

[6] P. Chotikarn, W. Koedsin, B. Phongdara and P. Aiyarak, "Low Cost Submarine Robot," Songklanakarinn J. Sci. Technol. 32(5), 513-518, September-October 2010.

[7] A. Wong, E. Fong, F. Wong, A. Nehmzow, C. Fischer and C. Zau, "2013 MATE ROV Competition Technical Report," The Mechanics Swiss International School, Hong Kong SAR, 2013.

[8] L. Stutters, H. Liu, C. Tiltman and D. J. Brown, "Navigation Technologies for Autonomous Underwater Vehicles," IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics – Part C: Applications and Reviews, 20 June 2008.

[9] G. Martos, A. Abreu and S. Gonzalez, "Remotely Operated Underwater Vehicle," A B.S.

Thesis Prepared in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Bachelor of Science in Mechanical Engineering, September 21, 2013.

[10] S. Ohata, Y. Eriguchi and K. Ishi, "AquaBox Series: Small Underwater Robot Systems for Shallow Water Observation," UT07+SSC07, Tokyo, Japan, 17-20 April 2007.

[11] Y. Wei, F. Liu, F. Hu and F. Kong. "The Structure Design of the Mini Underwater Robot," Applied Mechanics and Materials Vol. 307 (2013), pp: 121-125, 2013.

[12] Govindarajan.R, Arulselvi.S and Thamarai.P, "Underwater Robot Control System," International Journal of Scientific Engineering and Technology, Volume 2 Issue 4, pp:222-224, 1 April 2013

УДК 621.644.8

КИНЕТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА В СЛОЙ ПЕСКА РАЗЛИЧНОГО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО СОСТАВА

Думболов Д.У., Дедов А.В., Думболова Л.У.

*ФАУ «25 Государственный научно исследовательский институт химмотологии Минобороны России»
121467 Москва, ул. Молодогвардейская, д.10*

KINETIC DEPENDENCIES OF THE DEPTH OF PENETRATION OF DIESEL FUEL INTO THE SAND LAYER OF DIFFERENT GRANULOMETRIC COMPOSITION

Dymbolov D. Y., Dedov A. V., Dymbolova L. Y

*FAA "25 GosNII chemmotologii of the Ministry of defense of Russia",
10 Molodogvardeyskaya str., Moscow, 121467*

АННОТАЦИЯ

Исследована зависимость глубины проникновения дизельного топлива от гранулометрического состава частиц песка кремнезема в местах развертывания складов временного хранения топлива. Обоснован подход к оценке кинетики и глубины проникновения нефтепродуктов в защитный слой песка, основу которого составляет вероятностное движение границ потока жидкости в слое. Предложено описывать проникновение нефтепродуктов в слой песка в системе координат корня квадратного из времени процесса. Установлены зависимости глубины проникновения от гранулометрического состава песка и количеств дизельного топлива.

ABSTRACT

Influence of granulometric composition of sand on depth of penetration of diesel fuel into protective layer at place of deployment of temporary storage of fuel is investigated. The approach to estimation of kinetics and penetration depth of oil products into the protective layer of sand is justified, the basis of which is probabilistic movement of liquid flow boundaries in the layer. It is proposed to describe the penetration of oil products into the sand layer in the coordinate system of the square root of the process time. The depth of penetration is determined by the granulometric composition of sand and the amount of diesel fuel.

Ключевые слова: защитный слой песка, дизельное топливо, моделирование глубины проникновения.

Keywords: sand protective cushion, losses of oil products, modeling of penetration depth.

ВВЕДЕНИЕ

Размещение резервуаров для временного хранения нефти и нефтепродуктов на защитном слое песка [1-5] является эффективным способом защиты грунта от технологических проливов [6-8], возникающих при заполнении резервуаров и протечке запорно-контролирующей арматуры при перекачке. Загрязнение почвы происходит в форме капель нефтепродуктов, которые могут выделяться в течение определенного промежутка времени между периодическими осмотрами, которые выполняются через каждые 6 ч [9]. Практическое

значение имеет оценка необходимой толщины слоя песка, которая не только определяет защитные свойства, но и затраты на создание и удаление защитного слоя.

