

# МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ MONITORING, DIAGNOSTIC AND MANAGEMENT OF POWER PROCESSES AND EQUIPMENT

УДК 52-5

А.В. Торопов, канд. техн. наук, доц. ORCID 0000-0001-8505-0266

Л.В.Торопова, асс. ORCID 0000-0001-6882-2295

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## КВАЗИОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАГРУЗКОЙ КОНВЕЙЕРА НА ОСНОВЕ МИНИМАКСНОГО КРИТЕРИЯ КАЧЕСТВА

*В работе была решена задача синтеза квазиоптимального регулятора, обеспечивающего минимизацию отклонения загрузки конвейера при минимуме энергетических затрат на управление. При осуществлении процедуры синтеза использовалась математическая модель системы стабилизации загрузки конвейера с учетом чистого запаздывания по перемещению груза и колебательном характере переходного процесса в контуре скорости. Для нахождения квазиоптимального управления использовался метод Айзекса – Беллмана, позволяющего найти минимум функционала качества при наихудшем влиянии возмущающих воздействий. Задача решалась при условии существования «седловой» точки минимаксного критерия оптимальности по управляющему и возмущающим воздействиям. В результате синтеза был получен закон квазиоптимального управления в виде суммы линейных составляющих от переменных состояния. Исследование методом цифрового моделирования показало преимущества полученного алгоритма управления по сравнению с классическими регуляторами. Полученный закон квазиоптимального управления достаточно просто может быть реализован на программируемом контроллере для управления конвейером.*

**Ключевые слова:** загрузка конвейера, транспортировка сыпучих материалов, метод Айзекса - Беллмана, минимаксный функционал качества, седловая точка.

Введение. В настоящее время на предприятиях актуальной является задача энергосбережения за счет оптимизации работы систем с регулируемым электроприводом. Одними из наиболее энергоемких электроприводов со значительным потенциалом энергосбережения являются конвейерные системы непрерывной транспортировки сыпучих грузов, таких как песок, уголь, зерно. Применение регулируемых электроприводов позволяет стабилизировать загрузку конвейера, обеспечить максимальную производительность, увеличить надежность и долговечность системы в целом. Важно отметить, что именно стабилизация количества груза на конвейере позволяет получить максимальную энергоэффективность оборудования.

В то же время существенной проблемой внедрения таких систем является сложность их наладки и эксплуатации. Дело в том, что наличие чистого запаздывания в контуре регулирования делает неэффективным применение стандартных регуляторов, получаемых методами последовательной коррекции, либо частотными методами. Отклонения реальной загрузки конвейера от заданной приводят к перегрузке приводных двигателей, их перегреву, а также излишнему потреблению системой электроэнергии.

**Цель и задачи исследования.** Получение наилучшего режима работы конвейера с точки зрения энергоэффективности возможно за счет применения регуляторов, полученных путем применения различных методов оптимизации. Одним из наиболее эффективных методов синтеза оптимальных регуляторов является метод Беллмана – Ляпунова. В этом случае закон управления для системы с чистым запаздыванием и случайным возмущающим воздействием будет содержать коэффициенты, зависящие от времени. Процедура поиска аналитического выражения для этих коэффициентов с вычислительной точки зрения является крайне трудоемкой и приведет к значительному усложнению системы управления. Поэтому, разработка системы управления загрузкой конвейера, обеспечивающая оптимальное поведение системы и относительно простой с точки зрения практической реализации, является актуальной задачей.

**Материал и результаты исследования.** Задача регулирования загрузки конвейеров для снижения энергопотребления предприятий с системами транспортировки сыпучих материалов широко

рассматривается в работах [1-5]. В них решается задача синтеза линейно – квадратичных регуляторов загрузки, в которой существующие нелинейности рассматриваются как минимизируемые управляющие воздействия. Также в качестве корректирующих воздействий рассматриваются и внешние возмущения, действующие на контур. Особенностью существующих решений является то, что в качестве минимизируемого функционала качества используется классический квадратичный критерий оптимальности. В этом случае ограничения на возмущающие воздействия подразумевают их минимизацию, то есть фактически, задача поиска оптимального регулятора будет доставлять экстремум функционалу качества лишь при минимальном влиянии возмущений и нелинейностей [6]. Следовательно, полученные ранее, решения задачи аналитического конструирования регуляторов дают наилучший результат лишь при незначительных колебаниях загрузки, и не обеспечивают низкую чувствительность к вариациям возмущений.

Альтернативным подходом к обеспечению оптимального поведения системы является использование инвариантного управления, нечувствительного к внешним возмущающим воздействиям. Существует большое количество вариаций процедуры Беллмана - Ляпунова для решения задачи нахождения робастных регуляторов, из которых одним из наиболее популярных является метод Айзекса – Беллмана [7].

При использовании метода, предложенного в [8], задача поиска оптимального регулятора сводится к дифференциальной игре с двумя участниками, где первый игрок в виде управляющего воздействия будет обеспечивать минимум функционала качества при наихудшем характере возмущающих воздействий, формируемым вторым игроком. Такой подход позволит обеспечить высокую робастность системы к колебаниям количества сыпучего груза, которое поступает на конвейер.

Осуществим процедуру синтеза оптимального регулятора загрузки конвейера, электромеханическая система которого описывается колебательным звеном. Такое допущение будет справедливым для однодвигательного конвейера с настройкой контура скорости привода на технический оптимум. Предложенный подход позволит существенно упростить процедуру синтеза без значительного снижения точности решения задачи оптимизации.

Контур стабилизации загрузки непрерывного транспорта для сыпучих грузов с учетом предложенной модели электромеханической системы примет вид, представленный на рис.1.

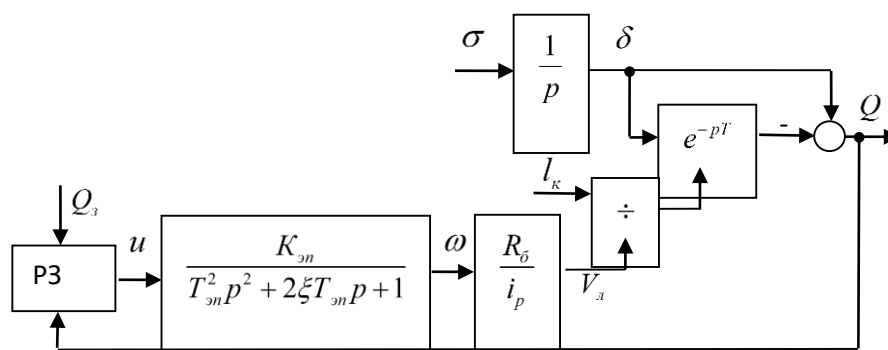


Рисунок 1 - Схема контура стабилизации загрузки конвейера горнодобывающего предприятия.

На рис.1 введены следующие обозначения:  $Q_s, Q$  - заданное и реальное количество груза на конвейере в текущий момент времени;  $\delta$  - количество груза, загружаемого на конвейер;  $\sigma$  - мгновенное количество груза, поступающее на конвейер;  $l_k$  - длина конвейера;  $R_b$  - радиус приводного барабана;  $i_p$  - передаточное число редуктора;  $K_{en}, \xi, T_{en}$  - параметры электромеханической системы конвейера при настройке внешнего контура на модульный оптимум;  $V$  - линейная скорость перемещения ленты;  $\omega$  - скорость вращения двигателя приводного барабана;  $u$  - управляющее воздействие.

Зависимость текущей загрузки конвейера от количества груза, поступающего на ленту, определяется выражением (1):

$$Q = (1 - e^{-pT})\delta. \quad (1)$$

Разложим составляющую  $e^{pT}$  в ряд Тейлора, ограничимся двумя составляющими, и при учете интегральной составляющей нагрузки получим:

$$Q = (1 - e^{-pT})\delta = (1 - \frac{1}{e^{pT}})\delta = (\frac{e^{pT} - 1}{e^{pT}})\delta \approx (\frac{1 + pT - 1}{1 + pT})\delta = \frac{T}{Tp + 1}\sigma. \quad (2)$$

Поскольку время задержки зависит от скорости в зависимости  $T = l_k i_p R_\sigma^{-1} \omega^{-1}$ , можем записать в нормальной форме Коши уравнение, описывающее изменение загрузки:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{R_\sigma}{l_k i_p} \omega Q + \sigma. \quad (3)$$

Поведение привода, при условии его настройки внешнего контура регулирования скорости на технический оптимум, описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \varepsilon; \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= -\frac{1}{T_{эн}^2} \omega - \frac{2\xi}{T_{эн}} + \frac{K_{эн}}{T_{эн}} u. \end{aligned} \quad (4)$$

Получим в итоге систему дифференциальных уравнений в нормальной форме Коши, описывающее поведение конвейерной системы:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -a_1 x_1 x_2 + \sigma, \\ \dot{x}_2 &= x_3, \\ \dot{x}_3 &= -a_2 x_2 - a_3 x_3 + bu, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $x_1 = Q$ ,  $x_2 = \omega$ ,  $a_1 = l_k^{-1} R_\sigma i_p^{-1}$ ,  $a_2 = T_{эн}^{-1}$ ,  $b = K_{эн} T_{эн}^{-1}$ .

Минимаксный функционал качества сформируем, исходя из требования динамической точности и минимума энергетических затрат на управление, а также максимизации возмущающего воздействия [9]:

$$\min_u \max_\sigma J = \int_0^\infty (q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + r_1 u^2 - r_2 \sigma^2) dt. \quad (6)$$

Наличие в функционале качества составляющей  $-r_2 \sigma^2$  указывает, что возмущающее воздействие меняется по линейной зависимости от переменных состояния, однако наихудшим образом по отношению к управляющему воздействию в произвольный момент времени.

Процедура решения прикладных задач аналитического конструирования квазиоптимального регулятора на основе теории дифференциальных игр [7,8] предполагает наличие «седловой» точки минимизируемого функционала, то есть существование решение игровой задачи. Поэтому, полагаем, что существуют допустимые  $u$  и  $\sigma$ , которые доставляют седловую точку выбранному функционалу качества.

Далее осуществим линеаризацию составляющей  $x_1 x_2$ , входящей в первое дифференциальное уравнение системы. При этом решение задачи оптимизации станет приближенным, то есть решение, полученное в результате синтеза, будет квазиоптимальным.

Существует два основных подхода к проблеме линеаризации. В первом случае медленно меняющаяся составляющая принимается детерминированной, то есть  $x_1 x_2 = K(x_1) x_2$  [10]. Здесь  $K(x_1)$  - коэффициент, принимаемый постоянным для некоторой области фазового пространства. Во втором случае осуществляется линеаризация «в точке» [11], например, в точке номинального режима работы конвейера. При этом  $x_1 x_2 = a_1(x_1, x_2) x_1 + a_2(x_1, x_2) x_2$ , где  $a_1(x_1, x_2)$ ,  $a_2(x_1, x_2)$  - коэффициенты линеаризации «в точке». Для задачи максимизации загрузки конвейера второй подход является более предпочтительным. В этом случае линеаризованная система дифференциальных уравнений, описывающая динамику конвейера, запишется:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + \sigma, \\ \dot{x}_2 &= x_3, \\ \dot{x}_3 &= -a_2x_2 - a_3x_3 + bu,\end{aligned}\quad (7)$$

где  $a_{11}$ ,  $a_{12}$  - коэффициенты линеаризации «в точке».

Для линеаризованной системы дифференциальных уравнений и выбранного минимаксного функционала качества уравнение Айзекса - Беллмана запишется:

$$\min_u \max_\sigma \left[ q_1x_1^2 + q_2x_2^2 + q_3x_3^2 + r_1u^2 - r_2\sigma^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1}(-a_{11}x_1 - a_{12}x_2 + \sigma) + \frac{\partial V}{\partial x_2}x_3 + \frac{\partial V}{\partial x_3}(-a_2x_2 - a_3x_3 + bu) \right] = 0. \quad (8)$$

Произведем поиск экстремума функционала по управляющему и возмущающему воздействию, получим:

$$u = -\frac{b}{2r_1} \frac{\partial V}{\partial x_3}; \quad \sigma = \frac{1}{2r_2} \frac{\partial V}{\partial x_1}. \quad (9)$$

Осуществим замыкание системы путем подстановки полученных выражений в функциональное уравнение (8), получим уравнение Айзекса – Беллмана в замкнутой форме:

$$\begin{aligned}q_1x_1^2 + q_2x_2^2 + q_3x_3^2 + \frac{\partial V}{\partial x_1}(-a_{11}x_1 - a_{12}x_2) + \frac{\partial V}{\partial x_2}x_3 + \\ + \frac{\partial V}{\partial x_3}(-a_2x_2 - a_3x_3) = \frac{b^2}{4r_1} \left( \frac{\partial V}{\partial x_3} \right)^2 - \frac{1}{4r_2} \left( \frac{\partial V}{\partial x_1} \right)^2\end{aligned}\quad (10)$$

Решением данного уравнения будет функция  $V$  в виде квадратичной формы от переменных состояния системы вида [9,10]:

$$V = K_{11}x_1^2 + 2K_{12}x_1x_2 + 2K_{13}x_1x_3 + K_{22}x_2^2 + 2K_{23}x_2x_3 + K_{33}x_3^2. \quad (11)$$

Подставим выражения для частных производных в уравнения Айзекса – Беллмана в замкнутой форме и выделив коэффициенты при одинаковых степенях, получим систему алгебраических уравнений Риккати [9]. Из нее получим значения коэффициентов функции Беллмана и подставим их в исходные выражения для управления и возмущения:

$$u = -K_{1u}x_1 - K_{2u}x_2 - K_{3u}x_3; \quad \sigma = K_{1\sigma}x_1 + K_{2\sigma}x_2 + K_{3\sigma}x_3. \quad (12)$$

Исследование динамических характеристик контура регулирования загрузки было проведено методом цифрового моделирования с применением пакета MATLAB и его приложения Simulink. В качестве объекта рассматривался конвейер горнодобывающего предприятия с рекомендуемой загрузкой 45 тонн и длиной 500 метров. Переменные состояния  $x_2$ ,  $x_3$  были получены в виде разности задания, получаемого от эталонной модели привода конвейера, настроенного на модульный оптимум. Задание по загрузке формировалось в виде обратно - пропорционального сигнала по скорости конвейера с целью максимальной компенсации чистого запаздывания ленты.

Графики переходных процессов по загрузке конвейера при использовании линейно – квадратичного регулятора, синтезируемого при учете наилучшего характера возмущающих воздействий, представлены на рисунке 2. В режиме стабилизации выходной величины имеются существенные колебания загрузки до 10% от заданного значения.

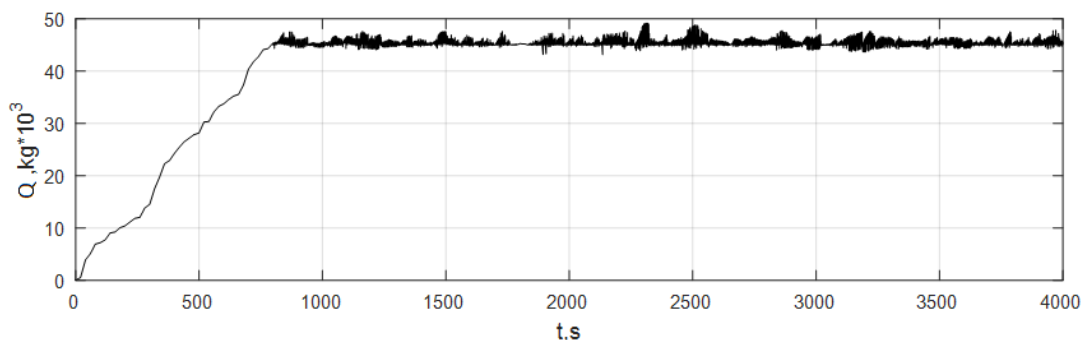


Рисунок 2 – График переходного процесса по загрузке при использовании линейно – квадратичного регулятора.

График переходных процессов по загрузке конвейера при использовании синтезированного квазиоптимального регулятора представлены на рисунке 3. При использовании синтезированного регулятора скачок загрузки при заполнении конвейера практически отсутствует, колебания загрузки в режиме стабилизации также существенно уменьшились.

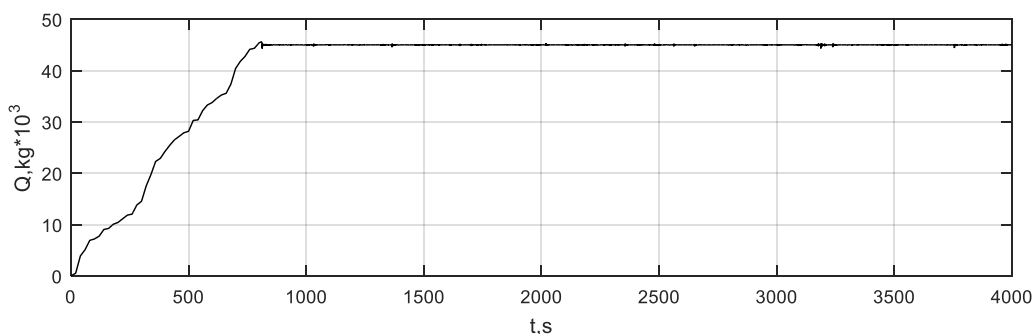


Рисунок 3 – График переходного процесса по загрузке при использовании квазиоптимального регулятора.

