

**Міністерство освіти і науки України  
Державний вищий навчальний заклад  
«Національний гірничий університет»**

**Збірник наукових праць  
Національного гірничого університету**

**№ 43**

**Дніпропетровськ  
2013**

УДК 622 (06)

Засновник та видавець  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Рік заснування – 1999

**Збірник наукових праць НГУ.** — Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2013 — № 43 — 213 с.

Наведено результати теоретичних і експериментальних досліджень з різних аспектів гірничої справи, розглянуто проблеми відкритої і підземної розробки родовищ корисних копалин, охорони праці і безпеки робіт на гірничих підприємствах, проблеми екології, маркшейдерії, геології, геоінформатики, електропостачання й автоматизації виробничих процесів у гірничій промисловості, висвітлені питання експлуатації гірничо-транспортного устаткування на шахтах, рудниках і кар'єрах .

Матеріали збірника призначені для наукових та інженерно-технічних працівників, які спеціалізуються в галузі гірничої справи .

Збірник друкується за рішенням вченої ради НГУ  
(протокол № 11 від 27.11.2013 р.)

Комп'ютерна верстка і набір – С.Ф. Гупало

Збірник зареєстровано у державному комітеті  
телебачення і радіомовлення України.  
Свідоцтво про реєстрацію КВ № 9030 від 04.08.2004 р .

© Державний ВНЗ «НГУ», 2013

**Редакційна Рада збірника:**

акад. НАН України, д.т.н., проф. Г.Г. Півняк  
д.т.н., проф. П. І. Пілов  
д.т.н., проф. О.С. Бешта  
д.т.н., проф. О. М. Шашенко  
к.т.н., доц. В.В. Ішков

**Редакція:**

головний редактор – к.т.н., доц. В.В. Ішков  
заступник редактора – д.т.н., проф. С.Ф. Власов  
відповідальний секретар – н.с. В. В. Задорнова

**Експертно-редакційна колегія:***Відкрита розробка РКК*

Гуменик І. Л. – д.т.н., проф.  
Дриженко А. Ю. – д.т.н., проф.  
Четверик М. С. – д.т.н., проф.  
Прокопенко В. І. – д.т.н., проф.  
Симоненко В. І. – д.т.н., доц.  
Собко Б.Ю. – д.т.н., г.н.с.

*Збагачення корисних копалин*

Пілов П. І. – д.т.н., проф.  
Младецький І. К. – д.т.н., проф.  
Полулях О. Д. – д.т.н., проф.  
Франчук В. П. – д.т.н., проф.  
Мостика Ю.С. – д.т.н., проф.  
Горобець Л.Ж. – д.т.н., проф.

*Екологічна безпека*

Зберовський О.В. – д.т.н., проф.  
Шапарь А.Г. – д.т.н., проф.  
Колесник В.Є. – д.т.н., проф.  
Долгова Т.І. – д.т.н., проф.  
Горова А.І. – д.б.н., проф.

*Підземна розробка РКК*

Бондаренко В. І. – д.т.н., проф.  
Кузьменко О. М. – д.т.н., проф.  
Пономаренко П.І. – д.т.н., проф.  
Бузило В.І. – д.т.н., проф.  
Ковалевська І.А. – д.т.н., проф.

*Маркшейдерія*

Четверик М. С. – д.т.н., проф.  
Халимендик Ю.М. – д.т.н., проф.  
Шашенко О.М. – д.т.н., проф.  
Петрук Є.Г. – д.т.н., проф.  
Назаренко В.О. – д.т.н., проф.

*Шахтне і підземне будівництво*

Шашенко О.М. – д.т.н., проф.  
Пономаренко П.І. – д.т.н., проф.  
Роєнко А.М. – д.т.н., проф.  
Сдвіжкова О.О. – д.т.н., проф.  
Соболев В.В. – д.т.н., проф.

*Геотехнічна і гірнична механіка*

Садовенко І.О. – д.т.н., проф.  
Бондаренко В.І. – д.т.н., проф.  
Шашенко О.М. – д.т.н., проф.  
Власов С.Ф. – д.т.н., проф.  
Новікова Л.В. – д.т.н., проф.  
Москальов О.М. – д.т.н., проф.

*Геологія та геофізика*

Нагорний Ю.М. – д.г.-м.н., проф.  
Приходченко В.Ф. – д.геол.н., проф.  
Додатко О.Д. – д.г.-м.н., проф.  
Бусигін Б.С. – д.т.н., проф.  
Тяпкін К.Ф. – чл.-кор., д.г.-м.н., проф.  
Баранов П.М. – д.геол.н., проф.

*Гірничі машини.**Динаміка і міцність машин*

Франчук В.П. – д.т.н., проф..  
Самуся В.І. – д.т.н., проф..  
Заболотний К.С. – д.т.н., проф..  
Ширін Л.Н. – д.т.н., проф..  
Кіріченко Є.О. – д.т.н., проф.

*Буріння свердловин*

Кожевников А.О. – д.т.н., проф..  
Власов С. Ф. – д.т.н., проф..  
Москальов О.М. – д.т.н., проф..  
Симанович Г.А. – д.т.н., проф..  
Франчук В.П. – д.т.н., проф.

*Електротехнічні комплекси і системи*

Півняк Г. Г. – проф., д.т.н., проф..  
Шкрабець Ф.П. – д.т.н., проф.  
Заїка В.Т. – д.т.н., проф.  
Випанасенко С.І. – д.т.н., проф.  
Бешта О.С. – чл.-кор., д.т.н., проф.  
Мещеряков Л.І. д.т.н., проф.

*Автоматизація технологічних процесів*

Ткачов В.В. – д.т.н., проф.  
Бешта О.С. – чл.-кор., д.т.н., проф.  
Кочура Є.В. – д.т.н., проф.  
Слесарєв В.В. – д.т.н., проф.  
Алексєєв М.О. – д.т.н., проф.

*Охорона праці*

Голінько В.І. – д.т.н., проф.  
Бойко В.О. – д.т.н., проф.  
Зберовський О.В. – д.т.н., проф.  
Шкрабець Ф.П. – д.т.н., проф.  
Колесник В.Є. – д.т.н., проф.

**Адреса редакції:**

49005, Дніпропетровськ, пр. К. Маркса, 19,  
НГУ, Ішкову В.В. тел./ факс 726-77-04,  
46-90-92, E-mail: zberovskya@mail.ru

## Требования к оформлению статей в «Сборник научных трудов НГУ»

### Требования к оформлению статей для опубликования в «Сборник научных трудов НГУ»

С учетом нормативных требований к оформлению печатных статей, рекомендаций Книжной Палаты Украины от 07.09.04 № 1291/11 и постановления ВАК Украины от 21.03.2008 № 1-04/5 «Про затвердження нових вимог до періодичних наукових фахових видань» к опубликованию в специализированном «Сборнике...» принимаются статьи, содержащие новые научные и практические результаты исследований авторов, которые ранее не публиковались и отвечают профилю «Сборника...». Структура научной статьи должна содержать следующие элементы: постановка проблемы; анализ последних достижений и публикаций, в которых заложено решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья; формулирование целей статьи (постановка задачи); изложение основного материала исследований с полным обоснованием полученных научных результатов; выводы по данному исследованию; список использованных источников.

Рекомендуемая структура статьи:

- **вступление** – постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими программами; анализ последних достижений и публикаций в которых заложено решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья (до 40 строк);
- **формулирование целей статьи** (постановка задачи) (до 20 строк);
- **изложение основного материала исследований** с полным обоснованием полученных научных результатов (5-8стр.);
- **выводы** по данному исследованию с указанием новизны, теоретической и практической значимости полученных научных результатов, перспективы дальнейшего развития в данном направлении (до 30 строк);
- **список использованных источников** - ссылки на литературные источники (не более 5), как правило, приводятся во вступлении при анализе последних достижений и публикаций на которые опирается автор.

Текст статьи (на русском, украинском или английском языках) объемом 6-10 стр., включая таблицы, графики и рисунки, подается в редакцию на электронном носителе и с распечаткой 1 экз. на листах формата А4. Текст следует набирать шрифтом Times New Roman 14 пунктов в редакторе Microsoft Office Word, все поля по 2 см и оформить следующим образом:

\* УДК – вверху слева, без отступов;

\* Инициалы, фамилия автора – следующая строка, выравнивание по правому краю;

\* Название статьи - заглавными буквами, жирно, выравнивание по центру; переносы и аббревиатура недопустимы;

\* Аннотация (до 5 строк) на русском, украинском и английском языках, размер 12 пт, отступ первой строки 0,5 см ;

\* Текст форматируется с выравниванием по ширине и междустрочным интервалом -1,0; отступ первой строки 1,2 см; абзацные отступы и интервалы – недопустимы; расстановка переносов автоматическая, номера страниц не проставляются.

\* *Простые формулы* в тексте набираются курсивом с помощью символов редактора Word, *сложные формулы* должны быть выполнены в приложении Equation Editor, соблюдая размеры, приведенные на рис. ⇨

\* Таблицы, графики и подписи к ним располагаются непосредственно в тексте и внедряются в документ как объекты, если они были созданы в Excel и др. приложениях.

\* Рисунки должны быть в черно-белом изображении и вставлены в текст в местах ссылки на них. Подписи рисунков имеют вид: Рис. 1. Схема...

\* Список литературы приводится в порядке ссылок в тексте, в соответствии с ДСТУ ГОСТ 7.1:2006, размером 12 пт.

Размеры	
Обычный	14 пт
Крупный индекс	12 пт
Мелкий индекс	11 пт
Крупный символ	16 пт
Мелкий символ	12 пт

*Образец набора*

УДК 550.83

© И.В. Петрова

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАРПАТ ИЗ КОСМОСА

Приведены результаты геологической дешифровки материалов космических геофизических съемок Карпат.

Наведено результати геологічного дешифрування матеріалів космічних геофізичних зйомок Карпат.

Results of geological photointerpretation of materials of space geophysical surveys of Karpat are considered.

По материалам космических геофизических съемок получают разнообразную геолого-геофизическую информацию .....

Список литературы

1. Ландау Л.Д. Статистическая физика. Серия 1. Теоретическая физика. Т. V. –М.: Наука, 1979.-268 с.

2. Архипов Ю.Р. Программное обеспечение для обработки геофизической информации// Горный журнал.-2002.-№11.-С.10-15

В редакцию «Сборника...» необходимо подать:

1. Электронный вариант и распечатанную **справку об авторах**:

Фамилия, имя, отчество; место работы (полное название организации и её почтовый адрес); должность; ученая степень; номера контактных телефонов, E-mail.

2. **Экспертное заключение** о возможности опубликования материалов в открытой печати.

3. **Выписку** из протокола кафедры /лаборатории, отдела/ отражающую: общий характер статьи (работа фундаментального или прикладного значения, экспериментальная (результаты моделирования, данные промышленных испытаний...), теоретическая (описание нового метода расчёта...) и т.п.; соответствие материалов паспорту выбранной специальности (шифр); личный вклад автора; новизну полученных результатов; рекомендации к публикации.

Телефоны для справок:

т. (0562) 46-90-92 **Ишков Валерий Валерьевич - гл. редактор**

т. (067) 636-17-18 **Зберовский Александр Владиславович**

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИИ ПРОДУКТИВНОГО РАСТВОРА ПРИ ОТРАБОТКЕ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МОНГОЛИИ

Проведен анализ гидрогеологических и горнотехнических условий на месторождениях урана в Монголии. Выполнено численное моделирование фильтрации продуктивных растворов при отработке урановых месторождений в центральной части страны методом скважинного подземного выщелачивания.

Проведено аналіз гідрогеологічних і гірничотехнічних умов на родовищах урану в Монголії. Виконано чисельне моделювання фільтрації продуктивних розчинів при відпрацюванні уранових родовищ в центральній частині країни методом свердловинного підземного вилуговування.

The paper analyses hydrogeological and mining conditions on the uranium deposits in Mongolia. A numerical simulation of leachate percolation and flow was carried out for treatment of the uranium deposits in the central part of the country to be treated by the in-situ leaching method.

Оценки запасов урана в разных странах мира постоянно корректируются в результате разведки новых месторождений и отработки старых. Кроме того, изменяется оценка доступных для разработки запасов. Опубликованные в открытой печати данные по запасам урана весьма противоречивы: если его запасы никак не привязаны к цене добычи, то данные по надежно разведанным ресурсам урана определяются возможностью выделить U из руды при себестоимости до 100 \$/кг, причем общие запасы оцениваются в 3,3 млрд. кг в пересчете на  $U_3O_8$ . Согласно одному из последних обзоров [1], последовательность стран с наибольшими запасами диоксида урана выглядит следующим образом: Австралия – США – ЮАР – Канада – Россия – Казахстан – Нигерия.

Существенное перераспределение запасов урана в мире за последние пять лет привело к снижению цен на сырье до уровня, не обеспечивающего рентабельность добывающих предприятий. Эффективная разработка месторождений может продолжаться при таком уровне цен лишь благодаря следующим факторам. К ним относятся:

- наличие на рынке урана, добываемого как попутного компонента;
- возможность некоторых производителей (Казахстан и Узбекистан) добывать уран низкой себестоимости, временно используя богатые участки месторождений;
- реализация урана многими добывающими компаниями по ценам, значительно выше текущих, за счет заключенных ранее долгосрочных контрактов, действие которых прекратится в течение ближайших лет.

В таких условиях уже закрыт ряд добывающих предприятий, не обладающих такими преимуществами.

Относительно дешевое производство урана на уровне 25–35 \$/кг возможно только компаниями, эксплуатирующими два типа месторождений: канадские объекты «несогласий» и месторождения «песчаникового» типа под скважинное подземное выщелачивание (СПВ). Их можно отнести к первой группе производителей, куда попали проекты «МакАртур-Ривер», «МакКлейн-Лейк», «Сигар-Лейк»

(Канада), объекты СПВ Австралии, Узбекистана, Казахстана и России. Сюда же следует отнести месторождения, где уран добывается попутно: «Олимпик Дам» и другие месторождения Южной Африки.

Существующий мировой опыт эксплуатации урановых месторождений методом СПВ показал, что безотказная работа геотехнологического оборудования эффективна в условиях плюсовых температур. Географическое расположение Монголии характеризуется резко континентальным климатом Центральной Азии, где плюсовые температуры фиксируются в летние месяцы, а зимняя температура зачастую опускается ниже  $-50^{\circ}\text{C}$ . Бурение и оборудование геотехнологических скважин, монтаж и демонтаж оборудования, работа с растворами и материалами в таких климатических условиях носит сезонный характер, что обуславливает необходимость отработки месторождений только в летнее время. При этом, на всех гидрогенных месторождениях страны рудные тела залегают на разных глубинах, что увеличивает время и затраты на их отработку. Таким образом, возникает научно-практическая задача повышения интенсивности отработки гидрогенных месторождений урана в Монголии в условиях сезонного ведения добычных работ.

Целый ряд перспективных месторождений урана находится в центральной части Монголии, восточнее столицы Улан-Батор: «Хараат», «Хайрхан», «Гурван-Сайхан» и «Ульзит». Рассмотрим более детально условия отработки методом СПВ на примере месторождения «Ульзит» (рис. 1).

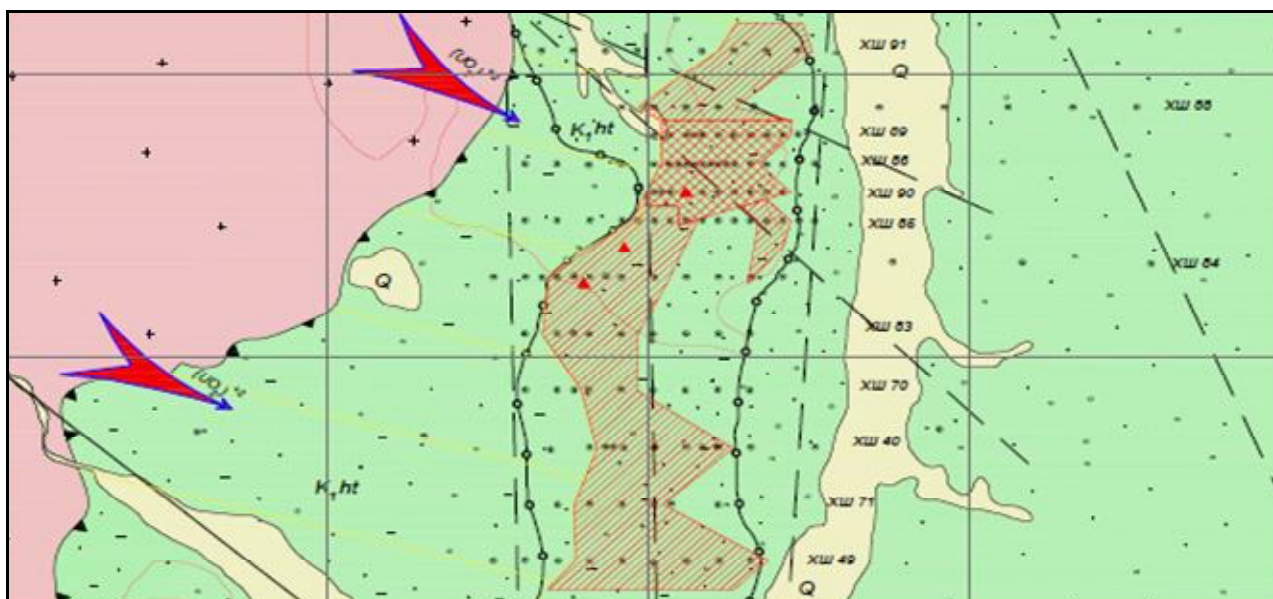


Рис. 1. Геологическая карта месторождения «Ульзит»

Проницаемость рудоносных горизонтов изменяется от малых до средних значений (коэффициент фильтрации от 0,1 до 10,0 м/сут). Проводимость водо-вмещающих пород невысокая, обычно до  $25 \text{ м}^2/\text{сут}$ , в отдельных случаях более  $50 \text{ м}^2/\text{сут}$ . Рудоносная зона и непосредственно месторождение расположено на территории единого гидрогеологического комплекса, ограниченного на востоке субмеридиональным разломом. На северном и южном флангах рудного поля

проявляются фрагменты границ, роль которых в водообмене к настоящему времени пока не ясна. Поток подземных вод внутри гидрогеологического комплекса направлен от бортов впадины к центру и с запада на восток. Уровни подземных вод на месторождении, в зависимости от формы рельефа, находятся на глубине 1,4–7,5 м с абсолютными отметками 1076–1078 м. Западнее месторождения, откуда происходит поступление подземных вод, абсолютные отметки уровней равны 1085–1090 м.

В гидрогеологическом блоке, расположенном восточнее месторождения, уровни подземных вод находятся на глубине 11,5–25,0 м с абсолютными значениями отметок 1065–1055 м. Переток подземных вод через границу, ширина которой составляет 100–200 м, проявлен плавным снижением уровней на 20 м, от 1077 м до 1055 м в абсолютных значениях. В пределах рудного поля месторождения выделено три рудоносных узла: Северный, Центральный и Южный, на которых в 1997 г. были проведены гидрогеологические работы. В лучшей степени изучен в гидрогеологическом отношении Южный узел, где опытно-фильтрационные исследования проведены на всех трех уровнях оруденения. В разрезе осадочной толщи выделяются несколько водоносных горизонтов разделенных водоупорными глинами мощностью от 2 м до 10 м. На локальных участках, соизмеримых по площади с гидрогеологическим кустом, водоупорные породы обеспечивают гидравлическую изоляцию водоносных горизонтов. Результаты откачек на гидрогеологических кустах, где скважины расположены ярусно, свидетельствуют об отсутствии вертикальной реакции на возмущение на протяжении опыта в 2–3 суток. Однако, в разрезе гидрогеологического блока выделяемые водоносные горизонты до глубины 150 м (глубина изучения) имеют одинаковое положение уровней подземных вод. Напоры их с глубиной увеличиваются. Данный фактор свидетельствует об одной области питания водоносных горизонтов, их гидравлической связи, и том, что гидрогеологический блок представляет собой единую гидрогеологическую структуру.

Мощность напорного водоносного горизонта вмещающего нижний уровень оруденения колеблется от 10–15 м до 40 м и более. В разрезе осадков наблюдается частое переслаивание проницаемых разнотипных песков, слабопроницаемых малоглинистых и глинистых песков, водоупорных песчаных глин и алевролитов. Водоупорные породы внутри горизонта ограничены в пространстве, мощность их колеблется от 1 м до 3–5 м. Пачка рыхлых отложений, вмещающая водоносный горизонт, относится к пойменно-русловой фации. В отдельных прослоях отмечены крупнообломочные фракции. Подобное распределение разнотипных осадков определяет хаотическую фильтрационную неоднородность пород. Водопроницаемость пород продуктивного горизонта изменяется от 16 до 31 м<sup>2</sup>/сут, удельные дебиты скважин – от 0,15 до 0,4 л/с. Дебиты откачек составили 2,8–6,4 м<sup>3</sup>/час при понижениях от 11,6 до 18,6 м. Коэффициент пьезопроводности водоносного горизонта составляет 5,6–9,4·10<sup>4</sup> м<sup>2</sup>/сут. Послойное изучение фильтрационных свойств урансодержащих пород проводилось с применением расходомерического каротажа, результаты которого совместно с данными откачек использовались в расчетах коэффициентов фильт-

рации. Результаты исследований свидетельствуют о фильтрационной анизотропии пород [2].

Математическая модель фильтрации продуктивных растворов основывается на схематизации следующих гидрогеохимических условий. Подземные воды месторождения – хлоридно-сульфатные, магниевые-натриевые, реже натриевые воды с минерализацией 3–5 г/л, с нейтральной или слабощелочной средой. В некоторых пробах минерализация достигает 6,0–6,6 г/л. Общая жесткость воды колеблется от 7,5 до 34,0 мг-экв/л. Для подземных вод водоносных горизонтов характерно отсутствие окисного железа, небольшие содержания закисного железа (2,8–7,3 мг/л), присутствие сероводорода до 10,2 мг/л. Имеющиеся данные свидетельствуют о наличии в рудоносном массиве восстановительной обстановки. Содержания урана в подземных водах колеблется от  $3 \cdot 10^{-5}$  г/л до  $3 \cdot 10^{-4}$  г/л. В нижнем и среднем продуктивных горизонтах концентрация урана в воде составляет  $(3-5,4) \cdot 10^{-5}$  г/л, в верхнем горизонте она достигает  $(1-3) \cdot 10^{-4}$  г/л.

Разработанная модель фильтрации растворов позволяет воспроизводить распределение давления и развитие гидродинамических процессов при нагнетании растворов и их отборе. На основании фильтрационной модели оказывается возможным количественно исследовать миграционные нестационарные гомогенные и гетерогенные процессы. Таким образом, моделируются физико-химические процессы неравновесного взаимодействия кислоты с минералами, поглощающими кислоту, неравновесное растворение-осаждение урана в различных формах, гомогенные кислотно-основные процессы, неравновесные окислительно-восстановительные процессы, неравновесная сорбция и десорбция, протекающие в рудовмещающей толще при разработке гидрогенных месторождений урана методами СПВ [1].

Основной моделирования фильтрации продуктивных растворов в рудовмещающей толще является дифференциальное уравнение [2]

$$T_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + T_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + W + Q = \mu \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

где  $H$  – напор (уровень) подземных вод, содержащих продуктивные растворы, м;  $T_x$  и  $T_y$  – проводимость водоносного горизонта вдоль осей  $Ox$  и  $Oy$ , м<sup>2</sup>/сут;  $W$  – инфильтрация, м/сут;  $Q$  – интенсивность источников и стоков (закачных и откачных скважин), распределенных по площади, м/сут;  $\mu$  – упругая водоотдача,  $t$  – время, сут.

Одним из универсальных методов численного решения уравнения (1) является метод конечных разностей. Конечно-разностные уравнения выводятся на основе баланса массы в каждой элементарной ячейке сетки, которой покрывается область расположения блоков СПВ на месторождении «Ульзит» (рис. 2). Составленное уравнение баланса заменяется соответствующим разностным выражением. Алгоритм конечно-разностного решения уравнения фильтрации (1) положен в основу программного обеспечения «ModFlow», используемого для исследования фильтрации продуктивных растворов при подземном выщелачивании урана.



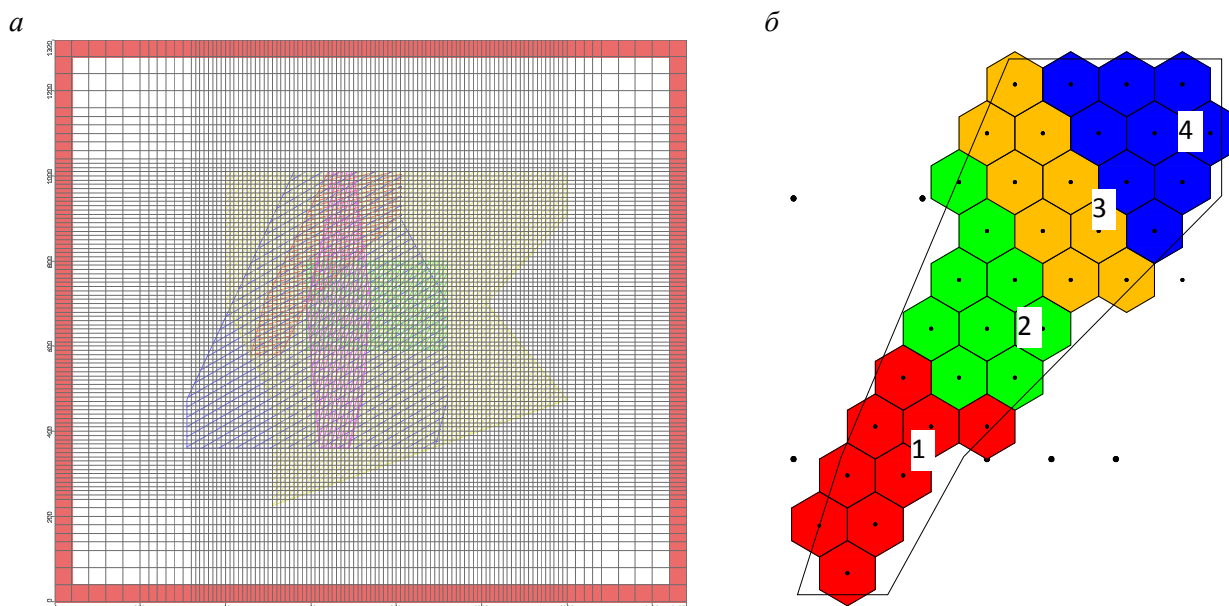


Рис. 2. Конечно-разностная аппроксимация месторождения «Ульзит» (а) и расположение обрабатываемых блоков рудного тела 1: группы гексагональных ячеек – добычные блоки № 1, 2, 3 и 4

При конечно-разностной схематизации месторождения «Ульзит» (рис. 2, б) размеры блоков в пределах рудного тела задавались  $5 \times 5$  м, что позволило достоверно воспроизводить значительные изменения напора между откачными и закачными скважинами при длине стороны гексагональной ячейки до 25 м. Внешние границы области моделирования задавались на удалении 200–400 м от контуров рудного тела, что позволило воспроизвести гидродинамическую изолированность области выщелачивания. Для относительно слабопроницаемых песчаников допустимо моделировать участок выщелачивания как небольшую изолированную зону на большом удалении от естественных границ области фильтрации. На удаленных границах задавался постоянный во времени напор (уровень) подземных вод. В соответствии с принятой гексагональной схемой заложения геотехнологических скважин было выполнено моделирование отработки рудного тела 1 вскрытого участка месторождения.

Таблица 1

Геотехнологические параметры отработки рудного тела 1

№ блока	Закачные скважины			Откачные скважины			Период отработки, сут.	Дебаланс, %
	$N$	$Q_{0,2}$	$Q_{\Sigma,2}$	$N$	$Q_{0,1}$	$Q_{\Sigma,1}$		
1	31	20	620	9	80	720	0 – 60	13,9
2							60 – 120	
3							365 – 425	
4	425 – 485	12,5						

В табл. 1 приняты следующие условные обозначения:  $N$  – количество скважин, шт.;  $Q_0$  – дебит одной скважины, м<sup>3</sup>/сут.;  $Q_{\Sigma}$  – суммарный дебит скважин, м<sup>3</sup>/сут. Дебаланс по скважинам определяется как отношение разности суммарных дебитов к суммарному дебиту откачных скважин

$$\eta = \frac{Q_{\Sigma,1} - Q_{\Sigma,2}}{Q_{\Sigma,1}} 100\% . \quad (2)$$

При задании границ области фильтрации учитывалось, что гидродинамические изменения в массив ураноносных песчаников невысокой проницаемости ограничены пределами рудных тел и небольшой приконтурной зоной вокруг них шириной 30-40 м. Границы области расположены на удалении несколько сотен метров от внешнего контура рудных тел. Такая схематизация при составлении модели допустима при замедленном водообмене, слабом естественном потоке подземных вод и низкой инфильтрации, характерных для пустынной территории месторождения «Ульзит» (рис. 3) [4].

В результате моделирования определены уровни и направления движения технологических и продуктивных растворов при отработке рудного тела 1 месторождения «Ульзит». В период отработки каждого блока вокруг него формируется депрессионная воронка с локальными понижениями в откачных скважинах до 3 м уровня подземных вод. При этом скорость фильтрации вблизи скважин достигает 2 м/сут.

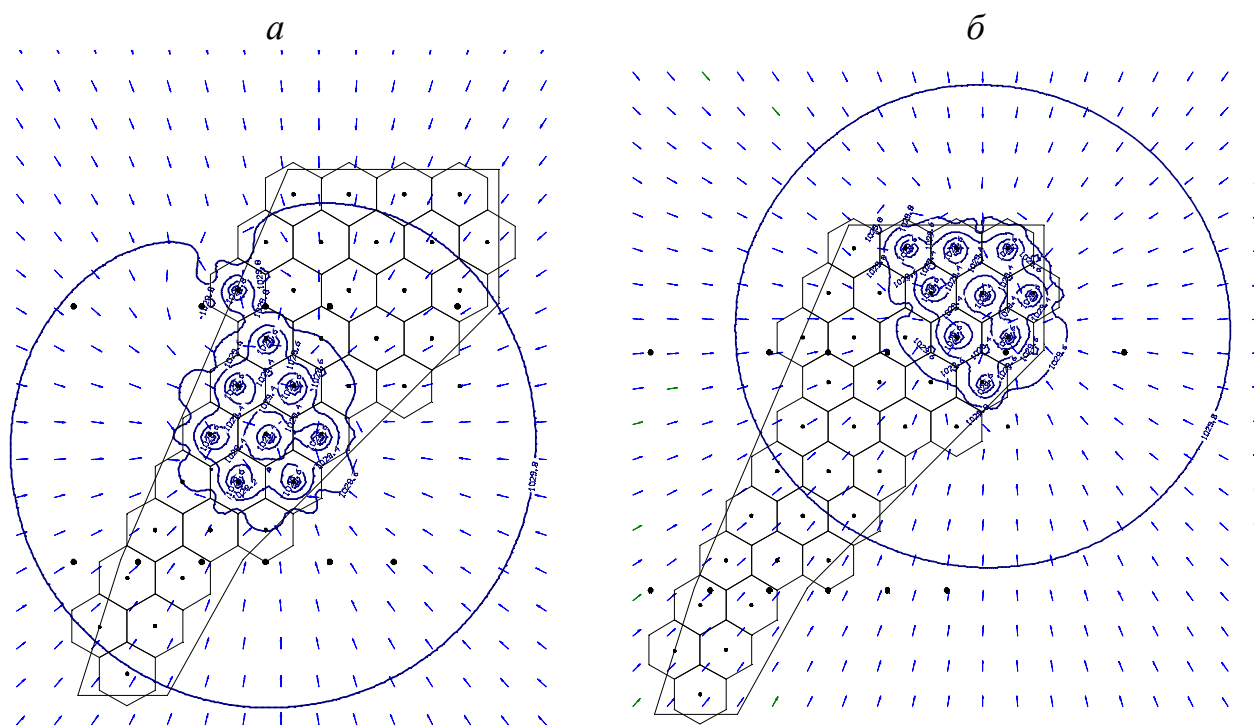


Рис. 3. Уровни и направления движения подземных вод и продуктивных растворов на завершающих этапах отработки рудного тела 1 в блоках № 2 (а) и № 4 (б): контуры блоков

На основе моделирования обоснованы параметры эффективного СПВ при гексагональной схеме заложения скважин для радиуса добычной ячейки 25 м. Миграция продуктивного раствора направлена преимущественно к откачным скважинам, причем его основная часть циркулирует в пределах рудного тела. После отработки предыдущего блока оставшийся в порах растворенный уран стягивается в новый обрабатываемый блок, что повышает степень его извлечения.

Ввиду неполного покрытия ячейками участка рудного тела и выхода некоторых ячеек за его пределы возможно небольшое, до 5–10 м, растекание части раствора за контур рудного тела. Незначительные остатки раствора с непрореагировавшей кислотой могут несколько месяцев находиться за пределами рудного тела в период паузы, связанной с сезонностью ведения добычных работ.

#### Список литературы

1. Khomenko O. The first Ukrainian corporative university / O. Khomenko & D. Rudakov // Materials of IV International scientific-practical conference “Scholl Underground Mining – 2010” / “New techniques and technologies in mining”. – Netherlands: CRC Press. Balkema. – P. 203-206.
2. Жанчив Б. Монгол улсын ураны үйлдвэрлэл, Цөмийн эрчим хүчний салбарын Өнөөгийн байдал, хөгжлийн хэтийн төлөв / Б. Жанчив, О.Е. Хоменко, Л. Ценджав // Уул уурхайн сэтгүүл. Улаан-Баатар: ШУТИС-ийн УУИС – 2011. – №. 1. – Х. 25 – 29.
3. Zheng C., Wang P.P. MT3DMS: A modular three-dimensional multispecies model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; Documentation and User's Guide, Contract Report SERDP-99-1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. 1999.
4. Рогов А.Е., Распанов Н.Б. Математические основы геотехнологии: Монография / А.Е. Рогов, Н.Б. Распанов. – Алматы: 2007, - 367 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бондаренком В.І.  
Надійшла до редакції 25.11.13*

УДК 622.272

© В.В. Фомичев, В.А. Соцков

### **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ НАДРАБАТЫВАЕМОГО ДРЕНАЖНОГО ШТРЕКА ПРИ ПРИБЛИЖЕНИИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ ДЛЯ УСЛОВИЙ ШП «САМАРСКАЯ»**

Смоделировано ведение очистных работ над дренажным вентиляционным штреком. Определено НДС углевмещающего массива в окрестности дренажного вентиляционного штрека и приближающейся лавы. Установлен характер перераспределения напряжений при изменении расстояния очистного забоя до выработки. Установлены области разупрочнения породного массива.

Змодельовано ведення очисних робіт над дренажним вентиляційним штреком. Визначено НДС вуглевміщуючого масиву навколо дренажного вентиляційного штреку і лави, що наближається. Встановлено характер перерозподілу напружень при зміні відстані очисного вибою до виробки. Встановлені області знеміцнення породного масиву.

There was simulated conducting coal-face work on the drainage airway. There was researched the stress strain state of the coal-bearing massif near the drainage airway and approaching working

face. The character of stress redistribution while changing of the distance from the working face to drift is described. The regions of the rock mass softening are defined.

**Актуальность работы.** Важной составляющей в топливно-энергетическом балансе Украины являются угли для коксования и энергетических нужд, что делает угольную промышленность одним из приоритетных направлений в развитии экономики страны. Стабильность функционирования угольной шахты во многом определяется состоянием подземных горных выработок, среди которых в наиболее сложных условиях эксплуатируются пластовые выработки, находящиеся в непосредственной технологической связи с очистными работами. Обоснование и принятие рациональных технических решений при эксплуатации сети подземных горных выработок является одной из составляющих эффективного функционирования угольной шахты [1]. Особую актуальность эти задачи приобретают в сложных горно-геологических условиях отработки тонких угольных пластов, в частности, в слоистом массиве слабых обводненных пород Западного Донбасса. В этой связи особое внимание уделено пластовым подготовительным выработкам по двум причинам: во-первых, данная группа выработок характеризуется наиболее неоднородной структурой и свойствами вмещающих пород; во-вторых, их состояние во многом предопределяет стабильность и надежность работы всей шахты [2].