Предложен подход к расчету толщины защитного слоя песка с учетом объема технологических потерь дизельного топлива [10]. Модель описывает кинетические зависимости глубины проникновения топлива в слой песка в координатах условного времени, которое соответствует квадратному корню времени процесса. Модель разработали на основании

вероятностного распространения «фронта» движения топлива в слое песка. Для оценки глубины проникновения используется математический аппарат, разработанных для описания броуновского движения частиц в жидкости [11] и устанавливающий зависимость математического ожидания положения частицы, а в нашем случае фронта растекания топлива в песке, определяющего глубину проникновения, от корня квадратного времени процесса.

В предложенной системе координат условного времени кинетические зависимости проникновения топлива в слой песка состоят из двух линейных отрезков, отражающих две стадии распределения нефтепродуктов в слое, которые отличаются скоростью и глубиной проникновения нефтепродуктов в песок. Обоснованы параметры оценки распределения топлива в слое, такие как условная скорость и глубина проникновения на первой и второй стадиях процесса [10].

Условную скорость проникновения топлива в песок на различных стадиях процесса рассчитывали, как тангенс угла наклона соответствующего линейного отрезка зависимостей глубины проникновения в системе координат условного времени. Глубину проникновения на первой стадии процесса определяли по координатам пересечения начальных отрезков кинетических зависимостей распределения топлива в защитном слое в координате условного времени с осью абсцисс. Для использованного в работе [10] песка глубина проникновения зависит от скорости и продолжительности первой стадии процесса. На второй стадии глубина проникновения топлива в защитный слой независимо от количества введенного топлива возрастала на 15-20 %

относительно глубины проникновения на первой стадии процесса.

Целью работы являлось определение влияния гранулометрического состава частиц песка, использованного в работе [10], на скорость и глубину проникновения дизельного топлива в защитный слой.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для искусственного загрязнения песка использовали дизельное топливо ЕВРО, зимнее, класса 2, экологического класса К5 по ГОСТ 32511-2013 (ДТ-3-К5). Методика проведения эксперимента имитировала высокую скорость введения заданных количеств дизельного топлива в слой песка. Топливо в количестве 3, 4, 5 и 7 г по каплям массой 0,02 г вводили в песок с интервалом времени падения капель 2-3 секунды. Глубину проникновения топлива оценивали в течение 6 ч методом измерения движения топлива в слое песка при использовании оптического микроскопа, снабженного линейкой с ценой деления 1 мм [12].

Гранулометрический состав песка определяли ситовым анализом [13, 14, 15]. Перед рассеиванием песок высушивали при температуре 80 °С до постоянной массы. Комки песка растирали резиновым пестиком в фарфоровой ступке. Гранулометрический состав песка оценивали по радиусу отверстий калиброванных сит. Образцы защитного слоя, состоящие из частиц песка заданного гранулометрического состава, перед нанесением капель дизельного топлива уплотняли на устройстве с амплитудой колебания 30 мм и частотой колебания 190-230 мин⁻¹.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гранулометрический состав использованного в работе [10] песка представлен в таблице 1.

Таблица 1

Гранулометрический состав песка по размерам ячеек ситок

Радиус отверстий сит, мм	>1,00	1,00-0,80	0,80-0,50	0,50-0,25	0,25-0,20	<0,20
Содержание, % мас	0,05	0,68	4,41	68,05	12,57	13,83

Полученные данные показывают, что большая часть песка представляет частицы, которые прошли через сито с размером отверстий 0,5 мм. Для образцов песка с $0,25 < R < 0,50$, $0,20 < R < 0,25$ и $R < 0,20$ (где R - размер ячеек сит), были установлены кинетические зависимости глубины проникновения h (см) дизельного топлива ДТ-3-К5 в системе координат условного времени $\tau^{0,5}$ (ч^{0,5}), которые представлены на рисунке 1.