Синтезированный квазиоптимальный регулятор, коэффициенты которого были определены с учетом наихудшего характера возмущающих воздействий, в отличие от линейно – квадратичного регулятора, лучше компенсирует случайные колебания загрузки в режиме стабилизации. При этом сложность регулятора существенно не увеличилась и полученный алгоритм управления, а также блок формирования задания по переменным состояния может быть реализован на микропроцессорном устройстве регулирования.

**Выводы.** Использование метода Айзекса – Беллмана при игровой постановке задачи синтеза позволило разработать алгоритм управления, обеспечивающий оптимальное качество управления при наихудшем характере возмущающих воздействий. Линеаризация «в точке», а также использование детерминированных коэффициентов регулятора обеспечили квазиоптимальное управление загрузкой без значительного усложнения системы регулирования. Сравнение результатов моделирования показало преимущество предложенного синтезированного регулятора, по сравнению с линейно - квадратичными, применяемыми в существующих конвейерных системах. Полученный алгоритм управления, а также используемый блок формирования заданий по переменным состояния может быть реализован на общепромышленном программируемом логическом контроллере, используемом для решения задач автоматизации. Предложенный подход к формированию контура регулирования загрузки предусматривает использование датчиков объема сыпучего груза, подключаемых к контроллеру по одному из промышленных интерфейсов. Дальнейшее улучшение качества регулирования загрузки возможно путем более подробного учета динамических свойств конвейерной системы, что может привести, в свою очередь, к существенному усложнению алгоритма управления.

#### Список использованной литературы

1. Дмитриева В.В. Разработка и исследование системы автоматической стабилизации погонной нагрузки магистрального конвейера/Дис.....кандидата техн.наук 05.13.06./В.В. Дмитриева; Ва Московский государственный горный университет– Москва,2005. - 162с.

2. Боровикова А.П. Разработка и исследование системы автоматического управления загрузкой магистральной конвейерной линии/ А.П. Боровикова, А.Е. Ткаченко, К.Н. Маренич// Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых: сборник научных трудов XVII научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке 24-25 мая 2017 г. - Донецк : ДонНТУ, 2017. – 409 с.
3. Дмитриева, В. В. Автоматическая стабилизация погонной нагрузки ленточного конвейера / В. В. Дмитриева, Л. Д. Певзнер // Московский государственный горный институт. – Москва : Препринт, 2004. – 25 с.
4. Дмитриева В.В. Поддержание величины тягового фактора ленточного конвейера с двухдвигательным приводом /В.В. Дмитриева, Куанг Пьей// 2015/ Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2015-№6 с.189-198.
5. Печеник М. В. Дослідження втрат енергії в електромеханічній системі конвеєра при плавній зміні навантаження / М. В. Печеник, С. О. Бур'ян, Л. М. Наумчук // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. - 2015. - Вип. 2. - С. 67-73
6. Летов А.М. Динамика полета и управление. – М.: Наука, 1969. – 359 с.
7. Атанс М., Фалб П.Л. Оптимальное управление. М.: Машиностроение, 1968, - 764с.
8. Жуковский В.И., Чикрий А.А. Линейно-квадратичные дифференциальные игры. К.: Наукова думка, 1994.- 314с.
9. Kudin V.F. Synthesis of a Robust Suboptimal Controller Based on the Optimality Minimax Criteria/ V.F. Kudin, Ye. Ye. Alexandrov//IFAC Proceedings Volumes. Vol. 25, Issue 21, September 1992- p.282-283.
10. Kudin, V. F. Suboptimal control of crane moving mechanism considering damping of load / V. F. Kudin, M. V. Pechenik, S. P. Kolesnichenko // 16 International Conference on Soft Computing MENDEL 2010, Brno, Czech Republic, June 23–25. – P. 381–386.
11. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням Київ: УкрНДІАТ, 2003.- 383 с.

**A. Toropov**, Cand. Sc. (Eng.), assoc. prof. ORCID 0000-0001-8505-0266

**L. Toropova**, TF ORCID 0000-0001-6882-2295

**National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»**

### **QUASI-OPTIMAL CONTROL OF CONVEYOR LOADING BASED ON MINIMAX QUALITY CRITERIA**

*In the work, the problem of synthesis of quasi-optimal controller, which minimizes the deviation of the conveyor load with a minimum of energy losses, was solved. When performing the synthesis procedure, a mathematical model of the conveyor loading stabilization system, taking into account the delay link in the load movement and the oscillating behavior of the transient process in the speed loop, was used. To find quasi-optimal control, the Isaacs-Bellman method, which makes it possible to find a minimum of the quality functional with the worst behavior of disturbing influences, was used. The problem was solved under the condition that there existed a «saddle» point of the minimax optimality criterion for control and disturbing influences. As a result of the synthesis, the law of quasi-optimal control was obtained as the sum of the linear components of the state variables. The investigation using method of digital simulation shows the advantages of the obtained control algorithm in comparison with the classical regulators. The obtained law of quasi-optimal control can be easily implemented based on a programmable regulator for conveyor control.*

**Keywords:** conveyor loading, conveying of bulk materials, Isaacs - Bellman method, minimax functional of quality, «saddle» point.

### **References**

1. Dmitrieva V.V. Development and research of the system of automatic stabilization of the running load of the main conveyor / Dis ... candidate of technical sciences 05.13.06./V.V. Dmitrieva; Moscow State Mining University- Moscow, 2005. - 162с. (Rus.)

2. Borovikova A.P., Tkachenko A.E., Marenich K.N. Development and investigation of the automatic control system for loading the main conveyor line // Automation of technological objects and processes. Collection of scientific papers of the XVII scientific and technical conference of graduate students and students in Donetsk May 24-25, 2017 - Donetsk: DonNTU, 2017. - 409 p.
3. Dmitrieva V. V., Pevzner L. D. Automatic stabilization of the load of a belt conveyor // Moscow State Mining Institute. - Moscow: Preprint, 2004. - 25 p. (Rus.)
4. Dmitrieva V.V., Quang Pey Maintaining the value of traction factor of a belt conveyor with a two-motor drive // Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal), 2015, №6 p.189-198. (Rus.)
5. Pechenik M.V., Buryan S.O., Naumchuk L. M. Investigation of energy losses in the electromechanical system of the conveyor under a smooth load change // Electromechanical and energy saving systems. - 2015. - Vol. 2. - p. 67-73 (Ukr.)
6. Letov A.M. Flight dynamics and control. - Moscow: Nauka, 1969. - 359 p. (Rus.)
7. Atans M., Falb P.L. Optimalnoe upravlenie. M.: Mashinostroenie, 1968, - 764p. (Rus.)
8. Zhukovsky V.I., Chikriy A.A. Linear-quadratic differential games. K.: Naukova dumka, 1994.- 314p. (Rus.)
9. Kudin V.F., Alexandrov Ye. Ye. Synthesis of a Robust Suboptimal Controller Based on the Optimality Minimax Criteria//IFAC Proceedings Volumes. Vol. 25, Issue 21, September 1992- p.282-283. (Eng.)
10. Kudin, V. F., Pechenik M. V., Kolesnichenko S. P. Suboptimal control of crane moving mechanism considering damping of load // 16 International Conference on Soft Computing MENDEL 2010, Brno, Czech Republic, June 23–25. – P. 381–386. (Eng.)
11. Petrakov Yu.V. Automatic control of the processes of cutting materials processing// Kyiv: UkrNIAT, 2003.- 383 p. (Ukr.)

**А.В. Торопов**, канд. техн. наук, доц. **ORCID 0000-0001-8505-0266**

**Л.В.Торопова**, асист. **ORCID 0000-0001-6882-2295**

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

#### **КВАЗИОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯМ КОНВЕЄРА НА ОСНОВІ МІНІМАКСНОГО КРИТЕРІЮ ЯКОСТІ**

*В роботі вирішена задача синтезу квазіоптимального регулятора, що забезпечує мінімізацію відхилення завантаження конвеєра, при мінімумі енергетичних затрат на управління. При здійсненні процедури синтезу використовувалася математична модель системи стабілізації завантаження конвеєра, з урахуванням чистого запізнювання по переміщенню вантажу і коливальному характері перехідного процесу у контурі швидкості. Для знаходження квазіоптимального управління використовувався метод Айзекса - Беллмана, що дозволяє знайти мінімум функціоналу якості при найгіршому характері збурюючих впливів. Задача вирішувалась за умови існування «сідлової» точки мінімаксного критерію оптимальності за керуючим та збурюючими впливами. В результаті синтезу було отримано закон квазіоптимального управління у вигляді суми лінійних складових від змінних стану. Дослідження методом цифрового моделювання показало переваги отриманого алгоритму управління у порівнянні з класичними регуляторами. Отриманий закон квазіоптимального управління досить просто може бути реалізований на програмованому контролері управління конвеєром.*

**Ключові слова:** завантаження конвеєра, транспортування сипучих матеріалів, метод Айзекса - Беллмана, мінімаксний функціонал якості, сідлова точка.

Надійшла 20.03.2018

Received 20.03.2018

УДК 621.3.011.74.005

В.В. Михайленко, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-0973-4612

Ю.М. Чуняк, асистент, ORCID 0000-0002-4506-912X

О.С. Чарняк, студентка

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧА З ВОСЬМИЗОННИМ РЕГУЛЮВАННЯМ НАПРУГИ

*Метою роботи є використання методу багатопараметричних функцій з використанням пакету MATHECAD для аналізу електромагнітних процесів в електричних колах з напівпровідниковими комутаторами.*

*У цій статті проведено аналіз електромагнітних процесів в електричних колах напівпровідниковими з комутаторами. Створено математичну модель для аналізу електромагнітних процесів в напівпровідникових перетворювачах з широтно-імпульсним регулюванням вихідної напруги. Наведено графіки, що відображають електромагнітні процеси у електричних колах. Стаття присвячена розвитку метода багатопараметричних функцій шляхом розробки нових математичних моделей та визначення функцій і алгоритмічних рівнянь для аналізу за підсистемними складовими електромагнітних процесів у розгалужених електричних колах з напівпровідниковими комутаторами і ланками з синусоїдальними, постійними імпульсними напругами. Напівпровідникові комутатори можуть виконувати високочастотне змінення структури електричних кіл і широтно-імпульсну модуляцію фазних і лінійних напруг трифазної мережі електроживлення, виконуючи регулювання вихідних напруг напівпровідникових перетворювачів параметрів електричної енергії.*

**Ключові слова:** електромагнітні процеси, вихідні напруга та струм, багатопараметричні модулюючі функції, напівпровідникові комутатори, моделювання.

Дослідження електричної енергії, а також розвиток напівпровідникової техніки дозволяють використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшої від частоти змінної напруги промислової мережі. Розвиток напівпровідникової техніки дозволяє використовувати в перетворювальних установках ланку високої частоти з частотою переключення вентилів значно більшої від частоти змінної напруги промислової мережі. В тих випадках, коли за вимогами навантаження необхідно забезпечити його гальванічну розв'язку з енергетичною мережею при багатозонному регулюванні вихідної напруги, в якості проміжних структур доцільно використовувати структури перетворювачів частоти з однократною модуляцією (ПЧ з ОМ). У [1-3] показана доцільність використання структур ПЧ з ОМ в діагностичних комплексах електромеханічних систем для побудови вторинних джерел живлення з різним видом вихідної енергії. У даній роботі проводиться аналіз використання тієї ж структури в якості ланки високої частоти перетворювачів трифазної напруги в постійну напругу при підключенні силових модуляторів (СМ) до фазних проводів енергетичної мережі і широтно-імпульсним регулюванням (ШПР) постійної напруги при восьмизонному керуванні. Таке з'єднання дозволяє покращити форму вхідних струмів перетворювача за рахунок відсутності в них гармонік, які кратні трьом.

Узагальнена структурна схема перетворювача показана на рис. 1. На структурній схемі позначені: СМ<sub>А</sub>, СМ<sub>В</sub>, СМ<sub>С</sub> – силові модулятори відповідних фазних напруг, сукупність яких представляє собою ланку високої частоти перетворювача, ВВ – високочастотний випрямляч, Н – навантаження. Кожний з СМ складається з *N* інверторів випряленої напруги (ІВН), які включені енергетичними входами паралельно і навантажені на узгоджувальні трансформатори (ТВ), з'єднані вторинними обмотками послідовно.

При складанні математичної моделі перетворювача з комп'ютерною орієнтацією її застосування використовуємо метод багатопараметричних модулюючих функцій [2], який передбачає попереднє представлення алгоритмічного рівняння перетворювача. При цьому приймемо такі припущення: вхідна енергетична мережа симетрична і її внутрішній опір дорівнює нулю, транзистори і діоди ІВН представляються ідеальними ключами, узгоджувальні трансформатори в кожній з зон регулювання вихідної не мають втрат, а навантаження перетворювача має еквівалентний активно-індуктивний характер.



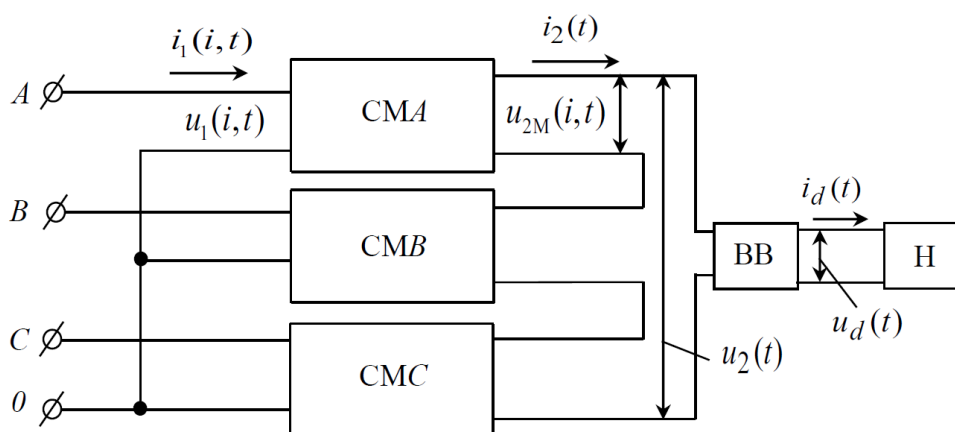


Рисунок 1 – Структурна схема перетворювача

Така структура дозволяє реалізувати багатоканальний спосіб перетворення параметрів електромагнітної енергії мережі, при якому в СМ здійснюється розгалужена модуляція миттєвих значень фазних напруг трифазної енергетичної мережі, частоти  $\omega_1$ , відповідними еквівалентними модулюючими впливами  $\psi(\alpha_p, t)$ , частоти  $\omega_2$ . В результаті такої операції на виході кожного з ІВН формується промодульована напруга

$$u_{2M}(p, i, t) = \frac{1}{k_T} u_1(i, t) \phi(i, t) \psi(\alpha_p, t), \quad (1)$$

де:  $i = 1, 2, 3$  – номери фазних напруг енергетичної мережі, відповідно  $A, B, C$ ;  $k_T$  – коефіцієнти трансформації узгоджувального трансформатора;  $p = 1, 2, 3, \dots, n$  – номер зони регулювання вихідної напруги, збігається з номером інвертора СМ;  $\phi(i, t)$  – функції прямокутних синусів, які співпадають за положенням в часовій області з відповідними фазних напругами мережі:

$$\phi(i, t) = \text{sign} \left\{ \sin \left( \omega_1 t - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right) \right\}; \quad (2)$$

де:  $u_1(i, t)$  – миттєві значення фазних напруг енергетичної мережі:

$$u_1(i, t) = U_{1m} \sin \left( \omega_1 t - \frac{(i-1)2\pi}{3} \right); \quad (3)$$

$U_{1m}$  – амплітудне значення фазної напруги.

Еквівалентні модулюючі впливи подамо виразом

$$\psi(\alpha_p, t) = \frac{1}{2} \sum_2 \text{sign}(\sin(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \varphi)) , \quad (4)$$

де  $\alpha_p(t)$  – кути управління, за рахунок зміни яких забезпечується ШПР вихідної напруги перетворювача;  $\varphi$  – початкова фаза еквівалентних модулюючих впливів.

При багатозонному регулюванні вихідної напруги перетворювача забезпечується по чергово зміна кутів управління в діапазоні від 0 до 90°. Умови зміни кутів управління у окремих зонах подамо у вигляді:

$\alpha_p(t) = 0$ , якщо  $t < \frac{(p-1)T}{N=20}$ ;  $\alpha_p(t) = 180^\circ$ , якщо  $t > \frac{pT}{N=20}$ , а інакше  $\alpha_p(t) = f_\mu(p, 20, t)$ , де  $f_\mu(p, 20, t)$  – функція, яка задає закон зміни  $\alpha_p(t)$ , яка залежить від номера зони  $p$  і їх кількості

Вихідну напругу  $u_2(t)$  ланки високої частоти перетворювача, згідно з його структурною організацією і з виразом (1), запишемо сумою

$$u_2(t) = \sum_{p=1}^{N=8} \sum_{i=1}^3 \frac{1}{k_\delta} u_1(i, t) \phi(i, t) \psi(\alpha_p, t), \quad (5)$$

а вихідну напругу перетворювача  $u_d(t)$  як випрямлену напругу (6) подамо виразом

$$u_d(t) = \sum_{p=1}^{N=8} \sum_{i=1}^3 \frac{1}{k_\delta} u_1(i, t) \phi(i, t) \psi(\alpha_p, t) v(t), \quad (6)$$

де:  $v(t)$  – функція прямокутного синуса, що співпадає за часом з положенням вихідної напруги  $u_2(t)$  ланки високої частоти перетворювача

$$v(t) = \text{sign}(u_2(t)). \quad (7)$$

Часові діаграми вихідних напруг ІВН  $u_{2M}(p, i, t)$ , ланки високої частоти  $u_2(t)$  і перетворювача  $u_d(t)$ , побудовані за (5) і (6) при зміні величини кута управління  $\alpha_p$  по лінійному закону в координатах від часу  $t$ , подані на рис. 3.

