

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ СЕРОВОДОРОДА В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРИ РАБОТЕ КАНАЛИЗАЦИОННОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

Л. И. Лейбович, П. А. Пацурковский

Национальный университет кораблестроения имени адмирала С.О. Макарова
просп. Героев Сталинграда, 9, г. Николаев, 54025, Украина. E-mail: recycle.lev@gmail.com

Выполнено математическое моделирование процесса откачивания стоков на канализационной насосной станции. Результаты математического моделирования представлены в виде распределения поля скоростей внутри накопительной емкости. Представлена графическая и аналитическая зависимость коэффициента массоотдачи от продолжительности работы перекачивающего насоса. Приведен график зависимости высоты волн на поверхности раздела фаз в накопительной емкости от времени работы перекачивающего насоса. Получена совокупность регрессионных зависимостей, позволяющая определять динамику поступлений сероводорода из канализационных стоков в воздух при включении перекачивающих насосов. Верификация полученных результатов осуществлялась на основе физического эксперимента. Приведены результаты экспериментальных исследований динамики изменения концентрации сероводорода над поверхностью канализационных стоков.

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

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ НАДХОДЖЕННЯ СІРКОВОДНЮ У ДОВКІЛЛЯ ПРИ РОБОТІ КАНАЛІЗАЦІЙНОЇ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ

Л. І. Лейбович, П. А. Пацурковський

Національний університет кораблебудування імені адмірала С.О.Макарова
просп. Героїв Сталинграда, 9, м. Миколаїв, 54025, Україна. E-mail: recycle.lev@gmail.com

Виконано математичне моделювання процесу відкачування стоків на каналізаційній насосній станції. Результати математичного моделювання представлені у вигляді розподілу поля швидкостей всередині накопичувальної ємності. Приведено графічну та аналітичну залежності коефіцієнта масовіддачі від тривалості роботи перекачувального насоса. Наведено графік залежності висоти хвиль на поверхні розділу фаз в накопичувальній ємності від часу роботи перекачувального насоса. Отримано сукупність регресійних залежностей, що дозволяє визначати динаміку надходжень сірководню з каналізаційних стоків в повітря при ввімкненні перекачувальних насосів. Верифікація отриманих результатів здійснювалася на основі фізичного експерименту. Наведено результати експериментальних досліджень динаміки зміни концентрації сірководню над поверхнею каналізаційних стоків.

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

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. 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.

Особенно важна задача прогнозирования поступления сероводорода в воздух помещений канализационных насосных станций. Высокая влажность воздуха и сероводород являются причиной формирования агрессивной среды в помещениях КНС, что существенно сказывается на сроке службы строительных конструкций и оборудования.

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 источника загрязнения окружающей среды по количеству выделяемого 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:

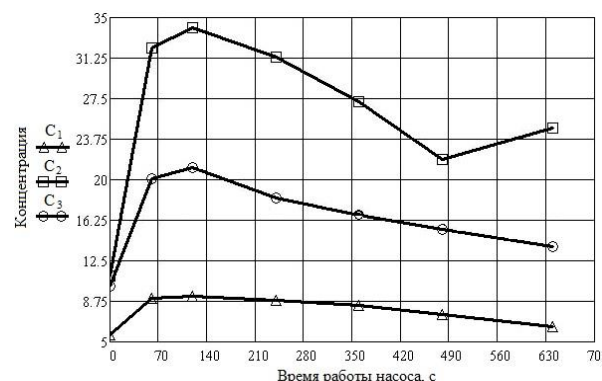


Рисунок 1 – Динамика изменения концентрации сероводорода в воздухе у решеток грабельного отделения КНС проекта 902-1-37: τ – время, с;
 $C_1=C/C_{01}$ – безразмерная концентрация сероводорода при начальной концентрации $C_{01}=5,7 \text{ мг/м}^3$ и температуре стоков $t=12 \text{ }^\circ\text{C}$;
 $C_2=C/C_{02}$ при $C_{02}=10,2 \text{ мг/м}^3$, $t=14,5 \text{ }^\circ\text{C}$; $C_3=C/C_{03}$ при $C_{03}=11,1 \text{ мг/м}^3$, $t=15,5 \text{ }^\circ\text{C}$

$$C_{H_2S} = (6.955 + 0.035 \cdot \tau - 1.325 \cdot 10^{-4} \cdot \tau + 1.267 \cdot 10^{-7} \cdot \tau) \cdot A, \quad (1)$$

$$A = \{ [1.93 \cdot 10^{-9} \cdot (1 + 0.02 \cdot (t - 20))] / 1,583 \cdot 10^{-9} \}^{10},$$

где τ – время перекачки, с; t – температура перекачиваемых стоков, °С.