Проникновение топлива ДТ-3-К5 в слой песка из частиц определенного гранулометрического состава (далее фракционный песок) протекает в две стадии, каждая из которых отражается линейными участками кинетических зависимостей $h - \tau^{0,5}$ (рисунки 1, а, б и в), что характерно для

проникновения топлива ДТ-4 в песок из смеси различных фракций частиц [10] (далее песок). Согласно работе [10] распределение топлива ДТ-4 в слое песка оценивали условной скоростью w_l (см/ч^{0,5}) и глубиной h_l (см) проникновения топлива на первой стадии процесса.

Условное время первой стадии проникновения $\tau_l^{0,5}$ (ч^{0,5}) топлива ДТ-3-К5 не зависит от гранулометрического состава песка и количества введенного топлива (рис.1, а, б, и в) и приближается к 0,5 ч^{0,5}. Согласно [10] условное время первой стадии проникновения различных количеств топлива ДТ-4 в песок также является величиной постоянной, но равной 1,2 ч^{0,5}.

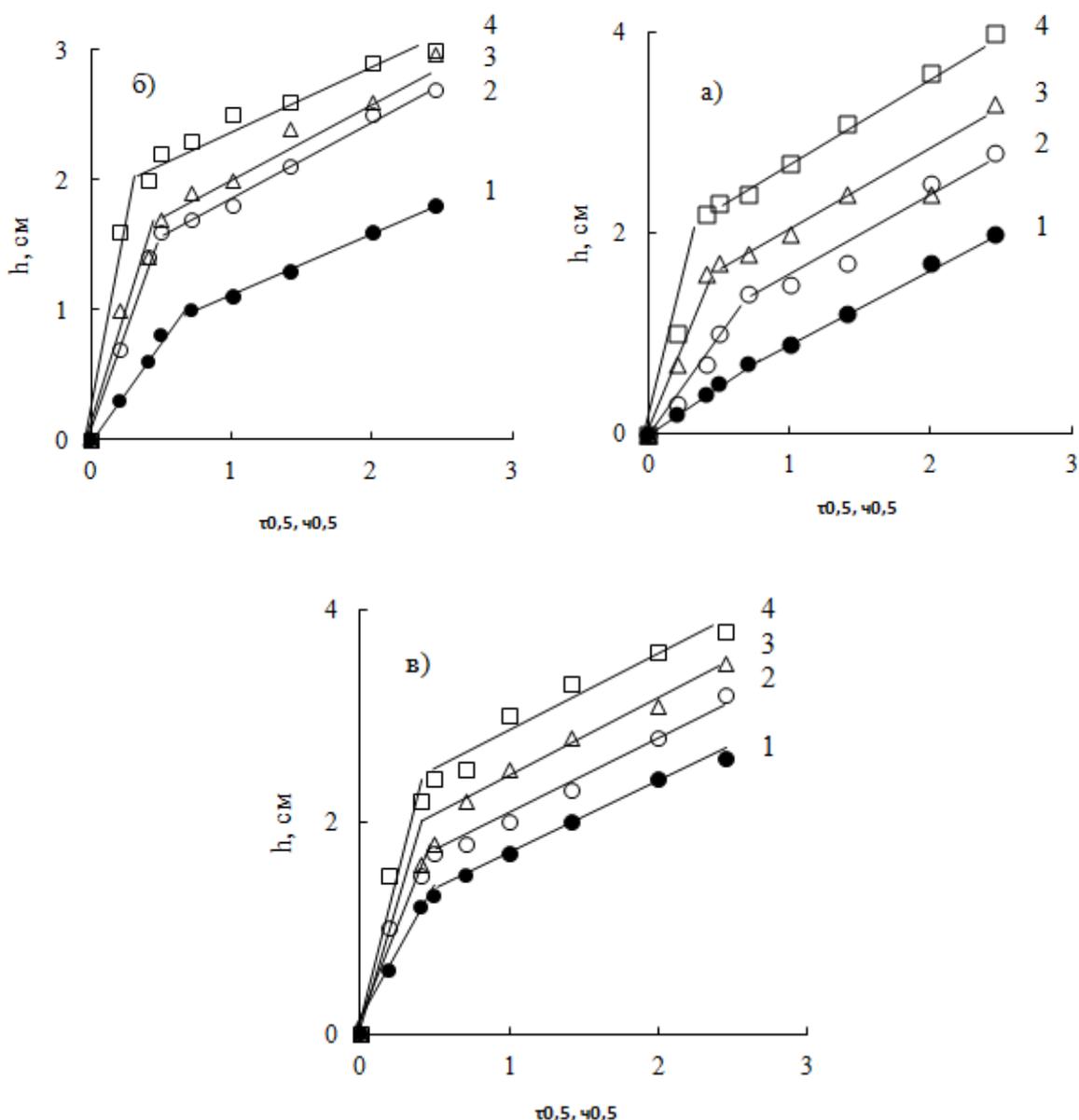


Рисунок 1 – Кинетические зависимости глубины проникновения топлива ДТ-3-К5 в количестве 3 (1), 4 (2), 5 (3) и 7 (4) г в слой песка с размером частиц 0,5-0,25 (а), 0,25-0,20 (б) и менее 0,20 (в) мм

По сравнению с ДТ-4 [10] для ДТ-3-К5 глубина проникновения h_2 (см) в фракционный песок за условное время второй стадии $\tau_2^{0.5}$ ($\text{ч}^{0.5}$) возрастает. Линейные отрезки зависимостей $h-\tau^{0.5}$, отражающие кинетику проникновения топлива на второй стадии процесса, параллельны, что