Для більш детального аналізу вихідної напруги перетворювача в (5) позначимо  $u_1(i, t) \phi(i, t) = |u_1(i, t)|$  і, враховуючи (3) та (4), а також те, що в (6)  $\psi(\alpha_p, t) v(t) = |\psi(\alpha_p, t)|$ , алгоритмічне рівняння переписемо у вигляді

$$u_d(t) = \frac{1}{2k_T} \sum_{p=1}^{N=8} \left( \sum_{i=1}^3 |U_{1m} \sin(\omega_1 t - \frac{(i-1)2\pi}{3})| \left| \sum_2 \sin n(\omega_2 t \pm \alpha_p(t) - \varphi) \right| \right). \quad (8)$$

Струм навантаження знайдемо, як реакцію одноконтурного  $RL$ -ланцюга на дію напруги (6). Для цього диференціальне рівняння, складене для вихідного контуру перетворювача, представимо в виді

$$D(t, y) = \frac{u_d(t)}{L} - \frac{R}{L} y_0, \quad (9)$$

де:  $y_0$  – визначається з початкових умов;  $R$  і  $L$  – відповідно активний опір і індуктивність навантаження.

Рішення (9) відносно струму навантаження визначимо числовим методом у вигляді матриці

$$i_d(t) = \text{rkfixed}(y, 0, k, s, D), \quad (10)$$

де:  $y$  – вектор початкових умов;  $0, k$  – часовий інтервал рішення;  $s$  – кількість точок на часовому інтервалі рішення;  $D$  – вектор функція диференціальних рівнянь.

Часові діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача і вихідного струму ланки високої частоти для восьмизонного регулювання представлені на рис. 2.

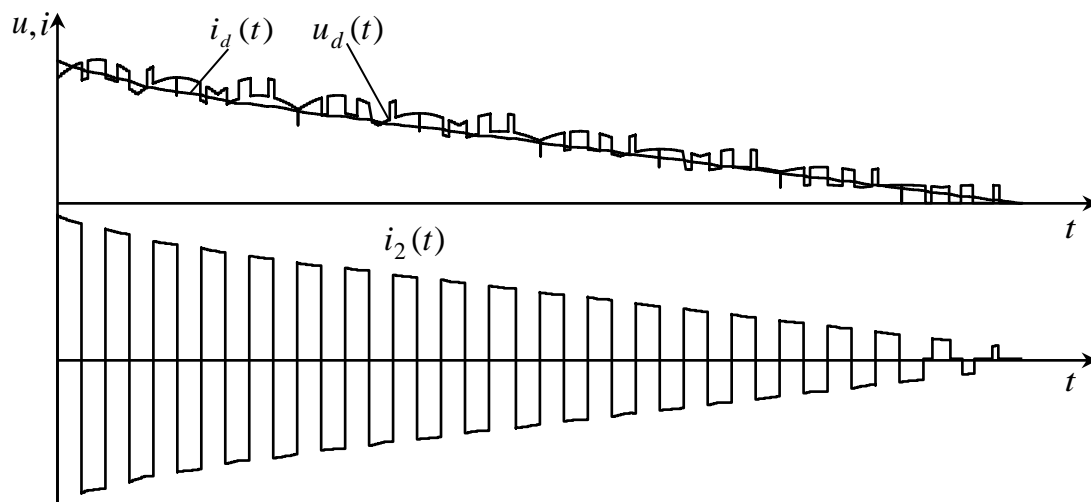


Рисунок 2 – Часові діаграми струму навантаження в координатах вихідної напруги перетворювача і вихідного струму ланки високої частоти

Враховуючи ту обставину, що на інтервалах нульових пауз (7) струм навантаження підтримується в контурі навантаження і діодів ВВ за рахунок енергії, яка запасається в індуктивності за попередні цикли роботи перетворювача і з енергетичної мережі не споживається, то для визначення вихідного струму  $i_2(t)$  ланки високої частоти достатньо (10) перемножити на функцію (7), що має одиничну амплітуду і співпадає за часом з (6). Тоді

$$i_2(t) = i_d(t)v(t) \quad (11)$$

Для визначення вхідних струмів інверторів кожної  $p$ -ї зони регулювання врахуємо, що  $i_2(t)$  протікає в загальному контурі всіх СМ, утвореному послідовно з'єднаними вторинними обмотками узгоджувальних трансформаторів і прийемо до уваги алгоритмічне рівняння (6) і те, що (2), (4) і (7) є функціями одиничної амплітуди.

При цьому у загальному виді

$$i_1(n, i, t) = \frac{i_2(t)\psi(\alpha_p, t)\phi(i, t)}{k_T} \quad (12)$$

Для визначення вхідних СМ у всьому діапазоні регулювання вихідної напруги підсумуємо вхідні струми відповідних ІВН. Враховуючи (12), загальний вираз для вхідних струмів СМ подамо у вигляді

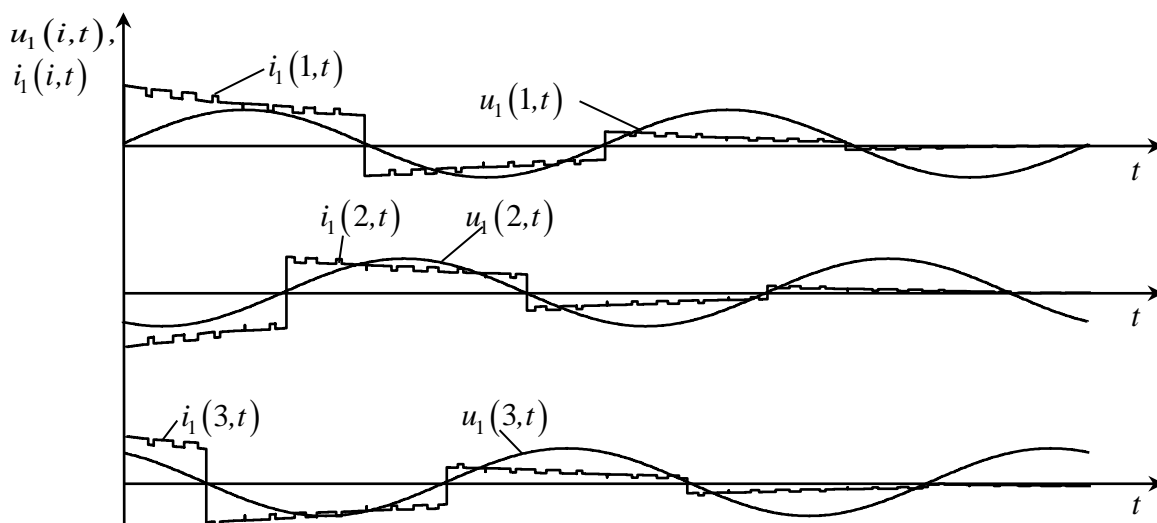
$$i_1(i, t) = \sum_{p=1}^{N=8} i_1(p, i, t), \quad (13)$$

де:  $i_1(p, i, t)$  – вхідні струми ІВН.

Часові діаграми вхідних струмів  $i$ -х фаз енергетичної мережі в координатах фазних напруг, побудовані за (13), представлені на рис. 3.

Таким чином, приведені результати досліджень показують ефективність подання математичної моделі перетворювача відносно напруги навантаження, струму навантаження і струмів, що споживаються з вхідної мережі узагальнюючими функціями багатопараметричного виду. Узагальнюючі функції багатопараметричного виду ефективні і для інших перетворювачів модуляційного типу.

Дослідження показують ефективність використання багатопараметричних модулюючих функцій для моделювання і розрахунку електромагнітних процесів у розгалужених електричних колах напівпровідникових перетворювачів з багатозонним високочастотним широтнопіпульсним регулюванням їхньої вихідної напруги при живленні RL-навантаження.

Рисунок 3– Часові діаграми вхідних струмів та напруг  $i$ -х фаз енергетичної мережі**Висновок**

В результаті досліджень можна зробити висновок, що доцільно використовувати програмний пакет MATHCAD для аналізу електромагнітних процесів та оптимізації параметрів напівпровідникових перетворювачів. Такий підхід дозволяє зменшити нестабільність режимів у технологічному навантаженні та режимів споживання електроенергії від мережі електроживлення.

**Список використаної літератури**

[1] Макаренко М.П. Аналіз електромагнітних процесів у перетворювачах з багатозонним регулюванням вихідної напруги функціями багатопараметричного виду / М.П. Макаренко, В.В. Михайленко // Технічна електродинаміка. Силова електроніка та енергоефективність - Тематичний випуск - 2002. - Ч.1. - С.19-22.

[2] Макаренко М.П. Напівпровідникові перетворювачі електромеханічних комплексів з покращеною електромагнітною сумісністю / М.П. Макаренко, В.В. Михайленко, А.А. Щерба, М.М. Юрченко // Вестник НТУ "Харьковский политехнический институт". "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". – 2003.– Вып. 13. – Т. 2 – С. 213–214.

[3] Михайленко В.В. Математична модель напівпровідникового перетворювача трифазної напруги у постійну з трizonним регулюванням вихідної напруги / В.В. Михайленко, В.В. Андрійчук, Я.В. Романчук // Доповіді за матер. МНТК "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". – Київ: Політехніка. – 2011. – С. 417–418.

V. Mihaylenko, Cand. Sc. (Eng), Assoc. Prof., ORCID 0000-0002-0973-4612

Y. Chunya, assistant teacher, ORCID 0000-0002-4506-912X

O. Charnyak, student

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

**STUDY OF CONVERTER WITH TWENTY ZONE REGULATION VOLTAGE**

*Analysis of the electromagnetic processes is organized beside this article in electric circuit with semiconductor commutator. Mathematical model is created for analysis electro-magnetic processes in semiconductor converter with width pulsed regulation of the output voltage. The brought graphs, which reflect the electromagnetic processes in electric circuit. Method much parametric functions was used when performing calculation. The mathematical model of the converter is created for twenty zoned regulations of the output voltage. Article is devoted to the development of a method of multi-parametric modulating functions by means of working out of new mathematical models and definition of functions and the algorithmic equations for the analysis on subsystem components of electromagnetic processes in electric circuits of variable structure with sinusoidal, direct and pulsing voltage. Introduction of functions with discrete parameters in the algorithmic equations for analysis of processes in circuits with semiconductor commutators simplifies modeling on subsystem components. The mathematical model of steady-state processes and transients in electric circuits of semiconductor converters of*

modulation type with multi-channel zonal use of phase and line voltages of a three-phase network of power supplies is developed. The mathematical model of electric circuits of thyristor shapers of electro-discharge pulses for the analysis and the matching of capacitors charging modes with decrease several times of electric resistance of technological load is also created. The obtained results have a great value for development theoretical electrical engineering in a direction of simplification of calculations of electromagnetic processes in electric circuits with semi-conductor converters of the electric power. The Electromagnetic processes in electric circuit under width-pulse regulation possible to analyse with use the algorithmic equations multivariable function, which argument are a system parameters semiconductor commutator, signal of control, phases to network of the power supply and time. Introduction multivariable function with discrete parameter in algorithmic equations of the analysis formed and connecting processes in electric circuit of the variable structure allows to reflect change of this structure under system components, simplifying modeling and analysis of such processes to account of the generalization of the got equations. Except specified correlations and diagrams designed model allows to analyse forms of the output voltages and current of the separate power modules.

**Keywords:** electromagnetic processes, output voltage and current, multi parametric modulating functions, semi-conductor commutators , modeling.

#### References

[1] Makarenko M.P. The Analysis of the electromagnetic processes in converter with much zoned regulations of the output voltage function multivariable type/ M.P. Makarenko, V.V. Mihaylenko // *Technicheskaia electrodinamika. Silova elektronika i energoefektivnist - Thematic vypusk.* - 2002. – Part 1. – P. 19-22 (Ukr.)

[2] Makarenko M.P. Semiconductor converters electromechanic complex with perfected by electric magnetic joining / M.P. Makarenko, V.V. Mihaylenko, A.A. Scherba, N.N. Yurchenko // *Vesnik NTU "Kharkovskiy politehnic institute". "Problemes avtomatic electroprivoda. Theory and practice".* – 2003.– Issue 13. – Part 2 – P. 213–214 (Ukr.)

[3] Mihaylenko V.V. Mathematical model of the semiconductor converter of the three-phase voltage in constant with three zoned regulations of the output voltage / V.V. Mihaylenko, V.V. Andriychuk, Y.V. Romanchuk // *Dopovidi za materialamy MNTK "Suchasni prolems electroenergetyki and avtomatic".* – Kyjv: Polytechnica. – 2011. – P. 417–418 (Ukr.).

**В.В. Михайленко**, канд. техн. наук, доц., ORCID 0000-0002-0973-4612

**Ю.М. Чуняк**, ассистент, ORCID 0000-0002-4506-912X

**О.С. Чарняк**, студентка

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ВОСЬМИЗОННЫМ РЕГУЛИВАНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

В статье проведен анализ электромагнитных процессов в электрических цепях с полупроводниковыми коммутаторами. Создана математическая модель для анализа электромагнитных процессов в полупроводниковых преобразователях с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения. Приведены графики, которые отражают электромагнитные процессы в электрических цепях. При выполнении расчетов использовался метод многопараметрических функций. Математическая модель преобразователя создана для восьмизонного регулирования выходного напряжения. Полупроводниковые коммутаторы могут осуществлять высокочастотное изменение структуры электрических цепей и широтно-импульсную модуляцию фазных и линейных напряжений трехфазной сети электропитания, реализуя регулирование выходных напряжений полупроводниковых преобразователей параметров электрической энергии.

**Ключевые слова:** электромагнитные процессы, выходные напряжение и ток, структура, многопараметрические модулирующие функции, полупроводниковые коммутаторы, моделирование.

Надійшла 01.01.2018

Received 01.01.2018

## ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ В ЕНЕРГЕТИЦІ ENVIRONMENTAL PROBLEMS IN ENERGY

УДК 621.6.039

В.П. Розен, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-0440-4251

С.В. Дяченко, магістр

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### МЕТОДИ ТА УСТАНОВКИ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ВОДОПАЛИВНИХ ЕМУЛЬСІЙ ЯК АЛЬТЕРНАТИВА ТРАДИЦІЙНИМ ПАЛИВАМ

*В статті розглянуто питання використання водопаливної емульсії (ВПЕ) як альтернативного палива для середньо- та малооборотних дизельних двигунів. Встановлено, що найбільш токсичними компонентами, які впливають на довкілля в процесі роботи дизельного двигуна, є оксиди азоту, вуглецю, вуглеводні та тверді частки сажі. Ефективним шляхом вирішення проблеми захисту довкілля є застосування водопаливної емульсії, оскільки її використання не вимагає конструктивних змін двигуна. Також визначено основні методи підготовки водопаливних емульсій та установок, в яких створюється емульсія, їх переваги та недоліки. Для аналізу характеристик установок використано діаграми Ісікави. Виділено перспективні системи створення емульсованих палив.*

**Ключові слова:** водопаливна емульсія, гомогенізатор, диспергатор, дизельний двигун, паливо.

#### Вступ

В останні роки перед судновласниками гостро постала проблема зростання цін на бункерувальне паливо. У зв'язку з цим багато компаній-судновласників знову стали розглядати питання застосування на судах більш дешевих важких сортів палива, альтернативних дорогим легким сортам. Сформована ситуація посилюється ще й тим, що якість судових важких палив в цілому погіршується, з огляду на те, що нафтопереробні заводи (НПЗ) прагнуть до підвищення вироблення з нафти легких фракцій.

Одночасно зі зростанням цін і зниженням якості палива посилюються вимоги до рівня викидів шкідливих речовин з відпрацьованими газами судових дизелів. У липні 2010р. вступила в силу нова редакція Програми VI Міжнародної конвенції щодо запобігання забрудненню із суден (MARPOL 73/78), яка передбачає більш жорсткі вимоги до суден.

Одною з основних задач під час експлуатації двигунів внутрішнього згоряння є енергозбереження та екологічний вплив на довкілля. Робота дизельного пального викликає ряд проблем пов'язаних з роботою двигуна та викидами токсичних речовин у повітря. З ситуації яка, склалась на сьогоднішній день, можна сказати що є сенс розглядати альтернативні види палива для подальшого їх використання з дизельними двигунами.

#### Мета

Підвищення рівня ефективності роботи дизельного двигуна та зниження вмісту токсичних компонентів відпрацьованих газів дизельного двигуна, шляхом аналізу проблеми використання важких сортів дизельного палива визначення способів та методів підготовки водопаливної емульсії, огляд установок з різними фізичними методами створення емульсій, застосування діаграм Ісікави для їх порівняння та визначення перспективних агрегатів для подальшої роботи з ними.

