

---

---

## Раздел 3 СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 629.54

DOI: 10.34046/aumsuomt96/14

### РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОЙ СОРБЦИИ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ НЕФТЕПРОДУКТОВ ИЗ ЛЬЯЛЬНЫХ ВОД

*И.Г. Берёза, доктор технических наук, профессор*

*Г.А. Зеленков, доктор физико-математических наук, профессор*

Разработана технология сорбционной доочистки судовых нефтесодержащих вод с использованием природных материалов. В процессе работы исследовались следующие природные сорбенты: шунгит и монтмориллонит. Определены параметры процесса статической и динамической сорбции нефтепродуктов из раствора судовых льяльных вод. Установлено, что наиболее эффективным материалом для процесса сорбции мелкодисперсных частиц нефтепродуктов является монтмориллонит. Разработана математическая модель процесса динамической сорбции, позволяющая определять эффективность очистки в зависимости от исходных концентраций нефтепродуктов в растворе и режима очистки.

**Ключевые слова:** предотвращение загрязнения морской среды, судовые льяльные воды, доочистка

A technology for sorption post-treatment of oil-containing water from ships using natural materials has been developed. In the course of work, the following natural sorbents were investigated: shungite and montmorillonite. The parameters of the process of static and dynamic sorption of petroleum products from a solution of ship bilge water have been determined. It has been found that montmorillonite is the most effective material for the sorption of fine particles of petroleum products. A mathematical model of the dynamic sorption process has been developed, which makes it possible to determine the cleaning efficiency depending on the initial concentrations of oil products in the solution and the cleaning mode.

**Key words:** prevention of marine pollution, ship bilge water, post-treatment

В соответствии с требованиями Международной конвенции МАРПОЛ 73/78 и резолюцией КЗМС.107(49) в Международных водах разрешается сбрасывать за борт очищенные льяльные воды с концентрацией нефтепродуктов не более  $15 \text{ млн}^{-1}$  [1, 2]. Достижение таких показателей (с учетом концентрации нефтепродуктов в исходной воде  $\sim 1000 - 2000 \text{ млн}^{-1}$ ) возможно лишь при многоступенчатой обработке льяльных вод.

В настоящее время в судовом очистном оборудовании в качестве фильтрующих материалов на второй стадии обработки, стадии доочистки, используют в основном активированный уголь различных марок [3, 4]. Процесс изготовления активированных углей требует значительных затрат, поэтому стоимость данных материалов достаточно высока как в России, так и за рубежом. Данные обстоятельства приводят к поиску новых более дешевых сорбентов.

В процессе разработки технологии доочистки судовых льяльных вод методом фильтрации были исследованы следующие природные минералы: шунгит и монтмориллонит.

Оценка возможности применения сорбционной технологии для осуществления конкретного процесса очистки требует сведений как об адсорбционных характеристиках в заданной системе сорбент - раствор, так и о кинетике адсорбции компонентов раствора в конкретных гидродинамических условиях проведения процесса.

На первой стадии работы в статическом режиме процесса были получены изотермы адсорбции нефтепродуктов из раствора льяльных вод, установлены максимальные сорбционные емкости исследуемых материалов ( $A_{\text{max}}$ ). Определение ( $A_{\text{max}}$ ) проводилось на льяльной воде, прошедшей первую стадию обработки с исходной концентрацией нефтепродуктов –  $15-75 \text{ мг/дм}^3$ .

Усредненные результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 1.

Анализ полученного экспериментального материала свидетельствует о том, что сорбент монтмориллонит обладает по отношению к нефтепродуктам значительно большей адсорбционной активностью [7]. Вследствие этого, дальнейшие исследования по определению динамических характеристик процесса сорбции проводились для монтмориллонита.

Динамические характеристики процесса сорбции нефтяных веществ из раствора льяльных вод (длина неподвижного слоя, время защитного

действия, скорость потока) определялись на опытной установке при движении потока исследуемого раствора снизу вверх (рисунок 1).