соответствует постоянной условной скорости второй стадии w_2 ($\text{см}/\text{ч}^{0.5}$). Тогда уравнения для прогнозирования максимальной глубины проникновения h_M (см) различных количеств топлива в защитные слои за 6 ч наблюдения можно записать в общем виде:

$$h_M = h_1 + h_2 \quad (1)$$

В уравнении (1) при различных количествах введения топлив ДТ-3-К5 в фракционный песок и ДТ-4 в песок [10] h_2 является величиной постоянной и h_M за 6 ч выделения различных

количеств нефтепродуктов зависит только от h_1 . Поэтому уравнение (1) можно представить в следующем виде:

$$h_M = h_1 + k_h \cdot h_1 \quad (2)$$

где k_h - безразмерный коэффициент приведения, для ДТ-3-К5 при распределении в песке различного фракционного состава $k_h=1,5$ и для ДТ-4 в смешанном песке, $k_h=1,2$.

Рассчитанные значения h_1 , w_1 и h_M для проникновения ДТ-3-К5 в фракционный песок заданного гранулометрического состава и топлива ДТ-4 в песок при заданных количествах введенного топлива (Q , г) представлены в таблице 2. Для топлива ДТ-3-К5 значения h_M рассчитали из уравнений (2) по показателям h_1 , которые получили из зависимостей $h-\tau^{0.5}$ (рисунок 1, а, б и в). Для

топлива ДТ-4 показатели h_M установлены по данным работы [10].

Таблица 2

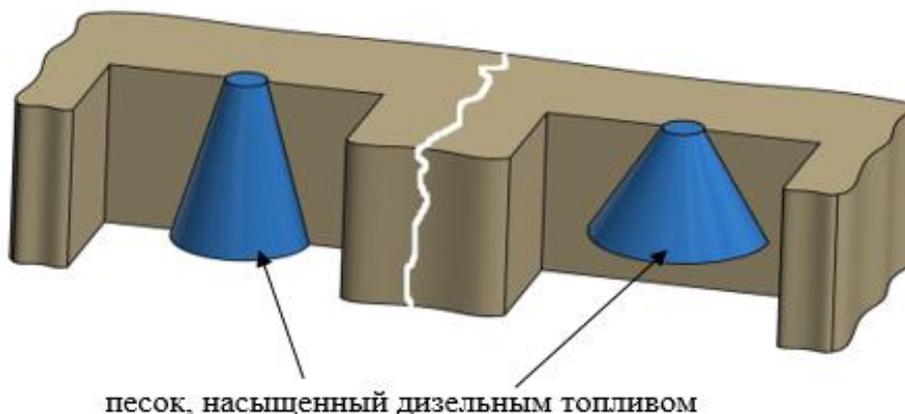
Глубина и условная скорость первой стадии проникновения топлива ДТ-3-К5 в фракционный песок определенного гранулометрического состава и топлива ДТ-4 в смеси в песок