**Постановка проблемы.** Условия отработки пласта  $C_5$  ШП «Самарская» ПСП «ШУ «Терновское» характеризуется как сложные по причине наличия в кровле достаточного количества обводненных маломощных угольных пластов и пропластков, обводненного песчаника и интенсивно трещиноватых слоев аргиллита и алевролита с практически полным отсутствием сцепления между слоями. Основная кровля оценивается как неустойчивая с образованием при посадке достаточно обширной области сдвижений и формированием значительных нагрузок на механизированную крепь, крепежные и охранные системы выемочных штреков. К геостатическому горному давлению добавляется гидродинамический фактор: водоприток в лаве достигает  $52 \text{ м}^3/\text{ч}$  в период посадки основной кровли. С целью отвода шахтных вод принято техническое решение о сооружении дренажного вентиляционного штрека в почве пласта  $C_5$  на глубине 8...9м. В этой связи представляется актуальной задача оценки состояния породного массива в окрестности дренажного штрека в период ведения очистных работ по пласту  $C_5$  в непосредственной близости от него.

**Изложение основного материала.** Для выполнения поставленной задачи была построена пространственная модель слоистого горного массива с учетом физико-механических свойств пород согласно данным геологической разведки в окрестности дренажного вентиляционного штрека ШП «Самарская» [3]. Смоделированная структура горного массива представлена на рис. 1.

Характерной особенностью данного участка является ведение очистных работ над дренажным штреком, который был предварительно пройден на глубине 8-9м метров от вынимаемого угольного пласта  $C_5$ . Выработка проведена в опасных зонах по обрушению пород кровли, которые характеризуются слабым внутри- и межпластовым сцеплением, поэтому в местах смены литологического состава пород кровли возможны обрушения.

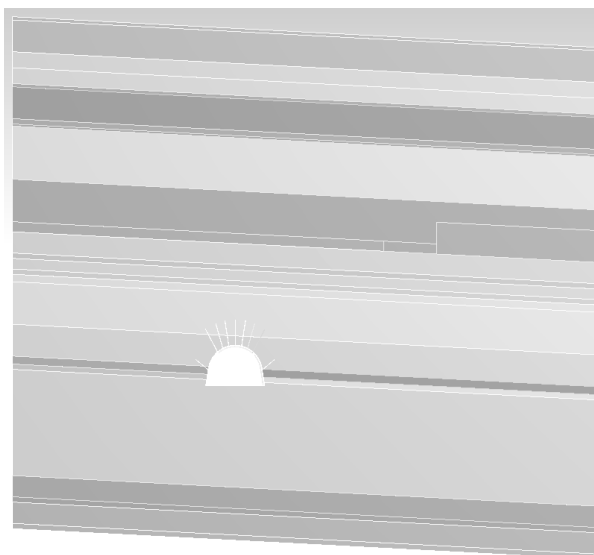


Рис.1. Пространственная модель массива горных пород

В результате расчетная модель состоит из 25 породных слоев и составляет: по падению/восстанию – 55 м, по высоте 48 м и протяженности выработок 1 м, угол падения пласта – 3 градуса. Каждый слой моделировался как отдельная деталь необходимого размера с соответствующими механическими характеристиками. Особенностью расчета является изменение положения очистного забоя относительно дренажного вентиляционного штрека.

На расстоянии 15 м от левого края модели и глубине 9 м от вынимаемого угольного пласта расположен дренажный штрек, сечение которого моделировалось арочной формы под крепь КШПУ-11,7. Для его поддержания использовалась рамная крепь со сталеполимерными анкерами. В сечение вписана рамная крепь, изготовленная из профиля СВП-22. Шаг установки рамной крепи – 1 м. Все элементы крепи моделировались как отдельные детали, обладающие соответствующими механическими характеристиками. Система анкерного крепления состоит из девяти сталеполимерных анкеров, семь из которых длиной 2,4 м устанавливаются в кровле выработки, а еще два длиной 2 м – в боках выработки с каждой стороны. Диаметр несущего элемента 22 мм, шаг установки – 1 м.

Механизированная крепь для уменьшения размерности задачи моделировалась как цельный прямоугольный блок с реакцией сопротивления горному давлению, соответствующей несущей способности крепи КД-80. Размеры по высоте и глубине соответствовали вынимаемой мощности, длина блока равна длине секции механизированной крепи. За ограждением механизированной крепи моделировались обрушенные породы в выработанном пространстве с разбиением на зону беспорядочного обрушения и зону шарнирно-блокового сдвижения с соответствующими механическими характеристиками.

**Анализ результатов вычислительного эксперимента.** Для проведения вычислительного эксперимента были построены три модели, различающиеся расположением плоскости очистного забоя. Это расстояние составило на первом этапе – 14 м, на втором – 7 м, а на третьем этапе плоскость забоя сравнивалась с вертикальной осью симметрии выработки. По результатам проведенных

расчетов были построены эпюры компонент напряжений и перемещений. Для анализа попарно приведены эпюры первого и последнего этапов.

**Вертикальные напряжения  $\sigma_y$ .** Первый шаг расчета был выполнен при расположении очистного забоя на расстоянии 14 м от дренажного штрека, при этом выработанное пространство задано шириной 15 м вплоть до границы модели. Если проанализировать полученную эпюру вертикальных напряжений (Рис. 2, а) комплексно, то можно увидеть, что практически полностью массив подвергается сжатию на уровне 8...9 МПа, за исключением пород почвы выработки, зоны разупрочненных пород вокруг выработанного пространства, а также очаговых растягивающих напряжений в местах установки крепежных конструкций.

Основная концентрация сжимающих напряжений сосредоточена в опорной зоне очистного забоя, что связано с опусканием пород кровли в выработанное пространство. Нарушение сплошности породного массива, в процессе отработки угольного пласта провоцирует перераспределение напряжений в близлежащих слоях. Наибольшее влияние оказывает область выработанного пространства. Опускание кровли происходит до тех пор, пока не будет превышен предел прочности данной породы на сжатие, после чего произойдет разрушение и обрушение породы в выработанное пространство. Наличие трещин и обводненности массива может значительно ускорить процесс естественного обрушения. В результате такого нарушения сплошности породных слоев при ведении очистных работ над механизированным комплексом образуется зона перегиба слоев, что провоцирует резкое возрастание давления на крепь и образование зоны опорного давления с высокими показателями сжимающих напряжений порядка 20...30 МПа и размерами по восстанию – 5...7 м и по высоте 10...13 м.

Область выработанного пространства, образовавшаяся непосредственно позади очистного забоя, характеризуется большой зоной разупрочненных пород кровли, что существенно отразилось и на распределении напряжений. Сжимающие напряжения здесь менее интенсивные, чем в окружающих слоях. Данная область распространилась на 4...6 м в кровлю и на 12...15 м в почву от выработанного пространства и в целом занимает по восстанию 15 м, а по высоте 20...25 м. При этом сжимающие напряжения колеблются в диапазоне 0,5...1,5 МПа. Далее происходит постепенное увеличение напряжений вплоть до достижения начального состояния массива.

Вокруг дренажного штрека происходит достаточно прогнозируемое распределение напряжений, связанное с влиянием системы поддержания выработки, включающей чередование рамной крепи и анкерного крепления, на окружающий массив. В кровле и почве выработки формируется область разгрузки со снижением сжимающих напряжений  $\sigma_y$ , вплоть до 1...3 МПа, что связано с пучением пород почвы (размеры: по ширине 1,5...2 м, по глубине 2...4 м) и образованием закрепленной анкерами породной плиты в кровле. При этом в боках выработки, наоборот, происходит увеличение напряжений до 11...14 МПа (размеры: по высоте 4...5 м, по ширине 3...4 м) в связи с нарушением начального состояния горного массива вследствие проведения выработки.

Характерной особенностью данного вычислительного эксперимента является надработка дренажного вентиляционного штрека, что уже на первом этапе расчета позволило получить совершенно новую область напряжений, которая объединила зону опорного давления впереди очистного забоя с областью повышенных сжимающих напряжений в боку выработки. В связи с достаточной удаленностью очистного забоя на первом этапе расчета данная зона не оказывает значительного влияния на выработку, но уже сейчас можно предположить, что с подвиганием очистных работ перераспределение нагрузок в буферной области между зоной опорного давления и выработкой будет оказывать определенное воздействие на рамное и анкерное крепление, установленное в штреке. На данном этапе общие размеры этой области по восстанию достигают 12...14 м, а по высоте 27...30 м, при этом сжимающие напряжения преобладают на уровне 12...16 МПа.

Распределение вертикальных напряжений  $\sigma_y$  в массиве горных пород (Рис. 2, б) на последнем этапе расчета подверглось существенным и количественным изменениям. Это связано с положением груди очистного забоя над дренажным штреком, что обуславливает формирование максимального влияния на выработку.

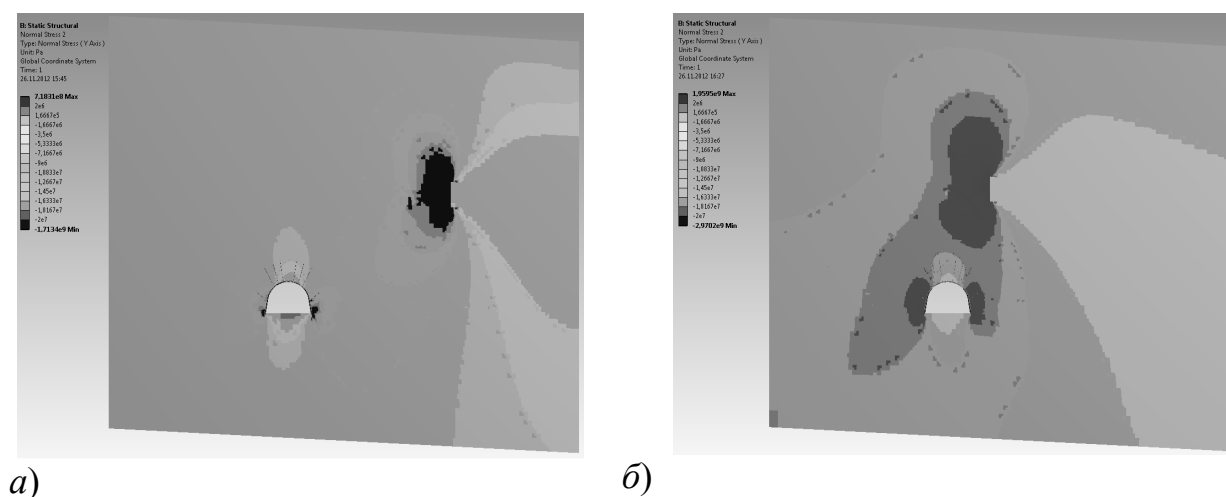


Рис. 2. Эпюры распределения вертикальных напряжений  $\sigma_y$ : а) при расстоянии 14м от груди очистного забоя до выработки; б) грудь очистного забоя сравнялась с вертикальной осью симметрии выработки

Зона опорного давления, сформировавшаяся вокруг очистного забоя, достигла максимальных размеров по сравнению с предыдущими этапами расчета. Во-первых, это связано с увеличением консоли зависания основной кровли, обрушением породы на удалении от забоя, а также сдвижением основной части вышележащих пластов, что провоцирует смещение породных слоев не только над выработанным пространством, но и над механизированным комплексом. Сдвигение больших объемов массива и образующаяся при этом мульда с увеличением площади начинает оказывать все большее давление на крепь. Во-вторых, в область действия зоны опорного давления попадает горная выработка, вокруг которой также происходит характерное распределение напряжений.

В связи с относительно небольшим расстоянием между вынимаемым угольным пластом и штреком, происходит наложение сжимающих напряжений от зон опорного давления в боках выработки и вокруг механизированного комплекса. Это приводит к образованию единой области повышенных сжимающих нагрузок, занимающей все пространство между выработкой и забоем, а также включающей в себя все зоны опорного давления.

Наибольшие концентрации сжимающих напряжений образовались вокруг механизированного комплекса с размерами по восстанию 6...8 м и 13...16 м по высоте, а также в боках выработки с размерами по ширине 1...2 м и по высоте 3...4 м, где напряжения превышают 20 МПа. Учитывая низкие прочностные характеристики пород Западного Донбасса, такие нагрузки свидетельствуют об их разупрочнении. Как было описано выше, между этими зонами образовалась единая область с несколько меньшими напряжениями, порядка 15...17 МПа, что также свидетельствует о разупрочнении пород и появлении трещин. Причем образование данной области вокруг выработки, происходит неравномерно. Со стороны подвигания очистного забоя ее размеры достигают 4...5 м по ширине и 9...11 м по высоте, в то же время на противоположной стороне выработки эта область намного больше и достигает 10...12 м по ширине и 16...18 м по высоте. Судя по результатам расчета, это связано с образованием зоны разгрузки в породах почвы под выработанным пространством. Очевидно, что данная зона оказывает некоторое влияние и на распределение нагрузок вокруг выработки. Также зоны разгрузки образовались в кровле и почве выработки. Стоит отметить, что снижение концентрации сжимающих напряжений происходит постепенно, связи с этим вокруг описанных зон образуется значительных размеров область с нагрузками в диапазоне 10...15 МПа. Это свидетельствует о протекании деформационных процессов на значительном расстоянии от выработок.

**Горизонтальные напряжения  $\sigma_x$ .** Практически весь нетронутый горный массив на эпюре горизонтальных напряжений (Рис. 3, а) находится в равновесном состоянии при сжимающих напряжениях на уровне 2...3 МПа. Основные перераспределения происходят в зоне влияния очистных работ, а также вокруг выработки.

Ведение очистных работ приводит к нарушению сплошности пород кровли на значительной площади массива, что приводит к существенным изменениям напряженно-деформированного состояния. Так вокруг механизированного комплекса, а также впереди очистного забоя образовалась достаточно большая зона опорного давления с размерами по ширине – 12...14 м, и по высоте 7...9 м. Здесь наблюдается высокая концентрация сжимающих напряжений, которые распределяются не равномерно по всей зоне. Над механизированной крепью образовался участок с наибольшим коэффициентом сжатия, напряжения достигают 12...17 МПа. Это наглядно демонстрирует деформацию пород, вследствие превышения предела текучести, и выдавливание горной массы в выработанное пространство.

Позади очистного породе кровли и почвы смыкают образованную пустоту, путем обрушения и пучения соответственно. Эпюра горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  достаточно наглядно это демонстрирует. Породная консоль в кровле над выработанным пространством, достигая своего критического размера, обрушается при



превышении предела прочности на растяжение алевролита, залегающего над угольным пластом. Этот участок занимает примерно 9...11 м по ширине и 2...3 м по высоте. Далее идут области большие по площади, но менее интенсивные в плане нагрузок. По размерам распределения в кровлю и почву они примерно одинаковы и занимают по ширине 13...15 м и 5...8 м по высоте, каждая. Концентрация напряжений здесь колеблется от 1 до 4 МПа, что говорит о менее интенсивном процессе разрушения пород и связано с образованием большого количества трещин. Также небольшая область с относительно низкими сжимающими напряжениями (0,5...1,5 МПа) образовалась под механизированным комплексом.

Вокруг выработки образовались только небольшие по размеру участки очагового типа со сжимающими нагрузками, в основном в местах влияния анкерного и рамного крепления на массив. Соответственно в почве появились растягивающие напряжения, связанные с протеканием процесса пучения обводненного аргиллита.

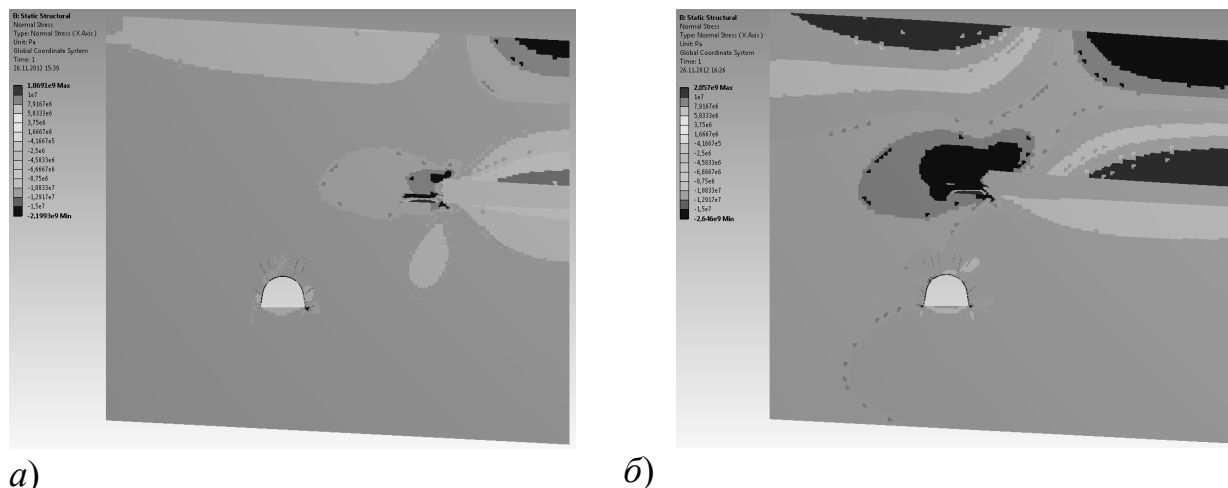


Рис. 3. Эпюры распределения горизонтальных напряжений  $\sigma_x$ : а) при расстоянии 14 м от груди очистного забоя до выработки; б) грудь очистного забоя сравнялась с вертикальной осью симметрии выработки.

Сравнительный анализ эпюр горизонтальных напряжений  $\sigma_x$  (Рис. 3, а и б) показал существенные различия не только в характере, но и в интенсивности распределения напряжений.

Область сжимающих напряжений вокруг механизированного комплекса увеличилась в размере примерно на 10 %. При этом значительно увеличилась концентрация напряжений, которая находится в диапазоне 12...15 МПа. С удалением от лавы в кровлю происходит постепенное снижение сжимающих напряжений и переход к растягивающим. Ориентировочно на высоте 10...11 м от угольного пласта начинает преобладать растяжение в породных слоях. Эта область занимает 22...25 м по ширине и 7...9 м по высоте, нагрузки при этом плавно возрастают от 1 до 10 МПа с отдалением от очистного забоя. При переходе напряжений в кровле в область влияния выработанного пространства появляется область перегиба слоев, в результате чего сжимающие и растягиваю-

щие напряжения меняются местами. Теперь область растяжения находится непосредственно над выработанным пространством, это связано с обрушением слоев кровли и просадкой вышележащих слоев, что связано с разупрочнением этих литологических разностей и появлением трещин. В то же время на высоте 12...15 м от отработанного пласта образуется область сжатия, размером 15...20 м по ширине и 8...10 м по высоте, напряжения достигают 15 МПа.

Влияние очистных работ на выработку оказывается преимущественно со стороны нетронутого угольного пласта, где происходит распределение сжимающих напряжений в диапазоне 6...9 МПа. Эта область занимает все пространство массива, начиная от выработки, и распространяется на значительную глубину в почву. На штрек оказывается влияние в боку выработки, где образуется концентрация сжимающих напряжений. В кровле выработки, в связи с влиянием анкерного крепления, происходит разрежение, и сжимающие напряжения не достигают выработки.

**Выводы.** В результате проведенного вычислительного эксперимента установлено, что при уменьшении расстояния от груди очистного забоя до дренажного вентиляционного штрека происходит изменение характера распределения напряжений. Если на первом этапе влияние очистных работ на выработку минимально, то с приближением очистных работ влияние увеличивается и приводит к существенным изменениям в напряженно-деформированном состоянии горного массива. Зоны опорного давления впереди механизированного комплекса и в боках выработки соединяются, что приводит к перераспределению напряжений по всему горному массиву между угольным пластом и выработкой. Закономерности изменения НДС таковы, что более активно протекают процессы разупрочнения слабых пород, распространяющиеся на значительные расстояния в кровлю, почву и бока дренажного вентиляционного штрека. В связи с этим можно прогнозировать увеличение вертикальной и боковой нагрузки на крепежную систему и интенсификацию процессов пучения почвы. Результаты вычислительного эксперимента нацеливают на усиление крепежной системы за счет глубинного упрочнения пород кровли и более активного противодействия боковым нагрузкам.

#### Список литературы

1. В.И. Бондаренко, И.А.Ковалевская, Г.А. Симанович, В.В. Фомичев, А.В.Мартовицкий, А.Ф.Копылов Методы расчета перемещений и упрочнения приконтурных пород горных выработок шахт Западного Донбасса// Монография. – Д.: ТОВ «Підприємство «Дріант», 2010.
2. В.И. Бондаренко, Г.А. Симанович, И.А. Ковалевская, В.В. Фомичев Влияние характеристик неоднородности тонкослоистого горного массива на результаты вычислительного эксперимента по устойчивости выемочных выработок // Материалы V Междунар. научн.-практ. конф. «Школа подземной разработки». – Д.: «ЛізуновПрес», 2011. – С. 10-18
3. В.И. Бондаренко, Г.А. Симанович, И.А. Ковалевская, В.В. Фомичев Методология и результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния системы «слоистый массив-крепь» подготовительной выработки // Горный журнал. – М.: Издательский дом «Руда и Металлы». – Специальный выпуск 2010. – С. 62-66.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бондаренком В.І.  
Надійшла до редакції 25.11.13*

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ МИНИМАЛЬНОЙ И МАКСИМАЛЬНОЙ ГРАНИЧНОЙ ПЛОТНОСТИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛИ ОПИСАНИЯ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА УГЛЯ

Предлагаются анализ экспериментальных данных для оценки влияния минимальной и максимальной граничной плотности на устойчивость модели описания фракционного состава угля.

Пропонуються аналіз експериментальних даних для оцінки впливу мінімальної та максимальної граничної щільності на стійкість моделі опису фракційного складу вугілля.

Experimental data are available to assess the impact of minimum and maximum boundary density on the stability of the model describing the fractional composition of coal.

Уменьшение числа и массы проб, что обосновано значительными материальными затратами на проведение фракционного анализа, значительно снижают достоверность определяемых характеристик угля [1]. С другой стороны, решение задач углеобогащения требует наличие достоверной информации о фракционном составе угля [2]. Таким образом, актуальной является не только задача восстановления информации о фракционном составе, но и анализ устойчивости моделей ее описания.

Ввиду того, что предлагаемая модель [3] имеет стохастическую природу, как и метод идентификации параметров модели [4], необходимо проанализировать влияние ошибок различной природы на устойчивость модели в целом. Для этого проведем численный эксперимент в окрестности точки оптимального значения параметров минимальной и максимальной граничной плотности.

Модель фракционного состава угля можно описать такой системой уравнений [5]:

$$\Gamma(\rho) = \frac{1}{1 + (a_0 + a_1 t_\rho) \sqrt{\frac{1}{t_\rho} - 1}}, \quad t_\rho = \left( \frac{\rho - \rho_{01}}{\rho_{k1} - \rho_{01}} \right)^2,$$

$$F(\lambda) = \frac{1}{1 + (b_0 + b_1 t_\lambda) \sqrt{\frac{1}{t_\lambda} - 1}}, \quad t_\lambda = \left( \frac{\lambda - \lambda_{01}}{\lambda_{k1} - \lambda_{01}} \right)^2,$$

$$U(\rho_{i-1}, \rho_i) = \frac{\Lambda(\Gamma_i(\rho_i)) - \Lambda(\Gamma_{i-1}(\rho_{i-1}))}{\Gamma_i(\rho_i) - \Gamma_{i-1}(\rho_{i-1})},$$

$$\Lambda(\Gamma) = \int_0^\Gamma \lambda(\Gamma) d\Gamma,$$

где:  $a_0, a_1, b_0, b_1$  – параметры модели, получаемые по экспериментальным данным,  $\rho_0, \rho_1$  – соответственно минимальная и максимальная граничная плотность.

Рассмотрим экспериментальные данные о фракционном составе угля шахты Бажанова, проведем идентификацию параметров (Табл. 1-2) модели описания фракционного состава и сравним экспериментальные и теоретические результаты (Табл. 3).

Таблица 1

Параметры модели

$a_0$	$a_1$	$b_0$	$b_1$
0,45789431	0,19644532	0,42728046	1,6371409

Таблица 2

Параметры модели

$\rho_0$	$\rho_1$	$\lambda_0$	$\lambda_1$	$\beta_{k_{exp}}$	$\beta_k$
1,28396	2,40061	0,03325521	0,94540927	59,026	59,026

Таблица 3

Сравнение теоретических и экспериментальных данных описания фракционного состава угля (шахты Бажанова).

$\gamma_{exp}, \%$	$\gamma_{teor}, \%$	$ \Delta\gamma $	$A^d_{exp}, \%$	$A^d_{teor}, \%$	$ \Delta A^d $
41,4	41,4	0	17,2	17,3112	0,1112
13,1	13,1	0	74,6	74,1563	0,4437
45,5	45,5	0	92,6	92,6297	0,0297

Из результатов сравнения (Табл.3) видно, что относительная погрешность определения выхода и средней зольности угля узких фракций не превышает погрешности получения экспериментальных данных.

Пусть

$$E_1 = \max_{1 \leq i \leq n} \left| \frac{\gamma_{i \text{ exp}} - \gamma_{i \text{ teor}}}{\gamma_{i \text{ exp}}} \right| - \text{оценка относительной погрешности определения выхода}$$

да в описании фракционного состава,

$$E_2 = \sum_{i=1}^n \left( \gamma_{i \text{ exp}} - \gamma_{i \text{ teor}} \right)^2 - \text{сумма квадратов отклонений выходов узких фракций,}$$

где  $\gamma_{i \text{exp}}, \gamma_{i \text{teor}}$  – соответственно выход  $i$ -й узкой фракции по экспериментальным и теоретическим данным;

$E_3 = \max_{1 \leq i \leq n} \left| \frac{A_{i \text{exp}}^d - A_{i \text{teor}}^d}{A_{i \text{exp}}^d} \right|$  — оценка относительной погрешности определения средней зольности в описании фракционного состава;

$E_4 = \sum_{i=1}^n \left( A_{i \text{exp}}^d - A_{i \text{teor}}^d \right)^2$  — сумма квадратов отклонений средних зольностей узких фракций

где  $A_{i \text{exp}}^d, A_{i \text{teor}}^d$  – соответственно средняя зольность  $i$ -й узкой фракции по экспериментальным и теоретическим данным.

Проведем численный эксперимент в окрестности  $[1,2339643; 1,3334643]$  оптимального значения минимальной граничной зольности  $\rho_0$ . Анализ результатов численного эксперимента показал, что оценка относительной погрешности определения выходов узких фракций (Рис.1)  $[1,2429643; 1,3194643]$  не превышает 0,05, а сумма квадратов отклонений в промежутке  $[1,2829643; 1,2849643]$  (Рис.2) близка к нулю. Поведение модели при определении средней зольности (Рис. 3-4) имеет схожий характер: в диапазоне  $[1,2654643; 1,3034643]$  оценка относительной погрешности не превышает 0,05.

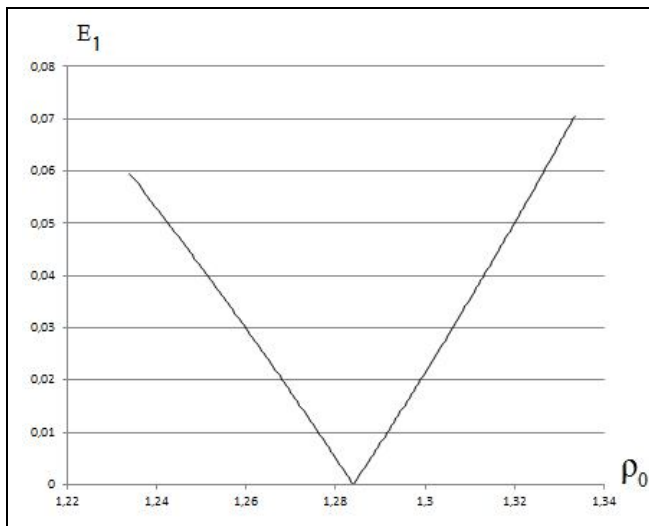


Рис. 1. Зависимость оценки относительной погрешности определения выхода от минимальной граничной плотности

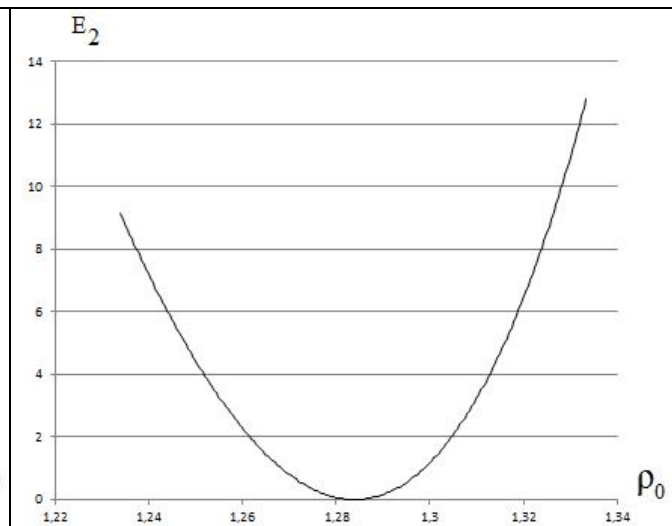
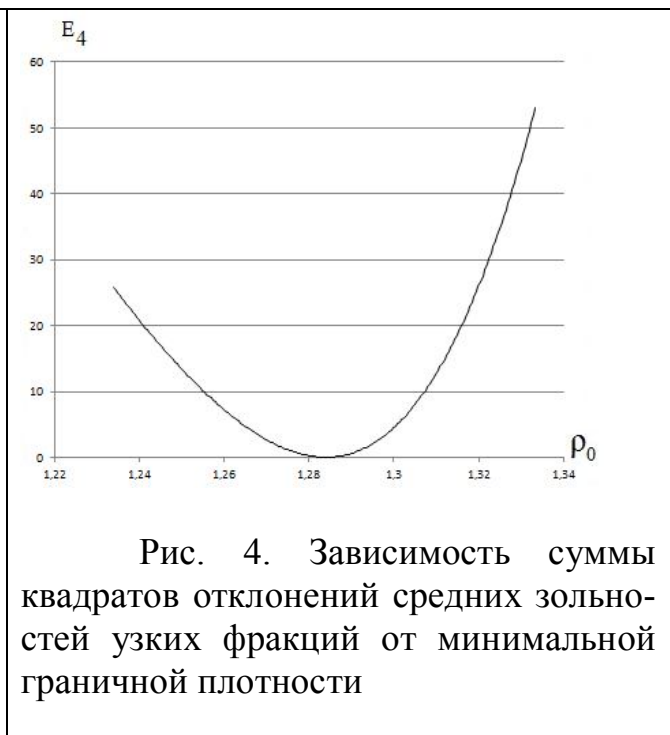
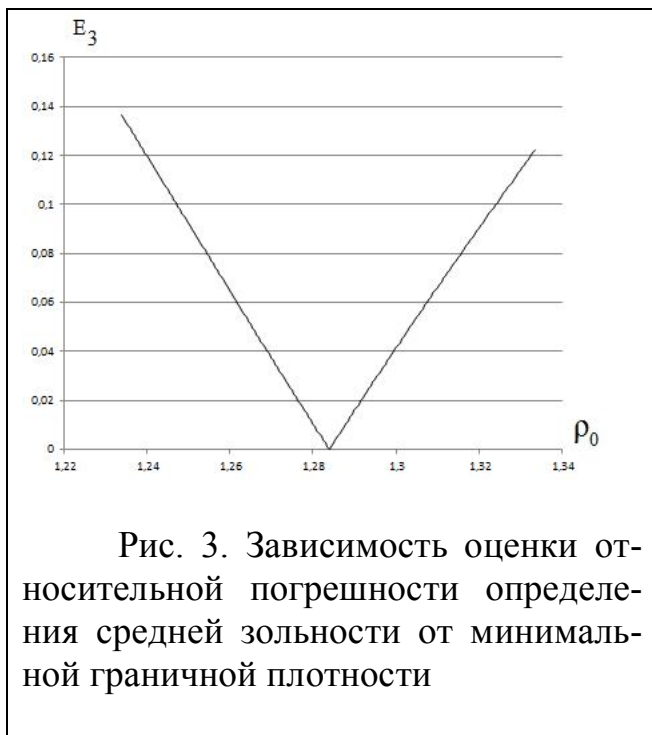
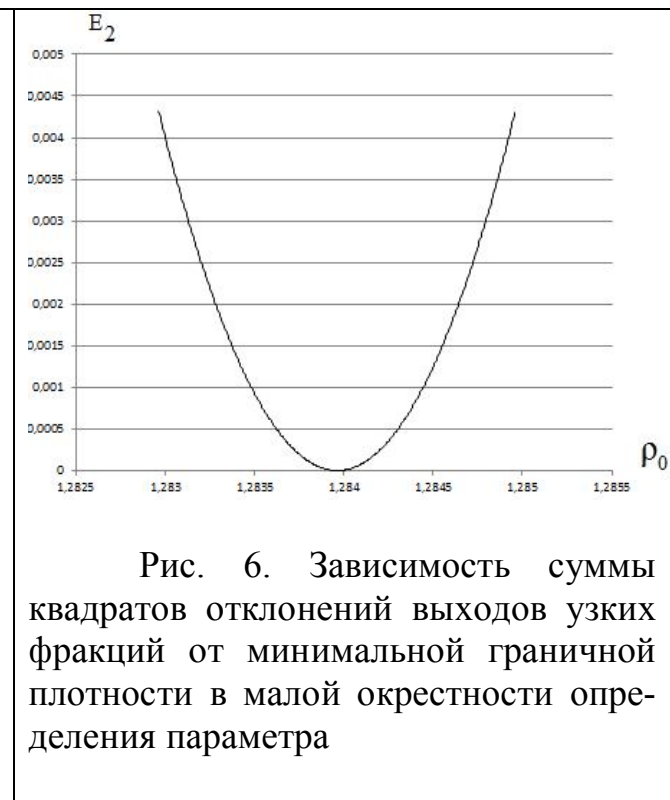
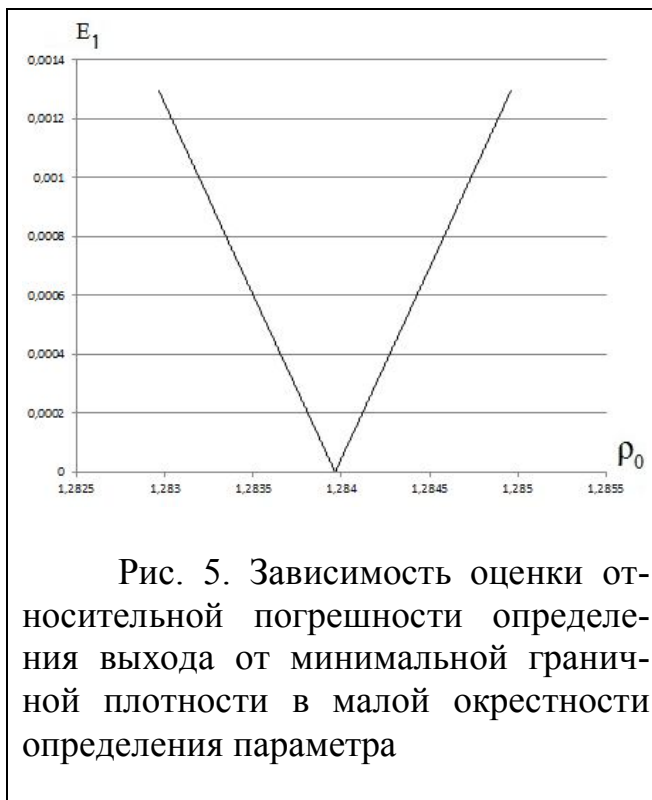


Рис 2. Зависимость суммы квадратов отклонений выходов узких фракций от минимальной граничной плотности



Для уточнения особенностей поведения модели рассмотрим меньшую окрестность  $[1,2829643; 1,2849643]$  параметра  $\rho_0$  с шагом изменения значения параметра  $0,000005$  (Рис.5, Рис.6, Рис.7, Рис.8). Анализ результатов показал, что значащими являются 5 знаков после запятой в определении  $\rho_0$ .



