сероводород, канализационные стоки, массообмен, поверхность контакта фаз.

## МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ НАДХОДЖЕННЯ СІРКОВОДНЮ У ДОВКІЛЛЯ ПІД ЧАС РОБОТИ НАСОСІВ КАНАЛІЗАЦІЙНИХ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ

Л.І. Лейбович, доц., к.т.н., П.А. Пацурковський, асп.,  
Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв

*Анотація.* Виконано математичне моделювання процесу відкачування стоків на каналізаційних насосних станціях. Отримано сукупність регресійних залежностей, що дозволяє визначити динаміку надходжень сірководню з каналізаційних стоків у повітря при ввімкненні перекачувальних насосів.

*Ключові слова:* сірководень, каналізаційні стоки, масообмін, поверхня контакту фаз.

## SIMULATION OF DYNAMICS OF HYDROGEN SULFIDE PENETRATION IN TO THE ENVIRONMENT DURING THE OPERATION OF PUMPS OF SEWAGE PUMPING STATIONS

L. Leibovych, Assoc. Prof., Ph. D. (Eng.),  
P. Patsurkovsky, P. G.,  
Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mikolaiv

*Abstract.* Mathematical modeling of wastewater pumping at sewage pumping stations was done. A set of regression dependences, allowing to define the dynamics of hydrogen sulfide penetration into the atmosphere from sewage facilities when switching on the transfer pumps is obtained.

*Key words:* hydrogen sulfide, sewage, mass transfer, phase contact surface.

### Введение

Вопросы, связанные с загрязнением окружающей среды, с каждым годом становятся все более актуальными. Одним из источников загрязнения окружающей среды являются канализационные насосные станции (КНС),

работа которых приводит к выделению вредных веществ в окружающую среду. Наиболее опасными веществами, поступающими в окружающую среду около КНС, являются сероводород и меркаптаны [1–3]. В литературе недостаточно изложены методы прогнозирования загрязнения окружающей среды

около КНС. Особенность работы КНС, связанная с периодичностью работы перекачивающих насосов, и требования техники безопасности по вентиляции емкостей накопления приводят к поступлению большого количества загрязняющих веществ в атмосферу. Поэтому возникла необходимость более детально исследовать обозначенную проблему.

### Анализ публикаций

Попытка проанализировать канализационную насосную станцию как источник загрязнения окружающей среды была сделана авторами работы [4]. На основании анализа данных работ [1–3, 5] в работе [4] было предложено оценивать канализационную насосную станцию как источник загрязнения окружающей среды по количеству выделяе-

мого сероводорода в момент работы перекачивающих насосов.

На основании экспериментальных исследований [4], приведенных на рис. 1, была получена регрессионная зависимость для расчета концентрации сероводорода в воздухе грабельного отделения канализационной насосной станции

$$C_{H_2S} = (6,955 + 0,035 \cdot \tau - 1,325 \cdot 10^{-4} \cdot \tau + 1,267 \cdot 10^{-7} \cdot \tau) \cdot A, \quad (1)$$

где

$$A = [1,93 \cdot [(10)]^{(-9)} \cdot (1 + 0,02 \cdot (t - 20))] / 1,583 \times \times [(10)]^{(-9)} \cdot 10;$$

$\tau$  – время перекачки, с;  $t$  – температура перекачиваемых стоков, °С.