Размер фракций песка, мм	h_I , см, при Q , г, равных:			w_I , см/ч ^{0,5} , при Q , г, равных:			h_M , см, при Q , г, равных:		
	3,0	4,0	5,0	3,0	4,0	5,0	3,0	4,0	5,0
<0,20	1,4	1,7	2,0	2,4	3,0	3,9	2,1	2,6	3,0
0,25-0,20	1,0	1,5	1,7	1,5	2,8	3,4	1,5	2,3	2,6
0,5-0,25	0,7	1,0	1,4	1,0	1,9	2,9	1,1	1,5	2,1
смесь*	1,9	2,7	3,6	2,0	2,2	3,0	2,3	3,2	4,3

*-в песок вводили дизельное топливо ЕВРО по ГОСТ Р 52368-2005 (ЕН 590:2009), сорт С (ДТ-4) [10].

При постоянном количестве введенного топлива ДТ-3-К5 увеличение размера частиц песка приводит к снижению величин h_I , w_I и h_M . Возрастание количеств введенного топлива отражается ростом этих величин оценки распределения топлива в слое песка. Кроме того, по сравнению с песком, для фракционного песка в одинаковых условиях эксперимента величина h_M

снижается и зависит от размера частиц песка, что наиболее выражено для слоев с $R > 0,25$ мм (таблица 2). Относительно большая величина h_I при проникновении ДТ-3-К5 в фракционный песок с $R < 0,25$ мм (табл.2) объясняется влиянием размера частиц на формирование пористой структуры слоя при вибрационном уплотнении (рисунок 2).

а) песок с частицам $R < 0,5$ ммб) песок с частицами $R > 0,5$ мм

песок, насыщенный дизельным топливом

Рисунок 2 – Распределение равных объемов дизельного топлива в фракционном песке различного гранулометрического состава частиц (голубым цветом обозначен объем защитного слоя, заполненного дизельным топливом ДТ-3-К5, линия соответствует разрыву между песком с различными размерами частиц)

При виброуплотнении мелкие частицы песка с $R < 0,25$ мм, которые обладают высокой подвижностью, ориентируются относительно друг друга, что приводит к формированию слоя со сквозными капиллярами, направленными перпендикулярно поверхности слоя песка. Косвенным доказательством ориентации мелких частиц является относительно большое по сравнению с крупными частицами уменьшение объема песка при уплотнении. В слое со сквозными капиллярами, топливо преимущественно перемещается в вертикальном направлении с относительно небольшим углом расхождением фронта движения топлива в слое песка, который имеет форму конуса (рисунок 2а, конус синего цвета), что увеличивает глубину и условную

скорость проникновения на первой стадии процесса (таблица 2).

Низкая подвижность крупных частиц песка ограничивает уплотнение слоя и формирование сквозных капилляров, что вызывает обтекание частиц песка топливом и приводит к сложной траектории движения потока с увеличением угла границы распределения топлива в слое песка (рисунок 2б, конус синего цвета). Движение топлива в направлениях, отличающихся от вертикального относительно поверхности слоя песка, уменьшает глубину проникновения (рисунок 2).

Из кинетических зависимостей проникновения ДТ-3-К5 в фракционный песок определенного

гранулометрического состава (рисунок 1) рассчитали h_I и w_I и установили их зависимости от количества (Q , г) введенного топлива (рисунок 3).