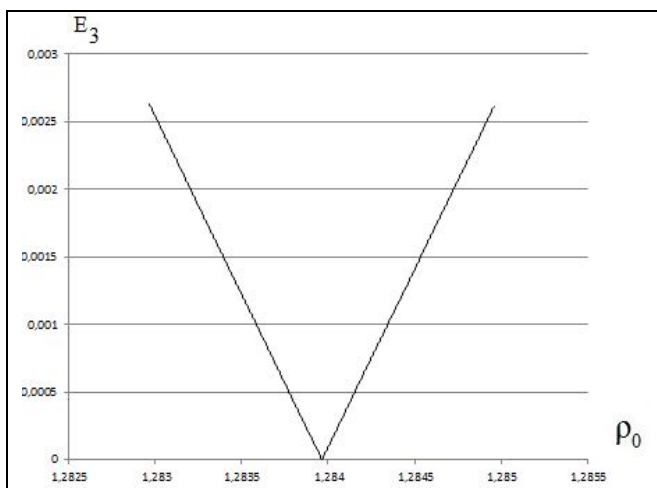


Рис. 7. Зависимость оценки относительной погрешности определения средней зольности от минимальной граничной плотности в малой окрестности определения параметра

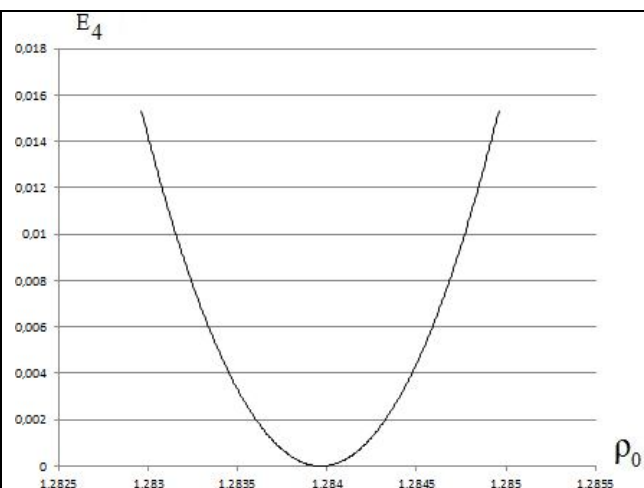


Рис. 8. Зависимость суммы квадратов отклонений средних зольностей узких фракций от минимальной граничной плотности в малой окрестности определения параметра

Проведем численный эксперимент в окрестности  $[2,350612; 2,450112]$  оптимального значения максимальной граничной зольности  $\rho_1$ . Анализ результатов численного эксперимента показал, что оценка относительной погрешности определения выходов узких фракций (Рис.9) во всем выбранном диапазоне не превышает 0,03, а сумма квадратов отклонений в промежутке  $[2,399612; 2,401612]$  (Рис.10) близка к нулю. Поведение модели при определении средней зольности (Рис. 11-12) имеет схожий характер: в диапазоне  $[2,36061212; 2,44661212]$  оценка относительной погрешности не превышает 0,05.

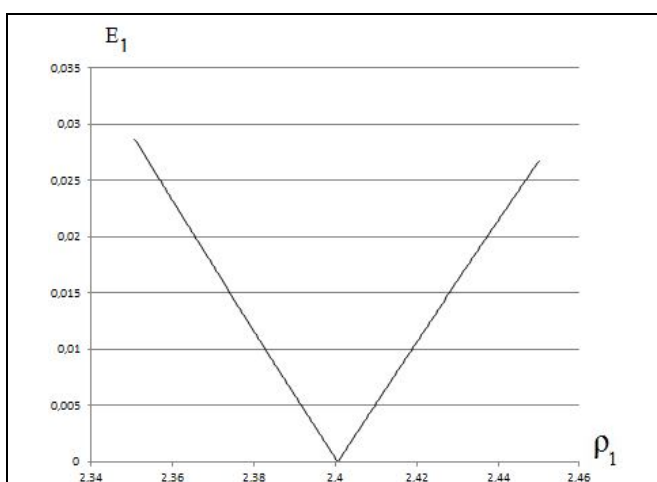


Рис. 9. Зависимость оценки относительной погрешности определения выхода от максимальной граничной плотности

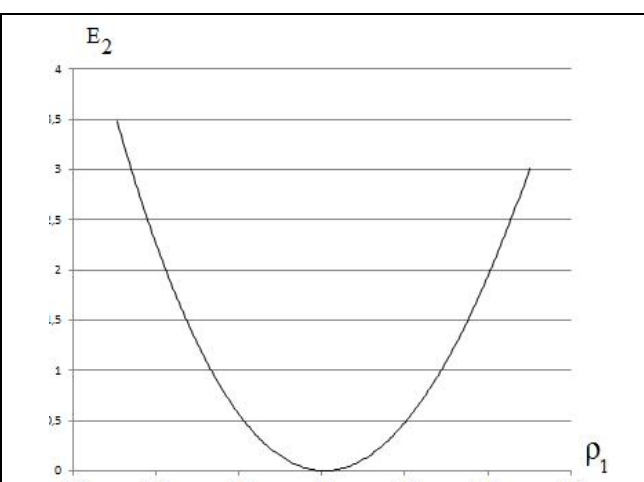


Рис. 10. Зависимость суммы квадратов отклонений выходов узких фракций от максимальной граничной плотности

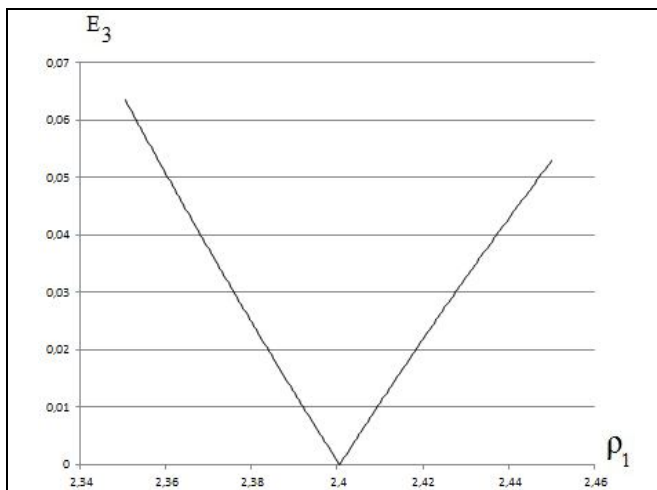


Рис. 11. Зависимость оценки относительной погрешности определения средней зольности от максимальной граничной плотности

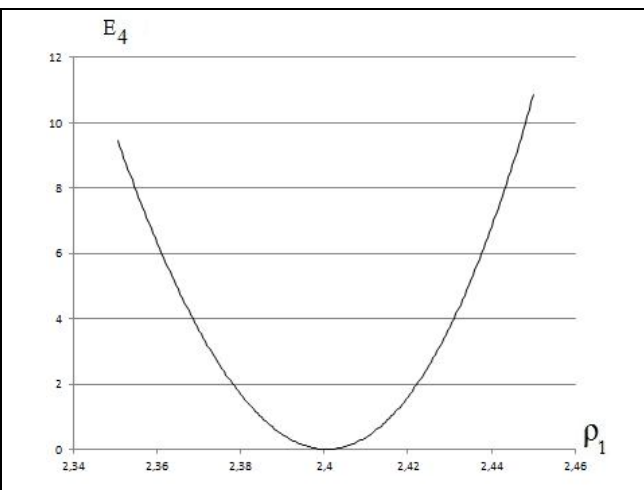


Рис. 12. Зависимость суммы квадратов отклонений средних зольностей узких фракций от максимальной граничной плотности

Для уточнения особенностей поведения модели рассмотрим меньшую окрестность  $[2,399612; 2,401612]$  параметра  $\rho_1$  с шагом изменения значения параметра  $0,000005$  (Рис.13, Рис.14, Рис.15, Рис.16). Анализ результатов показал, что значащими являются 5 знаков после запятой в определении  $\rho_1$ .

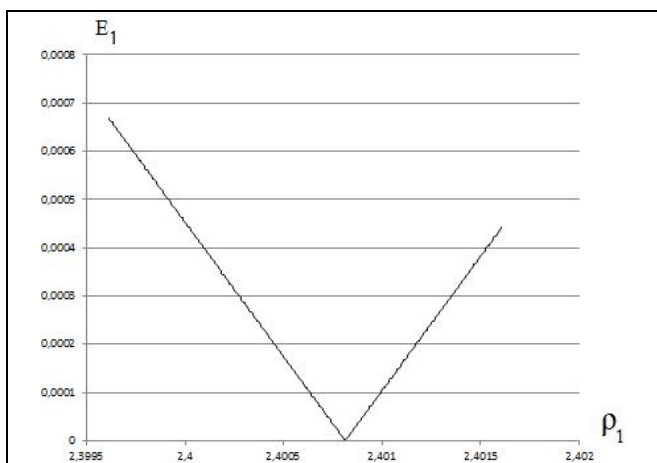


Рис. 13. Зависимость оценки относительной погрешности определения выхода от максимальной граничной плотности в малой окрестности определения параметра

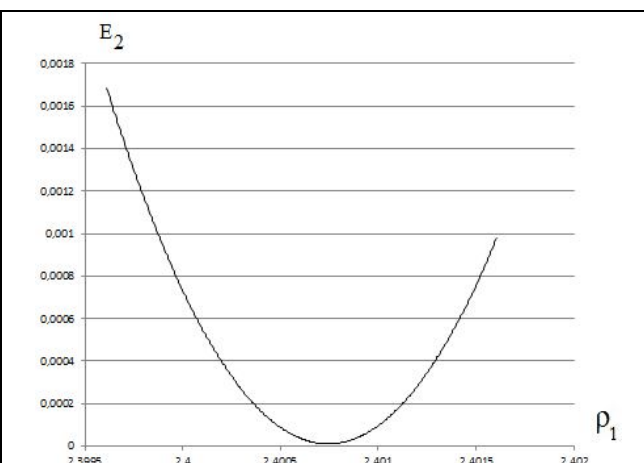


Рис. 14. Зависимость суммы квадратов отклонений выходов узких фракций от максимальной граничной плотности в малой окрестности определения параметра

Исходя из анализа данных проведенного численного эксперимента, модель описания фракционного состава угля устойчива при определении минимальной и



максимальной граничной плотности с точностью 2 знака после запятой (то есть при ошибках определения данных параметров начиная с 3 знака после запятой), при этом значащими для модели являются 5 знаков после запятой.

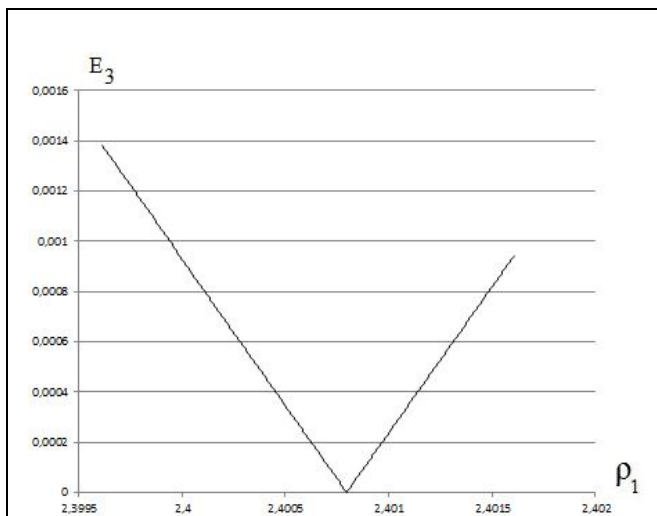


Рис. 15. Зависимость оценки относительной погрешности определения средней зольности от максимальной граничной плотности в малой окрестности определения параметра

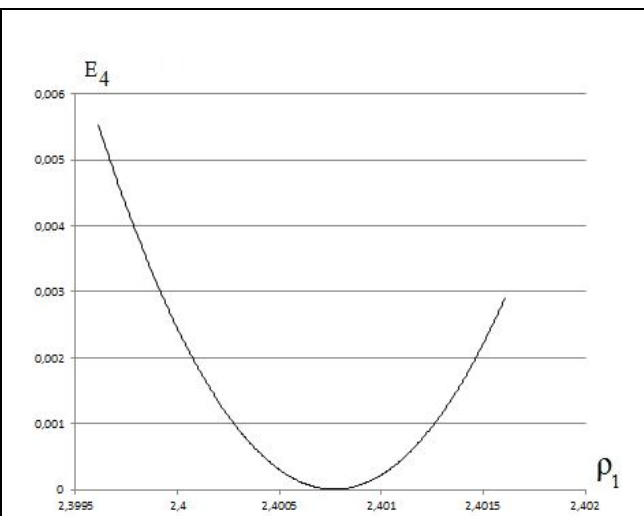


Рис. 16. Зависимость суммы квадратов отклонений средних зольностей узких фракций от максимальной граничной плотности в малой окрестности определения параметра

#### Список литературы

1. Формалізація результатів розподільчих процесів у вуглезбагаченні / [В.К. Гарус , О.В. Грачев, В.Ф. Пожидаев, О.Д. Полулях]: Монографія. – Луганськ: вид. ООО «НВФ»СТЕК», 2003. – 176 с. – ISBN 966-96298-3-2
2. Грачев О. В. Эффективность повышения стабильности качества угольных концентратов // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2003. – № 4 (62). – С.126-129.
3. Грачев О. В. Вид весовой функции распределения плотности и зольности угля по фракциям / В. Ф. Пожидаев, О. В. Грачев // Науковці – підприємствам і установам регіону: Зб. наук. праць СХУ ім. В. Даля. – Луганськ, 2002. – Ч.2. – С. 35.
4. Грачев О.В. Синтез детерминированного и стохастического алгоритмов поиска глобального экстремума с обучением / В. Ф. Пожидаев, О. В. Грачев // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2008. – №9 Ч.1. (127). – С. 170-174.
5. Грачев О.В. О неизменности вида функций распределения граничных плотностей и зольностей угля по фракциям // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2010. – №2(144). – С. 41-46.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Мещеряковим Л.І.  
Надійшла до редакції 11.11.13*

## ОПТИМИЗАЦИЯ КОМБИНАТОРНЫХ ПЛАНОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для повышения эффективности экспериментальных исследований рассмотрены алгоритмические и программные средства оптимизации комбинаторных планов экспериментов. Проведено сравнение оптимальных планов получаемых программным обеспечением с использованием метода ветвей и границ и метода последовательного приближения. На основании полученных результатов были даны рекомендации по применению программ оптимизации комбинаторных.

Для підвищення ефективності експериментальних досліджень розглянуті алгоритмічні і програмні засоби оптимізації комбінаторних планів експерименту. Проведено порівняння оптимальних планів отриманих за допомогою програмного забезпечення з використанням методу гілок та меж і методу послідовного наближення. На основі отриманих результатів були дані рекомендації по використанню програм оптимізації комбінаторних планів.

To increase the effectiveness of experimental studies examined the algorithmic and software tools of combinatorial optimization designs of experiments. A comparison of optimal designs obtained by the software using branch and bound method and the method of successive approximation. Recommendations were made on the application of combinatorial optimization programs using obtained results.

**Постановка проблемы.** При решении задач исследования различных технологических процессов и систем возникает проблема получения математических моделей указанных объектов. Для этого зачастую целесообразно использование методов планирования эксперимента, которые позволяют сформировать план его проведения. Однако, по мере роста сложности исследуемых процессов и приборов значительно возрастают затраты на проведение экспериментов. Поэтому при исследовании дорогостоящих или длительных процессов целесообразно оптимизировать план эксперимента.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Для решения этой задачи было разработано алгоритмическое и программное обеспечение, основанное на использовании метода ветвей и границ [1] и метода последовательного приближения [2]. Так в работе [3] разработан алгоритм оптимизации планов проведения эксперимента, основанный на использовании метода ветвей и границ. При этом в качестве критериев оптимизации применялись критерий минимальной стоимости реализации эксперимента и наименьшей длительности его проведения

$$S_0 = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k S_{i,j} \rightarrow \min, \quad (1)$$

или

$$t_0 = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k t_{i,j} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $S_{i,j}$  – стоимость установки  $i$ -го фактора в  $j$ -ом опыте;  $t_{i,j}$  – время установки  $i$ -го фактора в  $j$ -ом опыте;  $k$  – количество факторов;  $n$  – количество опытов.

Кроме того, данный метод был применен в работе [4] для двухпараметрической оптимизации планов экспериментов. Оптимизация плана эксперимента осуществляется по стоимостным или временным затратам на реализацию эксперимента с ограничением на длительность или стоимость его проведения соответственно

$$S_0 = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k S_{i,j} \rightarrow \min \text{ при } t_0 \leq t_{\text{огр.}}, \quad (3)$$

или

$$t_0 = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k t_{i,j} \rightarrow \min \text{ при } S_0 \leq S_{\text{огр.}}, \quad (4)$$

где  $t_0$  - суммарное время проведения эксперимента;  $t_{\text{огр.}}$  - ограничение на суммарное время проведения эксперимента;  $S_{\text{огр.}}$  - ограничение на суммарную стоимость проведения эксперимента.

Также метод ветвей и границ был применен для двухпараметрической оптимизации планов эксперимента [5], где в качестве критерия оптимизации использовалась формула

$$\sum \frac{S_{i \rightarrow j} \cdot K_1}{N_1} + \sum \frac{t_{i \rightarrow j} \cdot K_2}{N_2} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где  $K_1, K_2$  – весовые коэффициенты для стоимостного и временного параметра оптимизации соответственно;  $N_1, N_2$  – нормирующие значения для стоимостного и временного параметра оптимизации соответственно;  $t_{i \rightarrow j}$  – время перехода из  $i$ -го эксперимента в  $j$ -ый;  $S_{i \rightarrow j}$  – время перехода из  $i$ -го эксперимента в  $j$ -ый.

Нормирующие значения определяются следующим образом

$$\begin{aligned} N_1 &= \max \{S_{1 \rightarrow 2}, S_{1 \rightarrow 3}, \dots, S_{2 \rightarrow 1}, S_{2 \rightarrow 3}, \dots, S_{i \rightarrow j}, \dots, S_{n-1 \rightarrow n}, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n\}; \\ N_2 &= \max \{t_{1 \rightarrow 2}, t_{1 \rightarrow 3}, \dots, t_{2 \rightarrow 1}, t_{2 \rightarrow 3}, \dots, t_{i \rightarrow j}, \dots, t_{n-1 \rightarrow n}, T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n\}. \end{aligned} \quad (6)$$

В этой работе указано, что весовые коэффициенты  $K_1, K_2$  позволяют варьировать значимость соответствующего параметра оптимизации: чем выше значение весового коэффициента, тем выше значимость соответствующего параметра оптимизации.

В статье [6] приведен алгоритм однофакторной оптимизации планов проведения экспериментов, использующий метод последовательного приближения. Оптимизация проводилась с использованием критериев 1 и 2.

На основе метода последовательного приближения также был разработан алгоритм [7] двухпараметрической оптимизации композиционных планов, использующий критерий (5).

**Цель статьи:** провести сравнительный анализ существующих методов оптимизации планов эксперимента и дать рекомендации по их применению.

**Основные результаты исследований.** В работе [3] для исследования полупроводникового терморегулятора (задача 1) с использованием алгоритма, реализующего оптимизацию методом ветвей и границ, получен оптимальный по стоимости план ротатбельного центрального композиционного планирования (РЦКП).

Кроме того, для этой задачи в работе [4] был получен ряд оптимальных по стоимости планов с ограничением на время реализации эксперимента. С использованием программы, реализующей оптимизацию планов экспериментов методом последовательного приближения, синтезирован оптимальный по стоимости план РЦКП (табл. 1).

Таблица 1

Оптимальные планы (Задача 1 и 2)

Оптимальный план (Задача 1)					Оптимальный план (Задача 2)		
Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов	
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>
1	-1	-1	-1	-1	5	-α	0
2	+1	-1	-1	-1	10	0	0
3	-1	+1	-1	-1	11	0	0
4	+1	+1	-1	-1	13	0	0
5	-1	-1	+1	-1	12	0	0
6	+1	-1	+1	-1	9	0	0
7	-1	+1	+1	-1	6	+α	0
8	+1	+1	+1	-1	3	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1	1	-1	-1
10	+1	-1	-1	+1	7	0	-α
11	-1	+1	-1	+1			
12	+1	+1	-1	+1			
13	-1	-1	+1	+1			
14	+1	-1	+1	+1			
15	-1	+1	+1	+1			
16	+1	+1	+1	+1			
17	-α	0	0	0			
18	+α	0	0	0			
19	0	-α	0	0			
20	0	+α	0	0			
21	0	0	-α	0			
22	0	0	+α	0			
23	0	0	0	-α			
24	0	0	0	+α			
25	0	0	0	0			
26	0	0	0	0			
27	0	0	0	0			
28	0	0	0	0			
29	0	0	0	0			
30	0	0	0	0			
31	0	0	0	0			

В таблице 2 приведен сравнительный анализ полученных результатов оптимизации плана РЦКП различными алгоритмами.

Таблица 2

Сравнительный анализ результатов оптимизации (Задача 1)

Метод	Метод ветвей и границ				Метод последовательного приближения
	План 1	План 2	План 3	План 4	
Результат, усл. ед.	134,9	135,2	136,3	226,9	135,7
Время реализации эксперимента	1161	1061,8	991,7	899	1001,7
Ограничение по времени, мин.	–	1100	1000	900	–
Выигрыш	4,20	4,19	4,15	2,5	4,17
Время решения, с	7	7	7	7	меньше 1
Объем памяти ЭВМ, МБ	140	145	145	145	14

Также в работе [3] проведена оптимизация исследования процесса травления кристаллов в производстве полупроводниковых приборов (задача 2). В результате был получен оптимальный по стоимости план проведения эксперимента. Кроме того оптимизация этого исследования была проведена с использованием алгоритма последовательного приближения. Полученный план приведен в таблице 1. Сравнительный анализ полученных результатов приведен в таблице 3.

Таблица 3

Сравнительный анализ результатов оптимизации (Задача 2 и 3)

Метод	Метод последовательного приближения (задача 2)	Метод ветвей и границ (задача 2)	Метод последовательного приближения (задача 3)	Метод ветвей и границ (задача 3)
Результат	46,7	46,7	8556,2	8556,2
Выигрыш	3,06	3,06	1,73	1,73
Время решения, с	меньше 1	меньше 1	меньше 1	8
Объем памяти ЭВМ, МБ	13,3	40,4	16,6	156

В работе [8] был синтезирован оптимальный по времени реализации план исследования работы оператора на пульте управления сложной радиоэлектрон-

ной системы (задача 3). Синтез проводился с использованием алгоритма, реализующего метод ветвей и границ. Аналогично был получен оптимальный план с использованием алгоритма, основанного на методе последовательного приближения (таблица 4).

Таблица 4

Оптимальный планы (Задача 3 и 5)

Оптимальный план (Задача 3)						Оптимальный план (Задача 5)					
Номер опыта	Обозначение факторов					Номер опыта	Обозначение факторов				
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub> =X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>		X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
24	0	0	0	+a	0	4	-1	-1	+1	+1	+1
23	0	0	0	-a	0	8	+1	0	+1	+1	+1
19	0	-a	0	0	0	13	+1	-1	+1	+1	-1
20	0	+a	0	0	0	10	-1	0	+1	+1	-1
21	0	0	-a	0	0	1	-1	-1	+1	-1	-1
22	0	0	+a	0	0	11	+1	0	+1	-1	-1
28	0	0	0	0	0	5	+1	+1	+1	-1	-1
29	0	0	0	0	0	7	-1	+1	+1	-1	+1
31	0	0	0	0	0	14	+1	-1	+1	-1	+1
32	0	0	0	0	0	12	-1	-1	-1	-1	+1
27	0	0	0	0	0	15	+1	-1	-1	+1	+1
30	0	0	0	0	0	17	-1	-1	-1	+1	-1
17	-a	0	0	0	0	2	-1	-1	-1	+1	-1
18	+a	0	0	0	0	9	+1	-1	-1	-1	-1
26	0	0	0	0	+a	6	-1	+1	-1	-1	-1
25	0	0	0	0	-a	16	+1	+1	-1	+1	-1
14	-1	+1	-1	-1	-1	3	-1	+1	-1	+1	+1
15	+1	-1	-1	-1	-1	18	+1	+1	-1	-1	+1
9	+1	+1	+1	-1	-1						
12	-1	-1	+1	-1	-1						
10	-1	+1	+1	-1	+1						
11	+1	-1	+1	-1	+1						
13	+1	+1	-1	-1	+1						
16	-1	-1	-1	-1	+1						
6	-1	+1	-1	+1	+1						
7	+1	-1	-1	+1	+1						
1	+1	+1	+1	+1	+1						
4	-1	-1	+1	+1	+1						
2	-1	+1	+1	+1	-1						
3	+1	-1	+1	+1	-1						
5	+1	+1	-1	+1	-1						
8	-1	-1	-1	+1	-1						

В работе [7] была проведена оптимизация моделирования процесса получения пористых материалов (задача 4) с использованием программного обеспечения основанного на использовании метода ветвей и границ и метода последовательного приближения. Оптимизация проводилась с использованием критериев 1, 2 и 5 (с различными весовыми коэффициентами). Полученные результаты приведены в таблице 5.

Таблица 5

Сравнительный анализ результатов оптимизации (Задача 2)

Критерий оптимизации	Метод ветвей и границ		Метод последовательного приближения	
	$B_s$	$B_i$	$B_s$	$B_i$
Формула (1)	5,47	7,33	5,47	7,24
Формула (2)	3,54	12,58	3,54	12,34
Формула (5) при $K_1=1, K_2=1$	4,36	11,79	4,29	12
Формула (5) при $K_1=2, K_2=1$	5,46	7,33	5,46	7,17
Формула (5) при $K_1=1, K_2=2$	4,29	12,23	4,35	11,37

В работе [6] были получены оптимальные по стоимости реализации планы проведения экспериментов по исследованию технологического процесса получения попкорна (задача 5). Планы были получены с использованием методов последовательного приближения и метода ветвей и границ. В работе [5] для этого же исследования были синтезированы оптимальный по критерию (5) план эксперимента, а также оптимальный по стоимости план с ограничением на время реализации эксперимента. Кроме того, с использованием программы, реализующей оптимизацию планов экспериментов методом последовательного приближения, синтезирован оптимальный по критерию (5) план эксперимента (табл. 4).

В таблице 6 приведен сравнительный анализ полученных результатов оптимизации плана эксперимента различными алгоритмами.

Таблица 6

Сравнительный анализ результатов оптимизации (Задача 5)

Метод	Метод ветвей и границ			Метод последовательного приближения	
	План 1	План 2	План 3	План 1	План 2
Результат, усл. ед.	20,6	24,65	30,81	21,36	33,45
Время реализации эксперимент	70	60	38	78	42
Ограничение по времени, мин.	–	60	–	–	–
K1	–	–	1	–	1
K2	–	–	1	–	1
Выигрыш по стоимости	3,48	2,91	2,33	3,36	2,14
Выигрыш по времени	1,37	1,6	2,53	1,23	2,28
Время решения, с	2	2	2	меньше 1	меньше 1
Объем памяти ЭВМ, МБ	150	156	156	13,5	14,5

**Выводы.** Применение алгоритмов оптимизации планов экспериментов, основанных на методе ветвей и границ и методе последовательного приближения, позволяет значительно сократить затраты на проведение экспериментов, а также снизить длительность их проведение. Из таблиц 2, 3, 5, 6 видно, что алгоритм, основанный на методе ветвей и границ, позволяет получать несколько большие выигрыши, однако при этом требует существенно больших объемов памяти ЭВМ, а также времени на решение. Кроме того, результаты полученные в работах [4, 5, 7] показывают возможность применения метода ветвей и границ и метода последовательного приближения для двухпараметрической оптимизации планов проведения экспериментов. На основании полученных результатов можно дать следующие рекомендации по оптимизации планов проведения экспериментов.

1. При исследовании дорогостоящих или длительных процессов целесообразно проводить оптимизацию, используя алгоритмы, основанные на методах ветвей и границ и последовательного приближения, с применением критериев 1 или 2 соответственно. При этом метод ветвей и границ позволяет получать большие выигрыши, однако затрачивает при этом значительно больше оперативной памяти компьютера и времени на оптимизацию.

2. В случаях, когда существует ограничение на стоимость или длительность проведения эксперимента, целесообразно применять алгоритм, основанный на методе ветвей и границ, с использованием критериев 4 и 3 соответственно. Алгоритма, основанного на методе последовательного приближения, для этого случая не разработано.

3. В случае, когда важно и время, и стоимость реализации эксперимента целесообразно применять оптимизации с использованием критерия 5. При этом весовые коэффициенты позволяют варьировать значимостью соответствующих параметров оптимизации. Оптимизацию можно проводить как с использованием метода ветвей и границ, так и с использованием метода последовательного приближения.

Дальнейшие исследования будут направлены на развитие алгоритмического и программного обеспечения оптимизации планов экспериментов.

#### Список литературы

1. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
2. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Чуйко А. С. Метод последовательного приближения для решения задачи коммивояжера // Математичне моделювання. – 2012. – №1. – С. 58-61.
3. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Чуйко А. С. Применение метода ветвей и границ для оптимизации композиционных планов второго порядка // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2010. – Вип.25. – С. 95-101.
4. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Чуйко А. С. Применение метода ветвей и границ для двухпараметрической оптимизации композиционных планов второго порядка// Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2011. – Вип. 32. – С. 124-131.
5. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Чуйко А. С. Оптимальне планування експерименту при дослідженні технологічного процесу приготування попкорна в мікрохвильовій печі // Харчова промисловість. – 2011.



6. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Чуйко А. С. Применение методов ветвей и границ и последовательного приближения для оптимизации моделирования процесса получения пористых материалов // Оптимизация производственных процессов. – 2011, Вып. 13, – С. 69-74.
7. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Чуйко А. С. Алгоритм оптимизации композиционных планов второго порядка методом ветвей и границ // Математичне моделювання. – 2010. – №2(23). – С. 14-18.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Мещеряковим Л.І.  
Надійшла до редакції 11.11.13*

УДК 622.73: 004.67:004.9

© Л.И. Мещеряков, В.А. Новодранова, А.В. Прядко

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ**

Проведений аналіз особливостей струменевого подрібнення. Показана можливість застосування акустоемісійного методу для аналізу процесу струменевого подрібнення. Запропонована система аналізу даних акустичного моніторингу струменевого подрібнення.

Проведен анализ особенностей струйного измельчения. Показана возможность применения акустоэмиссионного метода для анализа процесса струйного измельчения. Предложена система анализа данных акустического мониторинга струйного измельчения.

The analysis is conducted of features of the stream growing shallow. Possibility is shown of application of akustoemissionnogo method for the analysis of process of the stream growing shallow. The system is offered of data analysis of the acoustic monitoring of the stream growing shallow.

Перспективним апаратом для здійснення тонкого помолу і одночасного обогачення матеріалів являється пневмоструйна протivotочна мельниця. Реалізуємий в ній спосіб високоскоростного самоизмельчения матеріалів дозволяє підвищити не тільки дисперсність отримуваного продукту, але і удельну продуктивність измельчителя, його енергонапруженність і к.п.д.

Крім того, з'являється можливість реально використовувати переваги високоскоростного вибіркового измельчения багатокомпонентних сумішей матеріалу з отриманням продуктів з заданими властивостями і, що немаловажно, хімічно чистих від шкідливих домішок. Процеси струйного измельчения використовують для підготовки мінерального сиров'язу в горній, хімічній, будівельній промисловості, в виробництві скла, пластмас, порошкової металургії, кераміки, вибухчатих речовин, твердих топлив, лікарської продукції і інших видів тонкодисперсних матеріалів. Такі мельниці мають ще цілий ряд переваг порівняно з іншими мельницями струйного типу: простота конструкції; відносно невисокий витрат енергоносія через малу кількість робочих сопел; можливість роботи мельниці в замкнутому циклі.

**Целью статьи** является обоснование применения акустического мониторинга для исследования процесса струйного измельчения и разработка системы анализа его результатов.

Труднораскрываемые и трудноизмельчаемые рудные и техногенные материалы требуют в процессе измельчения специальной обработки, связанной с нагружением их до высокой плотности энергии. Дезинтеграцию частиц в энергонапряженных режимах, развивающих в веществе высокие напряжения и высокие деформации, на практике осуществляют газодинамическим способом измельчения путем превращения потенциальной энергии рабочего газа в кинетическую энергию разгоняемых струями частиц. Для создания режимов высоких давлений используется энергия рабочего газа (воздух, азот и др.), сжатого до давлений в диапазоне 0,3–2,0 МПа, холодного или нагретого до температуры  $T \cong 40\text{--}600\text{ }^\circ\text{C}$ . В этом способе дезинтеграция (разрушение частиц, раскрытие минералов, измельчение, диспергирование) происходит без мелющих тел и без сопутствующего мелющим телам их износа, и следовательно, без приноса в продукт примесей от износа мелющих тел. Частицы измельчаются в результате взаимных столкновений друг с другом при нагружении высокоскоростными ударами, динамическим трением или в комбинированном режиме – сочетанием этих двух механизмов разрушения.

Для исследования процесса измельчения используется акустоэмиссионный метод [3, 4]. Акустическая эмиссия (АЭ) – это ультразвуковые колебания, возникающие при возникновении и развитии дефектов в контролируемом объекте под воздействием нагрузки. Акустико-эмиссионный метод основан на регистрации и анализе параметров сигналов акустической эмиссии, вызванной динамической локальной перестройкой структуры материала контролируемого объекта, обусловленной наличием и развитием в них дефектов. Источниками импульсной акустической эмиссии (АЭ) возникают в результате процессов развития трещин, переход материала в пластическое состояние и т.п., а также, процессы, связанные с наличием дефектов – трение берегов трещины, разрушение продуктов коррозии в полости трещины, разрушение и отслоение шлаковых включений. Дополнительные сигналы такого типа могут быть вызваны механическими воздействиями на контролируемую конструкцию типа ударов сторонних или плохо закрепленных предметов, трением подвижных частей, действием атмосферных осадков и т.д.

При измельчении материалов в противоточной струйной мельнице происходит выделение акустических сигналов в камере измельчения. Для их фиксации и дальнейшего анализа используется метод акустической эмиссии. На рис. 1 показана схема струйной установки с элементами оборудования для проведения акустического мониторинга.

Для реализации акустического мониторинга была разработана аппаратная измерительная система, которая показана на рис. 2.

Методика исследований параметров акустических сигналов заключалась в следующем. В процессе работы газоструйной установки регистрируются и анализируются следующие параметры акустического излучения:

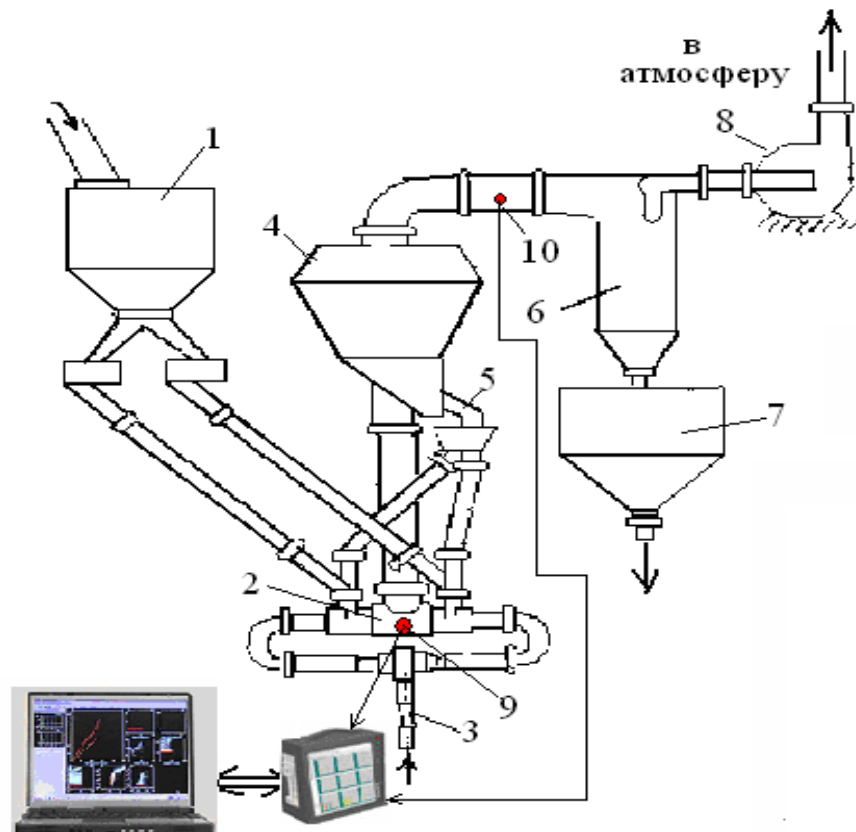


Рис. 1. Схема акустического мониторинга струйной измельчительной установки: 1– загрузочный бункер, 2 – помольная камера, 3 – подвод энергоносителя, 4 – классификатор, 5 – возврат материала, 6 – циклон, 7 – бункер готового продукта, 8 – вентилятор, 9, 10, - места установки датчиков 1, 2

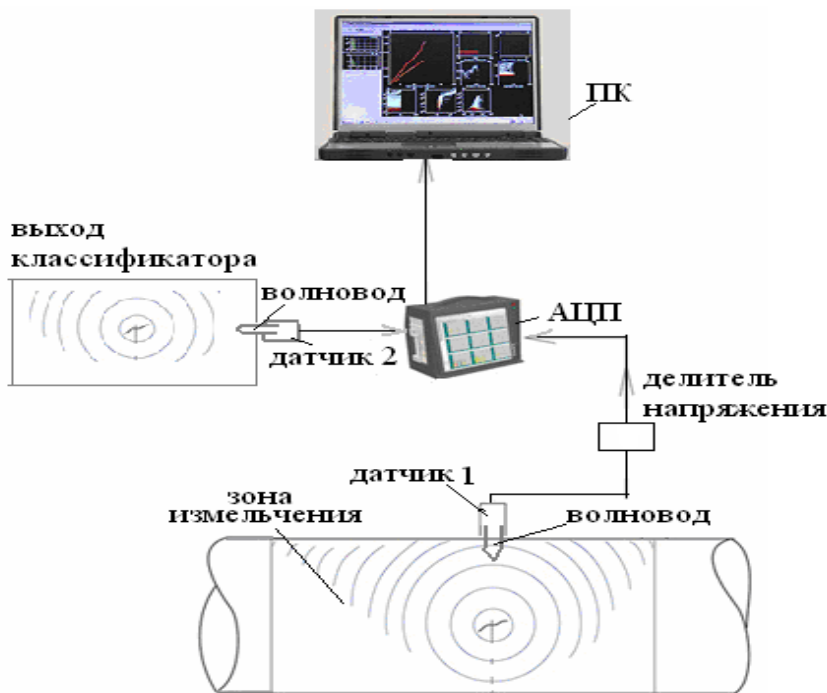


Рис. 2. Схема акустической измерительной системы

- общее число импульсов акустической эмиссии, то есть число зарегистрированных импульсов дискретной АЭ за исследуемый интервал времени;
- активность АЭ - общее число импульсов АЭ, отнесенное к единице времени;
- амплитуда АЭ - максимальное значение сигнала АЭ за выбранный интервал времени;
- распределение амплитуд АЭ за исследуемый интервал времени.

