

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУХСТАДИЙНОЙ МЕМБРАННОЙ ОЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ПРОМЫШЛЕННО-ЛИВНЕВЫХ СТОКОВ

© А.М. Гонопольский, И.С. Дуженко

Московский государственный политехнический университет,  
Российская Федерация, 107023, г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38.

*Цель исследования – определение рациональной технологической схемы многостадийной обратноосмотической установки для достижения максимальной степени очистки указанных стоков. Исследования проводились на стоках одного из крупнейших в РФ полигонов токсичных промышленных отходов – «Красный бор». Для очистки был применен мембранный обратноосмотический метод. Как следует из результатов экспериментов – предварительной традиционной обработки стока (в виде барботаж, отстаивания, подщелачивания, фильтрации на зернистой засыпке и последующей одноступенчатой обратноосмотической обработки стока оказалось недостаточно для нормативной очистки. Поэтому была использована двухступенчатая последовательная схема обратноосмотической обработки с аналогичной предварительной физико-химической очисткой. Сочетание физико-химической технологии и двухстадийной обратноосмотической очистки стока полигона «Красный Бор» позволяет достичь показателей, соответствующих нормативам сброса вод в природные водоемы. Существенное влияние на результаты очистки стока оказала стадия промежуточной реагентной очистки, которую обычно не используют в традиционных очистных сооружениях. При этом при более высокой степени очистки стока щелочи NaOH для двухстадийного подщелачивания понадобилось на 25–32% меньше, чем при одностадийном подщелачивании.*

*Ключевые слова: полигон «Красный бор», обратный осмос, промежуточная очистка, двухступенчатая очистка, технологическая схема очистки стоков.*

**Формат цитирования:** Гонопольский А.М., Дуженко И.С. Исследование эффективности двухстадийной мембранной очистки поверхностных промышленно-ливневых стоков // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7, N 1. С. 127–132. DOI: 10.21285/2227-2925-2017-7-1-127-132

## RESEARCH OF EFFICIENCY OF A TWO-STAGE MEMBRANE TREATMENT OF THE SURFACE INDUSTRIAL AND STORM WASTEWATER

© А.М. Gonopol'skii, I.S. Duzhenko

Polytechnic University (Moscow State Technical University),  
38, Bol'shaya Semenovskaya St., Moscow, 107023, Russian Federation.

*The aim of the study was to determine the rational technological scheme of multi-stage reverse osmosis for obtaining maximum treatment degree of mentioned wastewater. The sewage of «Krasnyi Bor», one of the largest toxic industrial waste landfill in the country, was used to conduct the study. Membrane reverse osmosis method was used for sewage treatment. The results demonstrate that preliminary traditional sewage processing including the barbotage, sludging, alkalization, filtration through granular layer and subsequent one-stage reverse osmosis was insufficient to get the normal cleaning. Therefore, two-stage consistent scheme of reverse osmosis processing including the several preliminary physico-chemical treatment was pro-posed. Combination of physico-chemical technology and two-stage reverse osmosis treatment of «Krasnyi Bor» sewage allows obtaining the indicators corresponding with limits of water disposal into natural waters. Intermediate reactant treatment, which is usually not used in traditional treating facilities, significantly affected*

results of sewage treatment. In addition the two-stage alkalization demands 25% - 32% NaOH less than the one-stage, giving the higher degree of sewage treatment.

Keywords: polygon «Krasnyi Bor», reverse osmosis, intermediate cleaning, two-step cleaning, technological scheme, wastewater treatment