#### Матеріал і результати досліджень

В роботі [1] аналіз відпрацьованих газів показав, що найбільш токсичними компонентами, які потрапляють в навколишнє середовище під час роботи дизельного двигуна, є: оксиди азоту NO<sub>x</sub>, вуглецю CO<sub>x</sub>, вуглеводні HC, тверді частки сажі.

Робота дизельного пального викликає ряд проблем, пов'язаних з погіршенням процесів змішування та згоряння, підвищенням рівня теплової напруженості, збільшенням лакофарбових відкладень і нагару на деталях циліндро-поршнєвої групи (ЦПГ), підвищенням зносу ЦПГ, скороченням терміну експлуатації мастил.

Одним з ефективних шляхів вирішення даних проблем є застосування водопаливних емульсій, використання яких не вимагає конструктивних змін двигуна, але потребує модернізації паливної системи, що вимагає деяких капіталовкладень.

Водопаливні емульсії представляють собою дисперсну систему, що складається з дрібних крапель рідини (дисперсної фази), розподілених в іншій рідині (дисперсійній). Розрізняють прямі емульсії типу

«масло в воді», з краплями неполярної рідини (наприклад, палива в полярному водяному середовищі) і зворотні типу «вода в маслі».

У дизелях застосовуються емульсії зворотного типу, які виключають контакт металевих поверхонь паливної апаратури і стінок трубопроводів з водою.

Згідно з [2] зміна характеру роботи дизельного двигуна, підвищення його техніко-економічних властивостей під час роботи на ВПЕ обумовлюється фізико-хімічними властивостями паливної емульсії. Різниця компонентів емульсії, нафтового палива і води, відбиваються в першу чергу на процесах розпилю палива, його випаровування та сумішоутворення. Висока випаровуваність води, висока температура випаровування дають можливість реалізації робочого процесу з більшою гомогенністю повітряно-паливної суміші. Тобто приблизити даний процес до того, який називається – НССІ-процесом (*Homogeneous Charge Compression Ignition*).

В дослідженнях [3] при використанні ВПЕ виготовлених гідродинамічним шляхом на основі дизельного палива марки ДТ, на дизелях 2Ч8,5/11 і 8ЧНР32/48 підтверджена можливість економії палива на 3-5%, але виявлено швидше зношування поверхонь, на яких відбувається тертя. Зношування обумовлено тим, що вода має високі змочувальні властивості і добре сорбується металом, що погіршує змащування деталей паливом. Але у разі використання деяких ПАВ як присадок для ВТЕ, які мають властивість витіснити воду, допомагають відновити нормальній режим тертя.

Також під час проведення дослідів на дизельному двигуні Sulzer 4RLB76 було отримано залежності  $P$ ,  $T$ ,  $S_{NOx}$ , від навантаження у разі роботи на ВПЕ з 20% відсотковим вмістом води, загальні показники двигуна покращились (рис. 1).

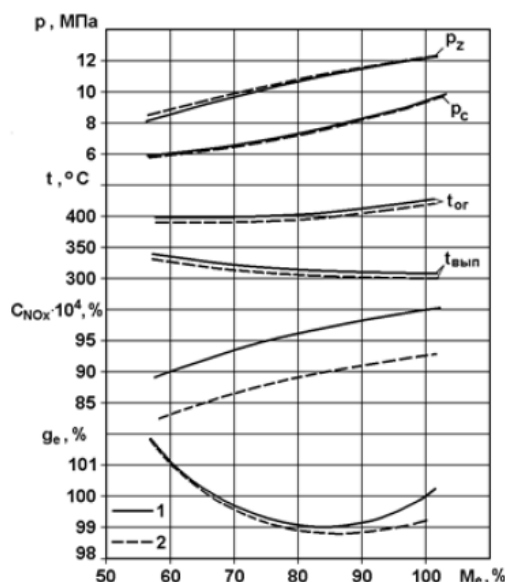


Рисунок 1 – Залежності параметрів двигуна при використанні:  
1 – звичайного палива; 2 – водопаливної емульсії

Слід додати, що згідно досліджень, використання різних систем приготування ВПЕ не впливає значною мірою на параметри дизельного двигуна.

### Способи отримання ВПЕ

Перший спосіб полягає в тому, що буде використовуватись приготована раніше емульсія, яка буде заливатися в бак замість класичного палива. Даний варіант буде доволі простим, оскільки потребує мінімальної модернізації існуючої паливної системи. Але з іншої сторони, ВПЕ не є дуже стабільними, у них доволі високі температури застигання, а також емульсії мають свій період релаксації, який найчастіше без додавання емульгаторів – хімічні поверхнево-активні сполуки – є досить коротким.

Другий спосіб полягає в приготуванні паливної емульсії на борту автомобіля або судна, прямо перед впуском її до циліндру. Ця система потребує досить серйозного втручання до паливної системи, що робить її складнішою для ремонту, але під час приготування емульсії на борту, наприклад прямо перед насосом високого тиску і подальшого впуску її до циліндра, є більш раціональним. Також це аргументується створенням досить великої кількості різноманітних диспергаторів.

Можна виділити три методи отримання ВПЕ (рис. 2):



Рисунок 2 – основні методи отримання водопаливних емульсій

- під хімічним методом мається на увазі використання поверхнево активних речовини – емульгаторів, які бувають 2х типів: водорозчинні (гідрофільні) та жиророзчинні (гідрофобні). Перший тип використовується для отримання емульсій типу «масло у воді» (прямі емульсії), другий тип використовується для створення емульсій «вода в маслі» (зворотні емульсії).

- фізичний метод полягає у використанні обладнання для створення водопаливної емульсії шляхом перемішування або перебування палива з водою, щоб в результаті утворилась зворотна емульсія з оптимальним розміром крапель води, яка знаходиться в вільному стані серед молекул вуглецевого палива. Найчастіше це: механічний вплив на воду з паливом, електричний, конденсація парових фаз.

- самоемульсування – цей метод передбачає емульгування нафтового палива в лужну воду за рахунок фізико-хімічних властивостей даних речовин, без зовнішнього впливу на них.

**Установки для отримання водопаливної емульсії**

Існує ряд способів отримати ВПЕ, не використовуючи хімічних засобів. Розглянемо технології та агрегати, при використанні яких емульсія створюється за рахунок механічного впливу на воду та вуглецеве паливо (рис.3).

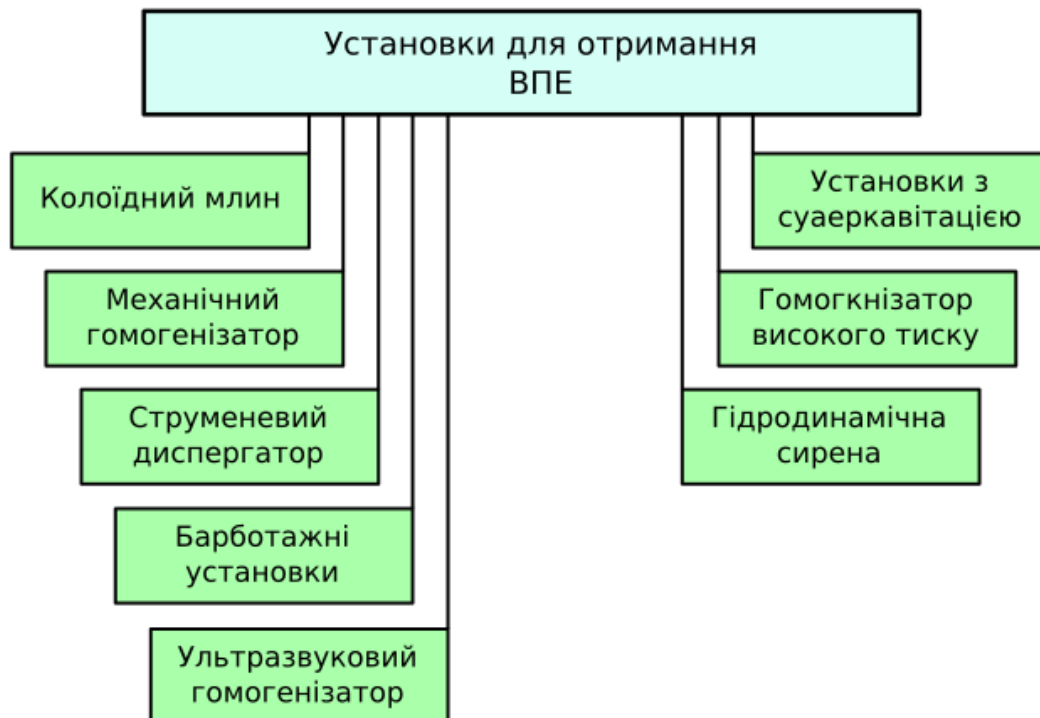


Рисунок 3 - класифікація установок для підготовки водопаливних емульсій

Установки для підготовки ВПЕ:



1. Колоїдний млин – процес диспергування частинок водної фази, залишкових фракцій нафтопереробки в змішувачах роторного типу здійснюється в каналах між обертовим ротором і статором. Зазвичай, між поверхнями ротора і статора встановлюється зазор у межах до 1 мм. Для забезпечення роботи роторного змішувача в режимі приготування емульсованого палива в його об'єм окремим насосом подають мазут і воду. Об'єднаний потік змішаних компонентів від насоса через радіальні канали ротора надходить в кільцевий канал між статором і ротором [4];

2. Механічні гомогенізатори – ножовий перемішувачий пристрій. Швидкості ножів механічних гомогенізаторів можуть варіюватися від декількох десятків обертів за хвилину (наприклад, фрізери) до десятків тисяч обертів за хвилину (наприклад, лабораторні гомогенізатори біологічних проб);

3. Струменеві диспергатори – вода і паливо перемішуються за рахунок зіткнення струменів речовин під тиском декілька разів (проходженням через секції диспергатора) [5];

4. Барботажні установки перемішують паливо з водою шляхом пропускання через рідини пари або газу. Газ продавлюється через шар рідини за допомогою труб з дрібними отворами (3-6 мм), сітчатих або ковпачкових тарілок абсорберів і ректифікаційних колон. При барботуванні створюється велика міжфазна поверхня на межі рідина - газ, що сприяє інтенсифікації тепло- і масообмінних процесів [6];

5. Ультразвукові гомогенізатори – перемішування відбувається за рахунок кавітації, яка створюється за рахунок проходження рідин через ультразвукове поле високої інтенсивності [7];

6. Пристрої з принципом суперкавітації – перемішування відбувається за рахунок схлопування каверн, які створюються на певній відстані від кавітатора (статичного або динамічного) [8];

7. Гідродинамічні сирени – це установки роторного типу, суть технологічного процесу яких обумовлюється в багатофакторним впливом на оброблюване рідке гетерогенне середовище і полягає в пульсаціях тиску та швидкості потоку рідини, розвиненої турбулентності, інтенсивної кавітації, пульсації в локальних об'ємах при пульсації та схлопуванні кавітаційних бульбашок (каверн), жорсткому кумулятивному впливі, високих зсувних і зрізаючих зусиллях, активації рідини [9];

8. Гомогенізатори високого тиску – принцип роботи даної установки полягає в продавлюванні речовини, яка гомогенізується, через отвір, діаметр якого регулюються. Основними показниками є тиск та продуктивність при роботі [10].

Основним показником роботи установок для отримання ВПЕ є дисперсність крапель води в паливі, тобто розмір крапель (рис.4):

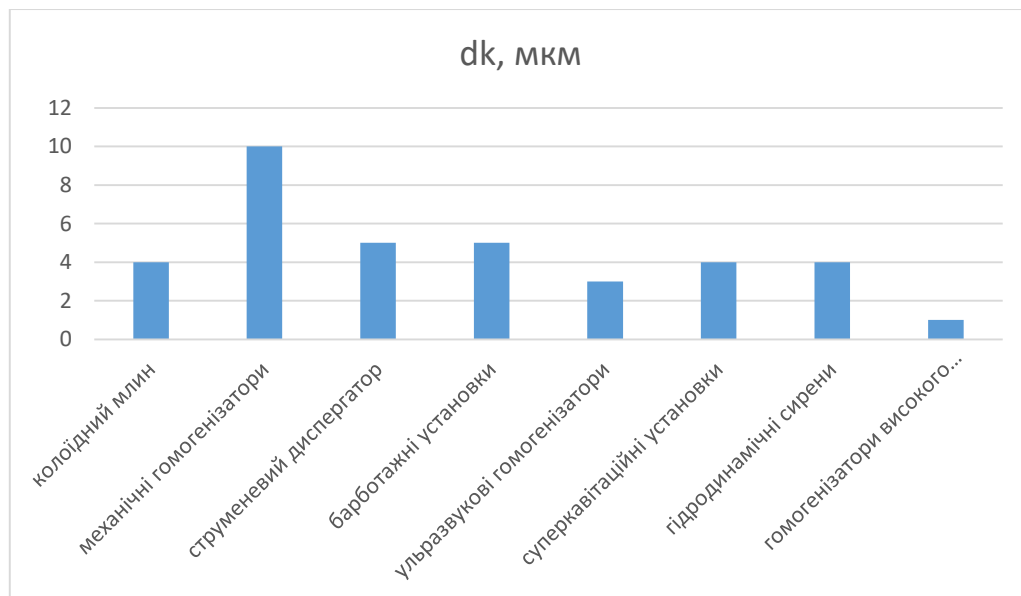
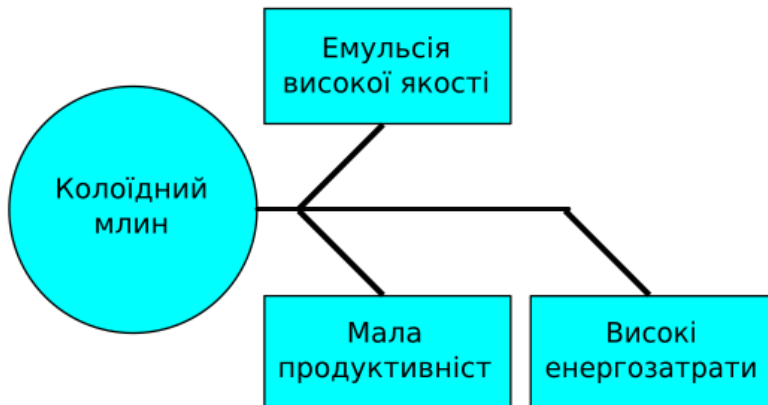


Рисунок 4 – порівняння дисперсності крапель води в емульсіях підготовлених в різних установках

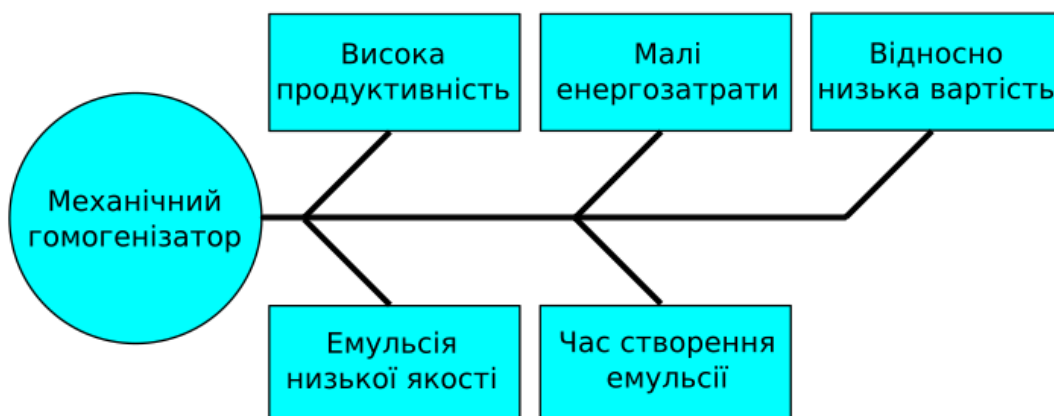
З рисунку 4 можна побачити, що найкращу дисперсність,  $dk \leq 5$  мкм, мають п'ять установок, а саме: колоїдний млин, ультразвуковий гомогенізатор, установки з суперкавітацією, гідродинамічні сирени та гомогенізатори високого тиску. Але щоб виділити найефективніші, треба розглянути переваги та недоліки даних агрегатів див. рис. 5.