Измельчению подвергается твердый сыпучий материал разной плотности и разной крупности. В экспериментах необходимо установить корреляционные зависимости между параметрами АЭ, технологическими параметрами и показателями газоструйного процесса измельчения.

Исследуется работа мельницы в различных режимах загрузки струй материалом: полной разгрузки, устойчивой (стабильной) работы с оптимальным заполнением струй материалом и перегрузки (состояния завала). Как показали предварительные испытания, изучаемым режимам соответствуют различные показания  $N$  активности излучения и значений амплитуды  $A$  акустических сигналов (см. рис. 3).

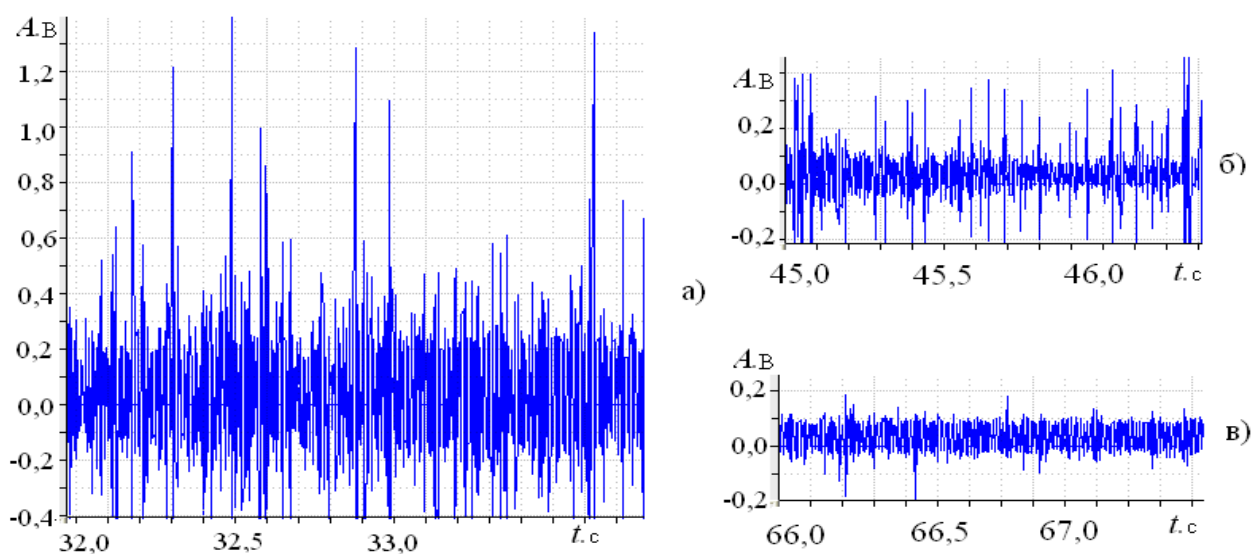


Рис. 3. Амплитудные характеристики АС в разных режимах загрузки лабораторной установки (материал – кварцевый песок, размеры частиц менее 0,8 мм): а) подача материала; б) рабочий режим; в) разгрузка струй.

Исследования показали, что по величине амплитуды можно судить о стадии измельчения (режиме загрузки струй материалом), о дисперсности материала и измельченного продукта. На рис. 4 показано различие амплитуд АС процесса измельчения шамота в зоне измельчения (б) и в потоке готового измельченного продукта (а), поступающего из классификатора.

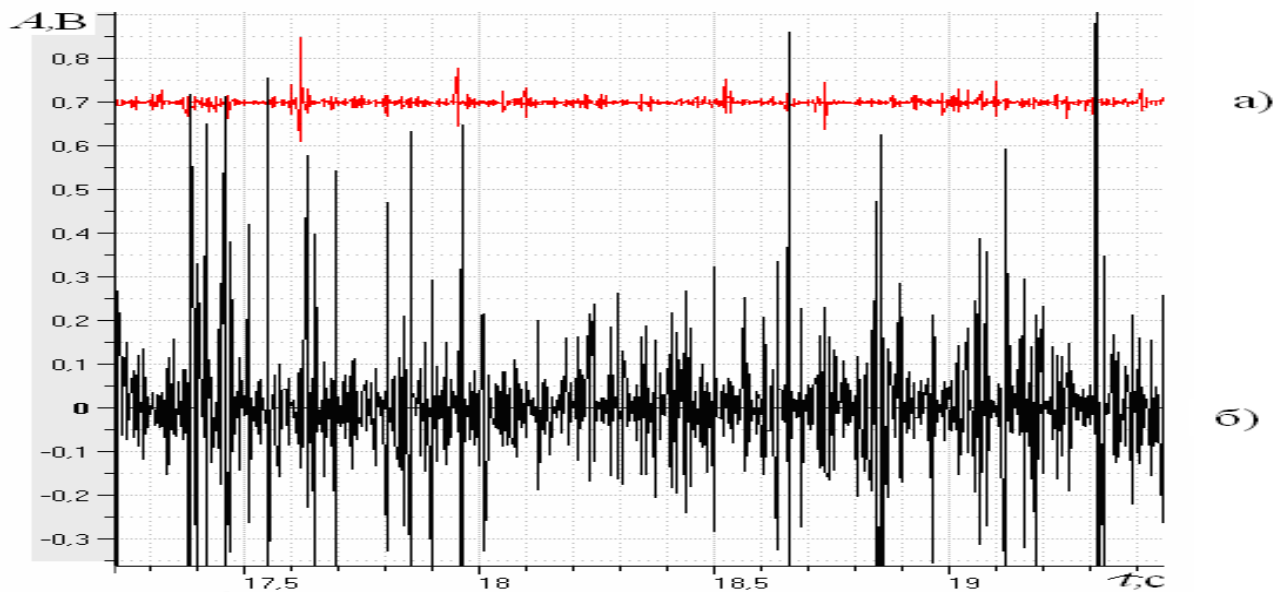


Рис. 4. Запись сигналов в зоне за классификатором (а) и в зоне измельчения (б)

Установлены зависимости акустических параметров от технологических параметров процесса измельчения. Помимо амплитуды сигналов информативным параметром является активность сигналов. По величине активности малоамплитудных сигналов можно судить о заполненности мельницы необходимостью производить ее загрузку.

**Выводы.** Разработаны основы системы анализа данных мониторинга струйного измельчения, показано применение системы для исследования различных режимов измельчения. Необходимо выявить информативные параметры акустических сигналов и расширить систему анализа данных мониторинга процесса.

#### Список литературы

1. Филин В.Я. Современное оборудование для тонкого и сверхтонкого измельчения / В.Я. Филин, М.В. Акимов. - М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. - 47 с.
2. Трипалин А.С., Буйло С.И. Акустическая эмиссия. Физико-механические аспекты.
3. Пилов П.И. Акустические и технологические характеристики процесса измельчения в струйной мельнице / П. И. Пилов, Л. Ж. Горобец, В. Н. Бовенко, Н. С. Прядко.- Известия вузов. Горный журнал. – 2009. – №4. – С. 117 – 121.
4. Горобец Л.Ж. Интенсификация процесса струйного измельчения на основе анализа акустических параметров / Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, И. А. Шуляк, Ю. Г. Соболевская.- Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 2(54). – С. 15 – 19

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Слесаревим В.В.  
Надійшла до редакції 11.11.13*

## СИСТЕМА АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ГАЗОСТРУЙНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Предложена система анализа акустических сигналов зоны измельчения струйной мельницы, основанная на установленных критериях и акустических параметрах работы мельницы. Для контроля качества получаемого продукта система дополнена показателями вейвлет - анализа и преобразования Гильберта-Хуанга акустических сигналов зоны измельчения

Запропоновано систему аналізу акустичних сигналів зони дрібнювання струминного млина, засновану на встановлених критеріях і акустичних параметрах роботи млина. Для контролю якості одержуваного продукту система доповнена показниками вейвлет - аналізу й перетворення Гільберта-Хуанга акустичних сигналів зони дрібнювання

The system of the acoustic signals analysis of a crushing zone of the jet mill, based on the established criteria and acoustic parameters of mill operating is offered. For quality assurance of a received product the system is added with parameters of the wavelet-analysis and Hilbert-Huang transformation of acoustic signals of a crushing zone

Струйное измельчение сыпучих материалов применяется для получения тонкодисперсных порошков при переработке полезных ископаемых. Однако, этот способ дезинтеграции минерального сырья отличается большой энергоемкостью при получении тонких порошков, что вызывает необходимость установления и поддержания наиболее эффективного режима измельчения.

Известные способы оптимизации процесса измельчения путем контроля температуры и разрежения по тракту струйной мельницы обладают значительной погрешностью и запаздыванием при оценке производительности и энергопотребления струйной мельницы. Знание физических закономерностей диспергирования и накопленный опыт экспериментальных исследований работы струйных мельниц [1, 2] позволяет использовать акустические сигналы зоны помола для разработки принципов оптимизации этого процесса. В число важных акустических параметров включена скорость счета  $\dot{N}$  и амплитуда акустических сигналов (АС). Проведенные исследования позволили установить связь технологических и акустических параметров струйного измельчения. Производительность струйной мельницы значительно изменяется в зависимости от степени загрузки струй материалом. Избыточное или недостаточное количество твердой фазы в струе приводит к отклонению от оптимального уровня ведущих параметров измельчения: скорости и частоты соударений частиц, что обуславливает уменьшение производительности мельницы при прочих равных условиях (параметры энергоносителя, режим работы классификатора и пневмотранспортной системы).

На основе установленных зависимостей акустических параметров зоны струйного помола от показателей измельчения проводится последующий анализ акустической информации о состоянии струй и регулирования загрузки измельчаемого материала. Контроль качества измельченного продукта возможен на основе анализа значений амплитуд акустических сигналов. Показателем аку-

стической активности с максимальными значениями амплитуд акустических сигналов в рабочей зоне помола можно отслеживать энергонапряженность разрушения при соударениях частиц в процессе струйного измельчения.

**Цель данной работы** – разработка системы анализа АС газоструйной мельницы, позволяющей контролировать ее работу и дисперсность получаемого продукта.

Для мониторинга моментов технологических отклонений от нормы процесса измельчения, приводящих к снижению производительности мельницы, предложены акустические критерии, величина которых при перегрузке струй уменьшается, что указывает на рост энергоемкости процесса. Опробование акустического мониторинга струйных мельниц различного типоразмера показало перспективность его использования для задач оптимизации измельчения. Установлена связь технологических параметров процесса измельчения с акустическими параметрами мониторинга зоны измельчения. В ходе исследований выявлены акустические критерии эффективности, оптимальности и энергоемкости процесса измельчения.

Для анализа процесса измельчения использован критерий эффективности процесса измельчения  $K_{эфф} = G / \dot{N}_{\Sigma}$ , (г/имп), акустические показатели энергоемкости измельчения  $\mathcal{E}_{изм}$  (имп/г) и энергоемкости диспергирования  $\mathcal{E}_{дисп}$  (имп/см<sup>2</sup>). Экспериментально установлено, что величина акустических критериев эффективности в моменты перегрузки струй уменьшается, а показателей энергоемкости соответственно возрастает.

На рис. 1 показано изменение производительности (а), коэффициента эффективности (б) и акустических показателей энергоемкости измельчения  $\mathcal{E}_{изм}$  и диспергирования  $\mathcal{E}_{дисп}$  (в) при промышленном струйном измельчении циркона на Вольногорском горно-металлургическом комбинате. При изменении производительности мельницы в пределах 336 – 1225 кг/ч коэффициент эффективности изменялся от  $4 \cdot 10^{-3}$  до  $0,67 \cdot 10^{-3}$ , причем максимальной производительности в рабочем режиме измельчения соответствовали максимальные значения критерия эффективности при различной крупности готового продукта (63 мкм и 45 мкм). В ходе промышленного опробования акустического мониторинга процесса в периоды нарушения оптимальной работы мельницы при уменьшении производительности в 2-3 раза ( $t \approx 45$  мин) критерий эффективности уменьшается (вдвое), а энергоемкость измельчения увеличивается втрое.

Экспериментальные исследования показали, что эффективность процесса струйного измельчения, зависящая от наполнения струй материалом, достаточно хорошо коррелирует с выведенными акустическими показателями. На этой основе разрабатывается система оптимизации процесса с целью управления производительностью мельницы.

Для комплексного изучения акустических сигналов струйного измельчения и создания системы их анализа был проведен ряд исследований по поиску наиболее эффективных методов оценки АС. Вейвлет-анализ сигналов струйной мельницы на стадии разгрузки при измельчении различных материалов (уголь,

циркон, шлак) показал, что стандартные отклонения детализирующего вейвлета - коэффициента первого уровня практически не отличаются.

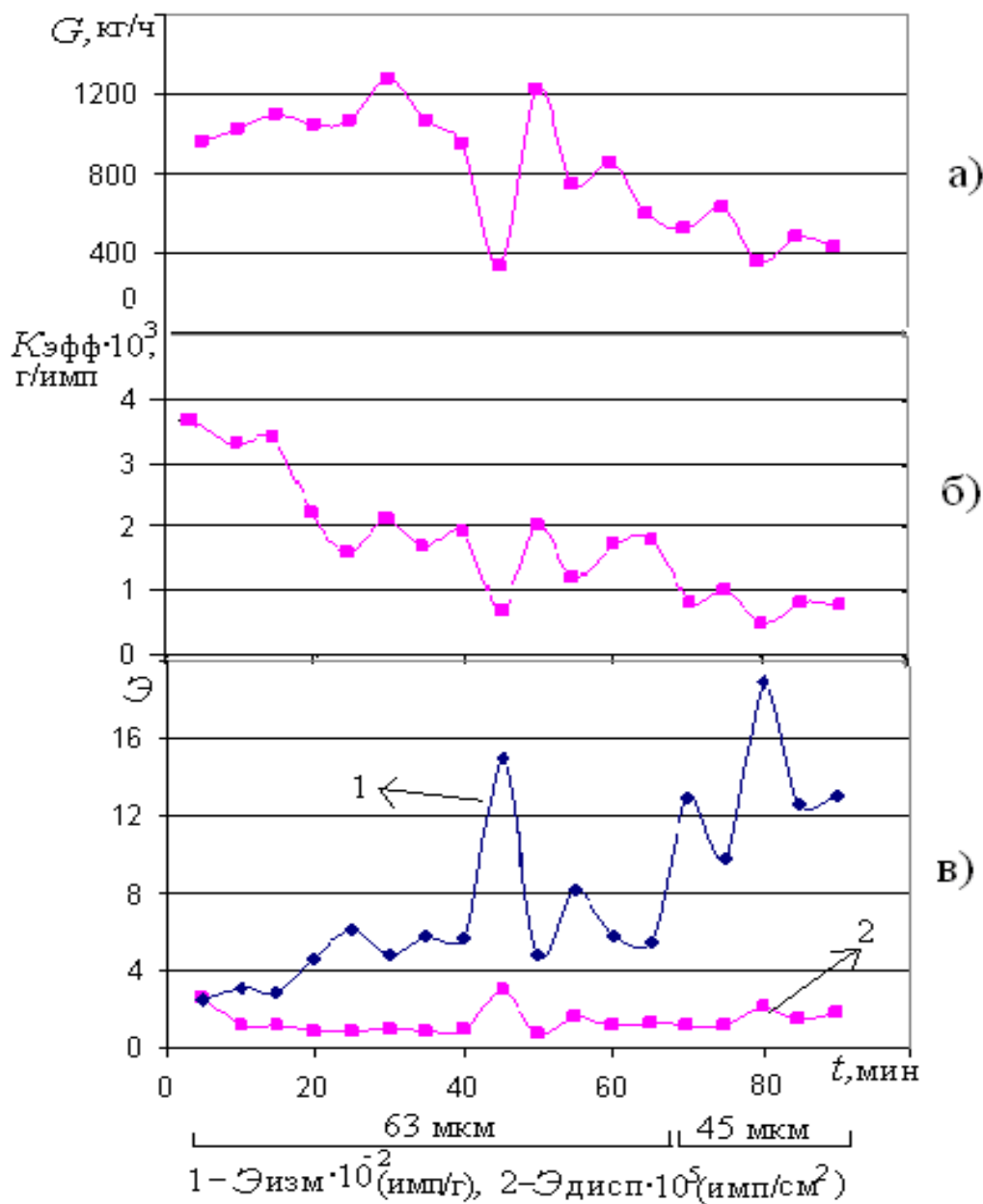


Рис. 1. Кинетика производительности и акустических показателей эффективности и энергоемкости струйного измельчения циркона на промышленной мельнице ВГМК

Исследованиями данных акустического мониторинга процесса струйного измельчения установлено, что вейвлет-коэффициенты АС двух различных режимов (рабочий, разгрузка) различаются на порядок. Таким образом, выбранный метод пригоден для установления оптимального режима загрузки струи материалом с позиций производительности мельницы, что позволяет дополнить информацией алгоритм управления загрузкой мельницы при струйном измельчении сыпучих материалов различной крупности.



Дальнейшие исследования были направлены на контроль качества получаемого продукта. Анализ акустических сигналов показал отличие значений вейвлет – коэффициентов в 1,5 раза при получении кварцевого песка ВГМК различной дисперсности. Для материалов отличающихся плотностью и крупностью эти величины также различаются на 50–100 % [3].

Наряду с вейвлет-анализом сигналов зоны был применен метод, основанный на преобразовании Гильберта-Хуанга (ННТ) [4], который заключается в применении к исследуемому процессу эмпирической модовой декомпозиции, а затем Гильбертова спектрального анализа. Этот метод дает возможность проведения частотно-временного анализа данных.

Преобразование Гильберта действительной функции  $x(t)$ ,  $-\infty < t < \infty$  есть действительная функция определенная как

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{1-\tau} d\tau .$$

Данное преобразование изменяет фазу всех частотных составляющих сигнала  $x(t)$  на  $\pi / 2$ . Это делает сигнал  $x(t)$  ортогональным  $\tilde{x}(t)$ , что позволяет сформировать из сигналов комплексный аналитический сигнал  $z(t)$

$$z(t) = x(t) + j\tilde{x}(t) .$$

Для определения текущих временных параметров акустических сигналов необходимо разложить их на несколько моногармонических составляющих, удовлетворяющих условию симметричности. Эта задача решена методом Н. Хуанга, который еще называется методом «эмпирической модовой декомпозиции сигналов» и представляет собой адаптивную итерационную вычислительную процедуру разложения исходного сигнала на эмпирические моды.

Установлены зависимости вейвлет-коэффициентов и показателей преобразования Гильберта-Хуанга (ННТ) от вида, плотности и дисперсности материала. Анализ акустических сигналов измельчения цирконового концентрата на промышленной мельнице ВГМК показал, что все показатели Гильберта-Хуанга и вейвлет-преобразований уменьшаются при увеличении удельной поверхности продукта измельчения (см. табл. 1, 2). Показатель плотности мощности спектра

Т а б л и ц а 1

Показатели Гильберта-Хуанга для АС струйной мельницы ВГМК

$S_{уд}$ , см <sup>2</sup> /г	Амплитуда огibaющей	Плотность мощности Спектра Гильберта	Стандартное отклонение амплитуды
1600	0,000063	0,000005	0,000065
2017	0,001159	0,000003	0,001322
2040	0,003061	0,000016	0,003355
2570	0,003566	0,000028	0,004019

Гильберта по сравнению с другими показателями максимально коррелирует с различием удельной поверхности материала в рабочем режиме.

Т а б л и ц а 2

Вейвлет коэффициенты для АС струйной мельницы ВГМК

$S_{уд},$ см <sup>2</sup> /г	cD1	cD2	cD3
1600	0,000181	0,000175	0,000173
2017	0,011457	0,013505	0,008993
2040	0,013351	0,014075	0,012574
2570	0,033723	0,015545	0,014982

Таким образом, предложенная система анализа акустических сигналов процесса струйного измельчения, которая основана на использовании акустических показателей и применении преобразования Гильберта-Хуанга и вейвлет - анализа, позволяет контролировать режим работы струйной мельницы и дисперсность получаемого продукта на базе результатов акустического мониторинга процесса. Дальнейшая разработка системы оптимизации работы струйной мельницы с использованием акустического мониторинга зоны измельчения позволит повысить эффективность струйного измельчения и контролировать качество измельченного продукта.

#### Список литературы

1. Характеристики дисперсности продуктов струйного измельчения / Л. Ж. Горобец, Н. С. Прядко, В. П. Краснопер, Л. А. Цыбулько, П. А. Бакум // ЗКК НГУ. – Днепропетровск. – 2010. – № 41 – 42 (81). – С. 110 –121.
2. Прядко Н.С. Акустико-эмиссионный мониторинг процесса струйного измельчения // Техническая диагностика и неразрушающий контроль 2012. – № 6. – С. 46 – 52.
3. Михалёв А.И., Прядко Н.С., Сухомлин Р.А. Вейвлет-анализ акустических сигналов процесса струйного измельчения //Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 3 (80). - Днепропетровск, 2012. – С. 122-127.
4. The Hilbert-Huang transform and its applications /Editors: Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen. - World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5, Toh Tuck. - Link, Singapore.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Мещеряковим Л.І.  
Надійшла до редакції 11.11.2013*

## ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО ЗАХИСТУ ВІД КОРОЗІЇ ПІДЗЕМНИХ СТАЛЕВИХ ТРУБОПРОВОДІВ

Выполнено описание электротехнической системы электрохимической защиты от коррозии подземного стального трубопровода. Приведены графики описывающие изменение во времени блуждающих токов. Предложено, с целью рационального использования электротехнической системой энергоресурсов, применить систему автоматического управления процессом формирования защитного потенциала подземного трубопровода.

Виконано опис електротехнічної системи електрохімічного захисту від корозії підземного сталевих трубопроводу. Наведені графіки описують зміну за часом струмів, що блукають. Запропоновано, з метою раціонального використання електротехнічною системою енергоресурсів, застосувати систему автоматичного керування процесом формування захисного потенціалу підземного трубопроводу.

Achieved description of the electrical system of electrochemical corrosion protection of underground steel pipelines. The graphs describing the time variation of the stray currents is given. Suggested for the rational use the electrical energy, use automatic control system of the process of forming the protective potential of the underground pipeline.

**Вступ.** Забезпечення цілісності підземних сталевих трубопроводів є актуальною проблемою з огляду на можливі екологічні, економічні наслідки. Порушення їх цілісності призводить до втрат речовини, що транспортується, екологічного забруднення навколишнього середовища та техногенних катастроф. Транспортні трубопровідні комунікації досить часто прокладено в безпосередній близькості від колій залізничного транспорту. Залізничний транспорт є потужним джерелом струмів, що блукають. Чисельні характеристики струмів, що блукають є змінними за часом як у залежності від навантаження (тягового локомотиву), так й в залежності від сезонних змін, що впливають на умови формування опору протіканню електричному струму. Актуальність вирішення проблеми визначення корозійного стану, параметрів ізоляційного покриття та характеристик фізичних полів, що сформовані струмами, які блукають визначено у роботах [1 – 4]. Авторами [1] звернуто увагу на те, що використання активних елементів системи електрохімічного захисту у неузгодженому режимі призводить до погіршення корозійного стану на підземному сталевому трубопроводі. Водночас, наявність активного впливу струмів, що блукають значно підвищує корозійну небезпеку. Формування математичної моделі, що достовірно здійснює опис електротехнічних та електрохімічних процесів у системі «підземний сталевий трубопровід – навколишнє середовище – станції катодного захисту» є досить непростою задачею [2].

**Метою** роботи є обґрунтування змін у характеристиках параметрів струмів, що блукають, доцільності сумісного автоматичного керування станціями катодного захисту від електрохімічної корозії підземного сталевих трубопроводу.

**Матеріали досліджень.** Підземна корозія - корозія в ґрунтах і почвах що викликається електрохімічними мікро- і макропарами, які виникають на металі

в місцях його контакту з корозійним середовищем, що відіграє роль електроліту. Корозійні пари виникають при неоднорідності металу споруди, неоднорідності структури ґрунту або складу електроліту, відмінності температури, вологості і повітропроникності ґрунту по трасі споруди. Електрокорозія – корозія металеві підземної споруди яка викликана проникненням на споруду струмів витоку з рейок електрифікованого транспорту або інших промислових електроустановок і споруд і, відповідно, має два різновиди:

- корозія струмом, що блукає;
- корозія зовнішнім струмом відбувається при протіканні через метал і електроліт електричного струму від стороннього джерела.

Залежно від інших умов і виду корозійного руйнування розрізняють суцільну і місцеву корозію, рівномірну, нерівномірну і контактну. Взаємодію ґрунтового електроліту з металом при будь-якому виді електрохімічної корозії можна розділити на два процеси: анодний і катодний [3]. Захист підземних споруд від підземної електрохімічної корозії умовно можливо розділити на пасивний захист – ізоляція споруди від контакту з навколишнім ґрунтом і обмеження впливу блукаючих струмів і активну (електрохімічну) — створення захисного потенціалу споруди по відношенню до довкілля.

Поширеним методом захисту від корозії розгалуженої системи підземних трубопроводів є методи, які впливають на середу експлуатації. Розгалуженість системи підземних сталевих трубопроводів є однією з основних відмінностей, що викликає додаткові складнощі в процес захисту від корозійних процесів, які можливо розкласти з позиції електрохімічної теорії. Катодний захист може бути реалізований як за допомогою джерел постійного струму – станцій катодного захисту (СКЗ), які є зовнішніми по відношенню до споруди, яка захищається увід електрохімічної корозії, так й за допомогою гальванічних електродів (анодів) які представляють собою електрохімічне джерело постійного струму. Обидва методи не містять в собі фундаментальних відмін, однак мають різні галузі використання й методології застосування.

Катодний захист зовнішнім струмом, як більш потужній використовують під час необхідності корозійного захисту в умовах з напруженою анодною ситуацією яка є розповсюдженою на великих ділянках. Вказаний тип захисту є пригідним для боротьби з електрохімічною корозією, яка зумовлена струмами що блукають. Катодний захист металевих споруд реалізовується за допомогою пристроїв (рис. 1):

- станція катодного захисту (джерело постійного струму, вимірювальні пристрої, електричні апарати);
- анодний заземлювач (анод);
- з'єднувальні лінії (між лінією електропередач, випрямлячем та анодним заземлювачем й металеві спорудою).

Таким чином відбуваються процеси руйнування анодного заземлювача й захист металеві споруди. Сьогодні СКЗ, які отримують поширення організовані за високочастотним принципом перетворення електричної енергії (рис. 2). Головною перевагою їх є невеликий розмір та вага, ККД.

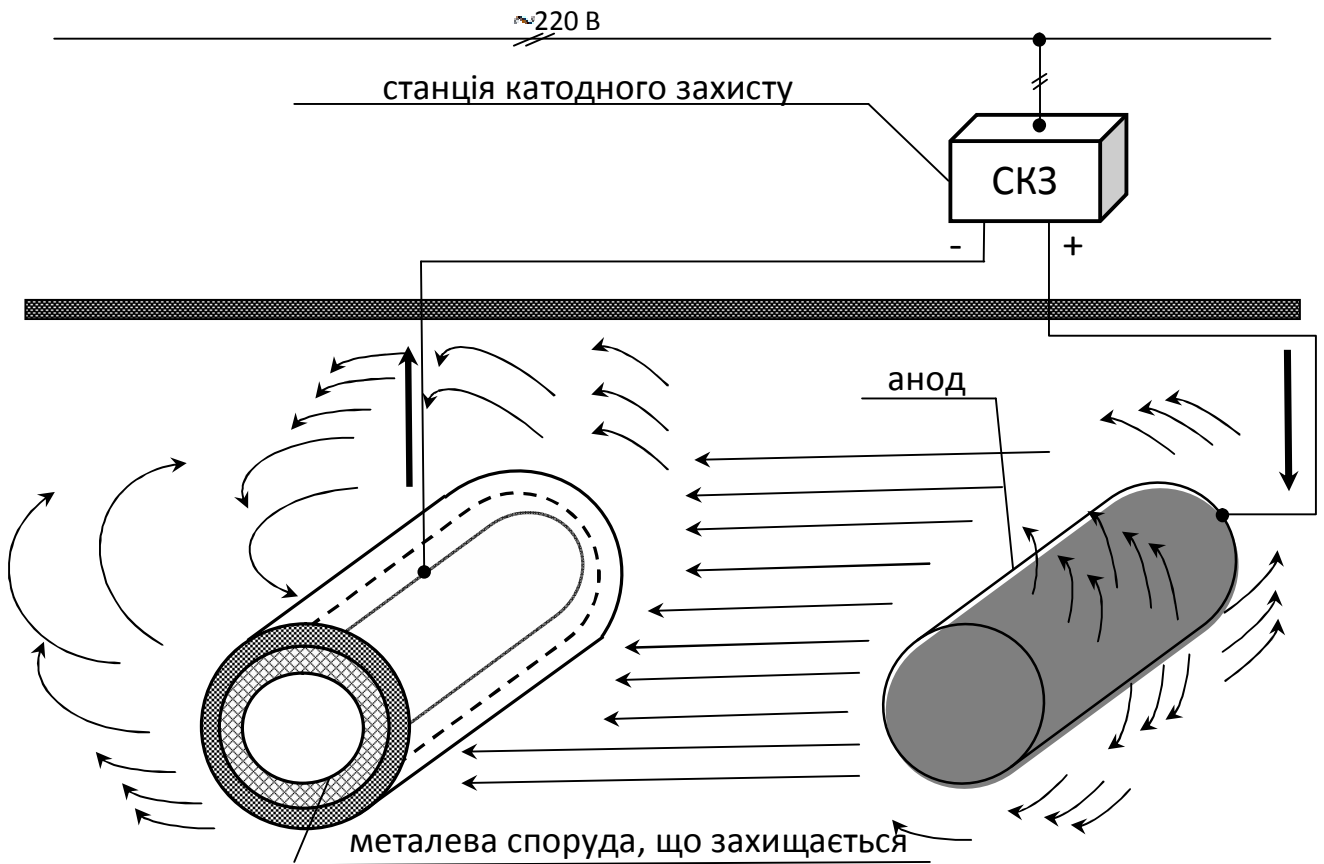


Рис. 1. Система електрохімічного захисту від корозії

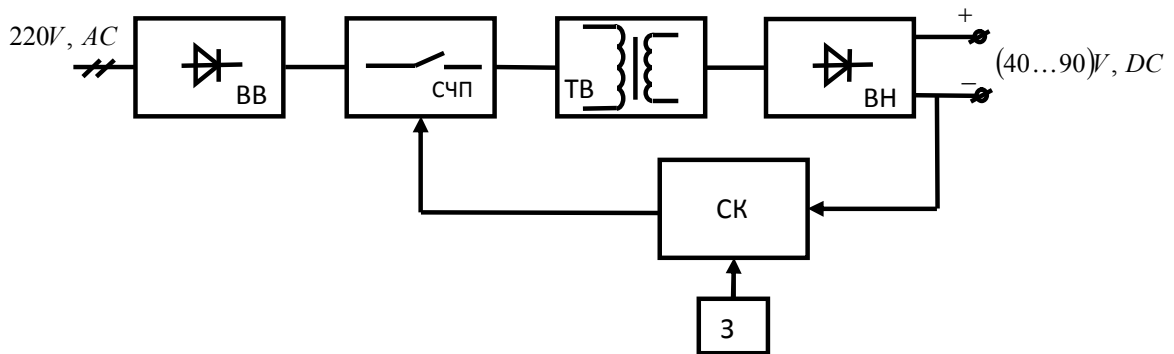


Рис. 2. Інверторний високочастотний випрямляч: ВВ – високовольтний випрямляч, СЧП – силовий частотний перетворювач, ТВ – високочастотний трансформатор, ВН – низьковольтний випрямляч, СК – система керування, З – блок завдання

Навантаженням для СКЗ струми, що протікають підземним сталевим трубопроводом та навколишнім ґрунтом. Електротехнічні характеристики сталевого трубопроводу, які впливають на значення струмів, є подібними до характеристик струмопровідного циліндру, поверхневий імпеданс якого –  $Z_{\Pi}$  та опір ізоляційного покриття  $Z_i$  визначається як [3]:

$$Z_i = \frac{h_i}{2\pi r_0 \tilde{\sigma}_i} \quad (1)$$

де  $\tilde{\sigma}_i = \sigma_i + i\omega\varepsilon_i$ ;  $\varepsilon_i$  - діелектрична стала ізоляційного покриття;  $\sigma_i$  - провідність ізоляційного покриття;  $h_i$  - товщина ізоляційного покриття.

$$Z_{II} = \frac{(1-i)\gamma_0 J_0((1-i)\gamma_0 r_0)}{2\pi r_0 \sigma_0 J_1((1-i)\gamma_0 r_0)} \quad (2)$$

де  $\gamma_0 = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma_0}{2}}$  - коефіцієнт згасання у циліндричному провідникові.

Якщо виконується вираз:  $\gamma_0 r_0 \ll 1$  та  $x \ll 1$  функції  $J_0((1-i)\gamma_0 r_0)$  та  $J_1((1-i)\gamma_0 r_0)$  запишемо як [3]:

$$J_0(x) \cong 1 - \frac{x^2}{4} \quad (3)$$

$$J_1(x) \cong \frac{x}{2} \left(1 - \frac{x^2}{8}\right) \quad (4)$$

$$\frac{J_0(x)}{J_1(x)} \cong \frac{2}{x} \left(1 - \frac{x^2}{8}\right) \quad (5)$$

Прийнявши, що  $x = (1-i)\gamma_0 r_0 \ll 1$  на основі виразу (5) запишемо:

$$Z_{II} \cong \frac{1}{\pi r_0^2 \sigma_0} \left(1 + i \frac{\lambda_0^2 r_0^2}{4}\right) \quad (6)$$

Якщо до виразу (6) підставити вираз  $\gamma_0^2 = \frac{\omega\mu\sigma_0}{2}$  то отримаємо:

$$Z_{II} = R_{II}^0 + i\omega L_{II} \quad (7)$$

де  $R_{II}^0 = \frac{1}{\pi r_0^2 \sigma_0}$  - повздовжній опір струмопровідного циліндра сталому струмо-

ві;  $L_{II} = \frac{\mu}{8\pi}$  - поверхнева індуктивність струмопровідного полого циліндра. За

умови виконання  $\gamma_0 r_0 \gg 1$  є також має силу вираз:  $\operatorname{ctg}\left((1-i)\gamma_0 r_0 \frac{\pi}{4}\right) \cong i$ , враховуючи який запишемо:

$$Z_{II} \cong (1+i) \frac{\gamma_0}{2\pi r_0 \gamma_0} = R_{II} + i\omega L_{II} \quad (8)$$

де  $R_{II} = \frac{1}{2\pi r_0} \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma_0}}$ ;  $L_{II} = \frac{1}{2\pi r_0} \sqrt{\frac{\mu}{2\sigma_0\omega}}$ .