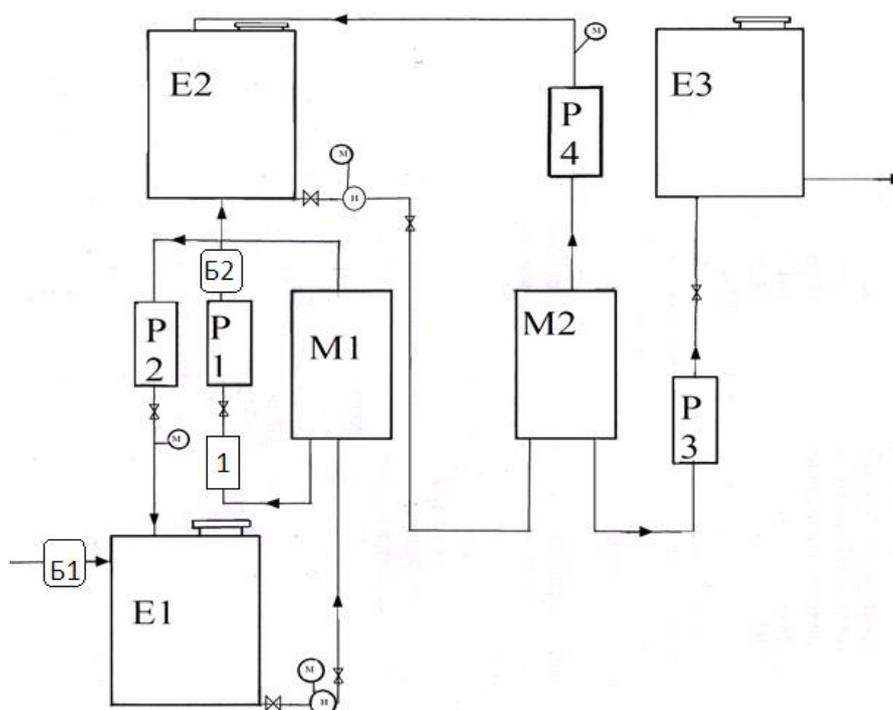
**For citation:** Gonopol'skii A.M., Duzhenko I.S. Research of efficiency of a two-stage membrane treatment of the surface industrial and storm wastewater. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]. 2017, vol. 7, no 1, pp. 137–132. DOI: 0.21285/2227-2925-2017-7-1-127-132 (in Russian)

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных способов решения проблемы очистки поверхностных промышленно-ливневых стоков является применение мембранных обратноосмотических методов очистки [1]. Как правило, это стоки сложного физико-химического состава, содержащие растворы солей, эмульсии, взвеси и пр., с концентрациями, многократно превышающими нормативы сброса не только на ландшафт, но и в городскую канализационную систему [2]<sup>1</sup>.

Целью данного исследования было определение рациональной технологической схемы

многостадийной обратноосмотической установки для достижения максимальной степени очистки указанных стоков. Схема лабораторного экспериментального стенда представлена на рис. 1. В состав стенда входят емкости, насосы, мембранные блоки в виде рулонных мембран в цилиндрическом корпусе, шесть ротаметров для контроля расхода фильтрата, пермеата и концентрата, соединенных между собой трубопроводом D-0.5", запорно-регулирующая арматура. Контур также соединены между собой трубопроводом D-0.5".



**Рис. 1. Общая схема установки для глубокой очистки стоков полигона «Красный Бор»: B1, B2 – блоки предварительной очистки; E1–E3 – емкости; P1–P4 – ротаметры; M1, M2 – мембранные блоки первой и второй ступени; н – насосы; м – манометры; 1 – реагентная корректировка pH пермеата после первой ступени**

<sup>1</sup>Воронов Ю.В., Яковлев С.В. Водотведение и очистка сточных вод: учебник для вузов. Изд. 5-е, перераб. и доп. М.: Изд-во АСВ, 2009. 702 с.

Voronov Yu.V., Yakovlev S.V. Vodootvedenie i oshistka stochnykh vod [Water disposal and sewage treatment]. Moscow, ASV Publ., 2009, 702 p.

Стенд оснащен электронными приборами контроля и измерений, данные от которых получает программируемый логический контроллер (ПЛК). ПЛК имеет интерфейс обмена информацией с персональным компьютером, что позволяет записывать и обрабатывать все данные от приборов КИП.

### **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

Производительность стенда по входящему потоку фильтрата зависит от типа мембранных блоков и изменяется от 0,16 до 2 м<sup>3</sup>/ч. В приведенных ниже экспериментах использовались рулонные обратноосмотические картриджи типа ROPUR membranes TR70-4021-HF.

Стенд включает в себя: приемный резервуар для очищаемого стока, трубопроводы, герметичный корпус, содержащий мембранный блок, штуцера для ввода очищаемого и вывода очищенного стока. Трубопровод, соединяющий приемный резервуар и штуцер в герметичном корпусе мембранного блока для ввода очищаемого стока, содержит входной трехпозиционный быстродействующий клапан, соединенный одним дополнительным трубопроводом с отстойником, а другим трубопроводом со штуцером в герметичном корпусе мембранного блока. Штуцер для вывода очищенного стока соединен трубопроводом с выходным трехпозиционным быстродействующим клапаном, дополнительным нагнетающим насосом и дополнительным трубопроводом с резервуаром очищенного стока. Соотношение «концентрат-пермеат» может устанавливаться приводной арматурой как вручную, с пульта, так и для управления в автоматическом режиме. В автоматическом режиме контроллер управляет арматурой так, чтобы обеспечить заданный расход концентрата. Расход исходного стока, концентрата и пермеата фиксируется расходомерами. Манометром фиксируется исходное давление на нагнетании подающего сток насоса, перепад давления концентрата на мембранных блоках и давление пермеата за каждым блоком. За каждым мембранным блоком установлен быстродействующий аварийный сбросной клапан.