Кроме того, в работе [4] предложены следующие регрессионные зависимости:

– для накопления сероводорода в застойных канализационных стоках, мг/л:

$$C_{H_2S} = 1.98 \cdot \tau^{-0.06 + 0.013 \cdot t}, \quad (2)$$

где t – температура канализационных стоков, °С; τ – время экспозиции, с;

– для определения насыщенных сероводородом минимальных объемов воздуха, поступающих в окружающую среду при вентиляции накопительной емкости КНС, л/с:

$$G_{max} = 5 \cdot G_{cp}^{0.835}, \quad (3)$$

где G_{cp} – значение среднечасового поступления канализационных стоков на КНС, л/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. Минимальный объем поступающих стоков на КНС наблюдается в ночное время, когда водопользование минимально.

Для откачки канализационных стоков на КНС используются насосы погружного типа. Регламент требует, что как минимум на КНС может быть установлено 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 перечисленные выше особенности работы КНС необходимо учитывать при формировании алгоритма расчета поступлений сероводорода 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, в работе [4] не даны рекомендации для формирования алгоритма расчета поступлений сероводорода в окружающую среду при работе КНС.

Целью данной работы является исследование гидродинамической обстановки в приемных емкостях современных КНС и определение динамики

поступления сероводорода из канализационных стоков в воздух окружающей среды на КНС.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Достижение поставленных целей достигается путем математического моделирования гидродинамической обстановки в приемных емкостях современных КНС и проведения натурных исследований выделений сероводорода из канализационных стоков в период работы перекачивающего насоса.

Сточные воды поступают в КНС через помещенные решетки, 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.

Стоит отметить, что стоки движутся между канализационными насосными станциями, в основном, по замкнутым трубопроводам. Это обуславливает малое поступление сероводорода в окружающую среду в районе размещения 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.

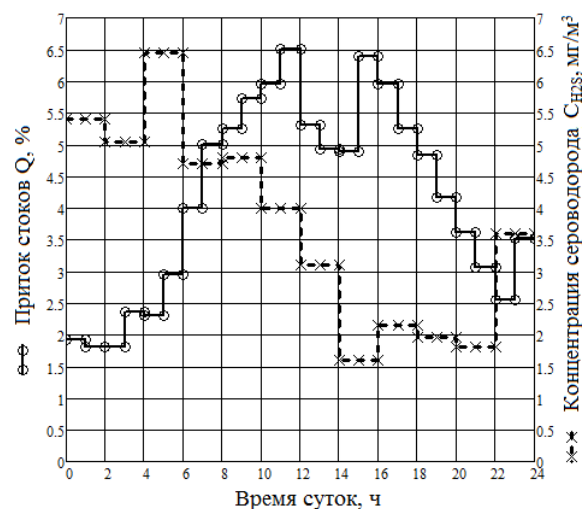


Рисунок 2 – Совмещенный график поступления сточных вод и выделения сероводорода в зависимости от времени суток

На основе анализа данных, приведенных на рис. 2, можно сделать следующие выводы:

- интенсивность накопления сероводорода в сточных водах значительно выше в ночное время суток. Показатель C_{H_2S}/Q повышается с 2,28 до 2,36 в период времени суток с 0 до 6 часов, а в дневное время суток этот показатель лежит в диапазоне 0,36...0,50.

- можно предположить, что образование сероводорода идет в застойных зонах городских систем канализации. Именно поэтому при малых поступлениях сточных вод в ночное время суток в них содержится большое количество сероводорода.

Аппроксимируя данные, приведенные на рис. 2 можно получить следующую регрессионную зависимость для прогнозирования интенсивности поступления сероводорода в воздух помещений КНС:

$$C_{H_2S}(g) = 0.932 - 10.9 \cdot g + 299 \cdot g^2 - 3750 \cdot g^3, (4)$$

где $C_{H_2S}(g)$ – 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 [5]:

$$R = K_{H_2S} \left(C_{H_2S}^W - \frac{C_{H_2S}^A}{H_c} \right), (5)$$

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.