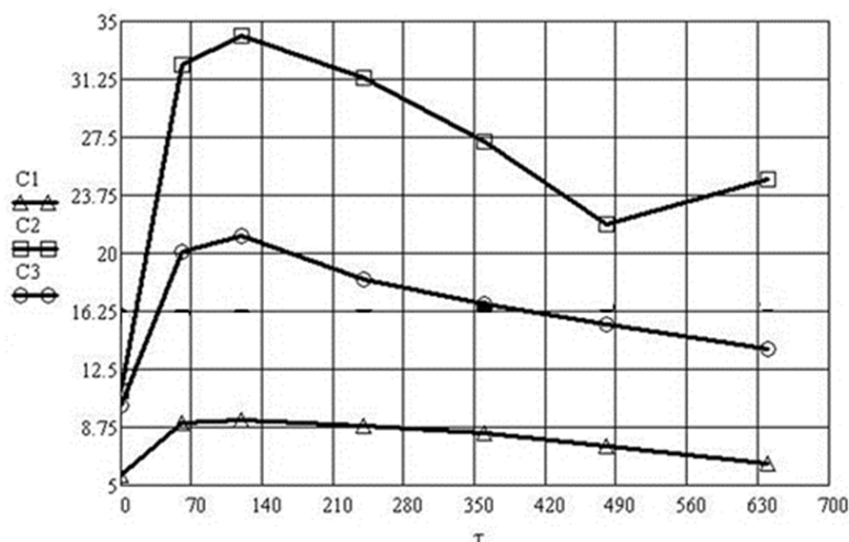


Рис. 1. Динамика изменения концентрации сероводорода в воздухе у решеток грабельного отделения КНС проекта 902-1-37:  $\tau$  – время, с;  $C_1=C/C_{01}$  – безразмерная концентрация сероводорода при начальной концентрации  $C_{01}=5,7$  мг/м<sup>3</sup>; температура стоков  $t=12$  °С;  $C_2=C/C_{02}$  при  $C_{02}=10,2$  мг/м<sup>3</sup>,  $t=14,5$  °С;  $C_3=C/C_{03}$  при  $C_{03}=11,1$  мг/м<sup>3</sup>,  $t=15,5$  °С

Важно отметить, что большую часть времени КНС выполняет функцию отстойника, так как стоки на нее поступают не постоянно, а периодически. Объем стоков, поступающих в приемный резервуар КНС, существенно различается по времени.

Для откачки канализационных стоков на КНС используются насосы погружного типа. Исходя из этого требуется, что на КНС может быть установлено как минимум два насоса: один – основной, а второй – резервный.

Согласно требованиям по автоматике включение насосов для откачки стоков осуществляется поочередно, т.е. в одном цикле откачки включается первый насос, а в другом цикле – второй. Частота пуска насосов для откачки канализационных стоков существенно изменяется в зависимости от времени суток и объема стоков, поступающих на КНС.

Все выше перечисленные особенности работы КНС необходимо учитывать при формировании алгоритма расчета поступлений се-

роводорода из канализационных стоков в окружающую среду при работе канализационной насосной станции.

В работе [4] было сделано предположение, что динамика поступлений сероводорода в окружающую среду определяется гидродинамической обстановкой в приемной емкости канализационной насосной станции. Однако не даны рекомендации для формирования алгоритма расчета поступлений сероводорода в окружающую среду при работе КНС.

### Цель и постановка задачи

Целями настоящих исследований является исследование гидродинамической обстановки в приемных емкостях современных КНС и определение динамики поступления сероводорода из канализационных стоков в воздух окружающей среды на КНС. Поставленные цели могут быть достигнуты путем математического моделирования гидродинамической обстановки в приемных емкостях современных КНС и проведения натурных исследований выделений сероводорода из канализационных стоков в период работы перекачивающего насоса.

### Моделирование динамики поступления сероводорода

Сточные воды поступают в КНС через помещение решеток, которые задерживают крупные примеси. Особенность эксплуатации решеток заключается в необходимости их периодической очистки. При контакте со сточными водами воздух насыщается сероводородом, который через приточно-вытяжную вентиляцию попадает в окружающую среду.

В работах [2, 3, 8] проводились исследования по определению эмиссии сероводорода из стоков, движущихся самотеком по канализации. Данные этих исследований показали, что на интенсивность десорбции сероводорода из канализационных стоков влияет множество факторов. К ним относятся следующие: концентрация сероводорода в стоках, температура стоков и воздуха окружающей среды, скорость движения, водородный показатель и расход стоков.

Но канализационные стоки движутся между канализационными насосными станциями в основном по замкнутым трубопроводам. Это обуславливает малое поступление сероводорода в окружающую среду в районе разме-

щения трубопроводов канализационной системы. И основное выделение сероводорода в окружающую среду происходит в районах размещения КНС, где трубопроводы имеют технологический разрыв, а в приемных емкостях велика поверхность контакта фаз (канализационных стоков и воздуха).

На рис. 2 приведен совмещенный график поступления сточных вод [6] и выделения сероводорода в воздух [7] в зависимости от времени суток.

На основе анализа данных, приведенных на рис. 2, можно сделать вывод, что образование сероводорода идет в застойных зонах городских систем канализации. Именно поэтому при малых поступлениях сточных вод в них содержится большое количество сероводорода.