Таблица 1 – Экспериментальные данные статической сорбции

Адсорбент: монтмориллонит							
$C_0$ , мг/ дм <sup>3</sup>	18,7	22,6	24,4	25,3	35,2	60,2	72,0
$C_{пр}$ , мг/ дм <sup>3</sup>	1,3	2,0	2,4	2,8	5,2	11,5	17,0
$A_i$ , мг/г	3,9	4,6	5,0	5,3	6,7	10,2	14,6
Адсорбент: шунгит							
$C_0$ , мг/ дм <sup>3</sup>	18,7	22,6	24,4	25,3	35,2	60,2	72,0
$C_{пр}$ , мг/ дм <sup>3</sup>	4,4	5,7	6,4	7,0	11,4	22,1	28,2
$A_i$ , мг/г	4,2	4,5	5,7	5,9	6,9	8,6	9,3

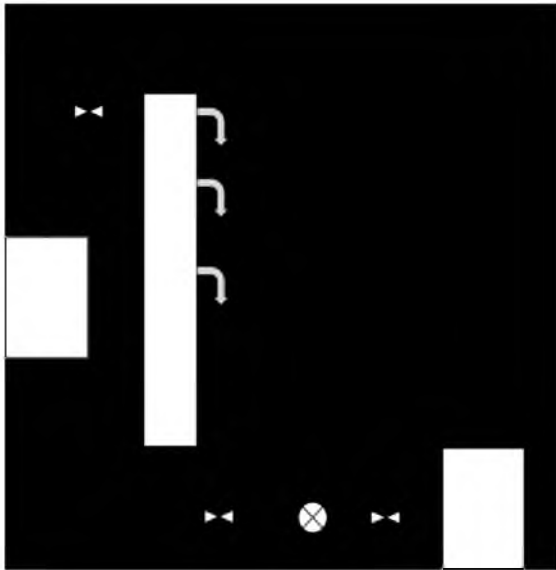


Рисунок 1 –Опытная установка сорбционной очистки: 1 - фильтровальная колонка; 2 - пробоотборники; 3 - насос-дозатор; 4 - резервуар исходного раствора; 5 - резервуар очищенной воды

Экспериментальная установка сорбционной очистки включала фильтровальную колонку 1, диаметром 50 мм, заполненную сорбентом и оснащенную пробоотборниками 2. Высота колонки 1,0 м, по высоте колонки предусмотрено три пробоотборника, подача воды на установку осуществлялась насосом - дозатором 3, обеспечивающим постоянство расхода при переменном давлении. Исследуемый раствор подавался на установку из резервуара 4. Очищенная вода поступала в резервуар 5.

Условия поглощения растворенных веществ при прохождении воды через сорбционную колонку по высоте слоя сорбента, как известно, неодинаковы [8, 9]. При осуществлении процесса сорбции в динамических условиях водный поток сначала профильтровывается через нижний слой свободного от извлекаемых загрязнений. Следующая порция воды поступает в нижний слой сорбента уже поглотившего ранее некоторое количество вещества. Вследствие этого, скорость погло-

щения дополнительного количества вещества оказывается меньше скорости поглощения на таком же участке свободного сорбента – и поглощение основного количества растворенного вещества из этой порции раствора заканчивается на большем расстоянии от начала слоя, чем при поглощении вещества из первой порции. Сорбция загрязнений из следующей порции раствора, вследствие тех же причин, заканчивается на еще большем расстоянии от входа раствора в слой сорбента.

Таким образом, при постоянном подводе загрязняющего вещества с потоком в фильтровальной колонке формируется фронт адсорбции, который перемещается с постоянной скоростью по слою сорбента. Данный концентрационный слой сорбента определяет зону массообмена в фильтре. Кривые, описывающие нарастание концентрации растворенного вещества в растворе, прошедшем через слой сорбента, носят название «выходных кривых» адсорбции.