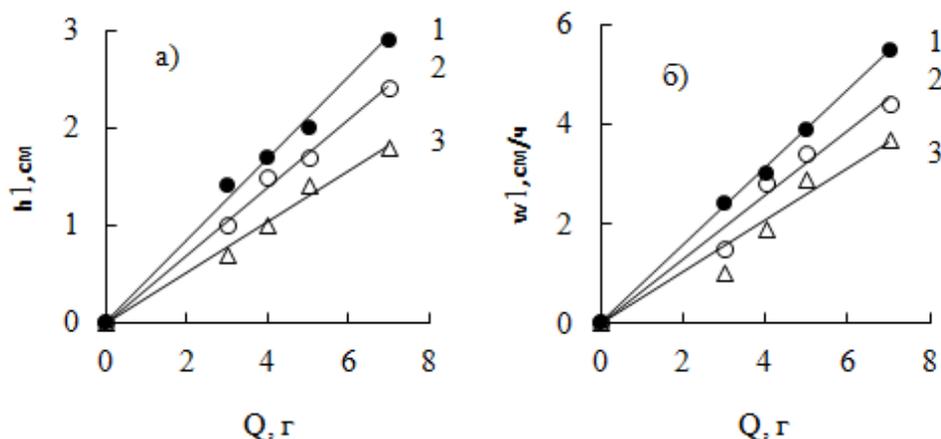


Рисунок 3 – Зависимости глубины (а) и условной скорости (б) проникновения дизельного топлива в песке из частиц с размерами <math><0,20</math> (1), $0,25-0,20$ (2) и $0,5-0,25$ (3) мм - от количества топлива, введенного в защитный слой песка (экспериментальные точки соответствуют среднему размеру частиц песка определенной фракции)

Особенностью зависимостей h_I-Q и w_I-Q является то, что при их построении должно выполняться следующее требование: при $Q \rightarrow 0$ выполняется $h_I \rightarrow 0$ и $w_I \rightarrow 0$. Другими словами зависимости h_I-Q и w_I-Q должны выходить из начала координат.

Зависимости h_I-Q и w_I-Q имеют линейный вид и описываются уравнениями:

$$h_I = k_Q \cdot Q; \quad (3) \quad w_I = k_w \cdot Q, \quad (4)$$

где k_Q , см/г, и k_w , см/(ч·г), коэффициенты приведения, которые зависят от фракционного состава песка. Зависимости коэффициентов k_h и k_w от фракционного состава частиц песка представлены на рисунке 4.

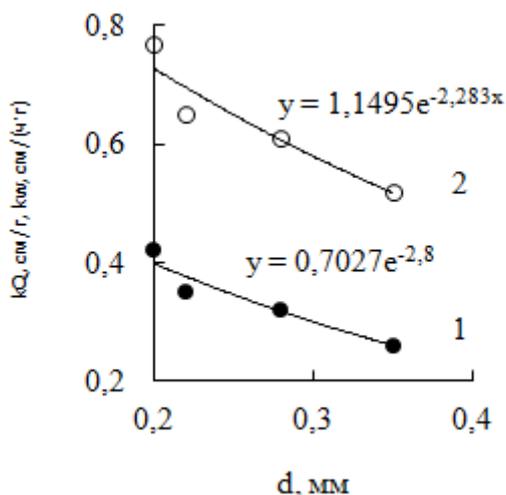


Рисунок 4 – Зависимости k_Q (1) и k_w (2) от среднего размера частиц песка

Зависимости k_Q-d и k_w-d (рисунок 3) с коэффициентом корреляции не менее 0,89 описываются экспоненциальными уравнениями, при подстановке которых соответственно в уравнения (3) и (4) получены модели для прогнозирования глубины и скорости проникновения дизельного топлива на первой стадии процесса от двух переменных, таких как

начальное количество введенного топлива и фракций песка, которые имеют вид:

$$h_I = 0,7e^{-2,87d}Q, \quad (5)$$

$$w_I = 1,15e^{-2,29d}Q. \quad (6)$$

Графически решено уравнение (5) в заданном диапазоне значений d от 0,1 до 1 мм и Q от 0 до 400

г, максимальное значение Q соответствует количеству дизельного топлива, которое поступает в слой песка при падении капель с интервалом 1 с в течение 6 ч (рисунок 5а). Установлено, что при использовании песка с размером частиц более 0,5

мм глубина проникновения топлива снижается. Численное решение уравнения (3), которое обеспечивает оценку глубины проникновения топлива в слой песка из частиц радиусом от 0,5 до 1 мм, представлено на рисунке 5б.