Основными показателями, влияющими на коэффициент массоотдачи в жидкой фазе при десорбции сероводорода и определяющими интенсивность массообменных процессов, являются площадь и гидродинамическая обстановка на поверхности контакта фаз.

Следует отметить, что современные КНС имеют сравнительно компактные размеры и оборудуются насосами (основным и резервным). Попеременное включение насосов при пиковых нагрузках может достигать 15 раз в час и более. 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. Компактные размеры приемной емкости КНС и частота включения насосов, откачивающих канализационные стоки, свидетельствует о высоких скоростях движения жидкости в приемной емкости в момент работы насоса. Можно предположить, что в процессе работы насоса откачки стоков из приемного резервуара формируется волнообразное движение на поверхности раздела фаз.

Анализ данных работы [9] показывает, что нали-

чие 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 гидродинамическую обстановку на поверхности раздела фаз (состояние поверхности контакта фаз и волнообразование).

Моделирование осуществлялось в программном комплексе FlowVision. В качестве модели была принята приемная емкость КНС со следующими геометрическими размерами: диаметр емкости 1,6 м, высота емкости – 2 м. В нижней части емкости размещены два насоса (основной и дублирующий).

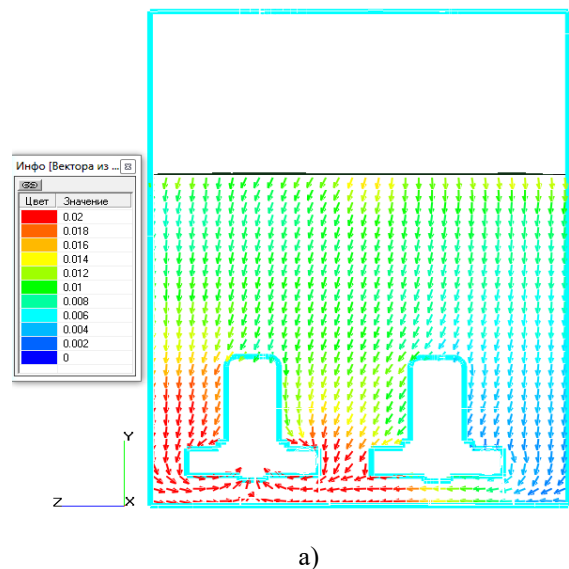
Моделирование осуществлялось при следующих допущениях:

- не учитывалось влияние вибрации, создаваемой при работе электродвигателя насоса, на гидродинамическую обстановку и на поверхность раздела фаз;

- откачка осуществлялась только одним насосом (второй насос не работает).

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.

Некоторые результаты моделирования гидродинамической обстановки в приемной емкости КНС приведены на рис. 3.



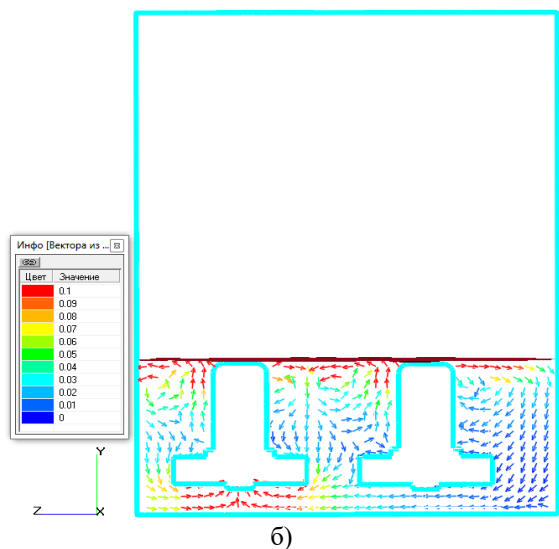


Рисунок 3 – Распределение поля скоростей после начала откачки стоков: а – через 30 с; б – через 115 с

Моделирование показало наличие развитого волнового движения на поверхности раздела фаз. Особенно это отмечается на конечной стадии работы насоса, когда уровень жидкости в емкости приближается к нижнему рабочему уровню.