В процессе экспериментальных исследований построение выходных кривых адсорбции проводилось для растворов льяльных вод с исходной концентрацией нефтепродуктов  $C_0 = 20-50$  мг/дм<sup>3</sup> до предельной концентрации  $C_{пр} = 5$  мг/дм<sup>3</sup>. Полученные результаты представлены на рисунке 3.

Теоретическая модель неравновесной динамики сорбции в неподвижном плотном слое разрабатывалась исходя из уравнения материального баланса веществ, кинетики адсорбции, изотермы адсорбции и соответствующих краевых условий.

Уравнения материального баланса веществ имеет вид

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} + \epsilon_n \frac{\partial C}{\partial \tau} + v \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

где  $a(x, \tau)$  – удельная адсорбция, отнесенная к единице объема слоя (с учетом насыпной плотности);  $C(x, \tau)$  – концентрация вещества в жидкости;  $\tau$  - время;  $x$  – расстояние от входа в слой до уровня замера;  $\epsilon_n$  – порозность слоя.

Первый член уравнения (1) отражает количество загрязнений, поступающих в адсорбер, второй – количество задержанных загрязнений, третий – остаточную концентрацию загрязнений в водном растворе.

Уравнение кинетики адсорбции, контролируемое внешним массопереносом, можно записать в виде

$$\frac{\partial a}{\partial \tau} = \beta(C - C_p) \quad (2)$$

где  $C$  и  $C_p$  – концентрации вещества в растворе в данный момент времени и при равновесии соответственно;  $\beta$  – коэффициент массопереноса.

Уравнение изотермы адсорбции

$$a = KC^n \quad (3)$$

Краевые условия:

$$\text{при } \tau = 0 \quad a = 0 \quad C = C_0 \quad (4)$$

Теоретическая модель динамики адсорбции в неподвижном плотном слое монтморилло-

нита разрабатывалась с учетом определенных ранее констант уравнения изотермы адсорбции, значения коэффициента массопереноса.

На основании совместного решения уравнений (1), (2) (3) с учетом краевых условий (4), при использовании пакетов компьютерной математики MatLAB и Maple получена математическая модель процесса динамической адсорбции частиц нефтепродуктов из раствора льяльных вод.

$$c(x, t) = D_1 D_2 e^{d_1 x} e^{-\frac{d_1 t \varepsilon_H}{v}} e^{\frac{t \beta}{v}} + D_1^{-1} D_2 c_p e^{-\frac{\beta x}{\varepsilon}} \quad (5)$$

где  $D_1 D_2 d_1$  – константы, определяемые из начальных условий

Графическое изображение полученной модели в виде выходных кривых представлено для зависимости степени очистки: от времени и высоты фильтрующего слоя на рисунке 2, от времени на рисунке 3.

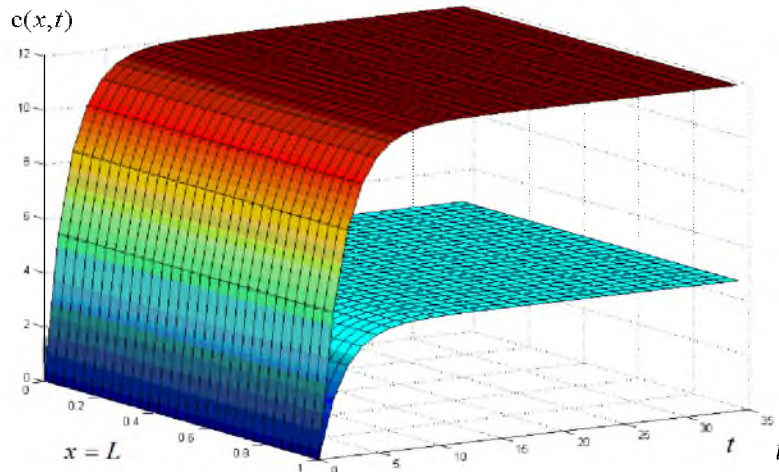


Рисунок 2 – Зависимость степени очистки нефтесодержащего раствора от величин "L" и "τ"