Основні переваги та недоліки установок

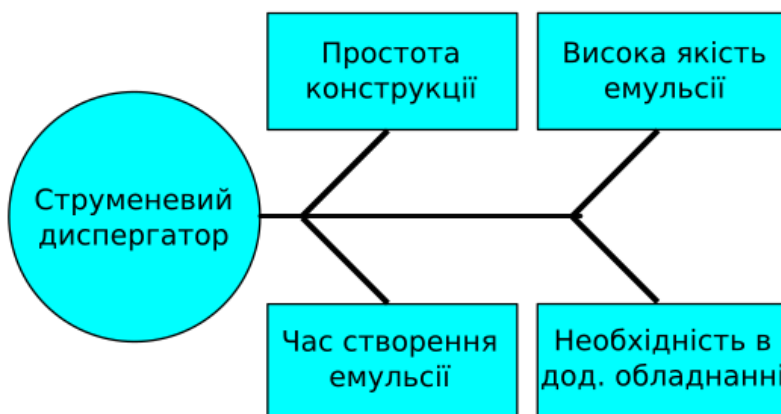
а)

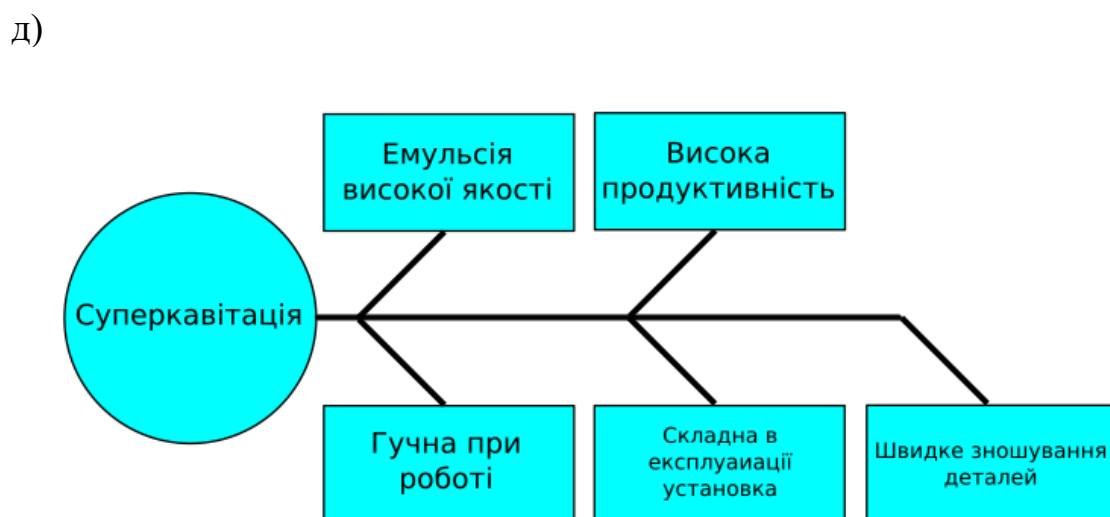
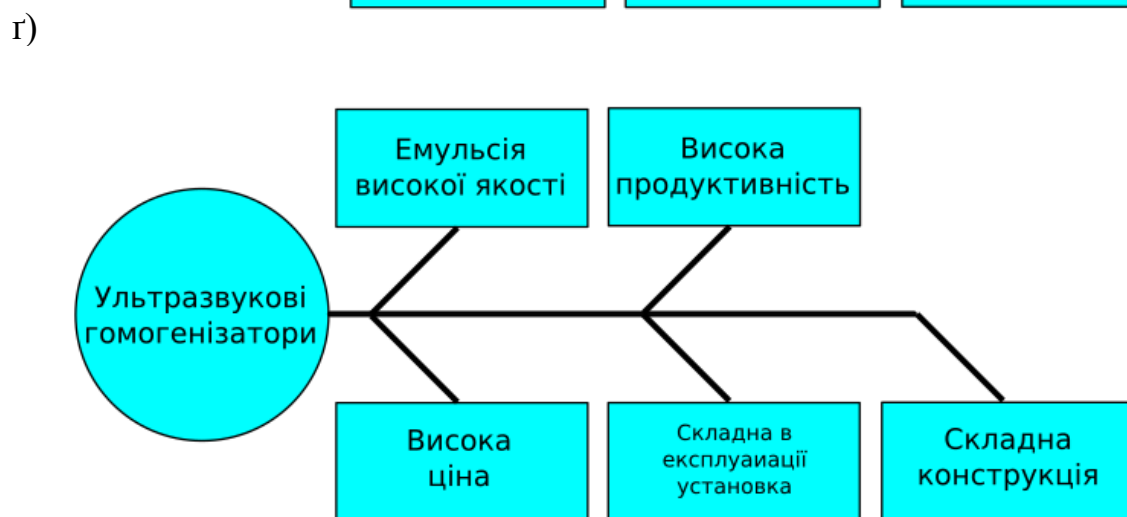
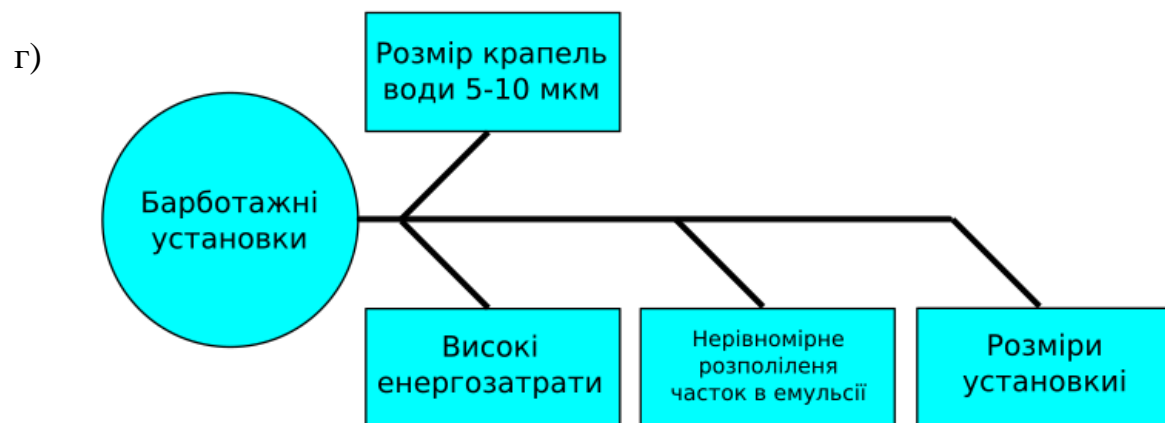


б)



в)





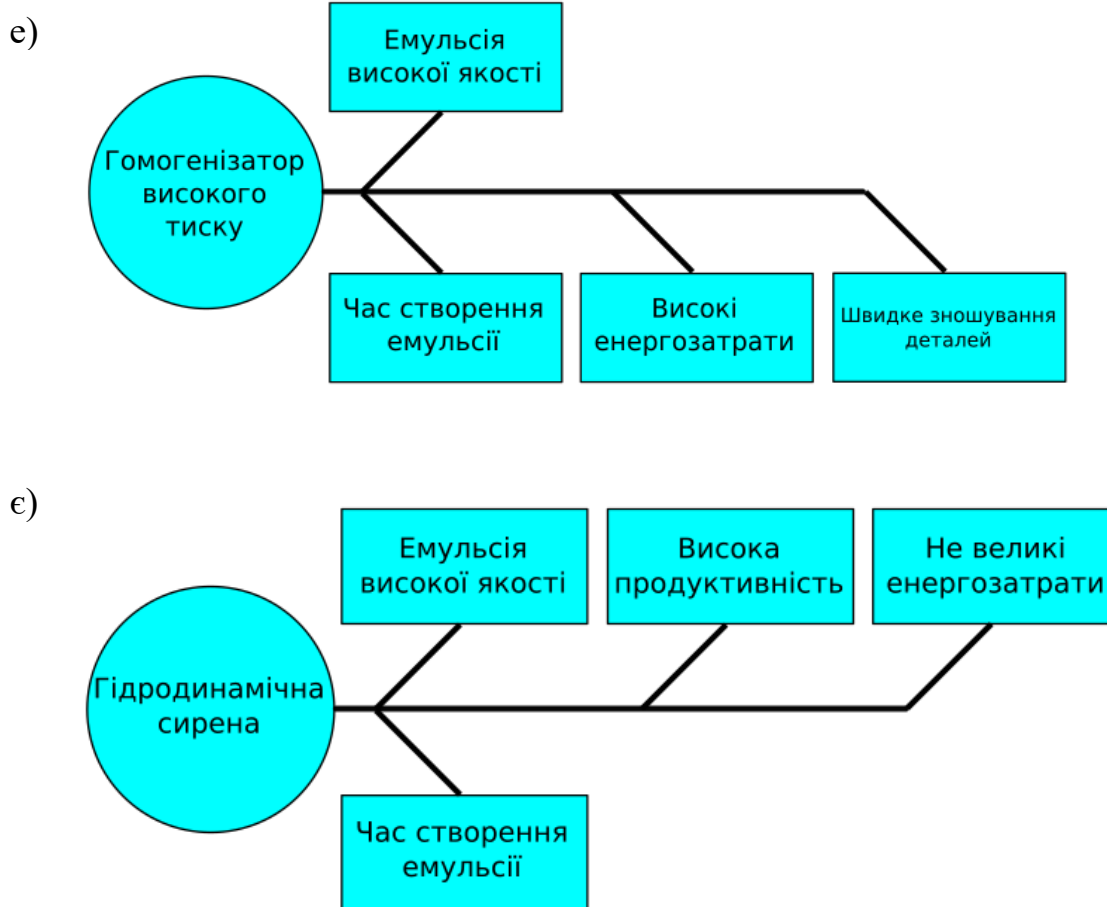


Рисунок 5 – основні переваги та недоліки установок для створення ВПЕ:

- а) Колоїдний млин; б) Механічний гомогенізатор в) Струменевий диспергатор;  
 г) Барботажна установка; г) Ультразвуковий гомогенізатор; д) Установки з суперкавітацією; е) Гідродинамічні сирени; е) Гомогенізатор високого тиску.

На рисунку 5 приведено основні якості установок для підготовки емульсованого палива, з яких можна виділити декілька найефективніших та найперспективніших. На приклад: ультразвукові гомогенізатори, установки з суперкавітацією та гідродинамічні сирени.

**Висновок:**

Згідно досліджень можна сказати, що використання водопаливних емульсій як альтернативного палива є досить перспективним шляхом зменшення екологічного впливу дизелів на навколишнє середовище та економії вихідного палива. Виділено основні методи приготування ВПЕ і визначено, що емульсію вигідніше підготовлювати на борту. Також розглянути основні установки для отримання емульгованого палива, порівняно їх показники дисперсності крапель води після приготування емульсії, розглянуто основні переваги та недоліки. Можна виділити найперспективніші установки для приготування емульсій: ультразвуковий гомогенізатор, установки з принципом суперкавітації та гідродинамічні сирени.

**Список використаної літератури**

1. Патров Ф.В., Вахромеев О.С. Использование водотопливной эмульсии при эксплуатации судовых ДВС / Ф.В. Патров, О.С. Вахромеев // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. -2009. -№1. -С. 121-127
2. Шумковский В.А. Улучшение показателей транспортного дизеля путем улучшения показателей распыления и смесеобразования [Текст]: Автореферат / В.А. Шумковский. – М., МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, -С. 16
3. Данилов А.М. Противоизносные свойства водно-топливных эмульсий для судовых дизельных двигателей / А.М. Данилов, А.А. Селягина, К.Б. Карякин и др. // Химия и технология топлив и масел. - 1987. -№ 7. -С. 18-20.

4. Физическая и коллоидная химия. 1980: Коллоидная мельница // Справочник химика 21 URL:<http://chem21.info/info/6083/>
5. Струйный диспергатор. Патент на полезную модель № 2143539 // Карпов В.М., Кириллов Г.А.
6. Барботаж перемешивания жидкости // Справочник химика 21 URL:<http://chem21.info/info/969659/>
7. Ультразвуковой гомогенизатор для эмульсирования водопаливной эмульсии в реальном времени. Патент на полезную модель US0079344774B2 // Ерик Вильям Коттел
8. Савченко Ю. Н. Нестационарные процессы при суперкавитационном движении тел / Ю. Н. Савченко, В. Н. Семенов, С. И. Путилин // Прикладная гидромеханика. -1999. -Т. 1 (73) № 1. -С. 79—97.
9. Калинин Д.В., Чернов М.А., Постникова И.В. Высокоэффективные машины роторного типа с развитой кавитацией / Д.В. Калинин, М.А. Чернов, И.В. Постникова // Современные наукоемкие технологии. -№3(39). -2014
10. Гомогенизатор высокого давления. Патент на полезную модель №2621773 // Боттиони Микеле, Бенасси Массимильяно

V. Rozen, Dr. Sc. Sciences, prof., ORCID 0000-0002-0440-4251

S. Dyachenko, master

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

#### METHODS AND INSTALLATIONS FOR PREPARING OF WATER IN FUEL EMULSIONS AS ALTERNATIVE FOR TRADITIONAL FUELS

*The article considers the use of water in fuel emulsion (WIFE) as an alternative fuel for medium- and low-speed diesel engines. The problem of a rapid increasing of the price for light fuels for marine diesel engines was determined. It was also defined a tightening of the requirements for the level of toxic components in the exhaust gases. It is also, established that in recent years the quality of heavy fuel grades has deteriorated. It is determined that the most toxic components that affect the environment during the operation of the diesel engine are nitrogen oxides, carbon monoxide, hydrocarbons and particulate matter of soot. Effective way to solve the problem of environmental protection is the use of water in fuel emulsion, their use does not require any structural changes in the engine. The basic methods of preparing water-fuel emulsions and installations in which an emulsion is created, their advantages and disadvantages are also had defined, their advantages and disadvantages are also defined. The Isikawa diagrams had used to analyze the characteristics of installations. Promising systems for the creation of emulsified fuels have identified.*

**Keywords:** water in fuel emulsion, homogenizer, dispersator, diesel engine, fuel

#### References

1. F. Patrov, O. Vakhromeev “Use of water-fuel emulsion during operation of marine diesel engines”, Vestnik AGTU, Marine technic and technology, №1, pp. 121-127, 2009
2. V. Shumkovsky Improving the performance of the transport diesel by improving the spraying and mixing rates M.S. thesis, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia, 2016
3. A. Danilov, A. Selyagina, K. Karyakin “Anti-wear properties of water-fuel emulsions for marine diesel engines”, Chemistry and Technology of Fuels and Oils, No 7, pp. 18-20, 1987
4. Chemical Handbook 21, Physical and colloid chemistry, Colloid mill, 1980 [Online]. Available: <http://chem21.info/info/6083/>
5. V. Karпов, G. Kirillov, Струйный диспергатор. RF Patent № 2143539
6. Chemical Handbook 21, Sparging liquid mixing [Online]. Available: <http://chem21.info/info/969659/>
7. Eric William Cottell, REAL TIME IN-LINE HYDROSONIC WATER-IN-FUEL EMULSION APPARATUS, PROCESS AND SYSTEM, U.S. Patent Appl. 0079344774B2, Mar. 20, 2007
8. Yu. Savchenko, V. Semenenko, S. Putilin, Non-stationary processes in supercavitational motion of bodies, Applied hydromechanics. Vol. 1, № 1(73), pp. 79—97, 1999
9. D. Kalinin, M. Chernov, I. Postnikova High-performance rotary-type machines with advanced cavitation, Modern high technology, №3(39), 2014
10. B. Michele, B. Massimigliano, High-pressure homogenizer. RF Patent №2621773

Надійшла 16.03.2018

Received 16.03.2018

## FORECASTING THE STABILITY OF THE SOLID WASTE LANDFILL UNDER ITS CREATION

*The modeling of the sedimentation of the solid domestic waste landfill with the use of the finite element method was carried out with the aim of predicting its stability in the creation and further use as a base of structures. His characteristic feature was accounting of geometrical and physicommechanical parameters of the ground and the soil basis. Using the C# programming language, software has been created to set the dependencies of the polygon sediment on the properties of the underlying soils and on the magnitude of the static load.*

**Key words:** solid waste landfill, mathematical and computer modeling, precipitation, stability.

**Introduction.** Ukraine ranks first in the world in terms of the number of household garbage per capita. Under the landfills of solid waste landfill (SWL) and landfills occupy over 160 thousand hectares of land, and this figure is constantly increasing. In this connection, the issue of sustainability of polygons arises, they exist and are created, since improperly designed and constructed polygons is a source of catastrophic events that not only cost millions of dollars of losses but also lead to huge environmental pollution and even loss of life [8 -18].

Planning is especially important where construction of facilities in or near the landfill is expected. Depending on the planned use of the landfill, it is necessary to consider the following factors: the thickness of the covering layer, the underlying layer, the slope angle of the landfill and the disposal of waste, the degree of compaction, the use of additives and cement to strengthen the landfill, selective disposal of waste. When planning the use of the landfill, account should also be taken of the draft, the characteristics of the underlying soil, the availability and control of the infiltration and landfill gas collection systems and vegetation.

Evaluation of the stability of a landfill is often carried out by predicting the draft at the landfill. The precipitation is caused by many processes, in particular, biodegradation of organic matter, dissolution and oxidation of substances, reorientation of waste in the body of the landfill. Draft is divided into sediment caused by primary (instantaneous) and secondary (long-term) consolidation.

Models describing the sedimentation of the solid waste landfill can be divided into models based on soil mechanics, empirical models and models that take into account biodegradation [1 - 11]. The existing methods for estimating the draft have a number of shortcomings. In particular, a model that includes all the factors and parameters that affect sediment is missing and its development is an important issue. The most common model based on soil mechanics is a model of weak soil with creep Soft Soil Creep (SSC). [12 - 22].

A common feature of the developed models is that they take into account only the municipal solid waste, their behavior and properties, neglecting such an important component of the landfill, as the soil on which it is based. It is from the type of strength, geotechnical properties of this soil that the stability of the landfill depends, since they are the greatest load.