Аппроксимируя данные, приведенные на рис. 2, можно получить следующую регрессионную зависимость:

$$C(g) = 0,932 - 10,901g + 299,038g^2 - 3,754 \times 10^2 g^2, \quad (2)$$

где  $C(g)$  – безразмерная концентрация сероводорода в воздухе (отношение текущего значения к максимально зарегистрированному для данной КНС);  $g$  – доля поступивших канализационных стоков в какой-либо промежуток времени от общего суточного значения канализационных стоков, перекаченных КНС.

Уровень выброса сероводорода может быть определен следующим уравнением [4]:

$$R = K_{H_2S} \left( C_{H_2S}^W - \frac{C_{H_2S}^A}{H_c} \right), \quad (3)$$

где  $K_{H_2S}$  – коэффициент массоотдачи;  $C_{H_2S}^W$  – концентрация сероводорода в воде;  $C_{H_2S}^A$  – концентрация сероводорода в воздухе;  $H_c$  – константа Генри.

Одним из основных показателей, влияющих на коэффициент массоотдачи в жидкой фазе при десорбции сероводорода и определяющих интенсивность массообменных процессов, является площадь поверхности контакта фаз.

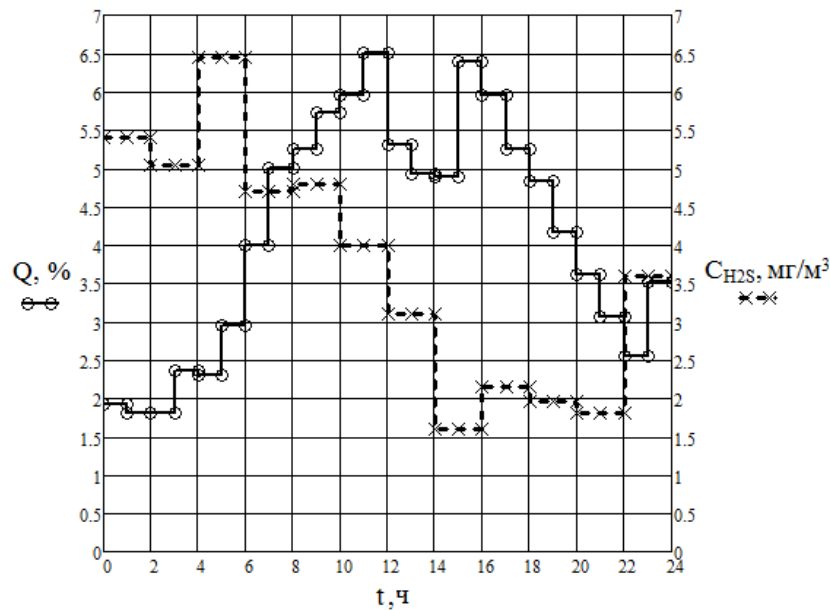


Рис. 2. Совмещенный график поступления сточных вод и выделения сероводорода в зависимости от времени суток

Следует отметить, что современные КНС имеют сравнительно компактные размеры и оборудуются насосами, включение которых при пиковых нагрузках может достигать 15 раз в час и более [9]. Включение насоса для откачки стоков из приемного резервуара осуществляется при достижении стоками верхнего уровня. После включения насоса уровень стоков начинает снижаться, пока не будет достигнут нижний уровень и насос автоматически отключится. Можно предположить, что в процессе работы насоса откачки стоков из приемного резервуара формируется волнообразное движение на поверхности раздела фаз.

Анализ данных работы [10] показывает, что наличие волнового движения жидкости на поверхности может способствовать интенсификации массообмена более чем в 4 раза. В связи с этим в рамках исследований было выполнено математическое моделирование процесса откачки стоков из приемного резервуара, в котором они накапливаются. Цель моделирования: определить скорость движения жидкости и оценить наличие волн на поверхности раздела фаз. Моделирование осуществлялось в программном комплексе FlowVision. Модель представляет собой цилиндрическую емкость диаметром 1,6 м.

Моделирование осуществлялось при следующем допущении – не учитывалось влияние вибрации, создаваемой при работе электро-

двигателя насоса, на поверхность раздела фаз.

Модель жидкости – свободная поверхность. В рамках данной модели решались уравнения Навье-Стокса, уравнение неразрывности, уравнение переноса, уравнения  $k-\epsilon$  модели турбулентности. Решение данных уравнений осуществлялось неявным методом, а шаг по времени задавался исходя из числа Куранта, равного 1. Расчетная область составила 10240 ячеек.