В блоке Б1 сток подвергается предварительной реагентной очистке, где достигаются параметры загрязненности пермеата, соответствующие дальнейшей очистке обратноосмотическими мембранами. После подготовки сток попадает в емкость Е1, откуда пермеат насосом под давлением 10 МПа подается на первый мембранный картридж М1. Далее пермеат поступает в емкость Е2, а концентрат и промышленная вода возвращаются в емкость Е1, отку-

да опять подаются на мембранный картридж М1. Пермеат через блок реагентной корректировки 8 под давлением 0,4 МПа подается на второй мембранный картридж 5, где происходит процесс финишной очистки до норматива сброса в водоёмы рыбохозяйственного назначения. Стенд также оснащен электронными приборами измерений общего содержания, водородного показателя рН, электропроводности, концентрации растворенного и общего кислорода, а также концентрации взвешенных частиц. Производительность стенда по очищаемому фильтрату варьируется от 0,15 до 0,45 м<sup>3</sup>/ч.

Исследования проводились на стоках одного из крупнейших в стране полигонов токсичных промышленных отходов «Красный бор» (далее – полигон), расположенного в 2-х км от поселка Красный бор Ленинградской области. В этом районе находятся залежи синих кембрийских глин, с мощностью пластов до 100 м, поэтому на полигоне происходит захоронение высокотоксичных отходов химических производств всего региона. Как следует из результатов комплексных анализов (табл. 1), в составе стока присутствуют загрязнители 2–4 классов опасности, в концентрациях многократно превышающих предельно-допустимые концентрации (ПДК). Для очистки был применен мембранный обратноосмотический метод. Как следует из результатов экспериментов, предварительной традиционной обработки стока, в виде барботаж, отстаивания, подщелачивания и фильтрации на зернистой засыпке, и последующей одноступенчатой обратноосмотической обработки стоков [3], оказалось недостаточно для нормативной очистки (табл. 2). Поэтому была использована двухступенчатая последовательная схема обратноосмотической обработки с аналогичной предварительной физико-химической очисткой (табл. 2).

Анализ химического состава стока и пермеата проводили с использованием рН-метра «Экотест-2000Т», анализатора жидкости «Флюорат-02-3М», фотоколориметра «КФК-2МП», электронных аналитических весов «Сартогосм ВР121S» и спектрометра атомно-абсорбционного «Квант-2А».

### **ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Эффективность описанного выше двухстадийного процесса очистки стока полигона «Красный бор», где каждая стадия состоит из обратноосмотической и реагентной очистки, подтверждается результатами измерений сухого остатка (рис. 2), общего содержания (рис. 3) и электропроводности (рис. 4).

**Таблица 1**

**Протокол анализов состава стока карты № 64 полигона «Красный бор»**

Определяемая характеристика	Значение мг/дм <sup>3</sup> изначального стока	ПДК культурно-бытового водопользования*
рН (водородный показатель)	4,7	6,5–8,5
Железо (общ.)	111	0,3
Хром6+	0,01	0,05
Кадмий	5,1	0,001
Цинк	47	1
Медь	0,09	1
ХПК, мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	10200	30
Хлорид-ион	1760	350
Сульфат-ион	2900	500
Сухой остаток	12800	1000

\*ГН 2.1.5.1315-03 с изменениями ГН 2.1.5.2280-07 и СанПиН 2.1.5.980-00.

**Таблица 2**

**Результаты постадийных анализов пермеата после предварительной физико-химической и обратноосмотической очистки стока карты № 64 полигона «Красный бор»**

Определяемая характеристика	Значение, мг/дм <sup>3</sup> после различных стадий очистки				ПДК культурно-бытового водопользования*	НД МКХА
	Предварительная реагентная очистка	Одностадийный обратный осмос	Промежуточная реагентная очистка	Двухстадийный обратный осмос (*без промежуточной очистки)		
рН (водородный показатель)	4,3	4,7	5,0	5,8 4,7*	6,5–8,5	ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97 (изд,2004г)
Железо (общ.)	38,2	2,8	1,3	0,02 0,1*	0,3	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98 (изд,2010)
Хром (общ.)	0,06	0,04	0,04	0,02 0,04*	0,05	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98 (изд,2010)
Кадмий	4,1	0,21	0,09	0,001 0,11*	0,001	ГОСТ Р 31956-12
Цинк	12,8	4,5	3,8	0,68 0,04	1	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98 (изд,2010)
Медь	0,051	0,029	0,021	0,013 0,026*	1	ПНД Ф 14.1:2:4.139-98 (изд,2010)
ХПК мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	5700	1930	560	3,5 230*	30	ПНД Ф 14.1:2:4.190-03 (изд,2012)
Хлорид-ион	1070	496	120	11 90*	350	ПНД Ф 14.1:2.96-97 (изд,2004)
Сульфат-ион	1360	150	80	20 60*	500	ПНД Ф 14.1:2.159-2000 (изд,2005)
Сухой остаток	4300	1900	950	640 870*	1000	ПНД Ф 14.1:2.114-97 (изд,2011)