Experimental methods are costly and effective only for specific conditions. For example, the methods of reverse analysis are based on taking into account the properties of already destroyed landfills. In turn, laboratory analyzes do not allow to simulate the natural properties and processes occurring in landfills.

Therefore, studies of stress-deformed state of the soil mass under the landfill, affects the stability with the mechanical and geometrical properties of the landfill and the underlying ground, static and dynamic loads and filtration processes is actual scientific and practical challenge.

**Goal and tasks.** The aim of the work is to predict the sustainability of a solid waste landfill in its creation, taking into account physical, mechanical and geometric parameters. The task is to develop a spatial mathematical model and computer simulation of the consolidation process of the body of the solid waste landfill and the underlying soil.

**Presentation of the main research material.** Numerical modeling of the stressed-deformed state of the solid domestic waste landfill and ground base has been carried out to predict its stability during laying.

To account for the liquid phase of the waste and the underlying soil, Darcy's law is used in the form of the equation of the balance of forces:

$$-\nabla P - \frac{\eta}{K} \vec{u} + \rho \vec{f} = 0, \quad (1)$$

where  $P$  is external pressure;  $\rho$  is the density;  $\eta$  is the dynamic viscosity;  $g$  is acceleration of gravity;  $\vec{u}$  is the filtration rate;  $\vec{f}$  is the field of external forces;  $K = \eta k / \rho g$  is the permeability coefficient characterizing the porous medium's ability to pass fluid.

The complete system of equations for the filtration of an incompressible fluid also includes the incompressibility equations:

$$\operatorname{div} \vec{u} = 0, \quad (2)$$

and the continuity equation:

$$\operatorname{div} \rho \vec{u} = -\rho m, \quad (3)$$

where  $m$  is the porosity of the soil.

It is assumed that the compressibility of the skeleton and the pore fluid is small, which leads to a linear dependence of soil porosity on pressure.

The covering and underlying layers of the soil were described by the Mohr-Coulomb model, in which the complete yield condition consists of six yield surfaces and six plastic potential functions.

The body of the polygon is modeled by a weak soil, taking creep into account, using the Soft Soil Creep (SSC) model [23 – 25]. At present, this model most fully describes such properties of weak soil as stress-dependent stiffness, as well as secondary compression with allowance for creep, in addition, it takes into account both the physical and geometric non-linearity of the process of soil deformation.

Full volumetric deformation  $\varepsilon_v$ , caused by the growth of effective stresses from the initial value  $p_0'$  up to  $p'$  for a period of time  $t_c + t'$ , consists of elastic  $\varepsilon_v^e$  and viscous-plastic  $\varepsilon_v^{vp}$  components. Viscous-plastic component is the total of deformation during consolidation  $\varepsilon_v^{vp}_c$  and after consolidation  $\varepsilon_v^{vp}_{ac}$ . The relationship between the deformations is expressed in the following form:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^{vp}_c + \varepsilon_v^{vp}_{ac}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_v^e = \kappa^* \ln \left( \frac{p'}{p_0'} \right); \quad (5)$$

$$\varepsilon_v^{vp}_c = (\lambda^* - \kappa^*) \ln \left( \frac{p'_{pc}}{p_0'} \right); \quad (6)$$

$$\varepsilon_v^{vp}_{ac} = \mu^* \ln \left( \frac{\tau_c + t'}{\tau_c} \right), \quad (7)$$

where  $\mu^*$  is the modified coefficient of creep;  $\tau_c$  is the time of consolidation, that depends on the geometry of the sample under consideration;  $t'$  is the time elapsed since the beginning of the loading of the landfill;  $\kappa^*$  is the modified coefficient of swelling;  $\lambda^*$  is the modified coefficient of compression;  $t_c$  is the time of completion of primary consolidation;  $p_0'$  is the initial effective stress;  $p'$  is the effective stress;  $p'_{pc}$  is the effective pre-consolidation stress.

The equation for determining the free surface of the filtration flow in the calculation of unstable filtration in the body of a polygon with allowance for infiltration should satisfy the following boundary conditions: 1) the pressure is equal to atmospheric pressure; 2) the normal velocity component on the surface is absent. At the boundaries between the layers of the polygon and the ground base, the conditions for the equality of the normal stress components and the rate of filtration are satisfied.

The initial conditions are: the filtration rate in the layers of the polygon and the underlying soil is zero; Atmospheric pressure acts on the surface, each layer of waste and ground has its own initial physical and mechanical properties, initial geometric parameters of the polygon are specified.

To calculate the coefficients of swelling, compression, consolidation, program software (PS) was created using the C # programming language. As a result of the numerical calculation, strain dependencies were obtained from the stresses under the static load of the body of the solid waste landfill. The parameters of the underlying soils and wastes are presented in Table. 1 and 2 respectively. Layer #1 is the latest layer, layer #10 is the first that lies in the foundation of the polygon

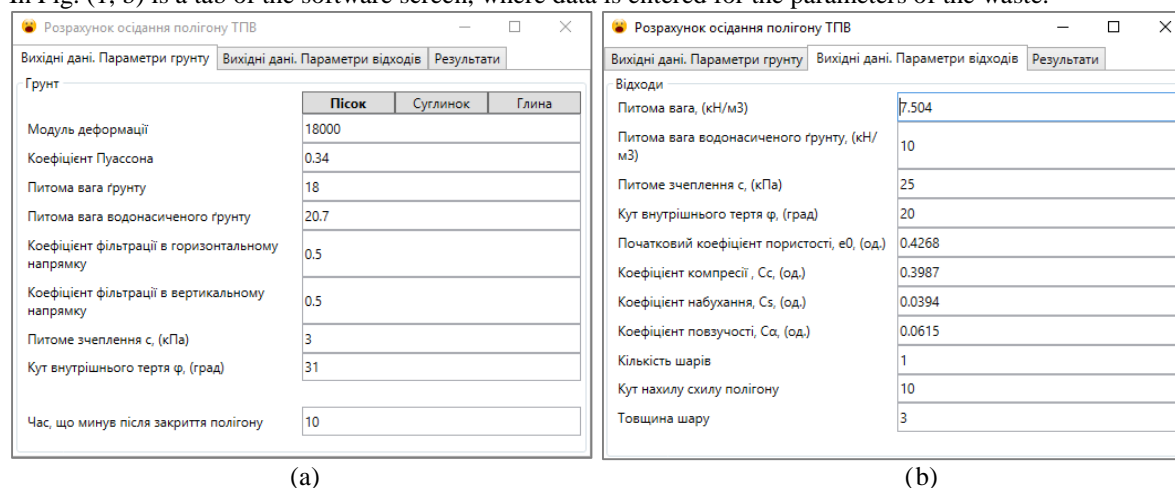
Table 1 - Physical and mechanical parameters of soils

Parameter	Soil		
	Sand	Loam	Clay
Modulus of deformation $E_{ref}$ , (kN/m <sup>3</sup> )	18000	10000	9000
Poisson's Ratio $\nu$ , (unit)	0,34	0,36	0,37
Specific gravity of soil $\gamma_{unsat}$ , (kN/m <sup>3</sup> )	18,0	13	19,0
Specific gravity of water-saturated soil $\gamma_{sat}$ , (kN/m <sup>3</sup> )	20,7	14,6	21,8
Filtration coefficient in horizontal direction $k_x$ , (unit)	0,5	0,006	0,004
Filtration coefficient in vertical direction $k_y$ , (unit)	0,5	0,006	0,004
Modulus of deformation $E$ , (MPa)	50	33	28
Specific cohesion $c$ , (kPa)	3	34	81
The angle of internal friction $\varphi$ , (degree)	31	14	13

Table 2 - Physical and mechanical parameters of the waste products

Parameter	Value
Specific gravity of soil $\gamma_{unsat}$ , (kN/m <sup>3</sup> )	7,504
Specific gravity of water-saturated soil $\gamma_{sat}$ , (kN/m <sup>3</sup> )	10,0
Specific cohesion $c$ , (kPa)	25
The angle of internal friction $\varphi$ , (degree)	20
The initial coefficient of porosity, $e_0$ , (unit)	0,4268
Coefficient of compression, $C_c$ , (unit)	0,3987
Swelling coefficient, $C_s$ , (unit)	0,0394
The coefficient of creep, $C_a$ , (unit):	
Layer #1	0,0615
Layer #2	0,0474
Layer #3	0,0448
Layer #4	0,0429
Layer #5	0,0414
Layer #6	0,0402
Layer #7	0,0391
Layer #8	0,0382
Layer #9	0,0374
Layer #10	0,0367

In Fig. (1, a) shows the main initial screen of the software, where data are entered for further calculation in accordance with the soil parameters. Parameters for sand, loam and clay are set separately in their respective tab. In Fig. (1, b) is a tab of the software screen, where data is entered for the parameters of the waste.



(a) (b)  
Figure 1 – Background data: (a) soil parameters, (b) waste parameters



The results of calculating the coefficients of swelling, compression, consolidation, and the relationship between deformations, depending on the type of soil, are shown in Fig. 2 (a, b, c).

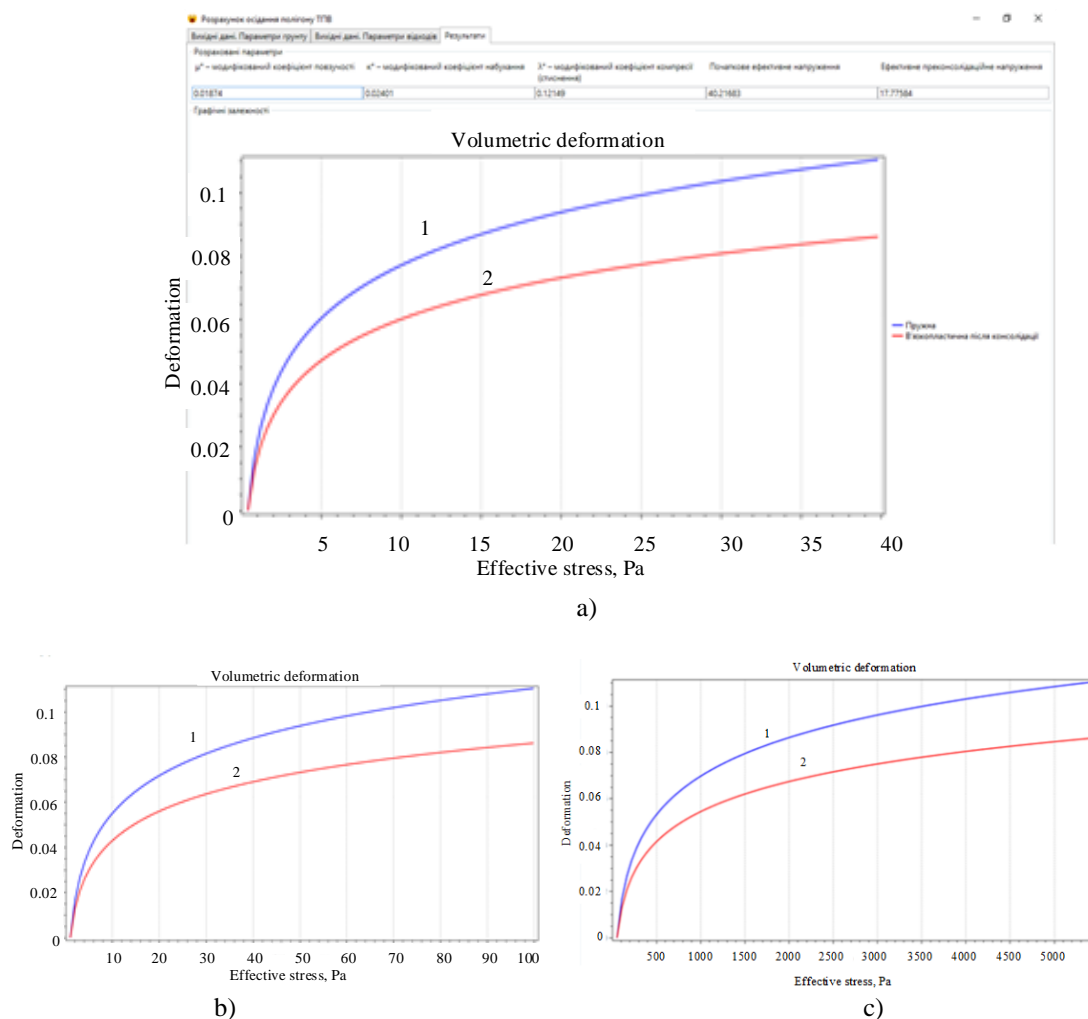


Figure 2 – The result of calculations for the soil: (a) – sand, (b) – loam, (c) – clay; 1 – spring strain, 2– viscous-plastic after consolidation

From the analysis of Fig. 2 it can be observed that there is less sediment of the landfill when the underlying soils are clay, and the most sediment is with sand. For example, an elastic complete deformation of 0.12 is achieved in clay with an input of 5000 Pa, in loam - 100 Pa, in sand - 40 Pa. From which it can be concluded that the underlying soil has a big influence on the sedimentation of the landfill. For the numerical solution of the problem the finite elements method was used. The estimated area was divided into 265 finite elements.

We investigated the influence of underlying soil (clay, sand or loam) foundation on settlement. The landfill for which the simulation was conducted consists of ten layers of the waste, the thickness of each layer is 3 m. The angle of inclination of the slope of the landfill was 75°.

The results of numerical calculations are shown in Fig. 3. The vertical deformations of the polygon with the sandy bottom of the base are shown in Fig. 3. It can be seen from the analysis of the figure that the greatest deformation is observed in the upper layers of the polygon and is 4.95 m, and the smallest in the layer lying at the base of the polygon (0.42 m). This is because the lower layers of the polygon are condensed more than the top layers. The deformations of the foundation soil are the largest at the bottom corners of the polygon body (0.041 m), and the smallest - in the center (0.0101 m), since the corners are stress concentrators, in turn causes an increase in deformations.

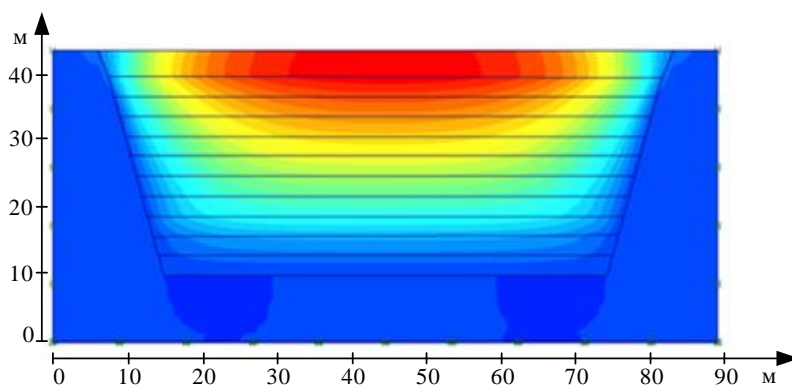


Figure 3 - Vertical deformation of the landfill with sandy bottom soil

From the results of calculations it is established that under the same conditions of the landfill, the underlying soil layer exerts a considerable influence on the sediment value: the denser and less porous the soil, the less the sediment. In particular, if the soil base is clay, a sludge is 23% less than sand, and 14% less than with loam as a base.

**Conclusion.** Thus, it was developed spatial mathematical model of process of consolidation of solid waste landfill in which for the first time it is offered to consider the spreading soil as it is one of major factors when forming draft. The software in a programming language C # for calculation of coefficients of swelling, a compression, consolidation and numerical calculation of dependence of deformations on tension at static loading of a body of solid waste landfill was created. The effective method of calculation of the intense deformed state combined the natural and technogenic environment which allows to predict its stability during his creation and reuse as a basis of constructions of different function is developed.

### References

1. Eid, H. T., Stark, T. D., Evans, W. D., and Sherry, P. E. 2000. "Municipal solid waste slope failure. I: Waste and foundation soil properties." *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 126 5, 397–407.
2. Kelly, W. E. 1976. "Ground-water pollution near a landfill." *J. Environ. Eng. Div. (Am. Soc. Civ. Eng.)*, 102 6, 1189–1199.
3. Campbell, D. J. 1996. "Explosion and fire hazards associated with landfill gas." *Landfilling of waste: Biogas*, T. H. Christensen et al., eds., E&FN Spon, London, 133–142.
4. Merry, S.M., Kavazanjian Jr., E., et al., 2005. Reconnaissance of the 10 July 2000 Payatas landfill failure. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, ASCE /MAY 2005,19 (2), 100–107.
5. Stark, T.D., Eid, H.T., Evans, W.D., Sherry, P.E., 2000. Municipal solid waste slope failure. II: stability analyses. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(5).
6. Zekkos, D.P., 2005. Evaluation of Static and Dynamic Properties of Municipal Solid Waste. A Dissertation Submitted in Partial Satisfaction of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering, University of California, Berkeley.
7. Zekkos, D.P., Bray, J.D., Kavazanjian Jr., E., Matasovic, N., Rathje, E.M., Riemer, M.F., 2006. Unit weight of municipal solid waste. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132 (10), 1250–1261.
8. Caicedo, B., Yamin, L., Giraldo, E., Coronado, O., 2002a. Geomechanical properties of municipal solid waste in Dona Juana sanitary landfill. In: *Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics*, Brazil, vol. 1, pp. 177–182.
9. Caicedo, B., Giraldo, E., Yamin, L., Soler, N., 2002b. The landslide of Dona Juana landfill in Bogota, a case study. In: *Proceeding of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics*, Brazil, vol. 1, pp. 171–175.
10. Koelsch, F., Fricke, K., Mahler, C., Damanhuri, E., 2005. Stability of landfills – the Bandung dumpsite disaster. In: *CISA (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Landfill Symposium*, Cagliari, Italy.
11. Evaluation of the geotechnical properties of MSW in two Brazilian landfills S. L. Machado, M. Karimpour-Fard, N. Shariatmadari, M. F. Carvalho, Julio C.F. do Nascimento (2010) *Waste management* (30), p.2579-2591.
12. Park, H. I. Long-term settlement behavior of landfills with refuse decomposition [Text] / H. I. Park, S. R. Lee // *J. Resour. Manage. Technol.* – 1997. – Vol. 24, Issue 4. – P. 159–165.