Анализ результатов моделирования показывает, что при достижении стоками нижнего уровня, при котором происходит отключение насосов, зона активного перемешивания жидкости частично перемещается со дна приемной емкости КНС на поверхность раздела фаз. Гидродинамическая обстановка характеризуется наличием развитых волн и интенсивным обновлением поверхности раздела фаз. Высота волн на поверхности раздела фаз может достигать 16 мм при скорости движения жидкости на поверхности раздела фаз более 0,1 м/с. Это способствует интенсификации процесса десорбции сероводорода из канализационных стоков.

На рис. 4 приведена полученная зависимость высоты волн от времени откачки стоков.

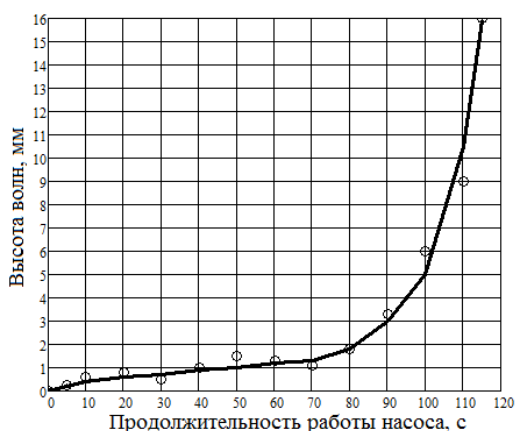


Рисунок 4 – Зависимость высоты волн от времени откачки стоков

Полученные данные в результате компьютерного моделирования (скорость движения жидкости на

поверхности раздела фаз и высота волны) позволяют определить коэффициент массоотдачи за время откачки стоков из КНС. Расчет коэффициента массоотдачи в жидкой фазе при десорбции сероводорода осуществлялся согласно [10]. Результаты расчета приведены на рис. 5.



Рисунок 5 – Изменение коэффициента массоотдачи в зависимости от времени откачки стоков

Данные, полученные в результате численной реализации математической модели процесса откачки стоков из приемной емкости канализационной насосной станции, проверялись на основании экспериментальных исследований, проведенных на КНС проекта 902-1-37.

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

Уравнение (5) 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

$$\beta = 1.175 \cdot 10^{-5} + 6.61 \cdot 10^{-8} \cdot \tau + 1.767 \cdot 10^{-10} \cdot \tau^2 + 5.2 \cdot 10^{-11} \cdot \tau^3, \quad (6)$$

где β – коэффициент массоотдачи при десорбции сероводорода с поверхности канализационных стоков, м/с; τ – время с начала работы насоса, с.

Важным параметром при прогнозировании количества сероводорода, поступившего в окружающую среду из канализационных стоков, является абсолютное содержание H_2S в объеме стоков, находящегося в приемной емкости. Данные исследований [4] показывают, что пик интенсивности выделений сероводорода в окружающую среду на 100...140 с работы насоса (рис. 1). Затем интенсивность де-

сорбции сероводорода снижается. Если принять скорость обновления поверхности канализационных стоков согласно данным компьютерного эксперимента 0,1 м/с, то при размере приемной емкости КНС проекта 902-1-37 в 6x8 м можно предположить, что за время 100...140 с поверхность контакта фаз полностью обновилась. Иными словами, весь объем жидкости с глубинных слоев приемной емкости переместился на ее поверхность. В процессе десорбции концентрация сероводорода в поверхностном слое жидкости уменьшается. И в последующие периоды времени поверхностный слой жидкости замещается стоками с меньшей концентрацией сероводорода. Что ведет к снижению концентрации сероводорода в воздухе.

В период времени с 0 до 140 с темп повышения концентрации сероводорода в воздухе высок (рис. 1). С дальнейшим течением времени концентрация сероводорода в воздухе снижается. Но темп снижения концентрации H_2S значительно меньше, чем темп повышения концентрации H_2S . Это можно объяснить началом интенсификации процесса волнообразования на поверхности контакта фаз.

Сравнивая данные экспериментальных исследований [4] и данные компьютерного эксперимента можно сделать вывод, что максимальные поступления сероводорода в окружающую среду наступают на 100...140 с 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 результатов приведенных исследований и данных работ [11] позволяют сформировать алгоритм расчета поступлений сероводорода в окружающую среду при работе КНС на основании регрессионных зависимостей (1)–(4) и (6). И в случае превышения концентрации сероводорода более 5 мг/м³ в воздухе, отбираемом из помещения емкости накопления стоков в КНС, сформировать технические требования к системе очистки воздуха, отбираемого из КНС и 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 численной реализации математической модели откачки канализационных стоков из КНС и экспериментальные данные имеют достаточно хорошую сходимость и указывают на интенсификацию выделения сероводорода из канализационных стоков в воздух в процессе работы канализационных насосов.