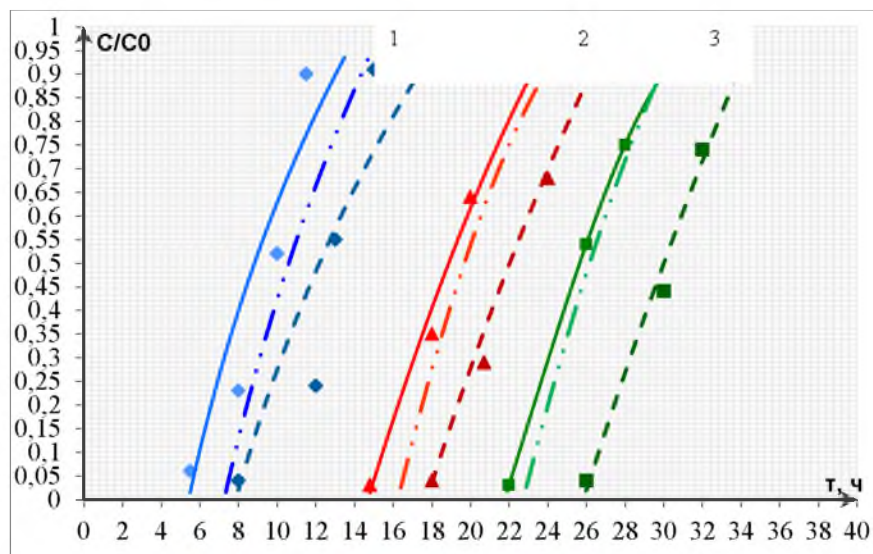


Рисунок 3 – Экспериментальные и рассчитанные выходные кривые адсорбции монтмориллонитом нефтепродуктов из раствора льяльных вод  
Уровни фиксации: 1 -  $L = 0,5$  м; 2 -  $L = 0,75$  м; 3 -  $L = 1,0$  м  
- - - - -  $C_0 = 20$  мг/л  $v = 2,0$  м/ч

————— -  $C_0 = 50$  мг/л  $v = 2,0$  м/ч  
 - · - · - · -  $C_0 = 50$  мг/л  $v = 2,0$  м/ч (расчетные данные)

Как следует из анализа полученных графиков, теоретически определенные выходные кривые адекватно описывают экспериментально установленные выходные кривые процесса динамической адсорбции нефтепродуктов из льяльных вод.

Используя полученную математическую модель процесса динамической адсорбции частиц нефтепродуктов из раствора льяльных вод (5), были определены оптимальные технологические параметры процесса на стадии доочистки:

- адсорбционная емкость монтмориллонита (относительно извлекаемых нефтепродуктов) – 22,5 мг/г;
- коэффициент защитного действия адсорбционного фильтра – 122 ч/м;
- скорость движения потока воды в фильтре – 2 м/ч;
- высота фильтрующего слоя – 2 м.

В результате экспериментальных исследований было установлено, что в оптимальном режиме эффективность извлечения нефтепродуктов из льяльных вод на стадии доочистки составила – (80-85) %, содержание нефтепродуктов в очищенной воде, при этом, не превышало 10 мг/дм<sup>3</sup>, что приблизительно составляет 11,5 млн<sup>-1</sup>.