\*ГН 2.1.5.1315-03 с изменениями ГН 2.1.5.2280-07 и СанПиН 2.1.5.980-00, мг/дм<sup>3</sup>.

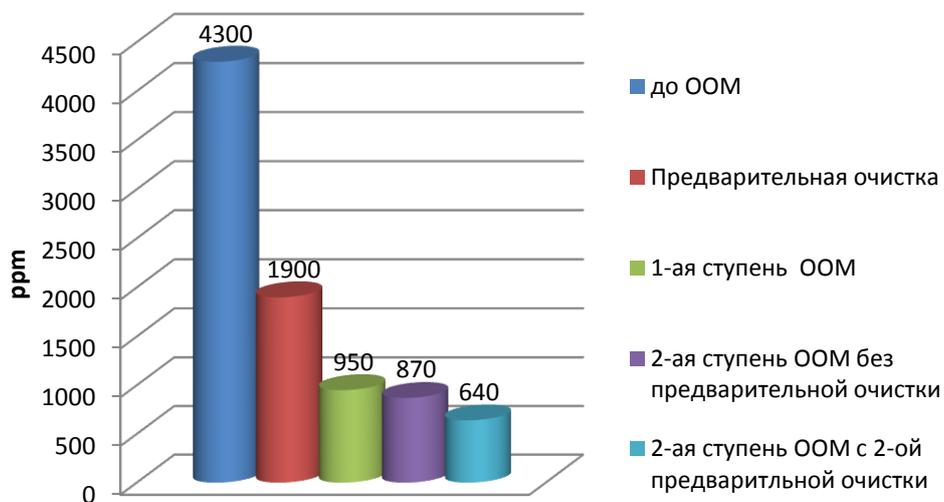


Рис. 2. Результаты измерений сухого остатка (ppm – единица измерения  $1 \text{ мг/дм}^3 = 1 \text{ ppm}$ )

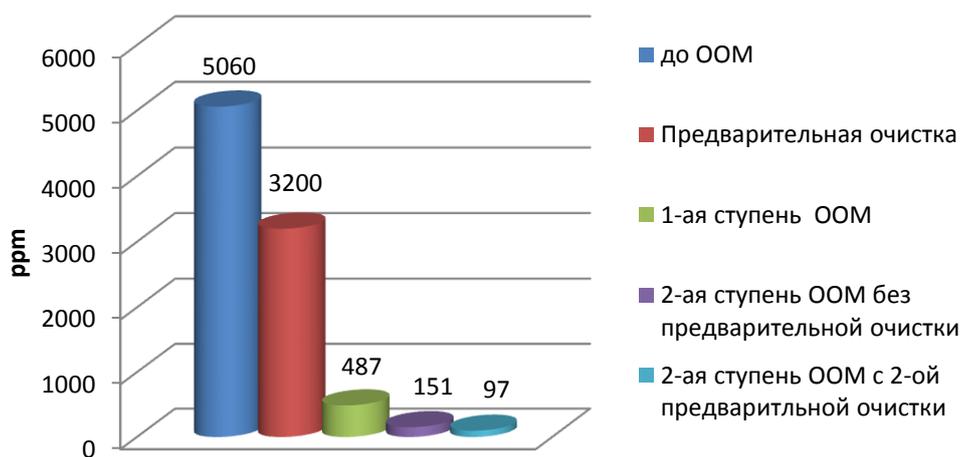


Рис. 3. Результаты измерений соледержания (ppm – единица измерения  $1 \text{ мг/дм}^3 = 1 \text{ ppm}$ )