Проведенные экспериментальные исследования и данные компьютерного эксперимента позволяют разработать алгоритм расчета поступлений серово-

дорода в окружающую среду при работе КНС в любой период времени. Также полученные результаты позволяют 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. Шандрович В.Т., Мальований М.С., Полюжин И.П. Моніторинг ефективності роботи аеротенків на львівських очисних спорудах // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2015. – Вип. 1/2015 (90), част. 1. – С. 126–132.
2. Лосева Я.П., Гриванова С.М., Мищенко Я.В. Эффективность рассеивания испарений от резервуаров канализационных очистных сооружений города Владивостока // Фундаментальные исследования. – Москва, 2013. – № 11, част. 3. – С. 1383–1388.
3. Hvitved-Jacobsen T., Vollertsen J., Nielsen A.H., Abdul-Talib S. Sewer microbial processes, emissions and impacts // Proceedings from the 3rd International Conference on Sewer Processes and Networks, April 15–17, (2002), pp. 1–13, Paris, France.
4. К вопросу прогнозирования выделения сероводорода в окружающую среду при работе КНС / Л.И. Лейбович, Ю.В. Помазкин, П.А. Пацурковский // IV Международная Научная Экологическая Конференция «Проблемы рекультивации отходов быта, промышленного и сельскохозяйственного производства». – Краснодар: Кубанский госагроуниверситет, 2015. – Част. I. – С. 563–567.
5. Yongsiri C., Vollertsen J., Hvitved-Jacobsen T. Hydrogen sulfide emission in sewer networks: a two-phase modeling approach to the sulfur cycle // Water Science and Technology. – 2014. – Vol. 50, no. 4. – PP. 161–168.
6. Яковлев С.В., Карелин Я.А., Жуков А.И., Колобанов С.К. Канализация: учебник для вузов. – М.: Стройиздат, 1975. – Изд. 5-е, перераб. и доп. – 632 с.
7. Sivret E., Le-Minh N., Wang B., Wang X., Stuetz R., Impact of sewer emission dynamics on monitoring campaign design // Chemical Engineering Transactions. – 2014. – Vol. 40. – PP. 43–48.
8. Lahav O., Sagiv A., Friedler E. A different approach for predicting $H_2S(g)$ emission rates in gravity sewers // Water Research. – 2006. – Vol. 40. – PP. 259–266.
9. Алексеенко С.В. Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости // Рос. Акад. наук, Сиб. отделение, Институт теплофизики. – Новосибирск: ВО Наука. Сибирская издательская фирма, 1992. – 256 с.
10. Холпанов Л.П., Шкадов В.Я. Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела. – М.: Наука, 1990. – 271 с.
11. Nielsen A.H., Vollertsen J., Jensen H.S., Madsen H.I., Hvitved-Jacobsen T. Aerobic and anaerobic transformation of sulfide in a sewer system. – field study and model simulation // Water Environment Research. – 2006. – Vol. 80. – PP. 3654–3670.

MODELING OF HYDROGEN SULFIDE DYNAMIC INFLOW IN THE ENVIRONMENT DURING SEWAGE PUMPING STATION OPERATION

L. Leibovich, P. Patsurkovskiy

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

prosp. Geroev Stalingrada, 9, Nikolaev, 54025, Ukraine. E-mail: recycle.lev@gmail.com