#### Литература

1. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973, измененная и дополненная, протоколом к ней 1978 г., или, сокращенно, МАРПОЛ 73/78: в 2 т. – М.: Изд-во ЦНИИМФ, 2012. – 762 с.
2. Резолюция МЕРС.107(49) Пересмотренные руководство и технические требования по оборудованию для предотвращения загрязнения из льял машинных помещений судов. – СПб.: ЦНИИМФ, 2004.
3. Тихомиров Г.И. Модернизация судовых нефтеводяных сепараторов // Морской флот.– 2003.– №6. – С.40-41.
4. Тихомиров Г.И. Анализ методов и технических средств очистки льяльных вод / Г.И. Тихомиров // Транспортное дело России. – 2015. – № 6 – С. 288-292.
5. Репняк В. И., Предотвращение загрязнения водоемов нефтесодержащей подсланевой водой при эксплуатации судов и судовых энергетических установок: монография – СПб.: СПбГУВК, 2011. – 207с.
6. Когановский А.М. Адсорбция органических веществ из воды / А.М. Когановский, Н.А. Клименко. – СПб.: Химия, 2010.
7. Берёза И.Г. Очистка судовых нефтесодержащих вод / И.Г. Береза, А.А. Кучинская// Транспортное

- дело России. – 2011. – № 9. – С. 103-105.
8. Фролов В.А. Процессы и аппараты химической технологии / В.А. Фролов. – СПб.: Химиздат, 2003.
9. Кичигин В.И. Моделирование процессов очистки воды / В.И. Кичигин. – М.: АСВ, 2008. – 230с.
10. Астреин В.В. Структура системы безопасности судовождения [Текст] / В.В. Астреин, С.И. Кондратьев // Эксплуатация морского транспорта.– 2015.– № 3.– С. 38-47.
11. Шорохов В.Н., Осокин М.Ю., Хекерт Е.В. Организация сбора и распространения гидрометеорологической информации: учебное пособие для обучения курсантов (студентов).– Новороссийск: "Морская государственная академия им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2010.
12. Студеникин Д.Е., Хекерт Е.В., Модина М.А. Прогнозирование движения судна с помощью иерархических систем нечеткой логики (на английском языке)// Морские интеллектуальные технологии.– 2018.– № 1-1 (39).– С. 205-208.
13. Томилиев А.Н., Туктаров Р.Р., Хекерт Е.В. Особенности конвенционной подготовки курсантов морского вуза// Конструктивные педагогические заметки.– 2018.– № 6-2 (10).– С. 676-685.

#### References

1. The International Convention for the prevention of pollution from ships, 1973, corrected and supplemented by the Protocol of 1978, or, in abbreviated form, MARPOL 73/78: in 2 T. Moscow, Publishing house CNIMF, 2012. 762 p.
2. Resolution MEPC.107(49) Revised guidelines and specification for pollution prevention equipment for machinery space bilges of ships. S-Pb, CNIMF, 2004.
3. Tikhomirov G.I. Modernizatsiya sudovykh neftevodnykh separatorov// Morskoy flot.– 2003, №6. pp. 40-41.
4. Tikhomirov G.I. Analiz metodov i tekhnicheskikh sredstv ochistki l'yal'nykh vod.// Transportnoe delo Rossii.– 2015.– № 6.– pp. 288– 292.
5. Reshnyak V. I., Predotvrashchenie zagryazneniya vodoemov neftesoderzhashchey podslanevoy vodoy pri ekspluatatsii sudov i sudovykh energeticheskikh ustanovok: monografiya. SPb, SPbGUVK.– 2011.– 207 p.
6. Koganovskiy A. M. Adsorbtsiya organicheskikh veshchestv iz vody. SPb., Khimiya, 2010.
7. Beryoza I.G. Ochistka sudovykh neftesoderzhashchikh vod. //Transportnoe delo Rossii, 2011, № 9. pp. 103-105
8. Frolov V.A. Protsessy i apparatyk himicheskoy tekhnologii. S-Pb, Khimizdat, 2003.
9. Kichigin V.I. Modelirovanie protsessov ochistki vody. – Moscow, ASV, 2008.– 230 p.
10. Astrein V.V. Struktura sistemy bezopasnosti sudovozhdeniya [Tekst] / V.V. Astrein, S.I. Kondrat'ev