Моделирование показало наличие волнового движения на поверхности раздела фаз. На рис. 3 приведена полученная зависимость высоты волн от времени откачки стоков.

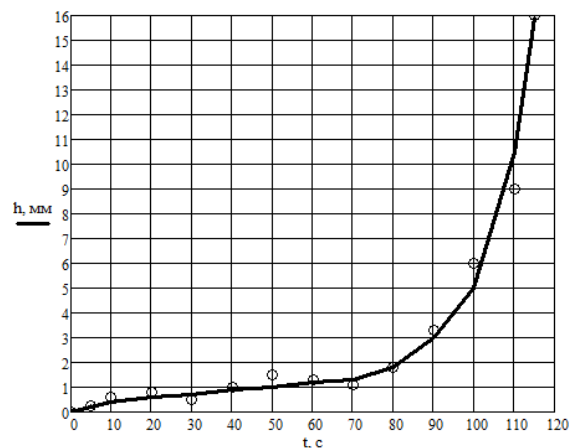


Рис. 3. Зависимость высоты волн от времени откачки стоков

Анализ результатов моделирования показывает, что при достижении стоками нижнего уровня, при котором происходит отключение насосов, наблюдается наиболее активное перемешивание стоков на поверхности жидкости и высота волн на поверхности является максимальной.

Полученные по результатам моделирования скорость движения жидкости на поверхности раздела фаз и высота волны позволили определить изменение коэффициента массоотдачи за время откачки стоков (рис. 5).

Расчет коэффициента массоотдачи в жидкой фазе при десорбции сероводорода осуществлялся согласно [11]. Результаты расчета приведены на рис. 4.

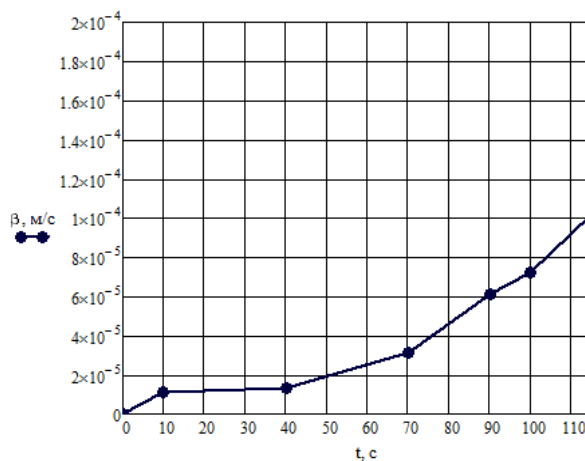


Рис. 4. Изменение коэффициента массоотдачи в зависимости от времени откачки стоков

Динамика выделения сероводорода в воздух грабельного помещения при работе перекачивающих насосов исследовалась авторами путем замеров концентраций  $H_2S$  газоанализатором ИСС (относительная ошибка в интервале измерений от 1 до 4 ПДК составляет не более 10 %). Одновременно отбирались пробы воздуха для определения хроматографическим методом других примесей, поступающих в воздух при перекачке канализационных стоков.

Уравнение (3) для расчета коэффициента массоотдачи при десорбции сероводорода с поверхности канализационных стоков в приемной емкости КНС с момента включения перекачивающего насоса можно заменить в алгоритме математической модели прогнозирования загрязнения окружающей среды

сероводородом следующей регрессионной зависимостью:

$$\beta = 1,175 \cdot 10^{-5} + 6,61 \cdot 10^{-9} \tau + 1,776 \cdot 10^{-10}, \quad (4)$$

где  $\beta$  – коэффициент массоотдачи при десорбции сероводорода с поверхности канализационных стоков, м/с;  $\tau$  – время с начала работы насоса, с.

Сравнивая данные экспериментальных исследований [4] и данные компьютерного эксперимента, можно сделать вывод, что максимальные поступления сероводорода в окружающую среду наступают на 100–140-й секундах от начала процесса перекачки стоков из приемной емкости КНС, что достаточно хорошо согласуется с полученными данными математического моделирования волнообразования на поверхности канализационных стоков. Также эти данные достаточно хорошо согласуются с расчетными значениями интенсификации процесса массообмена по сероводороду между канализационными стоками и воздухом (рис. 5).