Параметри сталевих трубопроводів  $R_{II}$ ;  $L_{II}$  є такими, що залежать від частоти напруги. Використання СКЗ з сучасними схемотехнічними рішеннями зумовлюють також зміни у картині струмів, які блукають. На рис. 3 наведений

сигнал який містить високочастотну складову, отриманий під час здійснення вимірів струмів, що блукають у поперечній площині по відношенні до підземного трубопроводу.

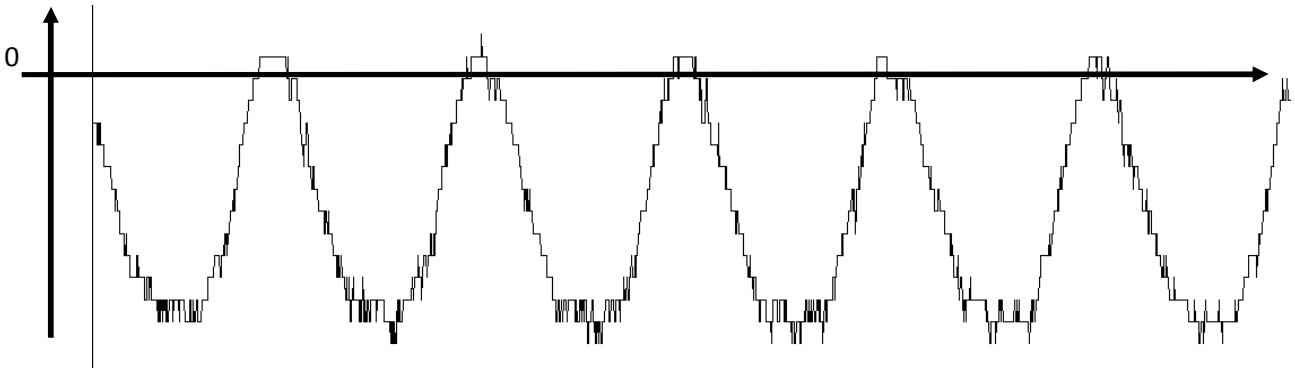


Рис. 3. Струми, що блукають виміряні у поперечній площині до трубопроводу

Як видно з рисунку 3, сигнал є чітко модульованим за алгоритмом перемикання силових ключів у сучасних високочастотних перетворювачах. Слід пам'ятати, що навіть незначний за значенням катодний струм має захисні властивості, оскільки він зменшує струм анодних пар. Ситуацію ускладнює та обставина, що захисний струм, який натікає на трубопровід є нерівномірно розподіленим за довжиною трубопроводу. Біля точки підключення станції катодного захисту до сталевого трубопроводу щільність струму є максимальною й такою, що значно перевищує значення  $j_{\min}$ , яке є достатнім для захисту (рис. 4).

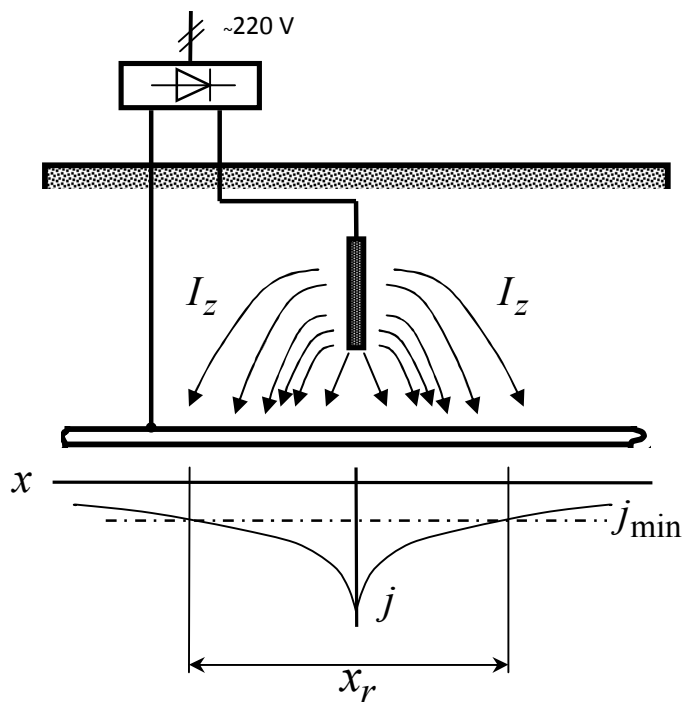


Рис. 4. Межа дії СКЗ

У цьому режимі відбувається нераціональне використання енергоресурсів та матеріалу анодного заземлювача. Для запобігання цьому явищу, враховуючи те, що підземний сталевий трубопровід захищає декілька СКЗ є доцільним, використання системи сумісного автоматичного керування групою СКЗ для зменшення надлишкового значення щільності струму у точці підключення при одночасному забезпеченні відповідного рівня захисту на межі дії станції.

**Висновки.** Враховуючи зміну у характеристиках сигналів струмів які блукають, що зумовлено використанням сучасної елементної бази у силових перетворювачах як СКЗ так й інших електротехнічних пристроях, у тому числі й локомотивного складу залізничного транспорту, з метою забезпечення раціонального використання енергетичних ресурсів електротехнічною системою електрохімічного захисту сталевих трубопроводів, є доцільним синтез та використання системи автоматичного керування процесом формування захисного потенціалу підземного металофонду. Причому, враховуючи розгалуженість підземних комунікацій, доцільно використовувати дворівневу систему, у якій система автоматичного керування (САК) високого рівня формує керуючий вплив до локальних САК, об'єктом керування для яких є окремі СКЗ.

#### Список літератури

1. Бешта О.С. Сумісна робота станцій катодного захисту підземних металевих трубопроводів від електрохімічної корозії / О.С. Бешта, О.О. Азюковський // Проблеми підвищення ефективності електромеханічних перетворювачів в електроенергетичних системах: Матеріали наук.-техн. конф. — Севастополь: Сев. НТУ, 2013. — С. 17-19.
2. Склярів С.А. Математические модели и информационные технологии автоматизированного управления системами противокоррозионной защиты магистральных трубопроводов: дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук.: 05.13.06/ Склярів Станіслав Александрович.- Х., 2002 - 168с.
3. Стрижевский И.В. Дмитриев В.И. Теория и расчёт влияния электрифицированной железной дороги на подземные металлические сооружения./ И.В. Стрижевский, В.И. Дмитриев. - М.: Машиностроение, 1967 - С. 227
4. Білоусова Н.А. Поляризаційні методи визначення швидкості корозії металів та їх метрологічна оцінка: автореф. дис. на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.: Спец. 05.17.14 «Хімічний опір матеріалів та захист від корозії» / Н.А. Білоусова. – Київ, 2005 – 22 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Мецєряковим Л.І.*

*Надійшла до редакції 28.12.13*



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОУДАРНЫХ ЯВЛЕНИЙ В НАПОРНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассматриваются вопросы разработки математической модели гидроударных явлений в промышленных трубопроводах, содержащих насосы и демпфирующие устройства, с целью определения эффективности влияния гасителей на амплитудно-частотные характеристики указанных гидромеханических систем.

Розглядаються питання розробки математичної моделі гідроударних явищ в промислових трубопроводах, які мають в своєму складі насоси та демпфери коливань, з метою визначення ефективності останніх на амплітудно-частотні характеристики таких гідромеханічних систем.

The issues of a mathematical model hydropercussion phenomena in industrial piping systems, with the pumps and dampeners, to determine the impact absorbers effectiveness on the amplitude-frequency characteristics of these hydromechanical systems are considered.

**Введение.** Методика расчета переходных процессов и частотных характеристик участка трубопровода, содержащего насос и демпфер, построена на базе нелинейной математической модели. Моделирование перекрытия потока с использованием промышленных заслонок проводилось путем введения экспоненциального закона уменьшения площади поперечного сечения трубопровода. В основе указанной модели расчета лежит метод характеристик, применяемый к модифицированным уравнениям Навье-Стокса. Результирующие нелинейные дифференциальные уравнения решаются с помощью метода конечных разностей первого порядка.

В данной статье рассматривалась задача проведения оценки влияния демпфирующих устройств для сглаживания пиковых амплитуд давления в рабочих жидкостях промышленных трубопроводов при имитации условий возникновения гидроударных процессов. При этом использовался модифицированный метод характеристик [1]. Программная часть проекта была реализована с использованием встроенного языка программирования пакета Matlab [2].

**Формулировка цели и задачи исследований.** Целью работы является разработка математической модели гидродинамического течения рабочей жидкости в длинном напорном трубопроводе с учетом нежесткости и шероховатости его стенок при имитации резкого останова этого потока путем закрывания заслонки на его удаленном конце с дальнейшей реализацией указанной модели в виде программного комплекса на базе пакета Matlab. На базе указанной математической модели ставилась задача создать программный комплекс, включающий дружественный графический интерфейс, позволяющий использовать результаты данной разработки в виде исполняемой exe программы. Данная программа предназначена для проведения оценочных расчетов эффективности применяемых демпфирующих устройств различных параметрических конфигураций на системах промышленных длинных напорных трубопроводов, характеристики которых задаются в рабочем порядке на Windows ОС в режиме работы в качестве рабочей станции персоналом компании-производителя демпфирующих устройств.

**Изложение основного материала исследований.** Для решения поставленной задачи в данной работе применялся метод характеристик [3], который позволяет провести преобразование дифференциальных уравнений в частных производных, для которых нельзя записать решение в общем виде в уравнения в полных производных. Результирующие нелинейные уравнения можно затем проинтегрировать, применяя методы, использующие уравнения конечных разностей.

Уравнения гидравлики, воплощающие принципы сохранения моментов количества движения и неразрывности в одномерном трубопроводе, соответственно имеют вид:

$$\begin{cases} \frac{P_x}{\rho} + VV_x + V - g_t \cdot \sin a + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \\ PP_t + P_xV + \rho \cdot a^2 \cdot V_x = 0 \end{cases} \times \lambda \quad (1) (2)$$

Их можно скомбинировать с неизвестным множителем  $\lambda$  и получить:

$$\lambda \left[ P_x \left( V + \frac{1}{\lambda \rho} \right) + P_t \right] + [V_x (V + \rho \cdot a^2 \lambda) + V_t] - g \cdot \sin a + \frac{fV|V|}{2D} = 0 \quad (3)$$

Произвольный выбор двух различных значений  $\lambda$  даст два независимых уравнения относительно переменных  $P(x,t)$ ,  $V(x,t)$ , эквивалентных уравнениям (1) и (2). При подходящем выборе  $\lambda$  возможно упрощение. В частности, так как  $P$  и  $V$  являются функциями  $x$  и  $t$ , то если принять, что  $x$  – функция  $t$ , тогда:

$$\begin{aligned} \frac{dP(x,t)}{dt} &= \frac{\partial P}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial P}{\partial t} \frac{dt}{dt} = P_x \frac{dx}{dt} + P_t \\ \frac{dV(x,t)}{dt} &= \frac{\partial V}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V}{\partial t} \frac{dt}{dt} = V_x \frac{dx}{dt} + V_t \end{aligned} \quad (4)$$

Если  $\frac{dx}{dt} = V + \frac{1}{\lambda \rho} = V + \rho a^2 \lambda$  (5), тогда уравнение (3) станет обыкновенным

дифференциальным:  $\lambda \frac{dP}{dt} + \frac{dV}{dt} - g \sin a + \frac{fV|V|}{2D} = 0$  (6)

Решая уравнение (5), получим:  $\lambda = \frac{1}{\rho a}$ ,  $\frac{dx}{dt} = V + a$  – по потоку

$$\lambda = -\frac{1}{\rho a}, \quad \frac{dx}{dt} = V - a \quad \text{– против поток} \quad (7)$$

Подставляя уравнения (7) в (6), получим систему уравнений в полных производных:

$$\frac{dP}{dt} + \rho a \frac{dV}{dt} - \rho a g \sin a + \rho a \frac{fV|V|}{2D} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{dx}{dt} = V + a, \quad (9)$$

$$\frac{dP}{dt} - \rho a \frac{dV}{dt} + \rho a g \sin a - \rho a \frac{fV|V|}{2D} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{dx}{dt} = V - a \quad (11)$$

Для решения нелинейных уравнений (8)-(11) используется метод конечных разностей.

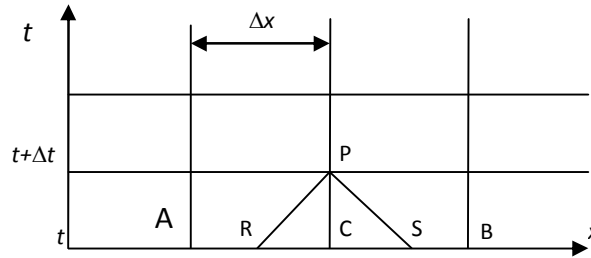


Рис.1. Пространственно – временная сетка

Пространственно – временная сетка (рис.1) описывает состояние жидкости в различных точках трубопровода в момент времени  $t$  и  $t+\Delta t$ . Давление и скорость в точках А, С и В, которые соответствуют времени  $t$ , известны либо из предыдущего шага, либо из данных о стационарном течении. Состояния в точках R и S соответствуют времени  $t$  и должны вычисляться из значений в точках А, С и В. Состояние в точке Р соответствует времени  $t+\Delta t$  и определяется из уравнений (8)-(11). Запишем уравнения (8)-(11) в конечных разностях и умножим на приращение времени:

$$P_p - P_R + \rho a_R (V_p - V_R) - \rho a_R g \sin a (t_p - t_R) + \rho a_R \frac{f V_R |V_R|}{2D} (t_p - t_R) = 0, \quad (12)$$

$$(x_p - x_R) = (V_R + a_R)(t_p - t_R), \quad (13)$$

$$P_p - P_S + \rho a_S (V_p - V_S) - \rho a_S g \sin a (t_p - t_S) + \rho a_S \frac{f V_S |V_S|}{2D} (t_p - t_S) = 0, \quad (14)$$

$$(x_p - x_S) = (V_S + a_S)(t_p - t_S), \quad (15)$$

Используется постоянный шаг по времени – специальный временной интервал. Запишем уравнения (12) и (14) в виде:

$$P_p = C_p - \rho a_R V_p \quad (16)$$

$$P_p = C_M + \rho a_S V_p, \quad (17)$$

где

$$C_p = P_R + \rho a_R V_R \left( 1 + \frac{g}{V_R} \Delta t \sin a - \frac{f \Delta t |V_R|}{2D} \right) \quad (18)$$

$$C_M = P_S - \rho a_S V_S \left( 1 + \frac{g}{V_S} \Delta t \sin a - \frac{f \Delta t |V_S|}{2D} \right) \quad (19)$$

Из рис. 1 и (13) следует:

$$\frac{x_C - x_R}{x_C - x_A} = \frac{V_C - V_R}{V_C - V_A}, \quad (20) \Rightarrow V_R = V_C - \frac{x_C - x_R}{x_C - x_A} (V_C - V_A)$$

$$x_C - x_R = x_p - x_R = (V_R + a_R)(t_p - t_R)$$

Подставим это выражение в (20):  $\frac{(V_R + a_R)(t_P - t_R)}{x_C - x_A} = \frac{V_C - V_R}{V_C - V_A}, \Rightarrow$

$$\begin{aligned} \Rightarrow [V_R(t_P - t_R) + a_R(t_P - t_R)](V_C - V_A) &= (V_C - V_R)(x_C - x_A), \\ V_R(t_P - t_R)(V_C - V_A) + a_R(t_P - t_R)(V_C - V_A) &= V_C(x_C - x_A) - V_R(x_C - x_A), \\ V_R[(t_P - t_R)(V_C - V_A) + x_C - x_A] &= V_C(x_C - x_A) - a_R(t_P - t_R)(V_C - V_A), \\ V_R &= \frac{V_C(x_C - x_A) - a_R(t_P - t_R)(V_C - V_A)}{(t_P - t_R)(V_C - V_A) + x_C - x_A} \quad (*) \end{aligned}$$

Разделим (\*) на  $(x_C - x_A)$ , учитывая, что  $t_P - t_R = \Delta t, x_C - x_A = \Delta x$ :

$$V_R = \frac{V_C - a_R \frac{\Delta t}{\Delta x} (V_C - V_A)}{1 + \frac{\Delta t}{\Delta x} (V_C - V_A)} = \frac{V_C - \xi_R (V_C - V_A)}{1 + \theta (V_C - V_A)} \quad (21)$$

$$\theta = \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (22)$$

$$\xi_R = a_R \frac{\Delta t}{\Delta x} = \theta a_R \quad (23)$$

Аналогично, из рис. 1 и (15) следует:

$$\frac{x_C - x_S}{x_C - x_B} = \frac{V_C - V_S}{V_C - V_B}, \quad x_C - x_S = x_P - x_S = (V_S + a_S)(t_P - t_S)$$

Скомбинируем два эти выражения:  $\frac{(V_S + a_S)(t_P - t_S)}{x_C - x_B} = \frac{V_C - V_S}{V_C - V_B}, \Rightarrow$

$$\begin{aligned} \Rightarrow [V_S(t_P - t_S) - a_S(t_P - t_S)](V_C - V_B) &= (V_C - V_S)(x_C - x_B), \\ V_S(t_P - t_S)(V_C - V_B) - a_S(t_P - t_S)(V_C - V_B) &= V_C(x_C - x_B) - V_S(x_C - x_B), \\ V_S &= \frac{V_C(x_C - x_B) + a_S(t_P - t_S)(V_C - V_A)}{(t_P - t_S)(V_C - V_B) + (x_C - x_B)} \quad (**) \end{aligned}$$

Учитывая, что  $t_P - t_S = \Delta t, x_C - x_B = -\Delta x$  поделим (\*\*) на  $(x_C - x_B)$

$$V_R = \frac{V_C \frac{x_C - x_B}{x_C - x_B} + a_S \frac{t_P - t_S}{x_C - x_B} (V_C - V_B)}{\frac{x_C - x_B}{x_C - x_B} + \frac{t_P - t_S}{x_C - x_B} (V_C - V_B)} = \frac{V_C - \xi_S (V_C - V_B)}{1 + \theta (V_C - V_B)} \quad (24)$$

Аналогично,  $\frac{x_C - x_R}{x_C - x_A} = \frac{P_C - P_R}{P_C - P_A} \Rightarrow P_R = P_C - \frac{x_C - x_R}{x_C - x_A} (P_C - P_A) \quad (***)$

$$\begin{aligned} \frac{x_C - x_R}{x_C - x_A} &= \frac{x_P - x_R}{x_C - x_A} \text{ из рис. 1. Подставим в это выражение (13)} \\ \frac{x_C - x_R}{x_C - x_A} &= \frac{(V_R + a_R)(t_P - t_R)}{x_C - x_A} = (V_R + a_R) \frac{\Delta t}{\Delta x} + a_R \frac{\Delta t}{\Delta x} = V_R \theta_R + \xi_R \end{aligned}$$

Подставляя его (13) в (\*\*\*), получим:  $P_R = P_C - (V_R \theta_R + \xi_R)(P_C - P_A) \quad (25)$

Аналогично,  $\frac{x_C - x_S}{x_C - x_B} = \frac{P_C - P_S}{P_C - P_B} \Rightarrow P_S = P_C + \frac{x_C - x_S}{x_B - x_C} (P_C - P_B) \quad (****)$

$$\frac{x_C - x_S}{x_B - x_C} = -\frac{x_C - x_S}{x_S - x_B} = -\frac{x_P - x_S}{x_C - x_B}$$

Подставим в последнее выражение (15):

$$\frac{x_C - x_S}{x_B - x_C} = -\frac{(V_S + a_S)(t_P - t_S)}{x_C - x_B} = (V_S - a_S)\frac{(t_P - t_S)}{x_B - x_C} = V_S \frac{\Delta t}{\Delta x} - a_S \frac{\Delta t}{\Delta x} = V_S \theta_S - \xi_S$$

Подставим последнее выражение в (\*\*\*):  $P_S = P_C + (V_S \theta_S - \xi_S)(P_C - P_B)$  (26)

Для сохранения сходимости полученные уравнения предполагают удов-

летворение условиям Куранта: 
$$\xi \leq \frac{a}{V + a} \quad (27)$$

Эти условия означают, что на рис. 1 точки R и S расположены между точками A и B. Решая совместно уравнения (16) и (17) при  $aR = aS$ ,

получим значение давления в точке P: 
$$P_P = \frac{C_P + C_M}{2} \quad (28)$$

Для вычисления скорости  $V_P$  может использоваться любое из уравнений (16) и (17). Это полностью определяет состояние во всех внутренних точках трубопровода. Следует обратить внимание на использование линейной интерполяции давлений и скоростей жидкости в трубопроводе. Чтобы сохранить точность при расчете нелинейных систем, величины  $\Theta$  и  $\xi$  должны удовлетворять неравенствам Куранта, которые предполагают интерполяцию только с малым шагом сетки. Таким образом, проблема течения в трубопроводе полностью решается для внутренних точек, но остается проблема установления граничных условий в конечных точках, в которых ни  $C_P$  ни  $C_M$  неизвестны.

На каждом конце трубопровода используется только одно из пары уравнений, т. е. уравнение (16) или (17). На входе в трубопровод используется уравнение (17), а на выходе (16) (см. рис. 2).

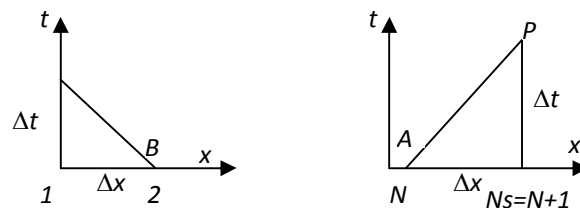


Рис. 2. Пространственно-временная сетка для граничных условий на концах участка трубопровода постоянного сечения

Чтобы определить давления и скорости на концах трубопровода, необходимо вывести вспомогательные уравнения (граничные условия), определяемые условиями на концах трубопровода.

Если давление на входе или выходе из трубопровода является известной функцией времени  $F(t)$ , то это соотношение может быть объединено с уравнением (16) или (17) для определения состояния в граничной точке.

Известное давление на входе в трубопровод:

$$P_U = F(t), P_D = P_U, P_D = C_M + \rho a_D V_D \Rightarrow V_D = \frac{F(t) - C_M}{\rho a_D} \quad (29)$$

Известное давление на выходе из трубопровода:

$$P_D = F(t), P_U = P_D, P_U = C_P + \rho a_U V_U \Rightarrow V_U = \frac{C_P - F(t)}{\rho a_U} \quad (30)$$

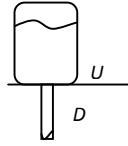


Рис. 3. Схема изменения поперечного сечения трубопровода

Соотношение неразрывности для несжимаемой жидкости:

$$A_U V_U = A_D V_D \quad (31),$$

где  $A_U, A_D$  – площади поперечного сечения трубопроводов.

Предполагая отсутствие рассеивания энергии в месте стыка трубопроводов и приравнивая полные давления с каждой стороны стыка, получим:

$$P_U = C_P - \rho a_U V_U, P_D = C_M - \rho a_D V_D, \quad P_U + \frac{1}{2} \rho V_U^2 = P_D + \frac{1}{2} \rho V_D^2, \quad (32)$$

$$\frac{1}{2} \rho V_D^2 + C_M + \rho a_D V_D - \frac{1}{2} \rho V_U^2 - C_P + \rho a_U V_U = 0,$$

$$\frac{1}{2} \rho V_D^2 + C_M + \rho a_D V_D - \frac{1}{2} \rho \left( \frac{A_D}{A_U} \right)^2 V_D^2 - C_P + \rho a_U \frac{A_D}{A_U} V_D = 0,$$

$$V_D^2 (1 - \beta^2) + 2(a_D + \beta a_U) V_D + \frac{2}{\rho} (C_M - C_P) = 0$$

$$\text{или } A \cdot V_D^2 + B \cdot V_D + C = 0 \quad (33),$$

где

$$\beta = \frac{A_D}{A_U}$$

Чтобы получить положительную скорость течения необходимо использовать положительный квадратный корень в формуле:

$$V_D = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (34)$$

Подставляя (34) в (31), (16), (17) получим все необходимые величины на стыке трубопроводов. Единственным допущением было пренебрежение рассеянием энергии в месте стыка. Оно вполне обоснованно для относительно малых скоростей течения жидкости в рассматриваемых трубопроводных системах и для систем трубопроводов, имеющих обтекаемые формы.

Уравнение расхода через диафрагму имеет вид:

$$V_D = \tau \sqrt{P_D - P_U}, \quad (35) \quad P_U = C_P - \rho a_U V_U, P_D = C_M + \rho a_D V_D, A_U V_U = A_D V_D,$$

где  $V_D$  определяется из квадратного уравнения с коэффициентами

$$A = 1, B = \tau^2 \rho (\beta a_U + a_D), c = \tau^2 (C_M - C_P)$$

Другие неизвестные легко находятся из (31), (16), (17).

На рис. 4 показано относительное движение между двумя элементами системы. Если площади и ориентация двух элементов неодинаковы, то в общем случае в месте стыковки этих элементов будет происходить определенное накопление или выделение жидкости, связанное с относительным перемещением элементов.

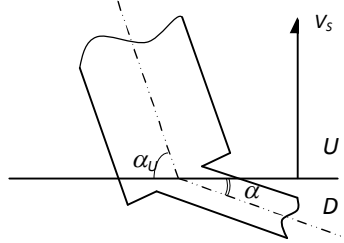


Рис. 4. Схема сопряжения трубопроводов различного сечения

Приравняв расход накопления жидкости разности расходов втекающей и вытекающей жидкости, получим:

$$A_U V_U - A_D V_D = -V_S (A_U \sin \alpha_U - A_D \sin \alpha_D) \quad (36)$$

Если предположить, что скорость перемещения сечения конструкции  $V_S$  направлена вертикально, а скорости жидкости  $V_U$  и  $V_D$  направлены вдоль осей соответствующих трубопроводов, ориентированных под углами  $\alpha_U$  и  $\alpha_D$ , из уравнений (16) и (17) и уравнения (36) получим:

$$P_U = P_D, \quad V_U = \beta V_D - V_S (\sin \alpha_U - \beta \sin \alpha_D) \quad (37)$$

Действие насоса может аппроксимироваться скачком давления на величину  $\Delta P$ , если размеры насоса являются небольшими по сравнению с другими элементами системы. Граничные условия в этом случае будут такими же, как и в случае, когда давление известно:

$$P_U = C_P - \rho a_U V_U, P_D = C_M + \rho a_D V_D, P_D = P_U + \Delta P, A_U V_U = A_D V_D, \\ C_M + \rho a_D V_D = C_P - \rho a_U \beta V_D + \Delta P \Rightarrow V_D = \frac{C_P - C_M + \Delta P}{\rho(a_D + \beta a_U)} \quad (38)$$

Демпфер представляет собой сосредоточенную податливость в месте стыковки двух элементов.

Так как демпфер является аккумулятором давления, то изменение давления в нем описывается дифференциальным уравнением. Податливость демпфера определяется по формуле:

$$b' = \frac{dVol}{dP} \quad (39)$$

Как и в случае относительного движения, скорость накопления жидкости в демпфере равна разности входного и выходного давления:

$$V_U A_U - V_D A_D = \frac{dVol}{dt} = \frac{dVol}{dP} \frac{dP}{dt} = b' \frac{dP_U}{dt}, \quad \frac{dP_U}{dt} = \frac{V_U A_U - V_D A_D}{b'} \quad (40)$$

**Результаты расчетов.** Реализация математической модели для трубопровода была проведена путем создания и отладки программного комплекса с использованием в качестве алгоритма функционирования и взаимодействия программных модулей.

Набор численных значений исходных данных осуществляется через всплывающие окна с информацией о текущем вводимом параметре с необходимыми пояснениями и подсказками (рис. 5), на рис. 6 приведено основное окно GUI в процессе вычисления.

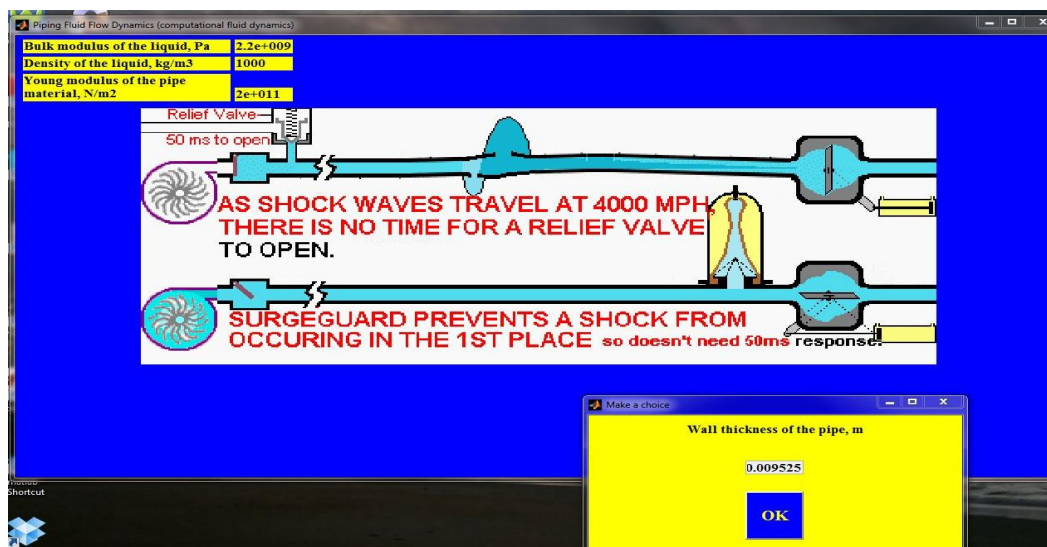


Рис. 5. GUI в процессе набора данных

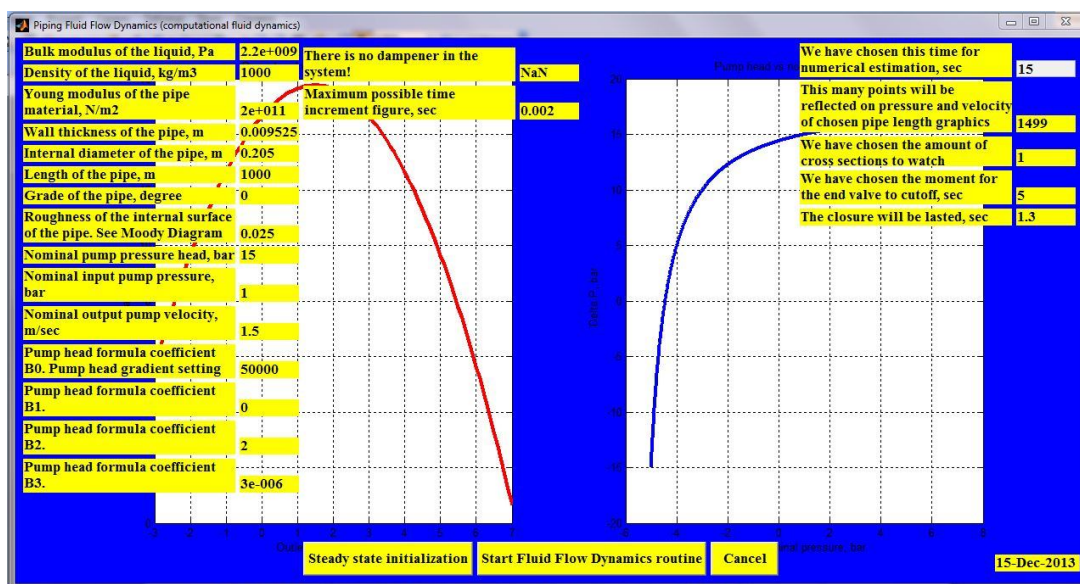


Рис. 6. Вид GUI в процессе вычисления. В отдельных ячейках отображаются численные значения параметров системы, с которыми проводится текущий расчет

Далее приводятся результаты пробного расчета для водопроводной трубы длиной 3000 м, с толщиной стенки из стали 9.525мм и внутренним диаметром 205 мм. Номинальный напор насоса 15 бар при входном номинальном давлении 1 бар и номинальной скорости потока на выходе из насоса 1.5 м/сек (при установившемся течении). Массовый расход рабочей жидкости при этом 27,8 кг/сек. В конце трубы перед клапаном устанавливался демпфер. Заслонка в



конце трубопровода начинала закрываться на 5 секунде. Время срабатывания заслонки до полного закрытия 1,3 секунды

На рис. 7, 8 и 9 приведены графики изменения давления и мгновенной скорости частиц рабочей жидкости в сечении узловой точки пространственно - временной сетки, ближайшей к заслонке трубопровода для трех вариантов, определяющих параметры демпфера, устанавливаемого на конце трубопровода.