- // Eksploataciya morskogo transporta. 2015. № 3. S. 38-47.
11. SHorohov V.N., Osokin M.YU., Hekert E.V. Organizatsiya sbora i rasprostraneniya gidrometeorologicheskoy informacii / Uchebnoe posobie dlya obucheniya kursantov (studentov) /FGOU VPO "Morskaya gosudarstvennaya akademiya im. adm. F.F. Ushakova", Novorossiysk, 2010.
12. Studenikin D.E., Hekert E.V., Modina M.A. Prognozirovanie dvizheniya sudna s pomoshch'yu ierarhicheskikh sistem nechetkoj logiki (na anglijskom yazyke) // Morskie in-tellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-1 (39). S. 205-208.
13. Tomilin A.N., Tuktarov R.R., Hekert E.V. Osobennosti konvencionnoj podgotovki kursantov morskogo vuza // Konstruktivnye pedagogicheskie zametki. 2018. № 6-2 (10). S. 676-685.

УДК 629

DOI: 10.34046/aumsuomt96/15

## ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НА БАЗЕ МНОГОСЛОЙНОГО ПЕРЦЕПТРОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ СУДОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

*А.И. Епихин, кандидат технических наук, доцент*

*С.И. Кондратьев, доктор технических наук, профессор*

*Е.В. Хекерт, доктор технических наук, профессор*

Рассмотрен один из возможных подходов к решению проблемы повышения эффективности технической эксплуатации судовой энергетической установки (СЭУ), в частности – судового двигателя внутреннего сгорания за счет внедрения комплексной системы технической диагностики и управления (КАСТДУ), построенной с использованием искусственных нейро-нечетких сетей (ИННС). Обоснована необходимость использования ИННС в КАСТДУ элементов СЭУ.

**Ключевые слова:** судовой двигатель, динамические нагрузки, система технической диагностики, нечеткие нейронные сети.

One of the possible approaches to solving the problem of increasing the efficiency of technical operation of a ship power plant (SEU), in particular, a ship's internal combustion engine, is considered through the introduction of an integrated system of technical diagnostics and control (castu), built using artificial neuro – fuzzy networks (INNS). The necessity of using the ins in the CASTLOU elements of SEU is justified.

**Keywords:** marine engine, dynamic loads, technical diagnostics system, fuzzy neural networks.

### Введение

В настоящее время одним из актуальных направлений исследований в области минимизации влияния «человеческого фактора» на управление СЭУ (а в глобальном аспекте - постепенного перехода к безэкипажным судам) является разработка и внедрение автоматизированных систем технической диагностики и управления судовыми энергетическими установками, включающие как системы управления ГЭУ, так и вспомогательными СТС.

Новый уровень развития компьютерных технологий позволил вывести процессы диагностики и управления на кардинально новый уровень, позволяющий перейти от локальных систем управления каждым элементом СЭУ по отдельности к глобальному – всей совокупностью СТС, являющихся составляющими сложной динамической системы «СЭУ-СУДНО», с использованием искусственного «интеллекта». Одним из способов решения этой задачи является разработка методологии оптимизации способов управления опасными технологическими процессами энергетиче-

ских установок, основанного на комплексной технической диагностике, решающего задачи снижения аварийности, соответствия постоянно ужесточающимся экологическим нормам, улучшения эксплуатационных характеристик судовых технических средств, увеличения их ресурса, а также уменьшения численности экипажа судна при сохранении максимальной надежности функционирования [1].

Также внедрение подобных систем позволит сократить статью расходов на содержание судна: постоянную – за счет снижения численности экипажа и переменную, зависящую от условий плавания – за счет снижения расходов на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР), связанных с поддержанием и восстановлением технического состояния СТС и увеличения их ресурса. Как правило суммарные расходы на ТОиР составляют около 46% постоянных эксплуатационных расходов и находятся в диапазоне от 33% до 59% в зависимости от типа судна, его дедефта, условий плавания [2]. Снижение этих затрат возможно при повышении эффективности технической эксплуатации за счет внедрения современных