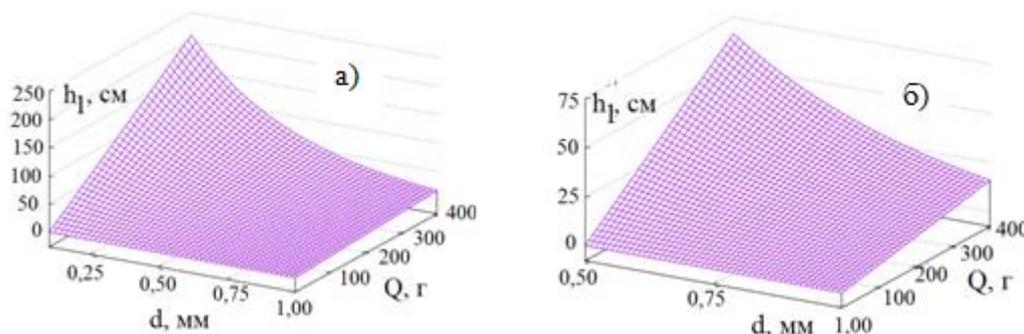


Рисунок 5 – Влияние размера частиц песка и количества введенного дизельного топлива ДТ-3-К5 на глубину его проникновения на первой стадии процесса (а-для песка с размером частиц от 0 до 1 мм, б-для песка с размером частиц от 0,5 до 1 мм)

Минимальную толщину защитного слоя при технологических потерях различных объемов дизельного топлива ДТ-3-К5 обеспечивает применение песка, который остается на сите с размером отверстий 0,80 мм и более (рис.5б). При протечке 400 г топлива в песок с частицами, которые проходят через сито с размером отверстий 0,5 мм глубина проникновения может достигать несколько метров (рисунок 5 а).

Выводы:

- для создания защитных слоев в местах расположения резервуаров временного хранения дизельного топлива оптимально использовать песок с размером частиц более 0,80 мм;
- предложенный подход, связанный с получением зависимостей глубины проникновения дизельного топлива от условного времени, можно использовать для оценки распределения топлива в слоях песка с различными размерами частиц.

Список литературы

1. Wang Y., Feng J., Lin Q., Lyu X., Wang X., Wang G. Effects of crude oil contamination on soil physical and chemical properties in Momoge wetland of China//Chinese Geographical Science. 2013. V.23. №11. P.708–715
2. Kanarbik L., Blinova I., Sihtmäe M., Künnis-Beres K., Kahru A. Environmental effects of soil contamination by shale fuel oils//Environmental Science and Pollution Research. 2014. V.21. №2. P.11320–11330
3. Thamer K., Heba S. Al-Mimar J. Zumberge Petroleum system modeling and risk assessments of Ad'daimah oil field: a case study from Mesan Governorate, south Iraq//Arabian Journal of Geosciences. 2015. V.8. №8. P.5739–5766
4. Gumerov F. M., Farakhov M. I., Khayrutdinov V. F., Gabitov R. F., Zaripov Z. I., Khabriyev I. Sh., Akhmetzyanov T. R. Improvement of functionality of carbonate macadam via supercritical fluid

impregnation with bituminous compounds//Russian J. Physic. Chem. B. 2016. V. 10. №6. P.1053–1061

5. Khairutdinov V. F., Akhmetzyanov T. R., Gumerov F. M., Khabriev I. Sh., Farakhov M. I. Supercritical fluid propane–butane extraction treatment of oil-bearing sands//Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2017.V.51. №6. P.299–306

6. Рыбаков Ю.Н., Ларионов С.В., Чириков С.И. Вопросы оценки экологической безопасности временных хранилищ нефтепродуктов на основе эластичных резервуаров//Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов, № 2(22), 2016. С. 96-99

7. Велихов Э.Х. Охрана окружающей среды на нефтегазодобывающих объектах в современных условиях//Нефтяное хозяйство. 1996. № 10. С 47-49

8. Volchok V. V., Suslin M. A., Mel'kumov V. N. A Study of Losses in Fuel with Dissolved and Emulsified Moisture at Ultrahigh Frequencies//Measurement Techniques. 2016.V.59. №6. P. 331–337

9. Постановление Правительства РФ от 21.08.2000 №613 «О неотложных мерах по предупреждению и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов»