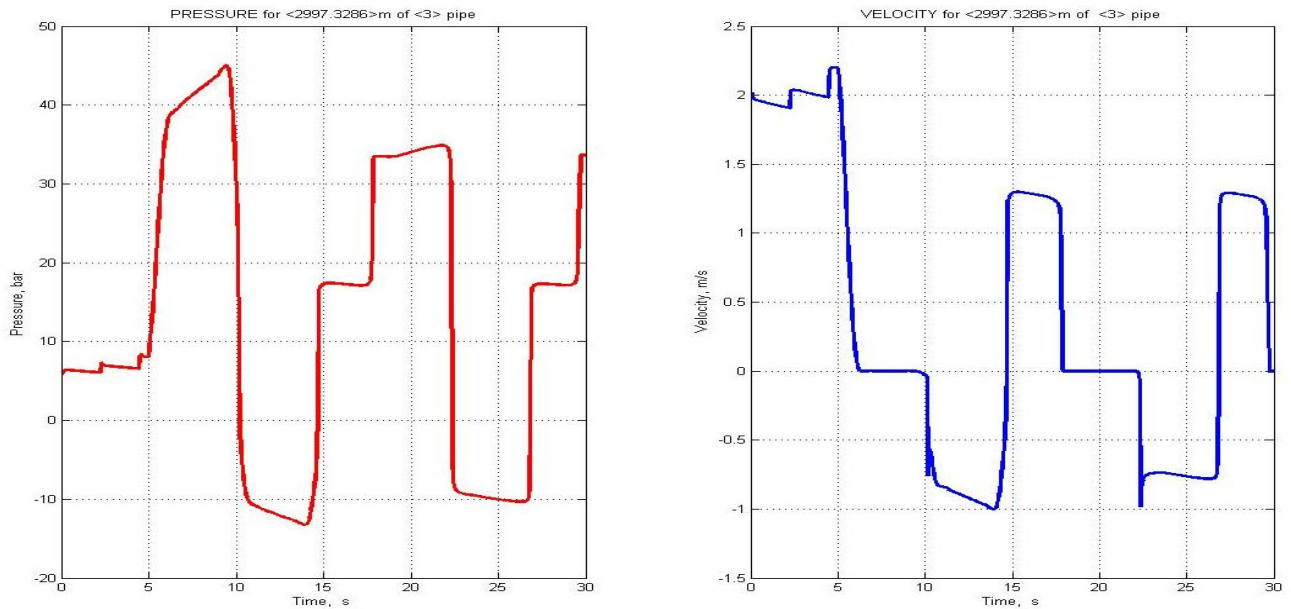


Рис. 7. График изменения. Давление и объем газовой подушки демпфера 20 бар и 1 л соответственно

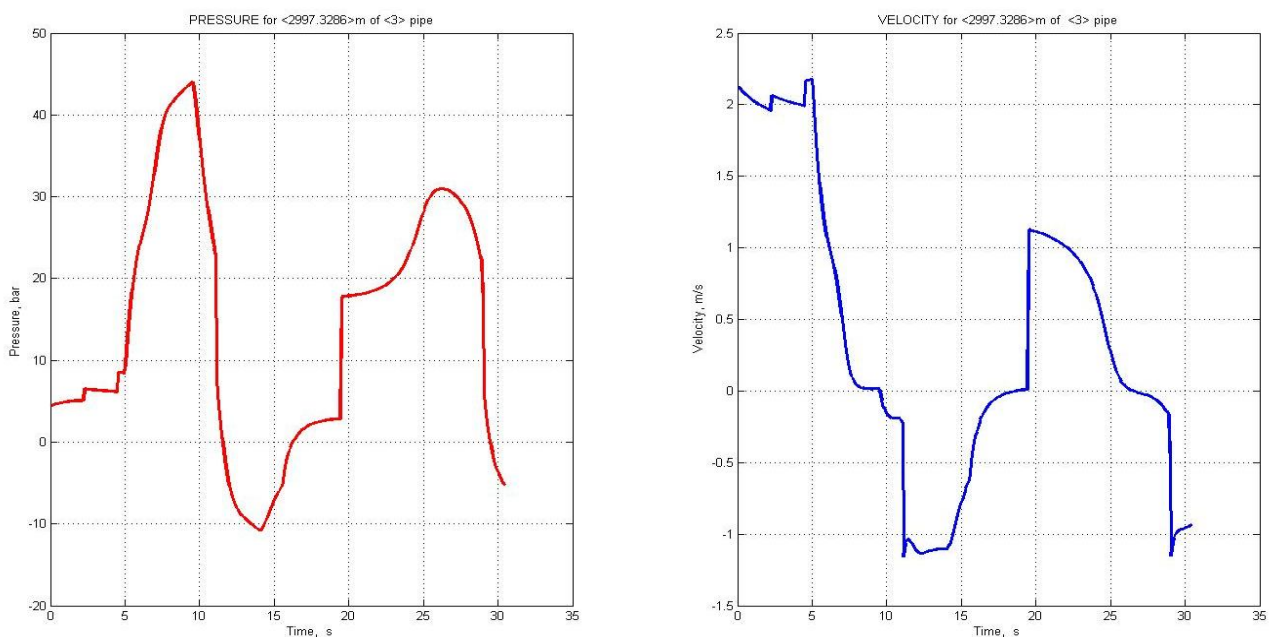


Рис. 8. График изменения. Давление и объем газовой подушки 20 бар и 50 л соответственно

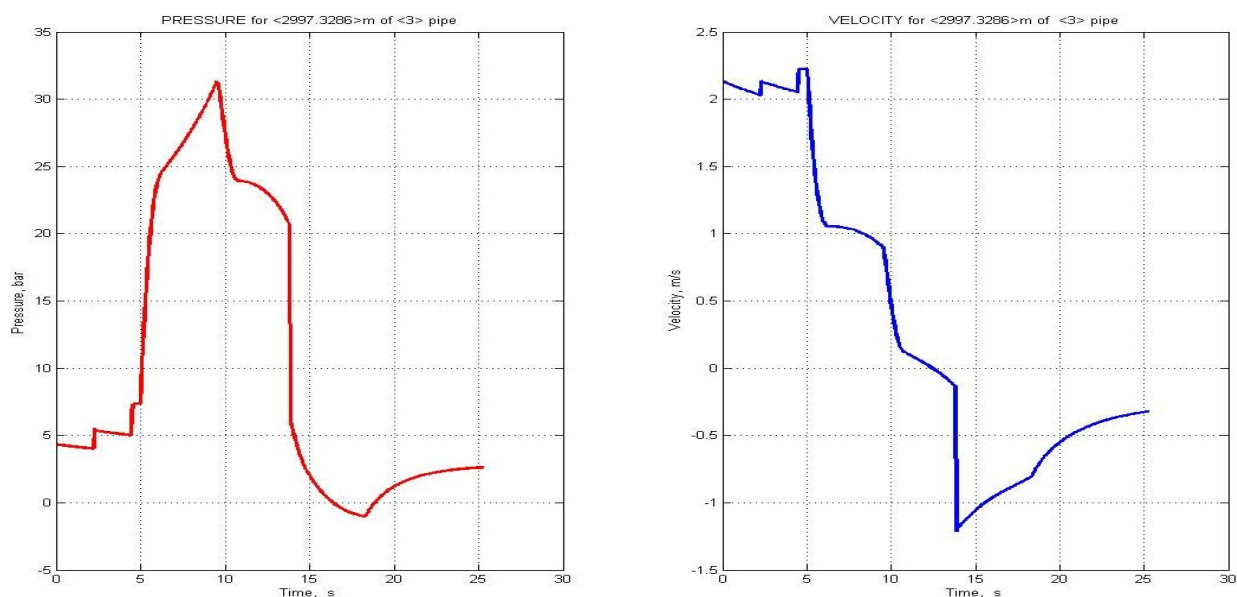


Рис. 9. График изменения. Давление и объем газовой подушки 20 бар и 250 л соответственно

Как видно из приведенных на рис. 7, 8 и 9 графиков, при последовательном наращивании объема газовой подушки соответственно 5л, 50л и 250л частота колебаний рабочей жидкости данного трубопровода с упругими стальными стенками изменяется соответственно 0,1Гц 0,067Гц и при значении газовой подушки 250л поток, после стартового единичного скачка давления, "выравнивается" в близкому к установившемуся течению начиная с 25 секунды. Что позволяет сделать вывод о том, что при давлении газовой подушки, равному 20 бар, объем газовой полости применяемого демпфера должен быть 250л для "сглаживания" течения в трубопроводе и практически полного подавления распространения гидравлических ударных явлений в жидкой среде для данного сочетания параметров длинного трубопровода.

### Выводы

1. В результате исследования было проведено ознакомление с методиками математического моделирования гидромеханических процессов с использованием метода характеристик, применяемого к модифицированным нелинейным дифференциальным уравнениям Навье-Стокса.
2. Предложенные подходы для численного интегрирования системы уравнений Навье-Стокса на пространственно-временной сетке методом характеристик позволили перейти к практическим вычислениям параметров течения рабочих жидкостей в длинных трубопроводах, с учетом граничных условий для стыковых сечений трубопроводов, которые определяют поведение насосов, диафрагм, заслонок, демпферных устройств, подключаемых к указанным сечениям.
3. Разработана математическая модель для прогнозирования пиковых амплитуд давления, обусловленными различными тормозящими причинами, приводящими к возвратному массовому потоку и, с ее использованием, программный вычислительный комплекс, который использован в качестве мо-

делирующего программного обеспечения на основе персонального компьютера, использующего OS Windows Vista и Windows 7.

4. Проведенные расчеты показали полную пригодность результатов данных разработок для решения задачи выбора приемлемых параметров демпфирующего устройства для подавления гидроударных явлений, возникающих при имитации внезапного перекрытия проходного сечения трубопровода при помощи заслонки, устанавливаемой на удаленном конце трубопровода.

#### Список литературы

1. Robert G. Dorch, Don J. Wood, Charlene Lightner. Distributed parameters analysis of pressure and flow disturbances in rocket propellant feed systems: - NASA Technical Note.- Washington DC, - August, 1966. – 54с.
2. MATLAB Compiler, The Language of Technical Computing: - Sixth printing, Revised for Version 3.0, The MathWorks, Natick, MA. 2002. - 274с.
3. R.A. Bakar and T. Firoz. Simulation of transient flows in a hydraulic system with a long liquid line. American Journal of Applied Sciences 2 (5): 1003-1007, ISSN 1546-9239, -5с.
4. Chaudhry M.H., Hussaini M.Y., 1985, Second-order explicit finite-difference schemes for waterhammer analysis, Journal of Fluids Engineering, 107, 523-529
5. 4. Wylie E.B., Streeter V.L., 1978, Fluid Transients, McGraw-Hill, New York

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Слесаревим В.В.  
Надійшла до редакції 16.11.13*

УДК 656:658

© И.А. Таран, М.Н. Трубицин, С.В. Крыжановская

## **РЕШЕНИЕ ТРАНСПОРТНОЙ ЗАДАЧИ МЕТОДОМ ПЕРЕБОРА ВЕРШИН**

Показана возможность решения транспортной задачи на основе построения, отсева и перебора вершин области определения целевой функции (N-мерного, выпуклого многогранника). Разработана стратегия выделения множества нужных для перебора угловых точек из множества всех допустимых точек на основе геометрии и известных свойств первых опорных планов. Разработанная MathCad-программа рекомендуется к применению в учебном процессе для детального исследования области определения целевой функции и сравнения начальных опорных планов.

The possibility of solving the transportation problem on the basis of construction, retention and re-boron vertices of the definition of the objective function (N-dimensional, convex polyhedron). A strategy for allocating a plurality needed for busting out of the corner points of the set of all possible points based on the geometry and the known properties of the first support of plans. MathCad-developed program is recommended for use in the learning process for the detailed study area definition of the objective function and the initial comparison of the support programs.

Показано можливість рішення транспортної задачі на підставі побудови, відсіву та перебору вершин області визначення цільової функції (N-мірного, опуклого багатогранника). Розроблено стратегію виділення множин потрібних для перебору кутових точок з множини всіх допустимих точок на основі геометрії і відомих властивостей перших опорних планів. Розроблена

MathCad-програма рекомендується до застосування в навчальному процесі для детального дослідження області визначення цільової функції та порівняння початкових опорних планів.

Современные учебные методы решения задачи линейного программирования (ЗЛП) основанные на традиционном симплекс-методе имеют итерационный характер, [1,2,3]. Эти итерации подразумевают прохождение по ребрам N-мерного многогранника (поверхность которого есть граница области определения целевой функции) от вершины с худшим значением функции, к вершине с более лучшим значением. Здесь  $N = n \cdot m$ , где  $m$  и  $n$  – количество поставщиков и потребителей. Вершины этого N-мерного выпуклого многогранника представляют собой возможные решения ЗЛП и их общее количество соизмеримо с величиной  $1,5 \cdot 2^{N-1}$ . Производство такого количества итераций не имеет смысла, даже для задачи с малыми  $m, n \leq 10$ , очевидно поэтому метод перебора вершин для достижения решения в ЗЛП до сих пор не рассматривается и не применяется.

В связи с выше изложенным, **целью** настоящей работы является применение метода прямого перебора вершин для решения транспортной задачи. **Идея** работы состоит в выделении различных множеств вершин, которые заранее не могут являться решением ЗЛП. Задача решалась с помощью MathCad, как наиболее доступным, наглядным и хорошо воспринимаемым студентами пакетом. Пример постановки закрытой ЗЛП для случая 15-ти мерного пространства показан на рис. 1.

$$\begin{array}{c}
 \begin{pmatrix} m \\ n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \end{pmatrix} \begin{array}{l} \text{поставщики} \\ \text{потребители} \end{array} \\
 \\
 \begin{matrix} \text{тарифы} & \text{объемы} \\ C = \begin{pmatrix} 4.3 & 2.5 & 2.8 & 1.3 & 2.1 \\ 2.1 & 3.5 & 4.7 & 3.8 & 3.2 \\ 4.6 & 4.9 & 2.3 & 3.3 & 2.1 \end{pmatrix} & b = \begin{pmatrix} 173 \\ 153 \\ 194 \end{pmatrix} \\
 \\
 \text{Целевая функция} \\
 z(x) := \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (C_{i,j} \cdot x_{i,j}) \\
 \\
 \text{объемы } a = (104 \ 113 \ 203 \ 45 \ 55) \\
 \text{найти } (X_1 \dots X_{15})^T = (x_{11} \ x_{21} \ x_{31} \ x_{12} \ x_{22} \ x_{32} \ x_{13} \ x_{23} \ x_{33} \ x_{14} \ x_{24} \ x_{34} \ x_{15} \ x_{25} \ x_{35})^T \quad z \rightarrow \min
 \end{matrix}
 \end{array}$$

Рис. 1. Постановка задачи, коллаж из MathCad-документа

Рассмотрим описание области определения минимизируемой целевой функции транспортной задачи. Первая ее часть представляет собой  $m+n-1=7$  гиперплоскостей, соответствующих балансу спроса и предложений. В связи с закрытостью ЗЛП необходимо отбросить одно уравнение, выберем последнее уравнение (объем -  $b_3$ ). Для определения координат вершин  $X_1 \dots X_{15}$  (как пересечения 15 гиперплоскостей) дополним систему линейных уравнений  $m \cdot n - (m+n-1) = 8$  нулевыми (координатными) гиперплоскостями  $X_\alpha = 0, X_\beta = 0 \dots X_\omega = 0$ , где  $\alpha, \beta \dots \omega$  представляют, в общем случае, некоторое сочетание без повторов 8 цифр из 15. Всего таких сочетаний или наборов (условимся, что в дальнейшем цифры набора расположены по возрастающей), а следовательно, вершин области и решений будет

$$C_{m \cdot n}^{m \cdot n - [m+n-1]} = C_{m \cdot n}^{m+n-1} = C_{15}^8 = C_{15}^7 = \frac{15!}{7! \cdot 8!} = 6435$$

При построении всего списка сочетаний воспользуемся лексикографическим методом, [4]. Для этого в текущем сочетании брался самый правый элемент, не достигший ещё своего наибольшего значения; он увеличивался на 1, а всем последующим элементам присваивались наименьшие значения, рис. 2.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9		6427	6428	6429	6430	6431	6432	6433	6434	6435	
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		7	7	7	7	7	7	7	7	7	8
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		8	8	8	8	8	8	8	8	9	9
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3		9	9	9	9	9	9	10	10	10	10
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	...	10	10	10	10	10	11	11	11	11	11
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5		11	11	11	11	12	12	12	12	12	12
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6		12	12	13	13	13	13	13	13	13	13
7	7	7	7	7	7	7	7	7	8		13	14	14	14	14	14	14	14	14	14
8	8	9	10	11	12	13	14	15	9		14	15	15	15	15	15	15	15	15	15

Рис. 2. Полный набор сочетаний 8 из 15, построенный по лексикографическому методу. Для этого набора в текущем сочетании находится самый нижний элемент, не достигший своего наибольшего значения; он увеличивается на единицу, а всем последующим элементам присвоим наименьшие значения

На первом шаге отбрасывания вершин выделим сочетания, включающие цифры 1,2,3, а также 4,5,6 и т.д., которые не дают решения в силу вырожденности составной матрицы системы линейных уравнений,  $\det(A/A_{\text{соч}})=0$ , рис. 3.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
6	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
7	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
8	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

	1
1	104
2	113
3	203
4	45
5	55
6	173
7	153
8	0
9	0
10	0
11	0
12	0
13	0
14	0
15	0

Рис. 3. Пример формирования системы при  $X_1= \dots =X_8=0$

Здесь уравнение № 1 можно получить сложением уравнений № 8, № 9, № 10, а уравнение № 2 - сложением уравнений № 11, № 12, № 13, что дает вырожденность матрицы  $A/A_{\text{соч}}$ , как матрицы с двумя одинаковыми строками. Отбросив подобные сочетания (вершины) как ненужные, у нас, в рассматриваемом примере, останется 2025 вершин, рис. 4.

	1	2	3	4	5		2023	2024	2025
1	0	0	0	0	0		-198	-188	-243
2	0	0	0	0	0		108	153	153
3	104	104	104	104	104		94	139	194
4	0	0	0	0	0			113	113
5	0	0	0	0	0			0	0
6	113	113	113	113	113			0	0
7	0	0	0	0	0			203	203
8	0	0	0	0	0			0	0
9	203	203	203	203	203	• • •	0	0	0
10	0	0	0	0	45		0	45	45
11	0	45	153	271	0		45	0	0
12	45	0	-108	-226	0		0	0	0
13	173	173	173	173	128		55	0	55
14	153	108	0	-118	153		0	0	55
15	-271	-226	-118	0	-226			55	0
16	883	884	886	887	888		$6,337 \cdot 10^3$	$6,338 \cdot 10^3$	$6,339 \cdot 10^3$

Рис. 4. Вершины, полученные в результате пересечения гиперплоскостей. Здесь и далее на рисунках в последней (16-той) строке матрицы находятся первоначальные номера вершин

На следующем шаге (в силу положительности перевозок в транспортной задаче) можно отбросить те вершины, у которых хотя бы одна координата отрицательна. В итоге останется 222 вершины, рис. 5.

Считаем целесообразным, на очередном шаге, отбросить те вершины, у которых присутствует максимальный тариф, в итоге имеем  $222-100=122$ , рис. 6.

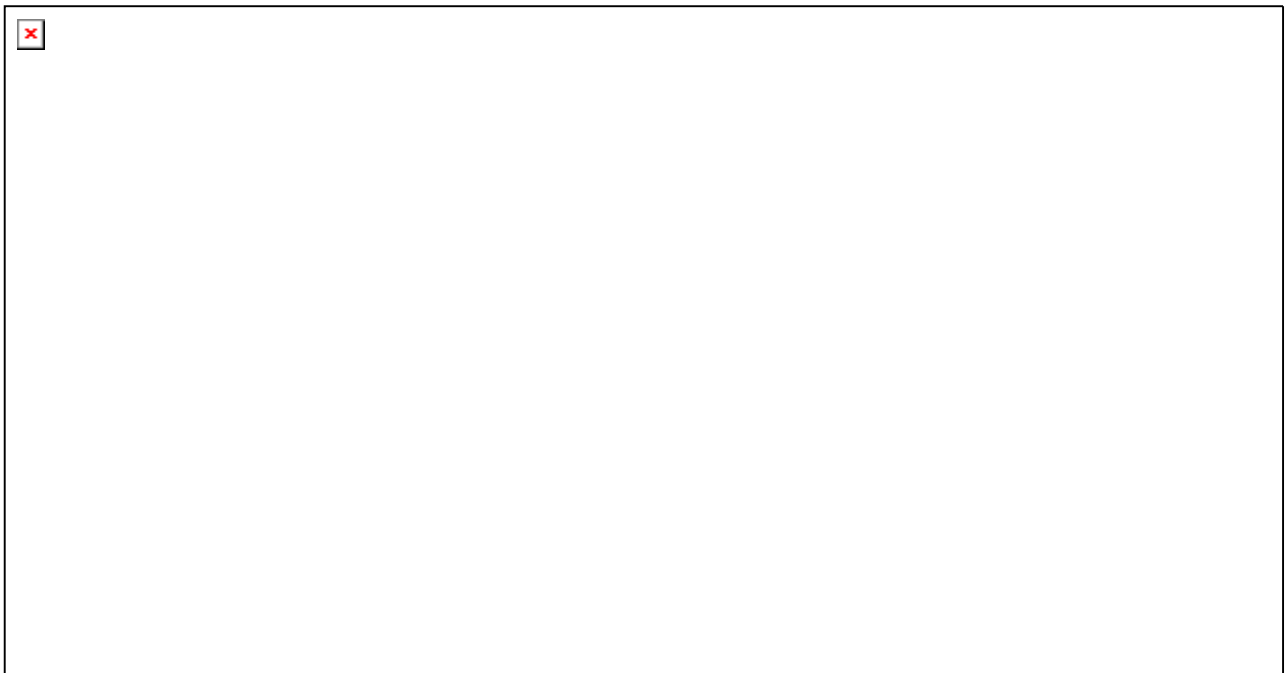


Рис. 5. Оставшиеся вершины, все координаты которых положительны

	1	2	3	4	5	6	118	119	120	121	122
1	0	0	0	0	0	0	15	15	6	51	6
2	0	0	0	0	0	0	89	89	98	53	98
3	104	104	104	104	104	104	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	113	113	113	113	113
5	113	113	113	113	113	113	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	173	158	173	118	128	113	0	0	54	9	9
8	0	0	0	0	0	0	64	9	0	0	0
9	30	45	30	85	75	...	139	194	149	194	194
10	0	0	0	0	45	0	45	45	0	0	45
11	0	0	40	40	0	0	0	0	0	45	0
12	45	45	5	5	0	0	0	0	45	0	0
13	0	15	0	55	0	0	0	0	0	0	0
14	40	40	0	0	40	0	0	55	55	55	55
15	15	0	55	0	15	0	55	0	0	0	0
16	$1,075 \cdot 10^3$	$1,077 \cdot 10^3$	$1,081 \cdot 10^3$	$1,083 \cdot 10^3$	$1,084 \cdot 10^3$	$1,086 \cdot 10^3$	$10^3$	$5,677 \cdot 10^3$	$5,705 \cdot 10^3$	$5,708 \cdot 10^3$	$5,712 \cdot 10^3$

Рис. 6. Вершины, в которых отсутствует максимальный тариф:  $C_{3,2}=4,9$ , следовательно,  $x_{3,2}=X_6=0$

Поступив аналогично с обязательным присутствием минимального тарифа, получим  $122-72=50$  вершин. На последних двух этапах применим метод двойного предпочтения, отбрасывая «двойной» максимум тарифов и оставляя «двойной» минимум тарифов. В результате окончательно имеем  $50-30-10=10$  вершин.

Результирующая матрица координат вершин приведена на рис. 7.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0	0	0	0	0	0	64	64	6
2	104	104	104	104	40	40	98	40	40	98
3	0	0	0	0	64	64	6	0	0	0
4	113	113	64	64	0	0	113	0	0	113
5	0	0	49	49	113	113	0	113	113	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	15	9	64	9	128	73	15	64	9	9
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	188	194	139	194	75	130	188	139	194	194
10	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	6	0	55	0	55	0	0	55	0
14	49	49	0	0	0	0	55	0	0	55
15	6	0	55	0	55	0	0	55	0	0
16	$2,26 \cdot 10^3$	$2,262 \cdot 10^3$	$2,531 \cdot 10^3$	$2,533 \cdot 10^3$	$2,993 \cdot 10^3$	$2,995 \cdot 10^3$	$3,204 \cdot 10^3$	$5,501 \cdot 10^3$	$5,503 \cdot 10^3$	$5,712 \cdot 10^3$

Рис. 7. Окончательная матрица координат вершин. Решение, соответствующее минимуму целевой функции расположено в столбце № 4

Показанная стратегия отбрасывания «ненужных» вершин является перспективной т.к. позволила сократить число рассматриваемых решений более чем в 600 раз. Применение такого метода решения транспортной задачи нуждается в более строгом математическом описании выделения всех перечисленных множеств вершин, табл. В рассматриваемом примере, табл., применение метода двойного тарифа является более предпочтительным т.к. позволяет отбросить из рассмотрения большее количество «ненужных» вершин. Рациональная последовательность применения перечисленных этапов отбрасывания вершин также нуждается в детальном математическом описании для предварительного сведения к минимуму окончательной матрицы сравниваемых вершин.

Таблица.

Этапы выделения и сокращения количества вершин 15-мерного многогранника рассматриваемого примера

Группы (множества) вершин	Основные аналитические выкладки
Максимально возможное количество вершин	$C_{m \cdot n}^{m+n-1}$
Вершины, как результат пересечения гиперплоскостей	$\det(A/A_{COЧ}) \neq 0$
Вершины, все координаты которых строго положительны	$X_p > 0$
Обязательное присутствие вершины, тариф которой – минимален	$C_p = \min \{c_{i,j}\}$ $X_p \neq 0$
Обязательное отсутствие вершины, тариф которой – максимален	$C_p = \max \{c_{i,j}\}$ $X_p = 0$
Присутствие вершин, тарифы которых – минимальны по строкам и столбцам	$X_{p \dots q} \neq 0$
Отсутствие вершин, тарифы которых – максимальны по строкам и столбцам	$X_{p \dots q} = 0$

$$\begin{pmatrix} 4.3 & 2.5 & 2.8 & 1.3 & 2.1 \\ 2.1 & 3.5 & 4.7 & 3.8 & 3.2 \\ 4.6 & 4.9 & 2.3 & 3.3 & 2.1 \end{pmatrix} X_{1,4} = X_{10} \neq 0$$

$$\begin{pmatrix} 4.3 & 2.5 & 2.8 & 1.3 & 2.1 \\ 2.1 & 3.5 & 4.7 & 3.8 & 3.2 \\ 4.6 & 4.9 & 2.3 & 3.3 & 2.1 \end{pmatrix} X_{3,2} = X_6 = 0$$

$$\begin{pmatrix} 4.3 & 2.5 & 2.8 & 1.3 & 2.1 \\ 2.1 & 3.5 & 4.7 & 3.8 & 3.2 \\ 4.6 & 4.9 & 2.3 & 3.3 & 2.1 \end{pmatrix} X_{2,10,15} \neq 0$$

$$\begin{pmatrix} 4.3 & 2.5 & 2.8 & 1.3 & 2.1 \\ 2.1 & 3.5 & 4.7 & 3.8 & 3.2 \\ 4.6 & 4.9 & 2.3 & 3.3 & 2.1 \end{pmatrix} X_{6,8} \neq 0$$

В предлагаемом алгоритме наиболее громоздкие и сложные действия, будут связаны с построением всего набора сочетаний  $C_n^k$ , ведь в реальных транспортных задачах количества поставщиков и потребителей может быть бо-



лее 100. Предполагается в дальнейшем упростить этот процесс используя один раз построенную матрицу-базу требуемого (большого) числа сочетаний. Меньшие наборы можно получать из построенной матрицы-базы вычеркиванием соответствующих строк и столбцов, [4].

Предполагаем, что использование теории графов для определения соседних вершин многогранника-графа [3] как некоторых множеств позволит определить новые геометрические свойства, упрощающие задачу перебора. Известные способы решения транспортной задачи и ЗЛП используют итерационный метод и различные методы задания начальных данных (первого опорного плана) [1]. Условия построения этих планов или вопросы итерационного перехода от вершины с худшим значением целевой функции к вершине с лучшим значением могут быть использованы для сужения множества сравниваемых вершин многогранника.

### **Выводы по работе:**

- Разработана наиболее простая стратегия отбрасывания вершин с заранее не подходящими решениями ЗЛП.
- Показано применение самого надежного метода нахождения экстремума целевой функции – метода прямого перебора решений
- Средствами MathCad реализован метод лексиграфического получения сочетаний из  $n$  по  $k$ .
- Определены возможные направления обобщения процесса отбрасывания «ненужных» вершин для ЗЛП.
- Показаны способы объединения групп вершин многогранника – с отрицательными компонентами, включающими (или исключаящими) координатами и др.
- На рассматриваемом примере показано преимущество метода двойного предпочтения, позволяющего отбросить максимальное количество «ненужных» вершин.

### Список литературы

1. Таха, Хемиди А. Введение в исследование операций.- М.: «Вильямс», 2007.-912 с.
2. Математика для экономистов на базе MathCad./А.А.Черняк, В.А.Новиков, О.И.Мельников, А.В.Кузнецов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003.-496с.
3. Фомин Г.П. Математические методы в коммерческой деятельности. – М.: Финансы и статистика, 2005.- 616с.
4. Липский В. Комбинаторика для программистов. – М.: Мир, 1988.- 341с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Ширінім Л.Н.  
Надійшла до редакції 14.11.13*

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ ШАХТНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

Проведен анализ факторов, влияющих на производительность и безопасность шахтной локомотивной откатки. Предложены технические решения по усовершенствованию тормозной системы электровозов с использованием электропластического эффекта.

Проведено аналіз чинників, що впливають на продуктивність та безпеку шахтної локомотивної відкатки. Запропоновано технічні рішення з удосконалення гальмівної системи електровозів з використанням електропластичного ефекту.

Analysis of factors effecting on productivity and safety of mine locomotive haulage has been carried out. Technologies concerning the improvement of electric locomotive brakes using electroplastic effect are proposed.

**Введение.** Эффективность подземной добычи угля, основного энергоносителя Украины, во многом зависит от совершенства конструкций применяемых средств транспортирования. На действующих горнодобывающих предприятиях преобладающим средством транспортирования горной массы, оборудования, людей и материалов по горизонтальным выработкам является локомотивная откатка. Она включает более 3,5 тысяч аккумуляторных и контактных электровозов, 150 тысяч вагонов, а ее производительность и безопасность во многом ограничиваются эффективностью и надежностью тормозных систем локомотивов.

Одной из основных проблем современного шахтного локомотивного транспорта является недостаточная его производительность. Старение шахтного фонда приводит к приближению горных работ к границам шахтных полей, неуклонному росту протяженности маршрутов и росту числа выработок с завышенным профилем рельсового пути (рис. 1).

В отличие от магистрального и карьерного железнодорожного транспорта, у которых тормозные средства размещены по всей длине поезда, в шахтном локомотивном транспорте ими оснащаются только локомотивы, что приводит к резкому снижению допустимой массы поезда по условию торможения.

**Актуальность.** Движение груженых составов от погрузочных пунктов к стволу производится, в большинстве случаев, вниз по спуску. Вследствие именно тормозных, а не тяговых ограничений на участках с завышенным уклоном, локомотив транспортирует часто только одну груженую вагонетку. Это приводит к тому, что локомотивная откатка не в состоянии оперативно обеспечивать потребности очистных и подготовительных забоев. Себестоимость транспортирования вспомогательных материалов при этом существенно увеличивается, что негативно сказывается на финансовых результатах работы предприятия в целом. При несоблюдении весовой нормы движущегося вниз состава или изменения в результате пучения почвы профиля пути на отдельных участках выработки возникают сложности с торможением и опасность возникновения неуправляемого движения поезда, растет аварийность и травматизм на транспорте.

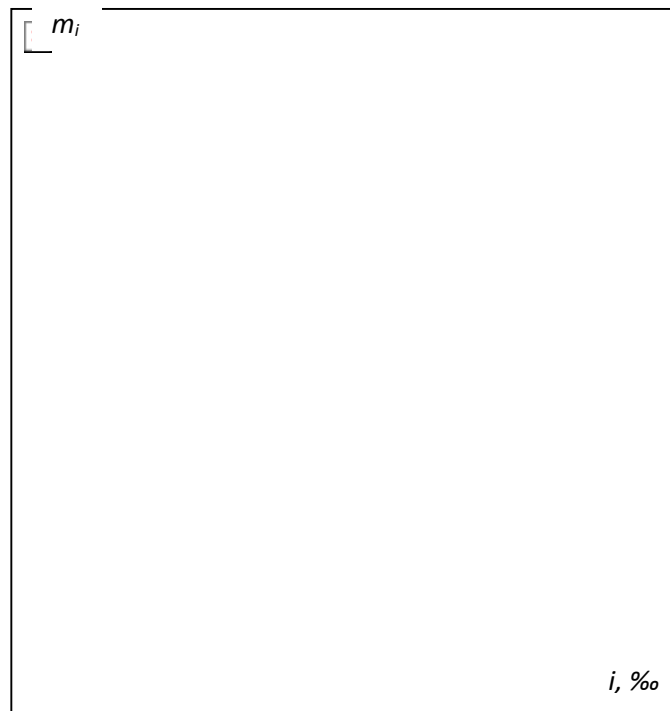


Рис. 1. Гистограмма распределения плотности вероятности ( $m_i$ ) продольного профиля ( $i$ ) рельсового пути на шахтах Западного Донбасса

**Цель исследований.** Увеличение производительности и безопасности эксплуатации локомотивного транспорта за счет повышения эффективности тормозной системы шахтных локомотивов.

Традиционно применяемый колесно-колодочный тормоз является основным для всех типов шахтных локомотивов, поскольку его конструкция проста и отработана. Основной его недостаток – интенсивный и неравномерный износ тормозной колодки и поверхности катания колеса, что оказывает отрицательное влияние на тягово-тормозные характеристики локомотива, повышает динамические нагрузки на него и верхнее строение путей. Согласно [1] эксплуатация локомотивов запрещена при износе более  $2/3$  толщины колодки и прокате бандажей более 10 мм. Непрерывное изменение геометрии поверхности контакта и попадание в него влаги и грязи приводит к нестабильности величины коэффициента трения между колодкой и колесом, что снижает эффективность торможения.

Общим недостатком колодочного тормоза является невысокий коэффициент сцепления между трущимися поверхностями, который обусловлен их физическими характеристиками и силой прижатия. Последняя ограничивается нормативами во избежание заклинивания колес локомотива, приводящего к росту тормозного пути, и неравномерного износа колес в виде «лысок».

Одним из перспективных, на наш взгляд, направлений повышения эффективности тормозной системы шахтного локомотива является использование электропластического эффекта, который описан белорусскими исследователями для тягового режима магистрального локомотива [2]. Ими было установлено, что прохождение электрического тока через зону контакта колеса с рельсом увеличивает силу взаимодействия между ними на

молекулярном уровне, повышает коэффициент сцепления и касательную силу тяги локомотива.

Авторами с целью повышения эффективности торможения предложено техническое решение [3], суть которого заключается в следующем (рис. 2).

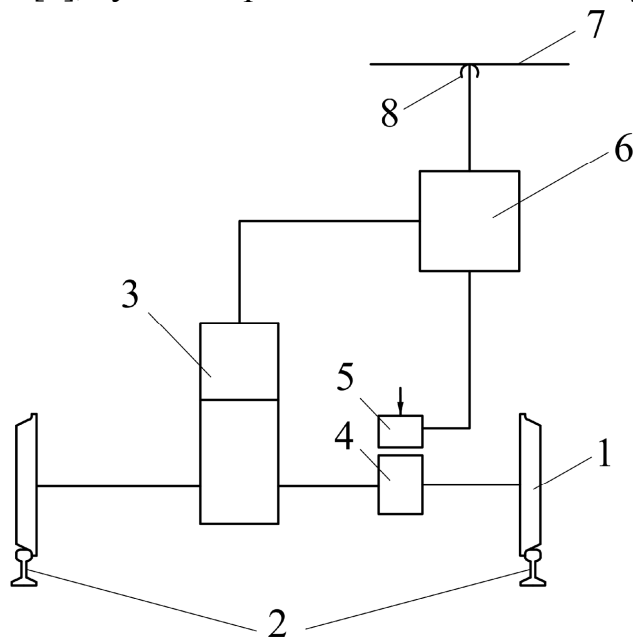


Рис. 2. Барабанное тормозное устройство шатного локомотива: 1 – колесная пара; 2 – рельсовый путь; 3 – двигатель приводного блока; 4 – тормозной барабан; 5 – тормозная колодка; 6 – регулирующее устройство; 7 – контактный провод; 8 – токоприемник

В тяговом режиме работы локомотива электрический двигатель приводного блока 3 питается от контактного провода 7 через токоприемник 8 и регулирующее устройство 6. Во время перехода в тормозной режим двигатель приводного блока 3 обесточивают с помощью регулирующего устройства 6, тормозную колодку 5 прижимают к поверхности тормозного барабана 4 с помощью привода, например пневматического, и соединяют ее через регулирующее устройство 6 и токоприемник 8 с контактной сетью. Таким образом образуется электрическая цепь: контактный провод 7 – токоприемник 8 – регулирующее устройство 6 – тормозная колодка 5 – тормозной барабан 4 – колесная пара 1 – рельсовый путь 2. Во время прохождения электрического тока через эту цепь возникает электропластический эффект, который повышает коэффициент трения между колодкой и тормозным барабаном, а также между колесом и рельсом. При этом, изменяя силу тока с помощью регулирующего устройства 6, например реостатного, обеспечивают управление тормозной силой локомотива.

К недостаткам предложенной конструкции можно отнести введение в нее дополнительного элемента – тормозного барабана, плотный контакт которого с криволинейной колодкой обеспечить гораздо сложнее, чем двух плоских поверхностей (как, например, в дисковом тормозе).

Избежать износа колесных пар и попадания загрязнений в зону контакта можно путем перехода к дисковым тормозам, основным конструктивным

элементом которых является тормозной диск, зажимаемый с двух сторон фрикционными накладками, установленными в суппорте. Основным их достоинством является то, что, благодаря плоскопараллельному контакту трущихся поверхностей, обеспечивается максимально плотное их прилегание друг к другу. Для реализации такого технического решения на шахтном локомотиве разработана конструкция тормоза [4], в котором тормозные накладки взаимодействуют с боковыми поверхностями колес.