Хорошее совпадение приведенных исследований и данных работ [12–13] позволяет сформировать алгоритм расчета поступлений сероводорода в окружающую среду при работе КНС на основании регрессионных зависимостей (1)–(2) и (4). И в случае превышения концентрации сероводорода более  $5 \text{ мг/м}^3$  в воздухе, отбираемом из грабельного помещения КНС, сформировать технические требования к системе очистки воздуха в помещениях канализационной станции.

## Выводы

Математическое моделирование гидродинамической обстановки в емкости для накопления канализационных стоков на КНС показало, что при их откачке развивается процесс волнообразования на поверхности контакта фаз.

Результаты математического моделирования и экспериментальные данные имеют достаточно хорошую сходимость и указывают на интенсификацию выделения сероводорода из канализационных стоков в воздух в процессе их откачки из КНС.

Проведенные экспериментальные исследования и данные компьютерного эксперимента

позволяют разработать алгоритм расчета поступлений сероводорода в окружающую среду при работе КНС в любой период времени, а также сформировать достоверные исходные данные в техническом задании на проектирование систем очистки воздуха от сероводорода на КНС с большими выделениями  $H_2S$  в окружающую среду.

### Литература

1. DMT ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dirkse-milieutechniek.com/>. – Заголовок с экрана.
2. Лосева Я.П. Эффективность рассеивания испарений от резервуаров канализационных очистных сооружений города Владивостока / Я.П. Лосева, С.М. Гриванова, Я.В. Мищенко // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 11 (Ч. 3). – С. 1383–1388.
3. Hvitved-Jacobsen T. Sewer microbial processes, emissions and impacts / T. Hvitved-Jacobsen, J. Vollertsen, A. Nielsen, S. Abdul-Talib. – Paris, France, Sewer Processes and Networks, 2002.
4. Лейбович Л.И. К вопросу прогнозирования выделения сероводорода в окружающую среду при работе КНС / Л.И. Лейбович, Ю.В. Помазкин, П.А. Пацурковский // *Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства: материалы IV Международной научной экологической конференции*. – Краснодар. – Кубанский госагроуниверситет, 2015. – Ч. I. – С. 563–567.
5. Yongsiri C. Hydrogen sulfide emission in sewer networks: a two-phase modeling approach to the sulfur cycle / C. Yongsiri, J. Vollertsen, T. Hvitved-Jacobsen // *Water Science and Technology*. – 2004. – Vol. 50, No. 4. – P. 161–168.
6. Яковлев С.В. Канализация: учебник для вузов / С.В. Яковлев, Я.А. Карелин, А.И. Жуков, С.К. Колобанов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1975. – 632 с.
7. Impact of sewer emission dynamics on monitoring campaign design / E. Sivret, N. Le-Minh, B. Wang, X. Wang, R. Stuetz // *Chemical Engineering Transactions*. – 2014. – Vol. 40. – P. 43–48. DOI: 10.3303/CET1440008.
8. Lahav O. A different approach for predicting  $H_2S(g)$  emission rates in gravity sewers / O. Lahav, A. Sagiv, E. Friedler // *Water Research*. – 2006. – Vol. 40. – P. 259–266.
9. Березин С.Е. Насосные станции с погружными насосами. Расчет и конструирование / С.Е. Березин. – М.: Стройиздат, 2008. – 160 с.
10. Алексеенко С.В. Волновое течение пленок жидкости / С.В. Алексеенко, В.Е. Накоряков, Б.Г. Покусаев. – Новосибирск: ВО Наука. Сибирская издательская фирма, 1992. – 256 с.
11. Холпанов Л.П. Гидродинамика и тепло-массообмен с поверхностью раздела / Л.П. Холпанов, В.Я. Шкадов. – М.: Наука, 1990. – 271 с.
12. Nielsen A.H. Aerobic and anaerobic transformation of sulfide in a sewer system – field study and model simulation / A.H. Nielsen, J. Vollertsen, H.S. Jensen, H.I. Madsen, T. Hvitved – Jacobsen. WEFTEC®, 2006. – P. 3654–3670.
13. Дрозд Г.Я. Вентиляция систем водоотведения / Г.Я. Дрозд, В.Д. Гусенцова. – Луганск: ЛНАУ, 2004. – 136 с.

Рецензент: Н.В. Внукова, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2016 г.