13. Machado, S. L. Modeling the influence of biodegradation on sanitary landfill settlements [Text] / S. L. Machado, M. F. Carvalho, O. M. Vilar // Soils and Rocks. – 2009. – Vol. 32, Issue 3. – P. 123–134.
14. Yen, B. C. Sanitary landfill settlement rates [Text] / B. C. Yen, B. S. Scanlon // J. Geotech. Eng. – 1975. – Vol. 101, Issue 5. – P. 475–487.
15. Marques, A. C. M. Composite compressibility model for municipal solid waste [Text] / A. C. M. Marques, O. M. Vilar // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. – 2003. – Vol. 129, Issue 4. – P. 372–378. doi: 10.1061/(asce)1090-0241(2003)129:4(372)
16. Hettiarachchi, C. H. Effects of gas and moisture on modeling of bioreactor landfill settlement [Text] / C. H. Hettiarachchi, J. N. Meegoda, J. P. Hettiarachchi // Waste Management. – 2009. – Vol. 29, Issue 3. – P. 1018–1025. doi: 10.1016/j.wasman.2008.08.018
17. Sivakumar Babu, G. L. Prediction of Long-term Municipal Solid Waste Landfill Settlement Using Constitutive Model [Text] / G. L. Sivakumar Babu, K. R. Reddy, S. K. Chouskey, H. S. Kulkarni // Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management. – 2010. – Vol. 14, Issue 2. – P. 139–150. doi: 10.1061/(asce)hz.1944-8376.0000024
18. Durmusoglu, E. Landfill Settlement with Decomposition and Gas Generation [Text] / E. Durmusoglu, M. Y. Corapcioglu, K. Tuncay // Journal of Environmental Engineering. – 2005. – Vol. 131, Issue 9. – P. 1311–1321. doi: 10.1061/(asce)0733-9372(2005)131:9(1311)
19. Karimpour-Fard, M. Mechanical Behavior of MSW Materials with Different Initial State under Static Loading [Text]: A Dissertation ... Doctor of Philosophy in Geotechnical Engineering / M. Karimpour-Fard. – Iran University of Science and Technology, 2009.
20. Shariatmadari, N. Municipal solid waste effective stress analysis [Text] / N. Shariatmadari, S. L. Machado, A. Noorzad, M. Karimpour-Fard // Waste Management. – 2009. – Vol. 29, Issue 12. – P. 2918–2930. doi: 10.1016/j.wasman.2009.07.009
21. Sivakumar Babu, G. L. Parametric Study of MSW Landfill Settlement Model [Text] / G. L. Sivakumar Babu, K. R. Reddy, S. K. Chouskey // Waste Management. – 2011. – Vol. 31, Issue 6. – P. 1222–1231. doi: 10.1016/j.wasman.2011.01.007
22. Reddy, K. R. Geotechnical properties of municipal solid waste at different phases of biodegradation [Text] / K. R. Reddy, H. Hettiarachchi, J. Gangathulasi, J. E. Bogner // Waste Management. – 2011. – Vol. 31, Issue 11. – P. 2275–2286. doi: 10.1016/j.wasman.2011.06.002
23. Vermeer, P. A. A Soft Soil Model that Accounts for Creep [Text] / P. A. Vermeer, H. P. Neher // Proc. Int. Symp. “Beyond 2000 in Computational Geotechnics”, 1999. – P. 249–261.
24. Raneard, D. Influence of soil model on the analysis of pressuremeter test [Text] / D. Raneard, R. Zentar, N-E. Abriak // In proceedings of Int. Conf. on Numer. Models in Geomech., NUMOG IX, 2004. – P. 699–705.
25. Remez, N. S. Prognozirovanie ispolzovaniia poligonov TBO v kachestve osnovaniia sooruzheniia [Text] / N. S. Remez, T. A. Osipova // ISJ Theoretical & Applied Science. – 2015. – Vol. 7, Issue 27. – P. 34–39.

**Н.С. Ремез**, д-р техн. наук, проф. ORCID 0000-0001-8505-0266

**В.О. Броницький**, ас. ORCID 0000-0001-6882-2295

**Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
ПРОГНОЗУВАННЯ СТІЙКОСТІ ПОЛІГОНУ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ПРИ ЙОГО  
СТВОРЕННІ**

*Проведено моделювання осадки полігону твердих побутових відходів із застосуванням методу скінчених елементів з метою прогнозування його стійкості при створенні і подальшому використанні в якості основи споруд. Характерною його особливістю було врахування геометричних та фізико-механічних параметрів полігону та ґрунтової основи. За допомогою мови програмування C# створено програмне забезпечення для встановлення залежностей осадки полігону від властивостей підстилаючих ґрунтів та від величини статичного привантаження.*

**Ключові слова:** полігон твердих побутових відходів, математичне та комп'ютерне моделювання, осадки, стійкість.

Надійшла 23.03.2018

Received 23.03.2018

**Т.В. Гребенюк**, канд. техн. наук,  
**О.О. Закладний**, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2813-3692  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## АНАЛІЗ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

*Проаналізовано структуру і вміст радіонуклідів хвостосховищ хімічних підприємств. Досліджені методи контролю радіаційної обстановки. Виконано оцінку поширення радіонуклідів у ґрунтах та підземних водах. Визначені напрямки поширення забруднення підземних вод на основі математичної моделі забруднення підземних вод. Проаналізована методика моделювання гідрогеологічних процесів. Досліджено перенесення радіоактивних речовин від хвостосховища радіоактивних відходів на природно-антропогенні території.*

**Ключові слова:** хвостосховища; радіонукліди; уран; радон; радіоактивність; моделювання.

### Вступ.

Україна належить до провідних урановидобувних країн світу. Уранові родовища розташовані в основному в межах Кіровоградської області. За досить низького вмісту урану в рудах, родовища України мають низку особливостей, які забезпечують конкурентну здатність виробленого уранового концентрату:

- великі розміри уранових покладів, що дозволяє застосовувати високопродуктивні системи видобутку;
- висока міцність вмшуючих порід, що дозволяє проходити гірничі виробки без кріплення та проходити очисні блоки великих обсягів;
- невеликі водні притоки до гірничих виробок;
- досить прості заходи радіаційного захисту завдяки невеликому вмісту урану у рудах.

Відомості про розвідані запаси урану, а також їх поповнення та вичерпання, надані WNA, свідчать, що світовий річний видобуток урану становить приблизно 35 – 37 тис. т (близько 55% поточних потреб). Решта цієї сировини поповнюється за рахунок складських запасів (конверсійний уран), проте, за аналізом вже у 2015 році ці додаткові джерела вичерпані. За прогнозами МАГАТЕ, річна потреба АЕС в урановій сировині до 2050 року зросте до 177 тис. т. (середній варіант), або навіть до 283 тис. т. (високий варіант). Навіть при середньому варіанті сумарна потреба ядерної енергетики за 50 років складе 5,35 млн. т. урану.

Основні запаси урану зосереджені в Кіровоградському урановорудному районі (КУРР), оцінювані запаси становлять понад 100 тис. т., з яких більше половини рентабельні; а також у центрально-українському ураново-рудному районі (ЦУРР). Родовища Побузького УРР відпрацьовані в 1990-х роках. В експлуатації перебувають Ватутінське і Мічуринське родовища (КУРР, ЦУРР відповідно), Северинське – в резерві. Деякі родовища перебувають на стадії розвідки [1].

Розроблена і виконана програма радіаційного контролю радіаційно небезпечних об'єктів із дотриманням певних радіаційно-гігієнічних регламентів [2], що мають супроводжувати будь-яку діяльність на цих об'єктах. Оскільки на даний час в Україні є відсутні національні рекомендації щодо організації і проведення радіаційного моніторингу на об'єктах колишнього уранового виробництва, то для вивчення радіаційного стану колишніх уранових об'єктів у даній роботі використано аналіз.

### Мета і завдання

Мета роботи полягає в аналізі математичних моделей, що характеризують гідрогеологічні умови хвостосховищ, аналізують геоміграції радіонуклідів та виконують оцінку фільтраційного виносу забруднюючих радіоактивних речовин у природні водойми. Дослідити процес перенесення радіоактивних речовин з хвостосховищ у природне середовище.

### Результати досліджень

Проведені комплексні дослідження та оцінка розповсюдження важких металів та радіонуклідів в компонентах природно-територіальних комплексів в районі впливу накопичувачів радіоактивних відходів уранодобувної та уранозбагачувальної промисловості.

За результатами радіометричного обстеження фізико-хімічних характеристик шламу у хвостосховищах встановлено, що швидкість вертикальної та горизонтальної міграції радіонуклідів значною мірою обумовлена механічними та фізико-хімічними характеристиками середовища (ємність поглинання, склад обмінних катіонів, рН, ефективна пористість, дисперсний склад, форми знаходження

радіонуклідів, швидкість фільтрації та ін.). Використання при моделюванні експериментальних значень відповідних параметрів дає змогу достовірно оцінювати та прогнозувати небезпеку, пов'язану з розповсюдженням радіонуклідів.

Серед основних фізико-хімічних характеристик шламу можна виділити:

- рН;
- щільність твердої фази;
- насипна щільність;
- пористість;
- природна вологість;
- коефіцієнт фільтрації води.

Як відомо, рН середовища значною мірою визначає перебіг окислювально-відновних процесів, що у свою чергу має позначатись на формах знаходження та мобільності радіонуклідів.

Важливим процесом, що обумовлює радонову небезпеку хвостосховищ, є інтенсивність газообміну їхніх внутрішніх шарів з атмосферою (аерація).

Переміщення радону в поровому просторі відбувається завдяки процесам дифузійного й конвективного переносу. Швидкість і глибина аерації, незалежно від механізмів переносу, тісно пов'язані з умовами, що визначають газопроникність середовища – наявність сполучених пор та ступінь їхнього заповнення водою. При 70 %-вому заповненні вільного об'єму ґрунту водою рух повітря в порових каналах практично відсутній. При незначному зменшенні вологості макропори осушуються і газопроникність значно збільшується.

Проаналізовані фільтраційні властивості різних типів хвостосховищ. Для деяких ділянок коефіцієнт фільтрації може бути досить низьким (~ 3 см/добу), що значно збільшує час взаємодії рідкої та твердої фаз. Деякі ділянки хвостосховища можуть відрізнятися високою швидкістю фільтрації (118 см/добу). Отримані результати повинні бути узгоджені з результатами дослідження гранулометричного складу частинок шламу – чим більший внесок у загальну кількість частинок < 1 мкм, тим нижча швидкість фільтрації.

Досліджено методики моделювання гідрогеологічних процесів. На сьогодні існує багато систем моделювання та програмного забезпечення, найбільш поширеними можна вважати – Visual Modflow, Visual Modflow Pro, Feflow, Modflow – Surfcast и т.п., які дозволяють створити тривимірні моделі геофільтрації [3]. Розроблені методики моделювання, орієнтовані на цей клас програм. Технологія моделювання істотно залежить не тільки від вибраного типу програмного забезпечення, а і від принципів схематизації гідрогеологічних умов. Схематизація є важливим етапом моделювання, включаючи в себе як процес геофільтрації так і область. Моделі області геофільтрації відображають зміни в просторі та часі властивостей гідрогеологічного об'єкта, а моделі процесів – закони, якими вони описуються. Програми виконують чисельним методом диференційні рівняння, які імітують процеси.

Методика моделювання хвостосховищ передбачає два етапи: створення регіональної фільтраційної моделі і побудова на її основі гідродинамічної сітки усталеною фільтрації підземних вод (стрічок струму); розрахунок міграції радіонуклідів уранового ряду уздовж стрічок струму підземних вод.

Для моделювання гідрогеологічних умов хвостосховищ проаналізовано [3] та обрано розроблену систему фільтрації - модель на основі програми Visual Modflow Pro. Модель передбачає сталу 3-мірну фільтрацію і має 5 розрахункових шарів (знизу вгору): кристалічні тріщинуваті породи, верхня частина тріщинуватих гранітів і кора вивітрювання, алювіальні піщані відкладення, суглинні ґрунти (на схилі плато), техногенні відкладення - відходи уранового виробництва, насипні ґрунти (фосфогіпс-си, шлаки).

Для моделювання геоміграції радіонуклідів з хвостосховищ використовується програмне забезпечення (ПО) Ecolago (Facilia AB, Швеція) [4]. Програма Ecolago являється ефективним інструментом для рішення систем диференціальних рівнянь на основі використання камерного підходу (аналог розроблен англійськими спеціалістами програм Mascot и Amber). Ecolago призначене для реалізації камерних радіоекологічних моделей, які описуються звичайними диференціальними рівняннями першого порядку. Програма має вбудовану базу даних радіонуклідів і дозволяє автоматично моделювати ланцюжка радіоактивного розпаду.

Модель враховує вертикальну інфільтрацію забруднених порових розчинів з тіла хвостосховища в алювіальних водоносний горизонт і подальший латеральний конвективно-дисперсійний перенос радіонуклідів (з урахуванням сорбції). У розрахунку враховувались всі основні радіонукліди уранового ряду. Математичні деталі методики розрахунку конвективно-дисперсійного перенесення за допомогою Ecolago наведені в [5].

Міграція радіонуклідів у хвостосховищах хімічних підприємств значною мірою визначається параметрами середовища. У зв'язку зі складністю врахування всіх факторів, що визначають сукупність елементарних актів сорбції та десорбції радіонуклідів на компонентах твердої фази, виникає необхідність створення спрощених моделей сорбційної взаємодії. Більшість радіонуклідів можуть затримуватися на твердій фазі за рахунок іонообміну. Інтенсивність цієї взаємодії можна визначити за допомогою

коефіцієнта  $K_d$ , який визначає співвідношення концентрації радіонуклідів, що адсорбовані на твердій фазі, та їхньою концентрацією в розчині після того, як система досягла рівноваги. Великі значення  $K_d$  означають, що радіонуклід міцно зв'язаний із ґрунтом і його міграція буде повільною, а невеликі – навпаки. Сорбційні параметри для водоносного горизонту прийняті на основі огляду літературних джерел [6, 7] (за аналогією).

Визначення рН водної витяжки зразків проводиться, як правило відповідно до ДСТУ ISO 10390-2001, при співвідношенні в суспензії твердої і рідкої фаз 1:5. Вміст вологи у зразках визначається за стандартною методикою. Бюкси з кришками і відомою масою заповнювались матеріалом хвостосховища і зважувалися з точністю до 0,001 г (А грамів).

Потім зразки висушують при 105 °С протягом 12 год зі знятими кришками. Після сушки бюкси закривають кришками, охолоджують в ексикаторі і зважують (В грамів). Вміст вологи (W,%) можна визначити як:

$$W = \frac{A-B}{B-m} \times 100,$$

де m-маса бюкса з кришкою.

Метод визначення щільності твердої фази шламу базується на стандарті для визначення щільності цементу. Для цього використовується прилад Ле-Шательє, що являє собою скляну колбу з мірною лінійкою. Прилад наповнюється зневодненим гасом до нижньої нульової риски і поміщається в скляний посуд з водою. Насипну щільність зразків шламу можна визначати шляхом утрясання висушених і подрібнених зразків у мірному циліндрі. Утрясання проводиться до припинення зменшення об'єму зразка. Одним з основних параметрів, що впливає на виділення радону з хвостосховищ, є ефективна пористість, яка являє собою сукупність сполучених пор і порожнин, у межах яких можливий рух рідин і газів при коливанні тиску і температури.

Оцінка фільтраційних властивостей хвостосховищ проводиться шляхом визначення коефіцієнта фільтрації ( $K_f$ ) води в колонках, заповнених шламом із хвостосховищ. У якості фільтрату використовується дистильована вода, як імітатор атмосферних опадів. Вимірювання швидкості фільтрації проводиться після встановлення динамічної рівноваги току води при гідравлічному градієнті=1.

Згідно з [8], експериментальні значення рН води техногенного водоносного горизонту хвостосховищ коливаються в інтервалі 2,5 ÷ 3,2, тому обчислення проводились для рН 2,5 і 3,2. Зміна рН досягається шляхом зміни кількості  $\text{NH}_4^+$  у модельній системі.

Результати обчислень, що виконувались для стандартних умов:  $T = 25$  °С і  $P = 1$  бар показали, що основними мінералами більшої хвостосховищ при рН = 9,8 є плагіоклаз та кварц (рис. 1). У значній кількості представлені оксиди та гідроксиди заліза (загалом до 13 %), у меншій – кальцит, глинисті мінерали та слюди. Аналогічний результат отриманий також для рН = 8,5.