В тяговом режиме работы (рис. 3) колесная пара 2 электровоза катится по рельсу 1 и фрикционные накладки 3, отжатые пружинами 5, не взаимодействуют с ее боковыми поверхностями. В момент торможения машинист включает насос 17, устанавливает золотник 8 в положение А и рабочая жидкость из бака 14 через клапан 9 под давлением поступает к гидроцилиндрам 4 по трубопроводу 15, что приводит к движению их штоков. При этом перемещаются тормозные накладки 3,

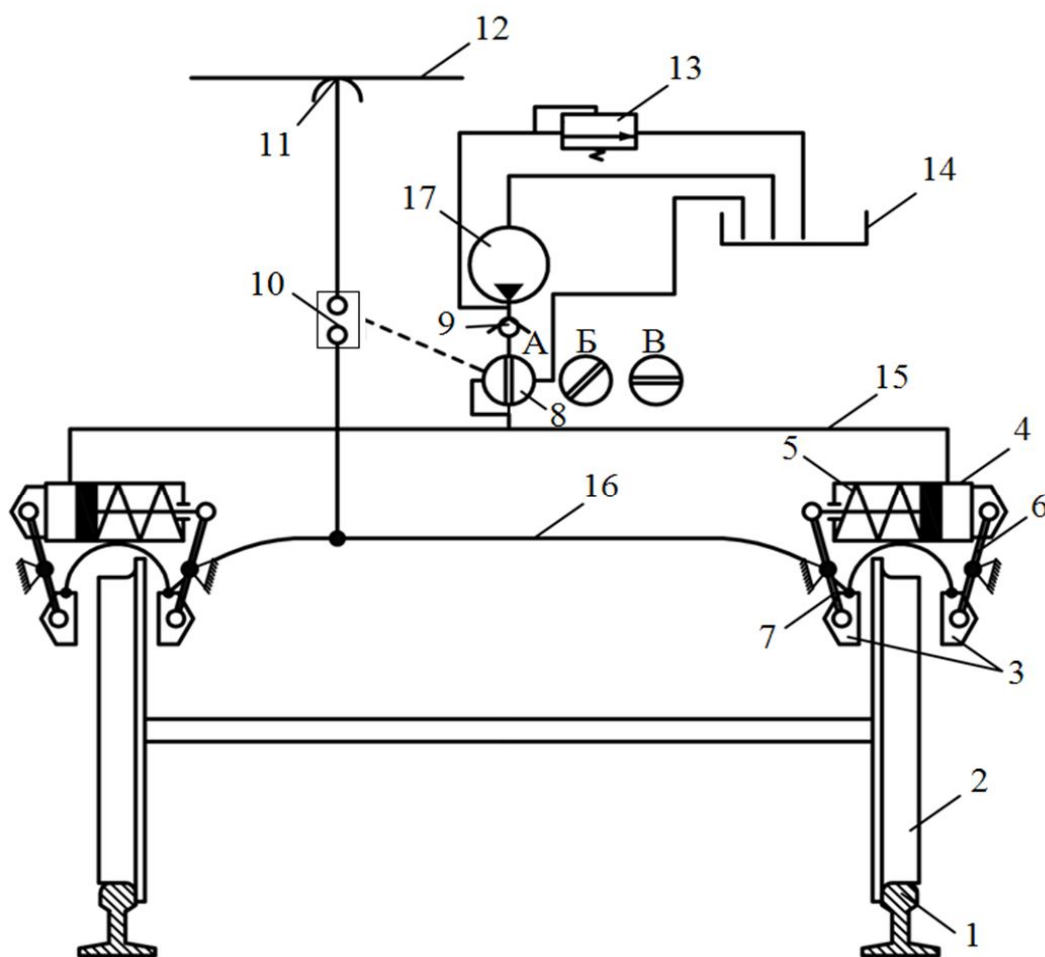


Рис. 3. Фрикционный тормоз локомотива: 1 – рельс; 2 – колесная пара; 3 – фрикционные накладки; 4 – гидроцилиндр; 5 – пружины; 6, 7 – рычаг; 8 – золотник; 9 – клапан; 10 – регулирующее устройство; 11 – токоприемник; 12 – контактный провод; 13 – предохранительный клапан; 14 – бак; 15 – трубопровод; 16 – провод; 17 – насос

соединенные с цилиндрами рычагами 6 и 7, которые зажимают боковые поверхности колесных пар 2, что приводит к механическому торможению локомотива.

Одновременно с этим включается регулирующее устройство 10, которое синхронно связано с золотником 8, и образуется электрическая цепь: контактный провод 12 – токоприемник 11 – регулирующее устройство 10 – провод 16 – фрикционные накладки 3 – колесная пара 2 – рельс 1. Во время прохождения электрического тока через зоны контакта фрикционных накладок 3 и боковых поверхностей колесных пар 2, а также рельсов 1 с рабочими поверхностями последних, возникает электропластический эффект, который повышает коэффициент трения между ними и коэффициент сцепления колес с рельсами.

Применение подобной конструкции позволяет также избежать неравномерного износа колеса, попадания в зону контакта грязи с поверхности катания, и, за счет плоскопараллельного контакта между накладками и колесом, существенно упрощает конструкцию фрикционной пары.

**Выводы.** Внедрение предложенных тормозных устройств позволит существенно повысить тормозную силу шахтного локомотива, снизить износ поверхности катания колеса, предотвратить нарушение геометрии трущихся поверхностей и, как следствие, увеличить весовую норму поезда и среднюю скорость движения состава по тормозному фактору, снизить динамические нагрузки на железнодорожное полотно и локомотив, улучшить технико-экономические показатели работы локомотивного транспорта. Дальнейшие исследования планируется проводить в направлении экспериментального определения эффективности предложенных технических решений и теоретического обоснования рациональных параметров их составных узлов.

#### Список литературы

1. Правила безпеки у вугільних шахтах [Текст] . – К.: Основа, 2010. – 208с.
2. Измеров О.Сцепление - вдвое? // [http://rzdclub.ucoz.ru/publ/sceplenie\\_vdvoe/1-1-0-1](http://rzdclub.ucoz.ru/publ/sceplenie_vdvoe/1-1-0-1).
3. Спосіб управління гальмовою силою транспортного засобу[Текст]: пат. на корисну
4. модель Україна 81075: МПК В61В 7/00/ О.В. Денищенко, О.М. Коптовець, С.Є. Барташевський; заявник і патентовласник ДВНЗ “Націон. гірн. ун-т”. – № u 2012 12657; заявл. 05.11.2012; опубл. 25.06.2013, Бюл.12
5. Гальмо шахтного електровоза [Текст]: рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель Україна по заявці № а2013 03756 від 04.07.2013 / О.В. Денищенко, С.Є. Барташевський, А.А. Юдіна, О.О. Кучеренко; заявник і патентовласник ДВНЗ “Націон. гірн. ун-т”.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Ширінім Л.Н.  
Надійшла до редакції 17.10.13*

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ПОРОДЫ НАПОЧВЕННЫМИ КАНАТНЫМИ ДОРОГАМИ**

Выполнено обоснование особенностей структуры автоматизированной системы управления процессами транспортирования породы напочвенными канатными дорогами в подземных выработках сложной рельефной конфигурации.

Виконано обґрунтування особливостей структури автоматизованої системи управління процесами транспортування породи надґрунтовими канатними дорогами в підземних виробленнях складної рельєфної конфігурації.

The ground is executed of features of structure of the automated system of process control of portage of breed by the napochvennimi funicular roads in the underground making of the complicated relief configuration.

При разработке резервных запасов угля, расположенных у границ шахтных полей, длина транспортных магистралей достигает 6–7 км. Резервные запасы преимущественно сосредоточены в зонах влияния тектонических нарушений, высокой обводненности и интенсивного пучения пород почвы. В подобных условиях ведения горных работ своевременный вывоз породы из подготовительных забоев традиционными видами транспорта является трудно решаемой, а в большинстве случаев невыполнимой задачей. Необходимо отметить, что явление пучения пород почвы, характер его проявления и влияние на состояние транспортных выработок до настоящего времени мало изучены и непрогнозируемые. В этой связи условия эксплуатации рельсовых видов участкового транспорта относятся к нетипичным, а процессы транспортирования – в условиях неопределенности, т.е. трудно поддающиеся идентификации и управлению. На шахтах Западного Донбасса при проведении и эксплуатации участковых подготовительных выработок с интенсивным пучением пород почвы технологически рекомендуется применять именно напочвенные канатные дороги (ДКН).

Выпускаемые для горнорудной отрасли модификации напочвенных канатных дорог типа ДКН-3, ДКНЛ и ДКНУ оборудованы приводными станциями на базе асинхронных электродвигателей с фазным ротором. Для управления электроприводом ДКН применяется аппаратура управления шахтными подъемными машинами и лебедками в исполнении РВ образца 60-х годов, которая содержит устаревшие технические решения и не соответствует современным требованиям по безопасности [1].

Следует отметить, что подобные технические решения удовлетворяли требованиям производства при проведении прямолинейных выработок длиной до 2000 м. В настоящее время на шахте «Павлоградская» в качестве единого транспортного средства при проведении выработок испытывается экспериментальный образец напочвенной канатной дороги тяжелого типа ДКНП-1,6 длиной 3360 м с общей кривизной трассы более 360°.

Результаты шахтных исследований эксплуатационных параметров дороги ДКНП-1,6 показали, что эффективность ее работы в значительной степени ограничена надежностью тягового органа и линейных элементов, а также низкими показателями работы автоматизированной системы управления транспортно-технологическими процессами и операциями по перемещению грузов в нетипичных условиях горного производства. К транспортно-технологическим процессам и операциям, кроме процесса транспортирования грузов по подземным выработкам, отнесены технологические процессы по выпуску породы из бункера, операции погрузки и разгрузки вагонов, а также маневровые операции по обмену груженых составов на порожние. В реальных условиях горного производства автоматизированная система идентификации и управления технологическими процессами транспортирования породы в подземных выработках шахты должна представлять собой оперативно-производственную информационно-советующую структуру с автоматизированным управлением основных и вспомогательных операций, осуществляемых под контролем человека.

При проведении выработок, в сложных горно-геологических условиях, из-за несовершенств системы оперативно-производственного управления транспортно-перемещающими процессами регулярно происходят отказы и повреждения линейных узлов, а также технологические нарушения, вызывающие простои напочвенных канатных дорог, обслуживающих подготовительные забои. По результатам анализа эксплуатационных показателей работы 38 проходческих забоев установлено, что на шахтах региона по вине транспорта ежедневные потери проведения подготовительных выработок достигают 0,53–0,8 м/сут., а затраты на замену канатов, линейных элементов дороги (шкивов, роликов) и ликвидацию несовершенств системы оперативно-производственного управления транспортно-перемещающими процессами и операциями составляют более 300 тыс. грн. в год [2].

**Целью работы** является обоснование структуры и методическое сопровождение модели автоматизированного оперативно-производственного управления транспортно-технологическими процессами и идентифицированными эксплуатационными параметрами напочвенных канатных дорог нового поколения, что обеспечивает снижение удельных энергозатрат и ресурсосбережение при значительной интенсификации процессов перемещения шахтной породы в подземных выработках сложной рельефной конфигурации.

Для снижения энергозатрат на транспортирование грузов в выработках сложной конфигурации и оперативного диагностирования функций, выполняемых ДКНП-1,6, была проведена оценка аппаратуры дистанционного управления АДУ-11М, используемой в конструкции дороги. Шахтными исследованиями установлено, что применяемые на рельсовом транспорте модели автоматизированной идентификации и управления процессами доставки грузов ориентированы на работу транспортного оборудования в типичных производственных ситуациях. В нетипичных условиях эксплуатации, т.е. за пределами своих пороговых значений, обработка экстремальных производственных состояний не предусмотрена. В подобных ситуациях функции управления транспортными средствами выполняет оператор ДКН, который, опираясь на имеющийся опыт



работы, принимает по конкретному технологическому состоянию свои субъективные решения.

По результатам выполненных исследований были предложены технические решения по усовершенствованию структурной схемы автоматизированной идентификации и управления транспортно-перемещающими процессами. Сущность совершенствования структурной схемы заключается в сопровождении процессов транспортирования грузов по подземным горным выработкам информационными потоками, которые передают оператору дороги сигналы об оперативных изменениях положений состава напочвенной дороги, нагрузок в тяговом канате, энергозатратах и прочих производственных ситуациях.

**Идея** исследования заключается в комплексном учете закономерностей взаимодействия элементов динамической системы «человек–агрегат–среда» для эффективного управления процессами транспортирования породы напочвенными канатными дорогами и энергосбережения при эксплуатации их в условиях существенной неопределенности.

Основными задачами действующих автоматизированных систем управления рельсовым транспортом угольных шахт являются повышение пропускной способности подсистем внутришахтного транспорта, а также обеспечение безопасности и безаварийности средств транспорта. При вовлечении в разработку прирезаемых запасов угля, сосредоточенных в зонах геологических нарушений и интенсификации горного производства, возникла необходимость повышения уровня автоматизированного управления транспортно-перемещающими процессами и оперативно-производственного диагностирования функций, выполняемых ДКН в условиях неопределенности.

На рис. 1 приведена модель функционального диагностирования технологической схемы транспортирования породы из подготовительных забоев шахты «Павлоградская» с применением экспериментального образца напочвенной канатной дороги ДКНП-1,6, породного бункера (гезенка) и вагонеток ВД-2,5 с откидными днищами.

Символами А, В, ..., Е отмечены участки повышенной опасности, требующие размещения в их зоне специальных устройств, обеспечивающих информационную *поддержку* оператору ДКН *для принятия решений* и позволяющих вместе с системой автоматизированного управления идентифицировать основные параметры взаимодействия объектов транспортно-технологического комплекса (тягового органа, линейных элементов, подвижного состава, рельсового пути и вмещающих боковых пород).

Базируясь на принципах создания единой информационной базы (комплекса) в зоне F (рис. 1) сосредоточены пульт управления дорогой, камера привода, пункт разгрузки вагонов и породный бункер. Следует отметить, что в условиях неопределенности системный подход к анализу структуры комплекса транспортного оборудования и выполнения, возложенных на него функций должен предусматривать возможность возникновения новых задач управления.

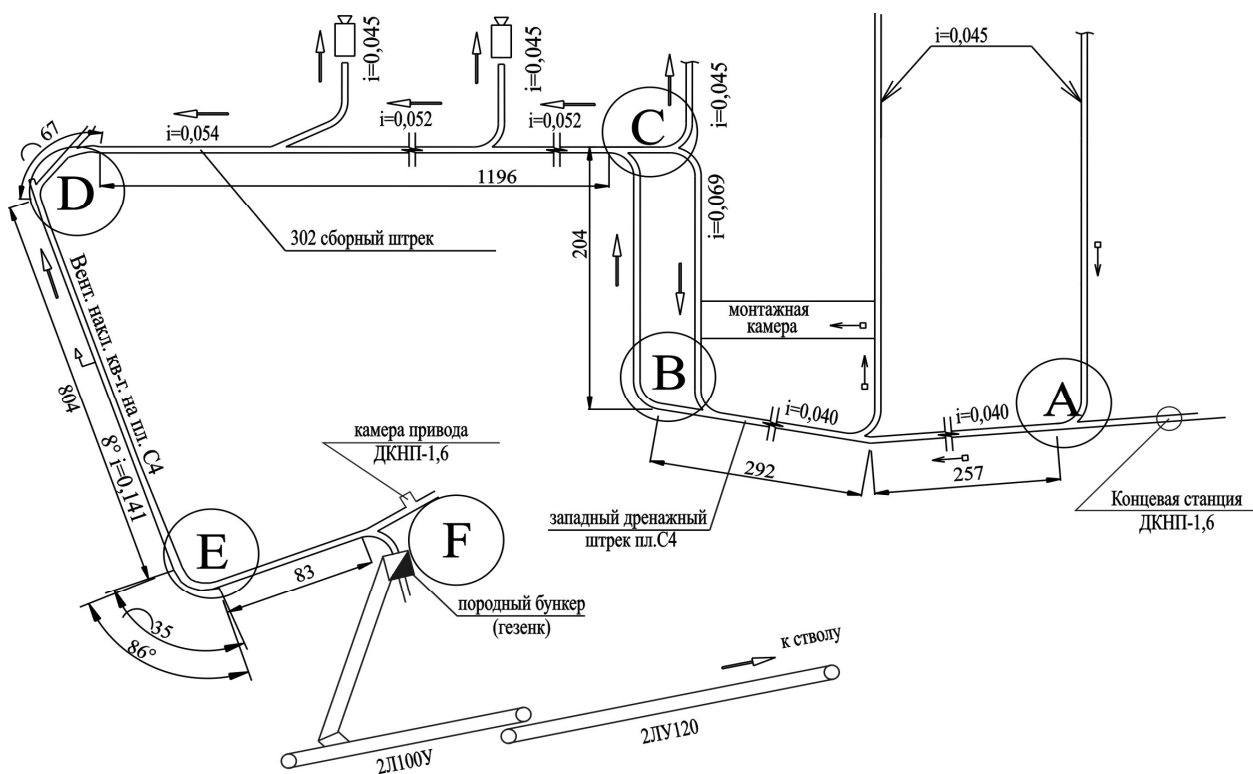


Рис. 1. Модель функционального диагностирования технологической схемы транспортирования породы напочвенной канатной дорогой ДКНП-1,6

В этой связи структура автоматизированной системы оперативно-производственного управления транспортно-технологическими процессами угольной шахты должна быть ориентирована на применение современных средств технического, программного, информационного и организационного обеспечения горного производства. Аналогом может служить опыт эксплуатации Унифицированной телекоммуникационной системы диспетчерского контроля и автоматизированного управления горными машинами и технологическими комплексами на угледобывающих и шахтостроительных предприятиях (УТАС). Принципы работы системы УТАС могут быть использованы для непрерывного контроля параметров напочвенной канатной дороги и комплекса технологического оборудования, управления транспортно-перемещающими процессами, передачи информации оператору ДКН, ее обработки и отображения [3]. При этом для достижения максимальной эффективности автоматизированной системы управления транспортно-технологическими процессами с применением ДКН нового поколения крайне необходимо решать базовый комплекс технических, технологических и организационных задач.

Шахтными исследованиями установлено, что в условиях существенной неопределенности горнотехнологических состояний продуктивная работа ДКНП-1,6, а также ресурсо- и энергосбережение могут быть достигнуты путем обеспечения оптимального функционирования транспортно-перемещающих процессов и операций как составляющих единого технологического комплекса.

Основу автоматизированного оперативно-производственного управления определяет правильный выбор целей, задач и путей их выполнения.

С учетом вышеизложенного, основными задачами структуры управления в этом случае являются:

– повышение пропускной способности участковых выработок путем внедрения автоматизированной информационно-советующей системы управления параметрами ДКН, которые характеризуют процессы транспортирования породы в подземных выработках сложной конфигурации;

– внедрение методов функционального диагностирования и контроля транспортно-перемещающих процессов и операций (процессы выгрузки породы, заполнения бункера, обмена груженых вагонов на порожние и др.);

– пересмотр схем оперативно-производственного управления грузопотоками породы в различное время суток.

Следует отметить, что каждая из задач фиксирует пороговые значения параметров соответствующих подсистем, которые в свою очередь являются системами, выполняющими определенные функции управления. Например, для повышения пропускной способности участковых выработок центральным звеном автоматизированной информационно-советующей системы ДКН является отражение интенсивности грузопотока, а также оперативное принятие решений в нетипичных производственных ситуациях и возможность быстро перестраиваться на новые алгоритмы управления в экстремальных условиях эксплуатации.

Пропускная способность участковых подготовительных выработок, оборудованных ДКН, определяется временем рейса подвижного состава и количеством вагонов в составе.

Полное время рейса подвижного состава ДКНП-1,6 равно

$$T_p = \frac{2L}{v_{cp}} + t_m + \left( \frac{1}{k_n Q} + \frac{\tau_p}{G} \right) nG, \text{ час.}, \quad (1)$$

где  $L$  – длина транспортирования, км;  $v_{cp}$  – среднеходовая скорость движения, км/час;  $Q$  – производительность погрузочного пункта, т/час;  $t_m$  – время маневров у погрузочного пункта, на разминовках и в пункте разгрузки, час.;  $k_n$  – коэффициент неравномерности;  $\tau_p$  – время разгрузки одного вагона, час.;  $nG$  – грузоподъемность состава, т.

Основными функциональными элементами напочвенной канатной дороги являются привод, тяговый канат, буксировочная тележка и подвижной состав. Условия их взаимодействия характеризуются состоянием сложным рельефом трассы транспортирования, натяжением тягового каната и массой подвижного состава, которая определяется количеством вагонов в составе и степенью их заполнения транспортируемой породы.

Количество вагонов  $N_v$  в составе напочвенной канатной дороги в подземных выработках сложной рельефной конфигурации определяется согласно выражения:

$$N_b = \frac{k_c \cdot k_n \cdot Q \left[ \frac{2L}{v_{cp}} + t_m + \left( \frac{1}{k_n Q} + \frac{\tau_p}{G} \right) nG \right]}{G}, \quad (2)$$

где  $k_c$  – коэффициент, учитывающий наличие дополнительных составов на сопряжении подготовительной и участковой выработках.

Исходя из практики, техническая задача автоматизированной системы управления процессом транспортирования породы напочвенной канатной дорогой ДКНП-1,6 характеризуется условиями взаимодействия привода и тягового каната в зависимости от состояния трассы и массы подвижного состава. То есть, оператор напочвенной канатной дороги должен на основе анализа информации об изменении рабочих параметров электропривода дороги диагностировать техническое состояние (дефекты и повреждения) тягового каната, трассы, массу подвижного состава и прогнозировать экстремальные ситуации. Экспериментально доказано, что путем обеспечения щадящих условий взаимодействия тягового органа и линейных элементов ДКН увеличивается срок их эксплуатации, т.е. обеспечивается ресурсосбережение.

К важнейшим технологическим объектам, которые необходимо рассматривать при построении структуры автоматизированной системы управления транспортно-перемещающими процессами относятся, сосредоточенные в зоне F (рис. 1), породный бункер и пункт разгрузки множества вагонов ВД-2,5.

В соответствие с технологическим регламентом вагонетки канатной дороги с откидными днищами разгружаются при замедленном ходе состава над разгрузочными ямами (рис. 2). Устройства для открытия и закрытия днищ вагонеток оборудуются дистанционно-управляемыми приводами. При надлежащей структуре системы автоматизированного управления процессом разгрузки, и оборудовании пункта разгрузки соответствующими устройствами слежения (средствами распознавания), оператор ДКН может избирательно контролировать полноту выгрузки породы из вагонов канатной дороги и степень заполнения бункера.

Указанные операции являются завершающим этапом оперативно-производственного управления транспортно-перемещающими процессами в участковых выработках с применением рельсовых видов транспорта, на котором функции автоматизированной системы управления напочвенной канатной дорогой прекращаются. Однако показатели заполнения бункера породой являются сигналом для оператора ДКН и исходной информацией о целесообразности включения в работу подбункерной конвейерной линии с позиции энергосбережения.

Последнее обусловлено двумя факторами:

- производственной необходимостью включения подбункерного конвейера при полном заполнении бункера породой с целью компенсации простоев конвейерной линии;

– стоимостью потребляемой электроэнергии в различное время суток.  
Стоимость электроэнергии в различное время суток дана в таблице 1.

Таблица 1

Стоимость электроэнергии, потребляемой шахтой в течении суток

Период потребления	Время, ч	Стоимость электроэнергии, грн/кВт.ч
Час «Пик»	8.00 – 17.00	0,79498
Время «Полупика»	17.00 – 22.00 6.00 – 8.00	0,4827
Ночной тариф	22.00 – 6.00	0,1656

На завершающем этапе автоматизированного оперативно-производственного управления технологическими процессами перемещения породы рельсовыми видами транспорта важным показателем для оператора ДКН является информация о качестве выгрузки породы из шахтных вагонов.

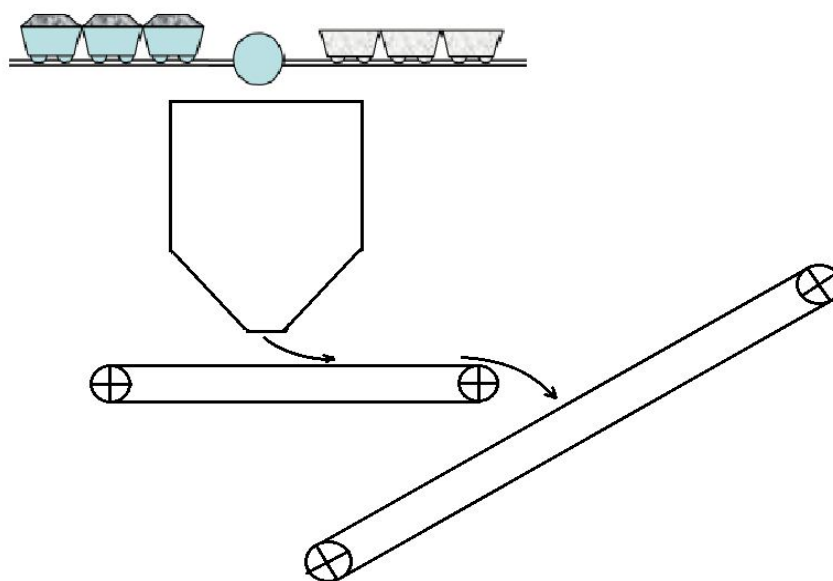


Рис. 2. Структурная схема энергосберегающей транспортно-технологической схемы откатки породы напочвенными канатными дорогами

Необходимость оперативного диагностирования данной операции обусловлена тем, что при транспортировании увлажненной горной массы происходит ее уплотнение и налипание в местах сопряжения вертикальных стенок вагонетки с днищем. В результате до 35 % уменьшается вместимость кузова вагонеток, снижается пропускная способность транспортных выработок, повышаются энергозатраты на транспортирование составов с «мертвым грузом», увеличивается потребность в дополнительных вагонах для вывоза горной мас-

сы из подготовительного забоя и, как следствие, нагрузка на тяговый орган напочвенной канатной дороги.

Для разрабатываемой структуры автоматизированного управления процессами транспортирования породы напочвенными канатными дорогами рекомендуется использовать визуально-оптический метод диагностирования процесса выгрузки породы из шахтных вагонов. В основу рекомендуемого способа положена идея бесконтактного определения объема горной массы внутри вагонетки. Принцип распознавания степени выгрузки породы из вагонов отражен на рис. 2. Сущность визуально-оптического метода диагностирования процесса выгрузки породы заключается в использовании эффекта компьютерного зрения для оперативного распознавания толщины слоя налипшей горной массы на стенки и днище шахтной вагонетки. По визуальному анализу получаемых трехмерных изображений, автоматизированная система идентификации и управления обрабатывает поступающую информацию и выдает соответствующие рекомендации оператору ДКН для принятия решений по координации режимов работы всей транспортной системы.

Таким образом, выполненное обоснование структуры модели автоматизированного оперативно-производственного управления транспортно-технологическими процессами и идентифицированными эксплуатационными параметрами напочвенных канатных дорог нового поколения обеспечивает снижение удельных энергозатрат и ресурсосбережение при перемещении шахтной породы в подземных выработках сложной конфигурации.

#### Список литературы

1. Руководство по ревизии, наладке и испытанию шахтных подъемных установок: нормативное производственно-практическое издание / Бежок В.Р., Калинин В.Г., Коноплянов В.Д., Курченко Е.М. / Под общей редакцией В.А. Корсуна, 3-е издание, перераб. и доп. – Донецк: Донеччина, 2009. – 672 с.
2. Мещеряков Л.И. Задачи систем автоматизированного управления процессами транспортирования грузов канатными напочвенными дорогами тяжелого типа /Л.И. Мещеряков, А.Л. Ширин, Л.Н. Посунько, А.Г. Васюк / Сб. научн. трудов НГУ. 2012. – №39. – С. 28–33.
3. Первый год эксплуатации системы УТАС / Король В.И., Кобзарь Д.И., Галушко Н.Н., Глебов В.П. // Уголь Украины. – 2012. – №8. – С.39–40.
4. Ширин А.Л. Визуально-оптический метод контроля процесса выгрузки породы из шахтных вагонов / Ширин А.Л. // Тези доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції аспірантів, молодих учених і студентів “Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості” (8-11 жовтня 2013, м.Івано-Франківськ)

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Слесаревим В.В.  
Надійшла до редакції 11.11.13*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ НАВАНТАЖЕННЯ ОПОРНОГО РОЛИКА КОНВЕЄРА В УМОВАХ ОСЕРЕДНЕНОГО ПОТОКУ РУДИ

Представлены результаты исследований случайного процесса нагрузки опорного ролика конвейера в условиях усредненного потока дробленой руды.

Представлені результати досліджень випадкового процесу навантаження опорного ролика конвеєра в умовах осередненого потоку дробленої руди.

The results of investigations of a random process the load bearing roller conveyor in terms of average flux of crushed ore.

**Вступ.** В Україні переважна частка залізних руд підлягає збагаченню, де найбільш витратними є процеси подрібнення вихідної сировини. Широке розповсюдження при подрібненні вихідної дробленої руди отримали технологічні схеми з кульовими млинами, що працюють у замкнутому циклі з спіральним класифікатором. Такі технологічні умови не дозволяють у кульовому млині підтримувати задане співвідношення руда/вода в наслідок складності визначення параметра, що приводить до значних економічних збитків і гальмування реалізації Державної науково-технічної програми «Ресурсозберігаючі технології нового покоління в гірничо-металургійному комплексі» та вимагає розробки теми «Комп'ютерно інтегрована система автоматичного регулювання співвідношення руда/вода в кульових млинах з циркулюючим навантаженням» (0106U000981), яка входить до плану наукової тематики Кіровоградського національного технічного університету. Оскільки удосконалення конвеєрних вагів при розв'язанні поставленої задачі має важливе значення, дослідження випадкового процесу навантаження опорного ролика конвеєра є актуальним.

Запропоновано ряд підходів стабілізації розрідження пульпи у кульових млинах даних циклів подрібнення руди, однак вони за різними причинами не отримали розповсюдження. Найбільш ефективним є спосіб автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням [1], запропонований автором даної статті та О.М. Сербулом. Цей спосіб реалізується пристроєм автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням [2] тих же авторів. Вони передбачають застосування конвеєрних вагів з якомога вищою точністю. Увагу конвеєрним вагам ще в 1964 р. приділяють С.А Волотковський і В.О. Бунько [3] та ін. На недоліки конвеєрних вагів вказують Б.Д. Кошарський та ін. [4]. У роботі [5] вказано, що недоліком конвеєрних вагів є недодержування гарантованої похибки вимірювання. Серед причин вказано на негативний вплив степені нерівномірності розташування матеріалу на конвеєрній стрічці, однак даний процес ніхто не досліджував.

**Формулювання цілей статті.** Метою даної роботи є дослідження випадкового процесу навантаження опорного ролика конвеєра при осередненому потоці руди шляхом його теоретичного описання та математичного моделювання за умов зміни базової відстані між несучими роликами.

**Викладення основного матеріалу досліджень.** Розподіл твердого на конвеєрній стрічці є нерівномірним і залежить від ряду факторів, до яких відносять і крупність шматків руди, що впливає на навантаження опорного ролика 2 (рис. 1). Впливовим фактором є базова відстань  $B$  між несучими роликками 1 і 3 (рис. 1). Базова відстань  $B$  може бути мінімальною, яка практично дорівнює сумі діаметрів опорного і несучого роликків, або може мати певне значення, яке набагато більше вказаного. У процесі руху матеріалу на конвеєрній стрічці він створює тиск на опорний ролик, який можливо зафіксувати перетворювачем 5. Впливу конвеєрної стрічки можливо позбавитись противагою 4. Навантаження опорного ролика при рухомому матеріалі буде випадковим процесом.

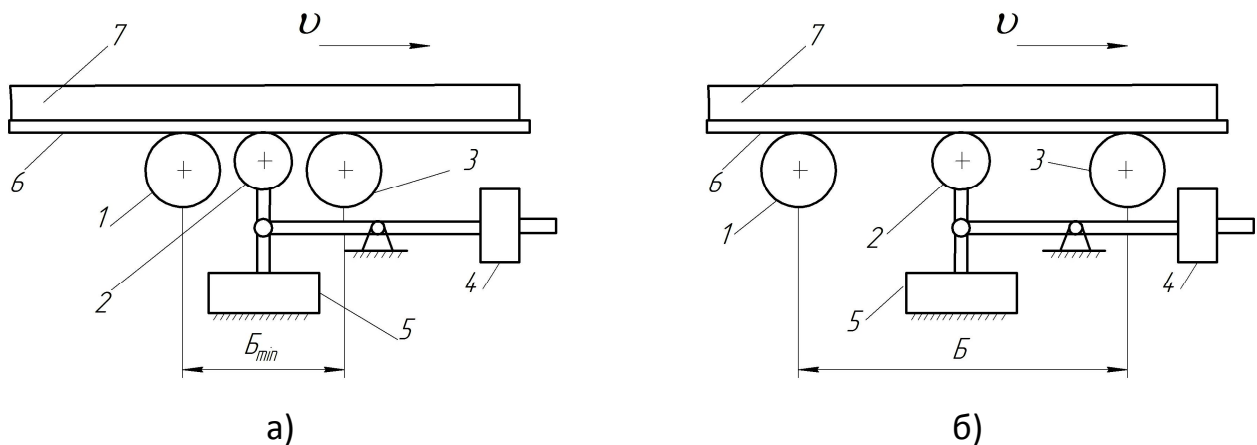


Рис. 1. Положення несучих і опорного ролика при мінімальній (а) і збільшеній базі (б): 1, 3 – несучі роликки; 2 – опорний ролик; 4 – противага; 5 – перетворювач тиску матеріалу; 6 – конвеєрна стрічка; 7 – сипкий матеріал;  $B$  – базова відстань між несучими роликками;  $v$  – швидкість і напрям руху

Дослідження випадкового процесу навантаження опорного ролика конвеєра розглянемо при осередненому потоці руди і довільних базових відстанях між несучими роликками. Для спрощення дослідження замінимо дійсний сипкий матеріал ідеальним, у якому всі шматки руди мають однаковий середній розмір і однакову правильну, наприклад кубічну форму, та знехтуємо жорсткістю конвеєрної стрічки.

Будь-який об'єм  $V$  рухомого подрібненого матеріалу можливо подати сумою однакових послідовно розташованих один за одним елементарних об'ємів  $\Delta V$ , довжина яких незначно відрізняється від розміру шматків руди. Для ідеального матеріалу кількість  $N$  шматків руди в об'ємі  $V$  визначиться відношенням

$$N = V_T / d^3, \quad (1)$$

де  $V_T$  – об'єм твердого в об'ємі  $V$ ;  $d$  – розмір грані шматка руди кубічної форми;  $d^3$  – об'єм одного шматка руди.

Математичне сподівання кількості шматків руди у кожному елементарному об'ємі дорівнює середньому їх числу  $n$

$$n = N/M = V_T / d^3 M, \quad (2)$$



де  $M$  – число елементарних об'ємів  $\Delta V$  в об'ємі  $V$ .

Дійсна ж кількість  $m$  шматків у кожному рухомому елементарному об'ємі визначається законами теорії ймовірностей.

Розглянемо розподіл шматків у двох елементарних об'ємах  $\Delta V_1$  і  $\Delta V_2$ , які знаходяться поруч, допускаючи, що сума шматків руди, що знаходяться у цих об'ємах, незначно відрізняється від середнього значення  $2n$ .

Знаходження кожного шматка в об'ємі  $\Delta V_1$  або в об'ємі  $\Delta V_2$  – події однаково імовірні, тобто  $p=q=0,5$ , де  $p$  – ймовірність перебування кожного шматка в об'ємі  $\Delta V_1$ ;  $q$  – ймовірність перебування кожного шматка в об'ємі  $\Delta V_2$ .

Ймовірність перебування кількості  $m$  шматків у кожному елементарному об'ємі визначається рівнянням

$$P_m = C_{2n}^m p^m q^{2n-m}, \quad (3)$$

де  $C_{2n}^m$  – кількість комбінацій з  $2n$  елементів по  $m$ .

При достатньо великому  $n$  рівняння (3) згідно локальній теорії Муавра-Лапласа можливо перетворити у асимптотичну формулу

$$P_m \cong \frac{1}{\sqrt{2npq}\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{m-2np}{\sqrt{2npq}}\right)^2\right]. \quad (4)$$

Підставивши у формулу (4) значення ймовірностей  $p=q=0,5$  і перетворивши її, отримаємо

$$P_m \cong \frac{1}{\sqrt{0,5n}\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{m-n}{\sqrt{0,5n}}\right)^2\right]. \quad (5)$$

де  $0,5n$  – дисперсія відхилень кількості шматків у елементарному об'ємі від середнього значення, що дорівнює  $\sigma^2$ .

З рівняння (5) витікає, що ймовірність перебування середньої кількості шматків руди ( $m-n=0$ ) визначається величиною  $P_c = 0,399/\sqrt{0,5n}$ . Поява відхилень  $(m-n) > 2\sigma = \pm\sqrt{2n}$  малоімовірна. Ймовірність появи максимального відхилення

$P_{\max} = \varphi(2)/\sqrt{0,5n} = 0,054/\sqrt{0,5n}$ , де  $\varphi(2)$  – функція  $\varphi(x) = \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right)/\sqrt{2\pi}$  при значенні аргументу  $x = (m-n)/\sqrt{0,5n} = 2$ . Отже, можливо рахувати, що кількість шматків руди  $m$  у елементарних об'ємах  $\Delta V$  змінюється в межах від  $n - \sqrt{2n}$  до  $n + \sqrt{2n}$ .