Purpose of research. The purpose of research was to determine the effect of hydrodynamic conditions in sewage receiving tank at hydrogen sulfide release rate. **Methodology.** Investigations were carried out by numerical implementation of mathematical model of sewage removing process from the receiving tank. Modeling was performed in FlowVision software. Navier-Stokes equation, continuity equation, transport equation and k-ε turbulence model equation were solved in the framework of mathematical model. The implicit method is used for solving indicated equations. The verification of obtained results is carried out on the basis of physical experiment. The experimental studies are based on measurements of dynamics of hydrogen sulfide concentration changes above the sewage. **Results.** The results of numerical implementation of sewage removing process mathematical model are presented as a velocity field distribution inside the sewage located in the receiving tank. The mathematical modeling results also presented in a graphic interpretation of the waves formation on the sewage surface as a function of sewage level in the receiving tank. The results of mathematical model numerical implementation are generalized in the form of graphic dependence of mass transfer coefficient from duration of the sewage pumping. The results of mathematical modeling and experimental studies are presented as a set of regression equations for the possibility of practical application. **Originality.** The set of regression equations is received to predict the intensity of hydrogen sulfide release into the environment from the sewage pumping station. **Practical value.** The obtained set of regression dependences allow to develop an algorithm for calculating hydrogen sulfide revenues into the environment since the sewage pumps starting. Obtained results allow forming a credible input data for the design of air purification systems from hydrogen sulfide. References 11, figures 5.

Key words: hydrogen sulfide, sewage, mass transfer, surface of phases contact.

REFERENCES

1. Shandrovich, V.T., Malovaniy, M.S., Polyuzhin, I.P. (2015), "Monitoring aerotanks effectiveness at Lviv wastewater treatment plants", *Transaction of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University*, iss.1, no. 90, part 1, pp. 126–132.
2. Loseva, Ya.P., Grivanova, S.M., Mishchenko, Ya.V. (2013), "Efficiency of vapors dissipation from the tanks of sewage treatment facilities in the Vladivostok city", *Fundamentalnye issledovaniya*, no. 11, part 3, pp. 1383–1388.
3. Hvitved-Jacobsen, T., Vollertsen, J., Nielsen, A.H., Abdul-Talib S. (2002), "Sewer microbial processes, emissions and impacts", *Proceedings from the 3rd International Conference on Sewer Processes and Networks*, Paris, France, April 15–17, pp. 1–13.
4. Leybovich, L.I., Pomazkin, Yu.V., Patsurkovskiy, P.A. (2015), "To the question of forecasting hydrogen sulfide releases into the environment during SPS operation", *IV Mezhdunarodnaya Nauchnaya Ekologicheskaya Konferentsiya na temu: «Problemy rekultivatsii otkhodov byta, promyshlennogo i selskokhozyaystvennogo proizvodstva»* [IV International Scientific Environmental Conference "Problems of reclamation of waste household, industrial and agricultural production"], Krasnodar, Kubanskiy gosagrouniversitet, pp. 563–567.
5. Yongsiri, C., Vollertsen, J., Hvitved-Jacobsen, T. (2004), "Hydrogen sulfide emission in sewer networks: a two-phase modeling approach to the sulfur cycle", *Water Science and Technology*, vol. 50, no. 4, pp. 161–168.
6. Yakovlev, S.V., Karelin, Ya.A., Zhukov, A.I., Kolobanov, S.K. (1975), *Kanalizatsiya. Uchebnik dlya vuzov. Izd. 5-e, pererab. i dop.* [Sewerage. Textbook for universities. Ed. 5th, revised. and ext.], Stroiizdat, Moscow, Russia.
7. Sivret, E., Le-Minh, N., Wang, B., Wang, X., Stuetz, R. (2014), "Impact of sewer emission dynamics on monitoring campaign design", *Chemical Engineering Transactions*, no. 40, pp. 43–48.
8. Lahav, O., Sagiv, A., Friedler, E. (2006), "A different approach for predicting H₂S(g) emission rates in gravity sewers", *Water Research*, no. 40, pp. 259–266.
9. Alekseenko, S.V., Nakoryakov, V.Ye., Pokusaev, B.G. (1992), *Volnovoe techenie plenok zhidkosti* [Wave flow of liquid films], Nauka, Novosibirsk, Russia.
10. Kholpanov, L.P., Shkadov, V.Ya. (1990), *Gidrodinamika i teplomassoobmen s poverkhnostyu razdela* [Hydrodynamics and heat and mass transfer with boundary surface], Nauka, Moscow, Russia.
11. Nielsen, A.H., Vollertsen, J., Jensen, H.S., Madsen, H.I., Hvitved-Jacobsen, T. (2006), "Aerobic and anaerobic transformation of sulfide in a sewer system – field study and model simulation", *Water Environment Research*, no. 80, pp. 3654–3670.

Стаття надійшла 25.05.2016.