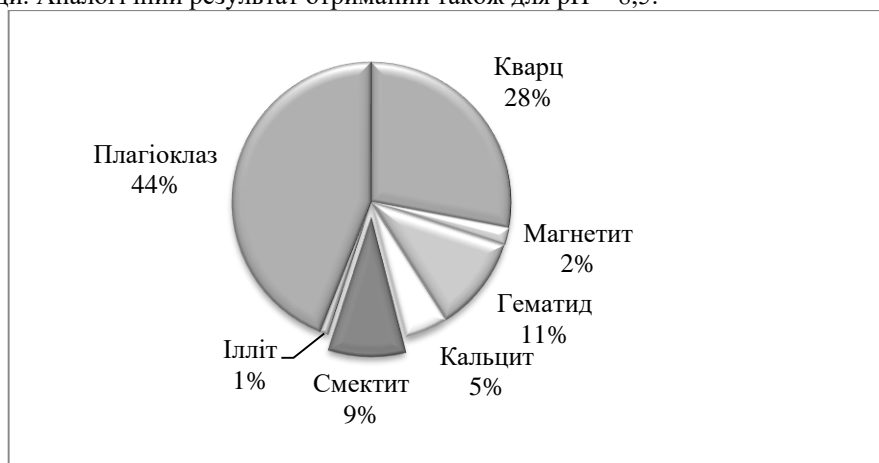


Рисунок 1 – Мінеральний склад матеріалів хвостосховищ хімічних підприємств при рН = 9,8

Оскільки при обчисленнях використовувались усереднені дані щодо хімічного складу мінеральної частини хвостів та складу води техногенного водоносного горизонту хвостосховищ, наведені результати слід трактувати як якісну оцінку основних процесів, що визначають форми знаходження урану та його рухливість в умовах хвостосховищ. Крім того, використаний для моделювання метод базується на припущенні встановлення в системі термодинамічної рівноваги, що в умовах хвостосховищ є маловірогідним.

Виявлено залежність  $K_d$  радіонуклідів ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{230}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ) у хвостосховищах від pH середовища.

### Висновки

Проаналізовано існуючі методи моделювання гідрологічних процесів. Досліджено міграцію радіоактивного забруднення та виконано оцінку зміни якості підземних вод, за допомогою математичного моделювання. Дослідження показали, що є перенесення радіоактивних речовин від хвостосховища радіоактивних відходів на природно-антропогенні території, відбувається водоносним шляхом, за допомогою підземних вод.

Встановлено, що істотним джерелом міграції радіонуклідів є не тільки зосереджені в хвостосховищі відходи, а й забруднені породи водоносного горизонту під чашею хвостосховища. Тому вилучення і перепоховання хвостів не дасть значного ефекту з точки зору зменшення виносу радіонуклідів в природні водойма (особливо в кратко- і середньостроковій перспективі). Раціональним підходом може бути консервування хвостів шляхом створення ґрунтового екрану, який мінімізує інфільтрацію атмосферних опадів в тіло хвостосховища і, відповідно, мінімізує забруднення підземних вод.

### Список використаної літератури

1. Присяжков, В.А. История Днепропетровского университета [Текст]./ В.А. Присяжков // Видавництво Дніпропетровського держуніверситету,- 1993.- С. 231-240.
2. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку: Закон України від 08.02.2002 р. № 39/95 ВР [Електронний ресурс].- Режим доступу: [http://uazakon.com/documents/date\\_6r/pg\\_gdwrof/pg2.htm/](http://uazakon.com/documents/date_6r/pg_gdwrof/pg2.htm/)
3. Рудаков, Д.В. Моделювання в гідрогеології [Текст]: навч. посібник / Д.В. Рудаков. – Д.: Національний гірничий університет, 2011. – 88 с.
4. Ecolego. User Guide [Електронний ресурс] / FACILIA AB, 2011. – 152 р. – Режим доступа: [http://ecolego.facilia.se/ecolego/report\\_objects/pdf/241](http://ecolego.facilia.se/ecolego/report_objects/pdf/241)
5. Ukrainian Centre for Economic & Political Studies [Текст] / Nuclear energy in the world and in Ukraine: state and prospects of development. – 2008. – Vol. 3. – P. 12-16.
6. Недашковский, Ю.С. Высокое напряжение атомной отрасли. Энергетика [Текст] / Ю.С. Недашковский // Итоги года. К.: Экономика, - 2005. - С. 12-14.
7. Радзивілл, А.Я. До геологічних проблем и можливість енергозабезпечення України [Текст] А.Я. Радзивілл // Геолог України. Вип. №4, - 2005. С. 26-32.
8. Камзист, Ж. С. Основы инженерной геоэкологии: Методика эколога-геологических исследований [Текст] / Ж. С. Камзист, А. В. Коваленко. – М., 1991. – С. 113.

**Т. Hrebenuk**, , Cand.Sc. (Eng.),

**O. Zakladniy**, Cand.Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-2813-3692

**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

### ANALYSIS MODELING OF DISTRIBUTION OF RADIOACTIVE WASTE

*Ukraine belongs to the leading uranium-producing countries of the world. Uranium deposits are located mainly within the Kirovograd region. The program of radiation control of radiation hazardous objects with the observance of certain radiation and hygiene regulations, which should accompany any activity on these objects, has been developed and implemented. Studies have shown that the transfer of radioactive substances from the tailings of radioactive waste to natural and human-made territories occurs in aquifers by groundwaters.*

*The existing methods of modeling of hydrological processes are analyzed. The migration of radioactive contamination was investigated and an estimation of change in the quality of underground waters was performed, using mathematical modeling. Migration of radionuclides in tailing ponds of chemical enterprises is largely determined by the parameters of the environment. The technology of modeling essentially depends not only on the chosen type of software, but also on the principles of schematization of hydrogeological conditions. The use of experimental values of the mechanical and physico-chemical characteristics of the environment in the simulation allows us to reliably assess and predict the dangers associated with the propagation of radionuclides. The method of tailings modeling involves two stages: the creation of a regional filtration model and based on it the construction of a hydrodynamic grid based on groundwater filtration.*

*The experimental values of the pH of the water of the technogenic aquifer of the tailing dumps are determined. Changes in pH are achieved by changing the amount of  $\text{NH}_4^+$  in the model system. The method used to model hydrological processes is based on the assumption of the establishment of a thermodynamic equilibrium system that is unlikely in the conditions of tailing dumps.*

*It was established that an essential source of migration of radionuclides is not only concentrated in the tailings waste, but also contaminated aquifer breeds under the cup of tailings. Tailing can be a rational approach*

*by creating a soil screen that minimizes the precipitation of infiltration into the body of the tailing pond and, accordingly, minimizes pollution of groundwaters.*

**Key words:** tailings; radionuclides; Uranus; radon; radioactivity; modeling.

#### **References**

1. Prisyakov, V.A. Istoriya Dnepropetrovskogo universiteta [Tekst]./ V.A. Prisyakov // Vidavnistvo DnIpropetrovskogo derzhunIversitetu,- 1993.- S. 231-240.
2. Pro vikoristannya yadernoyi energiyi ta radiatsiyu bezpeku: Zakon UkraYini vId 08.02.2002 r. # 39/95 VR [Elektronniy resurs].- Rezhim dostupu: [http://uazakon.com/documents/date\\_6r/pg\\_gdwrof/pg2.htm/](http://uazakon.com/documents/date_6r/pg_gdwrof/pg2.htm/)
3. Rudakov, D.V. Modelyuvannya v gIdrogeologiyi [Tekst]: navch. posIbnik / D.V. Rudakov. – D.: NatsIonalniy gIrnichiy unIversitet, 2011. – 88 s.
4. Ecolego. User Guide [Elektronniy resurs ]/ FACILIA AB, 2011. – 152 p. – Rezhim dostupa: [http://ecolego.facilia.se/ecolego/report\\_objects/pdf/241](http://ecolego.facilia.se/ecolego/report_objects/pdf/241)
5. Ukrainian Centre for Economic & Political Studies [Текст] / Nuclear energy in the world and in Ukraine: state and prospects of development. – 2008. – Vol. 3. – P. 12-16.
6. . Nedashkovskiy, Yu.S. Vvisokoe napryazhenie atomnoy otrasli. Energetika [Tekst] / Yu.S. Nedashkovskiy // Itogi goda. K.: Ekonomika, - 2005. - S. 12-14.
7. Radzivill, A.Ya. Do geologIchnIh problem i mozhlivIst energozabezpechennya UkraYini [Tekst] A.Ya Radzivill // Geolog UkraYini. Vip. №4, - 2005. S. 26-32.
8. Kamzist, Zh. S. Osnovy inzhenernoy geoekologii: Metodika ekologo-geologicheskikh issledovaniy [Tekst] / Zh. S. Kamzist, A. V. Kovalenko. – M., 1991. – S. 113.

**Т.В. Гребенюк**, канд. техн. наук,

**О.А. Закладной**, канд. техн. наук, доцент, **ORCID 0000-0003-2813-3692**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

#### **АНАЛИЗ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ**

*Проанализирована структура и содержание радионуклидов хвостохранилищ химических предприятий. Исследованы методы контроля радиационной обстановки. Выполнена оценка распространения радионуклидов в почвах и подземных водах. Определены направления распространения загрязнения подземных вод на основе математической модели загрязнения подземных вод. Проанализирована методика моделирования гидрогеологических процессов. Исследовано перенос радиоактивных веществ от хвостохранилищ радиоактивных отходов на природно-антропогенные территории.*

**Ключевые слова:** хвостохранилища; радионуклиды; уран; радон; радиоактивность; моделирования.

Надійшла 07.02.2018

Received 07.02.2018



## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

Для подання рукопису до журналу автори повинні дотримуватись всіх встановлених вимог, які вказані нижче.

**У разі невідповідності поданих матеріалів статті пунктам цих вимог, а також якщо вони не відповідають тематиці наукового журналу, редакція повертатиме авторам матеріали на доопрацювання!**

### **Обсяг статті**

Загальний обсяг статті – від 6 до 10 сторінок формату А4. Сторінки повністю заповнені текстом. Схеми, рисунки, таблиці й формули повинні бути пронумеровані та розміщені в тексті після посилань на них. Матеріал має бути викладений стисло, без повторювань даних таблиць і рисунків у тексті. Неприпустимо використовувати елементи форматування як «розрив розділу з нової сторінки» та колонтитули.

**Стаття має бути ретельно перевірена авторами та відповідати всім пунктам вимог до оформлення!!!**

### **Текстовий редактор**

Стаття набирається в текстовому редакторі **Microsoft Word (версії 2007 та вище)** і зберігається з розширенням \*.doc або \*.docx.

**Обов'язково** надсилається стаття, збережена у форматі \*.pdf !!!

### **Загальне оформлення:**

1) **Мова.** Статті приймаються до друку трьома мовами: українською, російською, англійською.

2) **Параметри сторінки:**

- Поля: зліва, справа, зверху, знизу – 2,5 см.
- Вирівнювання основного тексту – **за шириною.**
- Перші рядки всіх абзаців – з відступом 1,0 см!!!
- Шрифт – **Times New Roman**, кегль 10, міжрядковий інтервал 1.
- Назва статті друкується великими (Caps Lock) напівжирними літерами (Ж) – кегль 14.
- Заголовки елементів основного тексту (Вступ, Мета та завдання тощо) виділяються напівжирним шрифтом (Ж).

3) **Структура статті:**

- **номер УДК** (у верхньому лівому кутку сторінки, напівжирним шрифтом кегль 10)
- **прізвища авторів** (приклад: **І.І. Петренко** (укр.), **И.И. Петренко** (рос.) **I. Petrenko** (англ)) та відомості про авторів (науковий ступінь, вчене звання); **індекс ORCID – обов'язково;**
- **(Порядок оформлення наукових ступенів та вчених звань описано нижче в цьому ж документі в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і наукових ступенів»).**
- **повна назва організації** (навчального закладу, установи) – **вирівнювання за правим краєм;**
- **реферат обсягом від 1000 до 1100 знаків** повинен відображати короткий зміст статті, не повторювати назву, не містити загальних фраз та бути структурованим (мета дослідження, методика реалізації, результати дослідження, висновки). В англійській версії статті наводяться реферат обсягом 1700-2000 знаків,
- **ключові слова:** (6-8 слів), словосполучення «Ключові слова» – напівжирним + курсив.

**Відповідно до постанови Президії ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003р. до друку приймаються наукові статті, що мають такі елементи:**

### **Основний текст статті**

**Вступ** (постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які спирається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується зазначена стаття);

**Мета та завдання** (формулювання цілей статті, постановка завдання);

**Матеріал і результати досліджень** (виклад основного матеріалу дослідження, з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів, з можливим поділом на частини з відповідними назвами);

**Рисунки** (діаграми, фото тощо) подаються у **чорно-білому зображенні** разом із текстом, після посилань на них. **Вимога до графічних матеріалів:** будь-яка ілюстрація повинна бути єдиним нерозривним графічним об'єктом. Рекомендується застосування растрових форматів з роздільною здатністю **не менше 300 dpi**. Рисунок має бути розташований у центрі, без обтікання текстом. Підписи до рисунків повинні містити нумерацію в порядку розміщення в тексті та пояснювальний підпис. Неприпустимо включати підписи до самого рисунка. **Рисунок не повинен займати всю площу аркуша!!!**

Крапки після назви структурних частин статті не ставити.

**Графіки** повинні містити підписи **усіх осей на самому рисунку**. Будь-який інший вигляд підпису розглядатись та виправляти не буде!

**Таблиці.** При заповненні слід користуватись шрифтом 10 кеглю. Кожна таблиця повинна мати порядковий номер та назву і розташовуватись після посилання на неї у тексті статті. Якщо таблиця не вміщується на сторінці або виходить на іншу, слід використати позначення «Продовження табл.».

**Формули повинні бути набрані** за допомогою редактора формул **Math Type (версія 6.8 і вище)** або внутрішній редактор формул у Microsoft Word з **розмірами: звичайного символу – 11, великого індексу – 10, малого індексу – 9.** Кириличні та грецькі символи мають бути набрані прямим шрифтом, латинські літери – похилим. Виняток становлять символи операторів і стандартних функцій, які набираються прямим шрифтом. Нумерація формул, на які є посилання в тексті, – справа в дужках. Цілі частини від десяткових відокремлюються комою **Одиниці розмірності можна набирати окремо від формул, або у формулах, з обов'язковим використанням проміжку.**

**Висновки:** (навести основні висновки з дослідження та перспективи його подальшого розвитку в цьому напрямку).

**Список використаної літератури** наводиться в порядку посилань у тексті, відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр) Посилання на літературні джерела в тексті наводяться у квадратних дужках.

Список використаних літературних джерел подається **двічі:** мовою оригіналу відповідно до ДСТУ 8302:2015.(укр, рос) і англійською, відповідно до вимог IEEE style

**У разі відсутності або низького рівня перекладу англomовної версії списку використаної літератури (References) стаття буде повернута на доопрацювання!!!**

Для надання відомостей про авторів англійською, або російською мовами, слід використовувати загальноприйнятту лексику перекладу наукових ступенів, вчених звань, посад (описано в розділі «Рекомендовані скорочення вчених звань і ступенів»).

**Англomовна анотація за обсягом рекомендується більшою за українську (російську) 1700-к2000 знаків,** оскільки для закордонних вчених анотація є, як правило, єдиним джерелом інформації про зміст статті.

**У разі відсутності або низького рівня перекладу англomовної анотації (в Google Translate та ін.) стаття буде повернута на доопрацювання!!!**

**В окремому файлі подаються відомості про авторів у вигляді анкети:**

(Анкети подаються **3 мовами (укр., англ. та рос.)**. Вказується повна назва організації або установки, вказати місце де працює автор. Якщо всі автори статті працюють або навчаються в одній установі, можна не вказувати місце роботи кожного автора окремо.)

Прізвище, ім'я, по-батькові автора (повністю, без скорочень)	
Вчений ступінь, вчене звання, посада	
Місце роботи кожного автора в називному відмінку (повна назва без скорочень)	
Поштова адреса місця роботи, з поштовим індексом	
Контактний телефон	
Електронна адреса	
ORCID	

Відповідальність за зміст статті несуть автори. Остаточне рішення щодо друку статей ухвалює редколегія. Редакція залишає за собою право проводити редакційну правку статей.

**Редакція журналу здійснює перевірку на плагіат за допомогою спеціального програмного забезпечення!!!**

**Статті, які не відповідають вимогам редакції журналу "Енергетика: економіка, технології, екологія" та не пройшли перевірку на плагіат, будуть повернуті на доопрацювання.**

**Увага!!! На електронну адресу журналу надсилається:**

- стаття версія в форматі \*.doc або \*.docx;
- стаття версія в форматі \*.pdf (**ОБОВ'ЯЗКОВО**);
- анкета відомостей про авторів;
- акт експертизи про можливість оприлюднення матеріалів у засобах масової інформації.

**Контакти:**

- тел.: +38(044) 204-82-37;
- сайт: <http://energy.kpi.ua>;
- e-mail: [kravkpi@ukr.net](mailto:kravkpi@ukr.net)