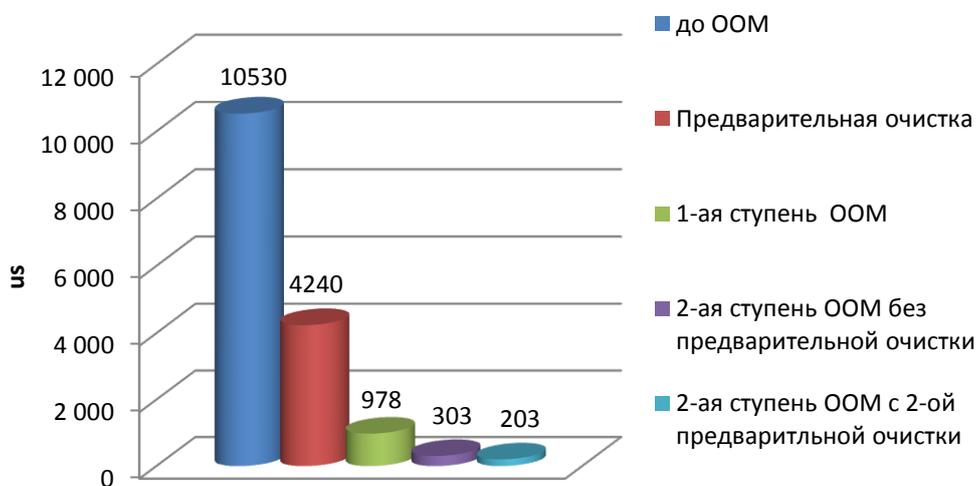


Рис. 4. Результаты измерений электропроводности (us – единица измерений микросименс)

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Из анализа данных табл. 2 следует, что сочетание физико-химической технологии и двухстадийной обратноосмотической очистки стока полигона «Красный Бор» позволяет достичь показателей, соответствующих нормативам сброса вод в природные водоемы. Существенное влияние на результаты очистки стока

оказала стадия промежуточной реагентной очистки, которую обычно не используют в традиционных очистных сооружениях. При этом при более высокой степени очистки стока щелочи NaOH для двухстадийного подщелачивания понадобилось на 25–32% меньше, чем при одностадийном подщелачивании.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Гонопольский А.М., Кудрявцев С.А., Стомпель С.И., Ладыгин К.В. Экспериментальное исследование процесса ультразвуковой очистки обратноосмотических мембран // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2014. № 4. С. 45–50.

2. Эль М.А., Эль Э.Ф., Вебер И.Ф. Наладка

и эксплуатация очистных сооружений городской канализации. М.: Стройиздат, 1977. 232 с.

3. Гонопольский А.М., Николайкина Н.Е., Миташова Н.И. Очистка фильтрата полигонов твердых бытовых отходов // Безопасность в техносфере». 2008. № 5. С. 35–40.

### **REFERENCES**

1. Gonopol'skii A.M., Kudryavtsev S.A., Stompel' S.I., Ladygin K.V. Experimental study of the process of ultrasonic cleaning of reverse osmosis membranes. *Zashchita okruzhayushchei sredy v neftegazovom komplekse* [Environmental protection in oil and gas complex]. 2014, no. 4, pp. 45–50. (in Russian)

2. El' M.A., El' E.F., Weber F.I. Naladka i ek-

spluatatsiya ochistnykh sooruzhenii go-rodskoi kanalizatsii [Commissioning and operation of treatment facilities of urban wastewater]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1977. 232 s.

3. Gonopol'skii A.M., Nikolaikin N.E., Mitashova N.I. Purification of the filtrate solid waste landfills. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere]. 2008, no. 5, pp. 35–40. (in Russian)

### **Критерии авторства**

Гонопольский А.М., Дуженко И.С. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Гонопольский А.М., Дуженко И.С. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

#### **Принадлежность к организации**

#### **Адам М. Гонопольский**

Московский государственный политехнический университет  
Российская Федерация, 107023, г. Москва,  
ул. Б. Семёновская, д. 38  
Д.т.н., профессор  
amgonopolsky@mail.ru

#### **Иван С. Дуженко**

Московский государственный политехнический университет  
Российская Федерация, 107023,  
г. Москва, ул. Б. Семёновская, д. 38  
Студент  
duzhenko@prom-centr.ru

**Поступила 15.08.2016**

### **Contribution**

Gonopol'skii A.M., Duzhenko I.S. carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Gonopol'skii A.M., Duzhenko I.S. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

### **AUTHORS' INDEX**

#### **Affiliations**

#### **Adam M. Gonopol'skii**

Polytechnic University (Moscow State Technical University  
38, Bol'shaya Semenovskaya St., Moscow,  
107023, Russian Federation  
Doctor of Engineering, Professor  
amgonopolsky@mail.ru

#### **Ivan S. Duzhenko**

Polytechnic University (Moscow State Technical University  
38, Bol'shaya Semenovskaya St., Moscow,  
107023, Russian Federation  
Student  
duzhenko@prom-centr.ru

**Received 15.08.2016**