10. Массольд А.В., Думболов Д.У., Дедов А.В. Моделирование глубины проникновения дизельного топлива в защитную песчаную подушку//Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. Т.10. №3. С. 300-304

11. Москалев П.В., Шитов В.В. Математическое моделирование пористых структур. М., Физматлит. 2007. 120 с

12. Устройство для оценки глубины проникновения нефтепродуктов в почву. Патент на полезную модель №198068; заявл. 29.01. 2020; опубл. 17. 06. 2020, Бюлл. №17

13. Надеин А.Ф. Очистка воды и почвы от нефтезагрязнений//Экология и промышленность России. 2001. № 11. С. 24-26

14. Латыпов Б.М., Ситдииков Р.Н., Прочухан Ю.А. Комплексный метод по рекультивации почв и грунтов, загрязненных нефтью//Материалы 2-ой Всероссий. научно-практической конференции:

Отходы 2000». Уфа, 22-24 ноября. 2000. Ч. III. С. 81-87

15. Массольд А.И., Ефремова Л.Ю., Думболов Д.У. Глауконит в качестве сорбента для защиты почв от загрязнения углеводородами на объектах нефтепродуктообеспечения Минобороны России. Труды 25 ГосНИИ МО РФ.2020. №59. С.468-473

РАБОТА ЭЛЕКТРОТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ ГАЗОТУРБИНЫХ УСТАНОВОК СЛОЖНЫХ ЦИКЛОВ НА НОМИНАЛЬНЫХ И ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМАХ

Матвеев Валерий Тимофеевич

доктор технических наук, профессор

Институт природно-технических систем,

г. Севастополь

Дологлонян Андрей Вартазарович

кандидат технических наук, доцент

Институт природно-технических систем,

г. Севастополь

Клименко Александр Георгиевич

ведущий инженер-исследователь

Институт природно-технических систем, г. Севастополь

Очеретяный Владимир Анатольевич

кандидат технических наук, доцент

Севастопольский государственный университет,

г. Севастополь

OPERATION OF ELECTRIC HEAT-GENERATION GAS TURBINE PLANTS OF COMPLEX CYCLES ON NOMINAL AND VARIABLE MODES

Matveenko Valeriy

Doctor of Sciences, Professor

Institute of Nature and Technical Systems, Sevastopol

Dologlonyan Andrey

Candidate of Sciences, assistant professor

Institute of Nature and Technical Systems, Sevastopol

Ocheretianyi Vladimir

Candidate of Sciences, assistant professor

Sevastopol State University, Sevastopol

Klimenko Alexandr

Institute of Nature and Technical Systems, Sevastopol

[DOI: 10.31618/nas.2413-5291.2021.2.64.384](https://doi.org/10.31618/nas.2413-5291.2021.2.64.384)

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследований и разработок когенерационных газотурбинных двигателей (ГТД) сложных циклов. Показано, что применение в ГТД турбины перерасширения (ТП) позволяет повысить экономичность двигателя наравне с применением регенерации теплоты (Р). Сочетание приведенных двух способов в ГТД с ТП и Р дает дальнейшее повышение экономичности двигателя. Установлено, что на частичных нагрузках каждая конструктивная схема имеет свои закономерности изменения теплотехнических характеристик, определяющие область применения когенерационных ГТД. Приводятся примеры возможностей изменения рабочего процесса в двигателе позволяющие управлять потоками энергии в когенерационной энергоустановке.

ABSTRACT

The results of research and development of cogeneration gas turbine engines (GTE) of complex cycles are presented. It is shown that the use of an overexpansion turbine (OT) in a gas turbine engine makes it possible to increase the efficiency of the engine on a par with the use of heat regeneration (R). The combination of these two methods in a GTE with OT and R provides a further increase in the engine's efficiency. It has been established that at partial loads, each design scheme has its own patterns of change in engine characteristics, which determine the field of application of cogeneration gas turbine engines. Examples of the possibilities of changing the working process in the engine are given, which allow to control the energy flows in the cogeneration power plant.

Ключевые слова: когенерация, газотурбинный двигатель, турбина перерасширения, дожимающий компрессор.

Keywords: cogeneration; gas turbine engine; overexpansion turbine; booster compressor.