Нехай конвеєрна стрічка з матеріалом, складеним з елементарних об'ємів  $\Delta V$ , переміщається через опорний ролик, який сприймає тиск лише одного елементарного об'єму  $\Delta V$ . При цьому довжина  $a$  сприймаючої площадки конвеєрної стрічки дорівнює довжині елементарного об'єму потоку  $\Delta V$ . При переміщенні конвеєрної стрічки опорний ролик будуть по чергово навантажувати послідовно розташовані елементарні об'єми матеріалу з різною кількістю шматків

руди. Тоді число частинок, що тисне на опорний ролик, у часі буде являти собою випадкову функцію  $\zeta(t)$ . Математичне сподівання її буде дорівнювати сталій величині  $n$ , а дисперсія у часі також буде незмінною і буде дорівнювати дисперсії будь-якого перетину випадкової функції, оскільки кількість шматків руди у елементарних об'ємах потоку  $\Delta V$  змінюється в однакових межах від  $n - \sqrt{2n}$  до  $n + \sqrt{2n}$ . Дисперсія випадкової функції визначиться виразом

$$D = \sum_{i=1}^k (m_i - n)^2 p_i, \quad (6)$$

де  $m_i$  – число шматків руди, що тиснуть на опорний ролик;  $p_i$  – імовірність появи певної кількості шматків.

Очевидно, що дисперсія випадкової функції буде дорівнювати  $D=0,5n$ , а середнє квадратичне відхилення від середнього значення  $\sigma = \sqrt{0,5n}$ . Це відповідає випадку, коли базова відстань між несучими роликами є мінімальною і на опорний ролик наближено діє лише один елементарний об'єм потоку.

Випадкова функція часу  $\zeta(t)$  являє собою зміну кількості відхилених від середнього значення шматків руди в зоні впливу на опорний ролик. Функція  $\zeta(t)$  змінює свої значення як у бік збільшення, так і у бік зменшення кількості шматків руди відносно середнього значення  $n$ . Якщо довжина елементарного об'єму потоку  $\Delta V$  дорівнює  $a$ , то тривалість додатнього або від'ємного викиду випадкової функції за рівень математичного сподівання  $n$  буде дорівнювати

$$\tau_B = \frac{a \cdot c}{v}, \quad (7)$$

де  $c$  – число елементарних об'ємів потоку, які створили викид;  $v$  – швидкість потоку.

При незмінній швидкості руху матеріалу тривалість викидів буде визначатися лише числом елементарних об'ємів, що їх створюють. Тривалість викидів також буде випадковою функцією. Випадкова функція  $\zeta(t)$  буде являти собою послідовність статистично розподілених у часі додатних і від'ємних викидів з випадковою тривалістю.

У випадку довільної базової відстані між несучими роликами опорний ролик одночасно сприймає тиск  $b$  елементарних об'ємів  $\Delta V$  потоку. Кількість шматків руди у часі  $t+\Delta t$ , що діють на опорний ролик, буде визначатись виразом

$$m = \sum_{i=1}^b m_i + m_{b+1} - m_0, \quad (8)$$

де  $\sum_{i=1}^b m_i$  – сума шматків руди у елементарних об'ємах, що знаходяться на базовій відстані між несучими роликами у даний момент часу (миттєве значення);  $m_{b+1}$  – число шматків у елементарному об'ємі потоку, що входить на ділянку базової відстані між несучими роликами;  $m_0$  – число шматків руди у елементар-

ному об'ємі, що виходить з ділянки базової відстані між несучими роликами;  $\Delta t$  – час проходження через опорний ролик одного елементарного об'єму потоку.

Оскільки на певній базовій відстані між несучими роликами одночасно знаходяться  $b$  елементарних об'ємів потоку з середнім значенням кількості шматків  $n$  у кожному з них, то математичне сподівання випадкової функції  $\xi(t)$  визначиться рівнянням

$$n_{\xi} = n_1 + n_2 + \dots + n_b = bn. \quad (9)$$

Отже, математичне сподівання випадкового процесу  $\xi(t)$  і у даному випадку є незмінною у часі величиною.

Дисперсія випадкової функції  $\xi(t)$ , що дорівнює дисперсії будь-якого її перетину, визначиться формулою

$$D_{\xi} = \sum_{i=1}^k \left( \sum_{i=1}^b m_i - bn \right)^2 p_i, \quad (10)$$

де  $p_i$  – імовірність появи даної суми відхилених шматків на базовій відстані;  $k$  – число можливих значень, які приймає сума відхилених шматків руди.

Середнє квадратичне відхилення числа шматків від середнього значення на базовій відстані  $B$  між несучими роликами, що відповідає  $b$  елементарним об'ємам, буде дорівнювати

$$\sigma_{\xi} = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left( \sum_{i=1}^b m_i - bn \right)^2 p_i}. \quad (11)$$

Зміна миттєвих значень випадкової функції, що визначається виразом (8), також буде являти собою послідовність статистично розподілених у часі додатних і від'ємних викидів, однак за рівень  $bn$ . Тривалість викиду тут при незмінній швидкості буде визначатись як параметром  $c$ , так і параметром  $b$ .

Важливою характеристикою випадкової функції  $\xi(t)$  є зв'язок між її значеннями у окремих перерізах. Цей зв'язок досліджувався шляхом математичного моделювання. Імовірність того, що в зоні контролю випадкового процесу опорним роликом певна кількість шматків руди відхилилась від середнього значення, знаходиться за формулою (5). Суму ймовірностей усіх можливих відхилень кількості шматків руди від середнього значення з одним знаком можна отримати взявши визначений інтеграл від 0 до  $2\sqrt{2n}$  з правої частини виразу (5). Сума ймовірностей додатного або від'ємного відхилення кількості шматків в елементарних об'ємах  $\Delta V$  над опорним роликом при переміщенні матеріального потоку буде складати величину, яка практично не відрізняється від 0,5. Сума ймовірностей відхилень з обома знаками складає наближено 1,0.

Зважаючи на те, що 100 з точки зору теорії імовірності і математичної статистики є достатньо велика сукупність шматків в елементарному об'ємі і вона добре відповідає реальним потокам при подрібненні руди, математичну модель можливо розробляти при  $n=100$ . Середнє квадратичне відхилення  $\sigma = \sqrt{0,5n} = \sqrt{50} \cong 7$ . Імовірність відхилення певної кількості шматків від серед-

нього значення визначається формулою (5). Імовірності, розраховані за формулою (5) з врахуванням певних допущень, занесені до табл. 1.

Таблиця 1

Кількість відхилень сукупності шматків потоку від середнього значення в елементарному об'ємі дробленої руди при  $n=100$  на 1000 елементарних об'ємів

Кількість відхилених частинок	Імовірність відхилення	Кількість відхилень
0	0,0564 (0,0282)	56 (28)
1	0,0563	56
2	0,0541	54
3	0,05145	51
4	0,04797	48
5	0,04385	44
6	0,03928	39
7	0,03449	35
8	0,02967	30
9	0,0253	25
10	0,0207	21
11	0,01696	17
12	0,0135	14
13	0,0103	10
14	0,008	8
15	0,0058	6
16	0,0044	4
17	0,0032	3
18	0,0023	2
19	0,0015	2
20	0,00105	1
21	0,00069	1
22	0,00119	1
	0,529 (0,5008)	528 (500)

По даним ймовірностей можна визначити кількість кожної з подій на певну кількість випробувань. Оскільки для визначення кореляційної функції випадкової функції з задовільною точністю треба, щоб кількість точок складала не менше сотні, а інколи і кількох сотень, число елементарних об'ємів необхідно задавати не менше 1000. Кількість відхилень кожної сукупності шматків руди, визначена за ймовірностями, не буде цілим числом, тому зробимо округлення відповідно математичним правилам. Ці дані також занесені до табл.1. Сума всіх відхилень одного знаку, якщо кількість нульових відхилень поділити навпіл, складає 500, що відповідає сумарній імовірності 0,5. Математична модель ви-

падкової функції буде вміщувати 1000 елементарних об'ємів з перерахованими відхиленнями – по 500 з кожним знаком. Послідовність розташування елементарних об'ємів буде величиною випадковою. Випадковість забезпечувалась таким чином. Відбирались кульки однакового розміру з одного і того ж матеріалу. На кульки наносились цифри, які відповідали кількості відхилених частинок від середнього значення. Крім того, на кульки ставились знаки “+” або “-”. Всього кульок було 1000 штук. Наприклад, з цифрою “14” було вісім кульок зі знаком “+” і вісім зі знаком “-”. З цифрою “1” було 56 кульок зі знаком “+” і 56 кульок зі знаком “-” і т.д. Всі кульки старанно перемішувались і висипались в автоматичний бункерний завантажувально-орієнтуєчий пристрій, розрахований на роботу з таким розміром тіл. При роботі пристрою кульки по одній послідовно видавалися на вихід, їх цифра і знак фіксувались. Таким чином отримувалась реалізація випадкової функції, яка вміщувала 1000 елементарних об'ємів з усіма можливими відхиленнями кількості шматків руди від середнього значення. Повторні реалізації випадкової функції мали один і той же характер.

Кореляційна функція розраховувалася за залежністю

$$K_{\xi}(B) = \frac{1}{1000 - B} \sum_{i=1}^{1000-B} \xi^o(t_i) \cdot \xi^o(t_{i+B}), \quad (12)$$

де 1000 – кількість однакових частин, що мають довжину елементарного об'єму  $\Delta V$ , на які розбита випадкова функція;  $B=0, 1, 2, \dots$  - число, що дорівнює певній кількості частин, на які розбита випадкова функція, взятих для визначення зв'язку між її значеннями;  $\xi^o(t_i)$  – значення центрованої випадкової функції в  $i$ -му перерізі;  $\xi^o(t_{i+B})$  – значення центрованої випадкової функції в перерізі, віддаленому на  $l$  - елементарних об'ємів.

Обробка результатів моделювання по залежності (12) показала, що кореляційна функція випадкового процесу достатньо швидко затухає і має затухаючу коливальну складову. Її можливо апроксимувати, наприклад, виразом

$$K_{\xi}(\tau) = \sigma_{\xi}^2 e^{-\alpha|\tau|} \cos \beta\tau, \quad (13)$$

де  $\tau$  – відрізок часу або відстань в  $l$  елементарних об'ємів;  $\sigma_{\xi}^2$  – дисперсія випадкової функції;  $\alpha, \beta$  – сталі, що характеризують випадкову функцію.

Характер кореляційної функції однакокий як для випадкової функції  $\xi(t)$  при впливі на опорний ролик одного елементарного об'єму  $\Delta V$ , так і при одночасній дії ряду елементарних об'ємів. При збільшенні швидкості переміщення матеріалу тривалість викидів буде зменшуватись, що приводить до зростання коливальності випадкового процесу. Залежність тривалості викидів випадкової функції від швидкості переміщення матеріалу відповідно (7) показана на рис.2. З рис. 2 видно, що дана залежність в межах значень швидкостей матеріальних потоків на збагачувальних фабриках наближена до лінійної при значних змінах числа елементарних об'ємів, які створили викид випадкової функції за її середнє значення. Зміна коливальності випадкової функції приводить до зменшення або збільшення сталих  $\alpha$  і  $\beta$  кореляційної функції у відповідності до швидкості

переміщення матеріалу. У діапазоні розглянутих швидкостей руху матеріалу коливальність випадкової функції достатньо висока, що говорить про вміст високочастотних складових.

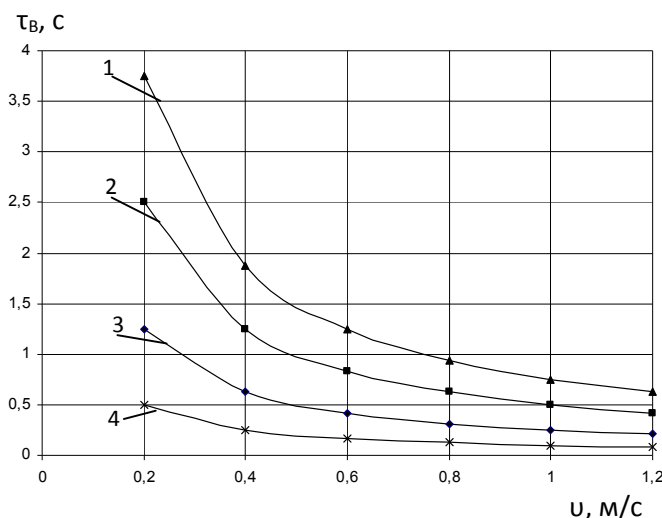


Рис. 2. Залежність тривалості викидів випадкової функції від швидкості переміщення матеріалу при  $a=0,01$  м і різних значеннях  $c$ : 1 – 75; 2 – 50; 3 – 25; 4 – 10 елементарних об'ємів

Зміна крупності матеріалу приводить до зміни параметра  $a$  у залежності (7), що вплине на тривалість викиду  $\tau_B$ . Враховуючи, що середня крупність шматків руди в технологічних процесах у широких межах не змінюється, коливання розміру шматків суттєво не вплинуть на параметри випадкової функції, які в основному визначаються природою її коливальності – порядком формування тривалості і зміни знаку викидів.

Отже, опорний ролик конвеєра може слугувати джерелом інформації про математичне сподівання навантаження на стрічці та його змінну складову, яка відрізняється

достатньо високочастотними гармоніками. Змінна складова може стати перешкодою при вимірюванні навантаження на конвеєрній стрічці в залежності від її амплітудних значень. Максимальну чутливість процесу можна визначити за формулою

$$\delta = \frac{\sqrt{2n}}{n} \cdot 100\% . \quad (14)$$

Величина  $\delta$  характеризує відносні зміни кількості шматків руди у елементарному об'ємі  $\Delta V$  потоку. Якщо ця величина буде занадто малою, то зміну кількості шматків руди зафіксувати практично не буде можливо. Із залежності (14) видно, що з ростом  $n$  максимальна чутливість процесу буде зменшуватись. Аналіз показує, що при  $n \approx 100$  зміни  $\delta$  складають близько 14 %, при  $n \approx 1000$  ця величина дорівнює 4...5 %. Якщо  $n \approx 10000$ , зміни кількості шматків руди складають близько 1,5 %. На силу, прикладену до опорного ролика, практично не буде впливати змінна складова при  $n > 10^4$  шматків руди у поперечному перерізі потоку. У реальних умовах транспортування матеріалу на збагачувальних фабриках  $n$  наближено дорівнює 100, що відповідає зміні до 14 %. При збільшенні базової відстані на опорний ролик буде одночасно тиснути ряд елементарних об'ємів з незмінним математичним сподіванням  $bn$ . Змінна складова за час проходження одного елементарного об'єму може приймати найбільше значення, що дорівнює різниці у відхиленнях шматків руди у елементарному об'ємі, який виходить та заходить у базову відстань, тобто це буде при  $n=100$  не більше [22]. Аналіз показує, що в умовах завантаження барабанних млинів рудою відносно значення амплітуди змінної складової може при  $B=1$  м доходити до 0,25...0,55 %, що впливатиме на

пониження точності визначення поточного навантаження конвеєрної стрічки рудою. Змінна складова представлена коливаннями значної частоти.

Задача розглянута для ідеального випадку, коли подрібнений матеріал складався з шматків руди, що мають однакову форму і розміри. У реальних умовах матеріал містить суміш шматків різної форми і розмірів. Тоді розглянуті залежності будуть притаманні кожному класу крупності. Випадкова функція буде багатовимірною, що характеризується складовими відхиленнями в окремих класах крупності.

На збагачувальних фабриках завантаження конвеєрів здійснюють або регулюванням висоти насипання матеріалу, або зміною швидкості конвеєрної стрічки. При регулюванні висоти насипання матеріалу змінюється площа поперечного перерізу потоку, тобто величина  $n$ . Наприклад, більше  $n$  приводить до зростання  $bn$ , однак кількість відхилених шматків руди при цьому також зростає, що робить амплітудні умови практично незмінними. Якщо регулювати швидкість конвеєрної стрічки, то при цьому амплітудні умови залишаються незмінними, а коливальність процесу буде залежати від швидкості переміщення конвеєрної стрічки.

**Висновки.** У результаті проведених досліджень встановлено, що навантаження опорного ролика конвеєра складається з усталеного значення та змінної складової. Усталене значення формується середнім вмістом шматків руди, а змінна складова їх відхиленнями від цього значення. Навантаження опорного ролика одним вертикальним стовпчиком потоку відрізняється високою динамічністю. Тут відхилення навантаження від середнього значення може досягати 14 %. Змінна складова являє собою випадковий процес з дисперсією, що дорівнює середній кількості шматків руди, які тиснуть на опорний ролик, і кореляційною функцією, що затухає і містить затухаючу коливальну складову. Зміна швидкості конвеєрної стрічки впливає на коливальність випадкової функції з забезпеченням наближено лінійних зв'язків. Випадкова функція відрізняється високочастотними складовими, що визначаються середнім розміром шматків руди і швидкістю руху матеріалу. Збільшення базової відстані між несучими роликами приводить до зменшення амплітуди коливань, однак при прийнятному її значенні в один метр відносне відхилення складає 0...0,55 %, що може суттєво знижувати точність вимірювання. Якщо матеріал буде розташовано більш нерівномірно, наприклад в наслідок сегрегації, ця складова може бути значно більшою.

У процесі проведених досліджень вперше теоретично описаний механізм впливу нерівномірності розподілу дробленого матеріалу на показання конвеєрних вагів, що дозволяє більш ефективно здійснювати удосконалення їх характеристик. Практична значущість проведених досліджень полягає у тому, що отримані конкретні значення характеристик випадкової функції змінної складової навантаження опорного ролика придатні для використання при стабілізації розрідження пульпи у млинах з циркулюючим навантаженням.

Перспективою подальших досліджень є можливість підвищення точності конвеєрних вагів та їх ефективного застосування у сучасних системах автоматизації процесів збагачення руд.

#### Список літератури

1. Пат. 59644 Україна, МПК В03В 11/00, В02С 25/00. Спосіб автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням / Кондратець В.О., Сербул О.М.; заявник і патентовласник Кіровоградський нац. техн. у-т.- №2002118758; заявл. 05.11.02; опубл. 15.04.05, Бюл. №4.
2. Пат. 40465 Україна, МПК В03В 11/00, В02С 25/00. Пристрій автоматичної стабілізації розрідження пульпи в млинах з циркулюючим навантаженням / Кондратець В.О., Сербул О.М.; заявник та патентовласник Кіровоградський нац. техн. ун-т. - №u200813005; заявл. 10.11.08; опубл. 10.04.09, Бюл.№7.
3. Волотковский С.А. Автоматизация производственных процессов на обогатительных фабриках / С. Волотковский, В. Бунько.- М.: Недра, 1964.- 282 с.
4. Автоматизация управления обогатительными фабриками / [Кошарский Б.Д., Ситковский А.Я., Красномовец А.В. и др.].- М.: Недра, 1977.- 527 с.
5. Троп А.Е. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик / Троп А.Е., Козин В.З., Прокофьев Е.В.- М.: Недра, 1986.- 303 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Мецераковим Л.І.*

*Надійшла до редакції 11.11.13*

УДК 624.154.1

© Н.В. Зуєвська, М.О. Гембарська

### **ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ АНАЛІЗУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ОСНОВИ ПАЛЕВОГО ФУНДАМЕНТУ**

В роботі порівнюються результати досліджень впливу палевого фундаменту на ґрунтову основу з використанням ростверку відповідної жорсткістю по випробуванням на будівельному майданчику та з застосуванням програмного комплексу Plaxis 3D foundation.

В работе сравниваются результаты исследования влияния свайного фундамента на ґрунтовую основу с использованием ростверка определенной жесткости по испытаниям на строительном участке и с применением программного комплекса Plaxis 3D foundation.

The results of researches about influence of pile's foundation with grillage of certain inflexibility to the basement according to tests on a build area and with the use of programmatic complex Plaxis 3d foundation are compared in this article.

**Вступ.** Значення пальових фундаментів важко переоцінити, вони займають значну нішу як в цивільному, так і в промисловому будівництві. Проблемі взаємодії паль з ґрунтовою основою присвячено багато робіт, і на даний момент характер роботи одиночної палі є достатньо вивченим. Однак питання роботи і взаємодії групи паль, в тому числі в куці, є проблемним. Це пояснюється тим, що взаємодія палі з оточуючим ґрунтовим масивом має складний нелінійно-просторовий характер, а при зведені групи паль виникають додаткові фактори впливу, наприклад такі як: співвідношення діаметра палі і відстані між ними, відстані між палями і довжиною палі, ширини ростверку і довжини палі, жорсткості ростверку тощо.



До прийняття Зміни №1 до ДБН В.2.1-10-2009 «Основи та фундаменти споруд» в 2011 р. [1] в Україні відповідно до діючого тоді СНіПу [2] осадки пального фундаментів розраховували за схемою умовного фундаменту. Така розрахункова схема мала ряд недоліків, до яких відноситься припущення, що при відстані між палями менш ніж  $6d$  зміщення палі і ґрунту в міжпальному просторі проходить одночасно, і пальовий фундамент і ґрунт зміщуються як єдиний масив. Це твердження є хибним, про що свідчить ряд робіт [3, 4]. Згідно нового нормативного документу [1] осідання групи палей розраховують за методикою, що враховує взаємний вплив палей у фундаменті. Однак відомо, що суттєве значення в роботі пального фундаменту має також і низький ростверк [5], але в нормативному документі [1] це питання ніяк не висвітлено і при розрахунках не враховується.

Вплив ростверку на характер передачі навантаження на ґрунтову основу пального фундаменту й відповідно його осідань, залежить не тільки від його розмірів, але й від жорсткості. Проведення експериментальних натурних досліджень такого впливу є складним і дорогим. Альтернативним способом вирішення цієї проблеми є застосування комп'ютерного моделювання, що базується на програмах, які описують нелінійну поведінку ґрунту.

**Постановка завдання.** В статті розглядається вплив низького ростверку певної жорсткості на характер роботи і осідання пального куща.

**Викладення основного матеріалу досліджень.** Для достовірності результатів розрахунку на ЕОМ моделювалась робота буронабивної палі випробуваної статичним навантаженням на будівельному майданчику в м. Києві. Базуючись на даних випробувань створена розрахункова модель в програмному комплексі Plaxis 3D foundation. Обрана натурна паля має такі геометричні параметри: довжина палі складає 24,5 м, її діаметр становить 0,82 м. Влаштована паля переважно у алювіальних пісках  $a_{III-IV}$ , зверху присутній двометровий шар намивного піску. На рівні трьох з половиною метрів знаходяться ґрунтові води. Ґрунти мають такі фізико-механічні характеристики: для алювіальних пісків модуль деформації  $E = 25$  МПа, кут внутрішнього тертя  $\varphi = 33^\circ$ , зчеплення  $c = 2$  кН/м<sup>2</sup>; для намивних пісків:  $E = 22$  МПа,  $\varphi = 33^\circ$ ,  $c = 3$  кН/м<sup>2</sup>.

В якості логіко-математичного опису задачі використовувалась модель скінчених елементів ґрунтової основи та тіла палі. Паля задавалась за допомогою команди Massive circular pile як лінійно-пружній непористий матеріал. Ґрунтова основа являє собою куб з розмірами  $44 \times 44 \times 35$  м ( $a \times b \times h$ ). При цьому для моделювання середовища обрана модель ґрунту, що зміцнюється. Ця пружнопластична модель гіперболічного типу дозволяє враховувати ефект зміцнення як при стисненні так і при зсуві; а також враховувати залежність жорсткісних характеристик від напруження.

В програмі проведено серію розрахунків типу «навантаження-осадка» в діапазоні навантажень до 5600 кН; при цьому паля навантажувалась ступінчасто у відповідності зі статичним випробуванням натурної палі. В результаті побудовано графіки осадки за даними статичного випробування і за результатами розрахунку (рис. 1).

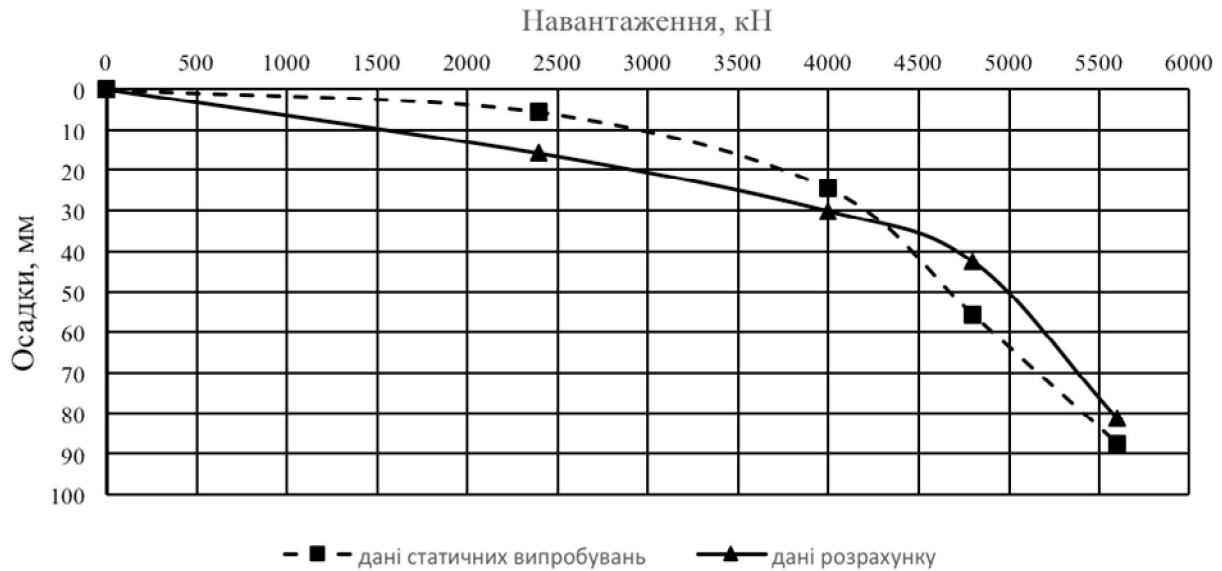


Рис.1. Графік осадки палі за даними статичного випробування і комп'ютерного розрахунку

З графіків видно, що вибрана модель досить точно прогнозує роботу палі у ґрунті, внаслідок чого вона прийнята для подальшого моделювання групи палей.

Розрахунок ведеться для куца з п'яти палей (рис. 2) для двох випадків: при відстані між палями  $3d$  і  $6d$ .

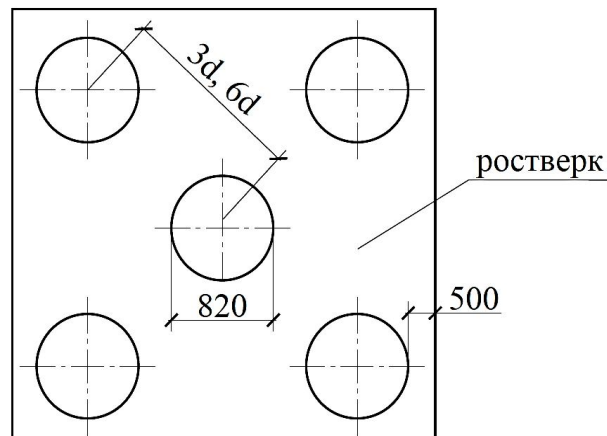


Рис. 2. Розташування палей в куці об'єднаних ростверком

Для кожного з випадків проводиться декілька варіантів розрахунку:

1) Група палей необ'єднана ростверком, кожна з палей ступінчасто навантажується в 4-ри етапи навантагою в 2400 кН, 4000 кН, 4800 кН, 5600 кН;

2) Група палей об'єднана жорстким ростверком з модулем деформації  $E=2,1 \times 10^8$  кН/м<sup>2</sup>, система навантажується ступінчасто зосередженим навантаженням по центру в 12000 кН, 20000 кН, 24000 кН, 28000 кН. Значення навантаження розраховано виходячи з навантаження на одну палю прийнятого в першому варіанті розрахунку, але з врахуванням кількості палей ( 5 шт.);

3) Група палей об'єднана жорстким ростверком з модулем деформації  $E=2,1 \times 10^8$  кН/м<sup>2</sup>, система навантажується ступінчасто розподіленою навантагою, яка розраховується в залежності від площі ростверку, виходячи з навантаження на одну палю прийнятого в першому варіанті розрахунку з врахуванням кількості палей;

4) Група палей об'єднана гнучким ростверком з модулем деформації  $E=1 \times 10^6$  кН/м<sup>2</sup>, система навантажується ступінчасто розподіленою навантагою, аналогічно попередньому варіанту.

Значення величин осадок за перерахованими варіантами розрахунків для випадків при відстанях між палями в 3d і 6d показано на рис. 3 і рис. 4 відповідно. По осі «Х» відкладено значення навантажень, що за прогнозом припадають на 1-ну палю.

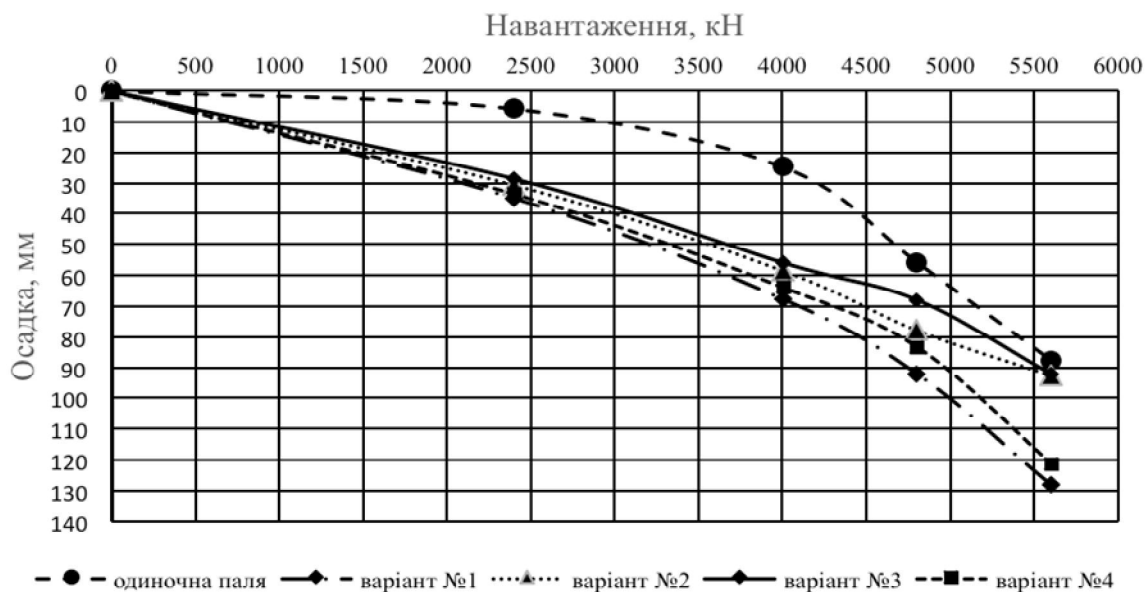


Рис. 3. Графіки осадки палей в куці за визначеними варіантами розрахунку при відстані між палями 3d

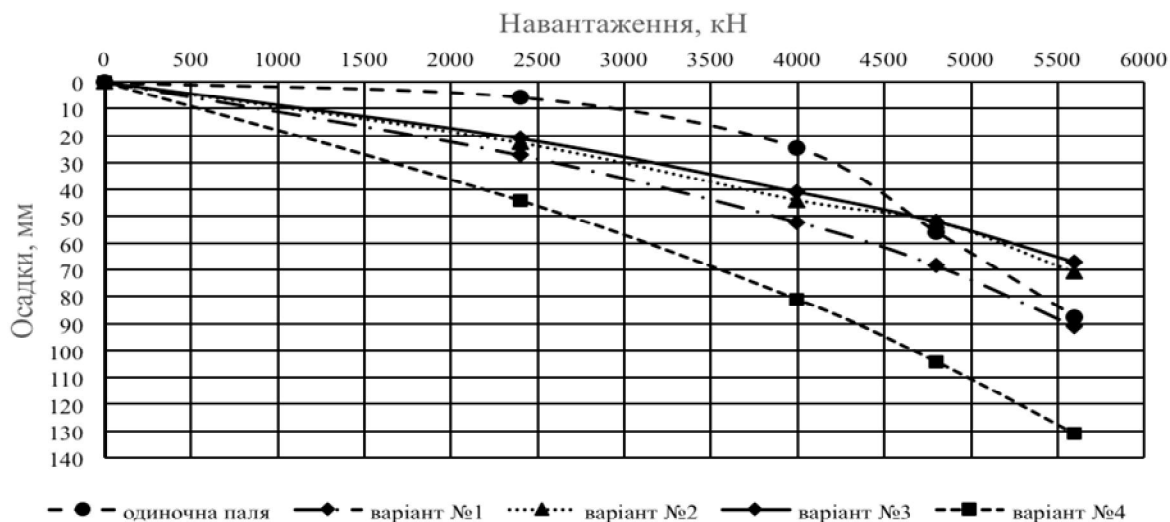
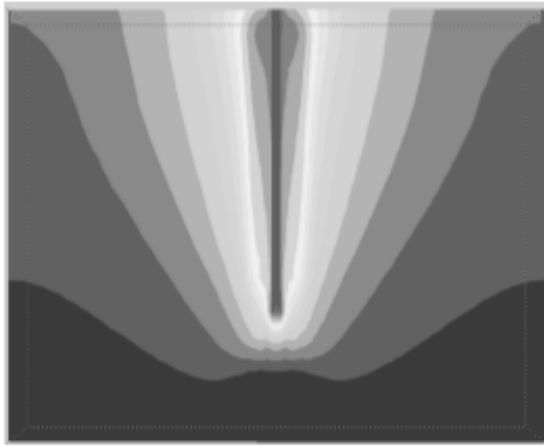
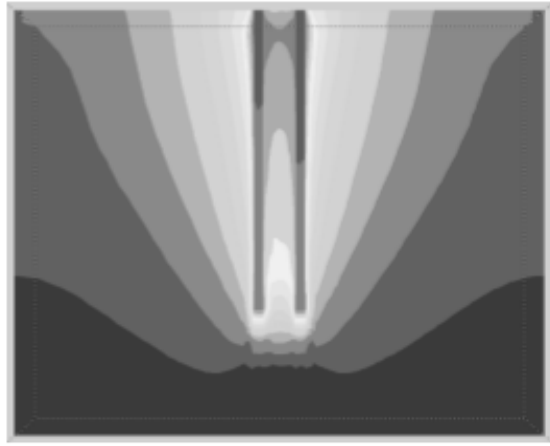


Рис. 4. Графіки осадки палей в куці за визначеними варіантами розрахунку при відстані між палями 6d

а)

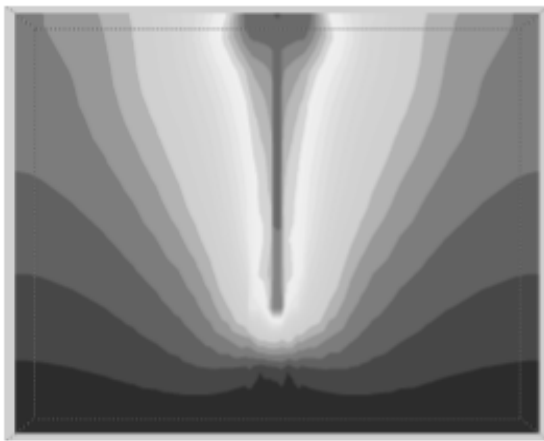


центральна паля

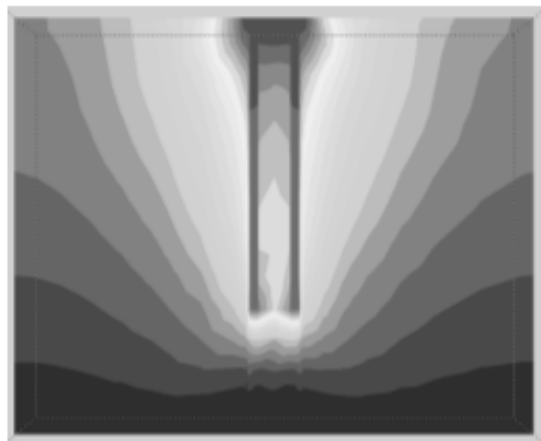


палі по контуру

б)

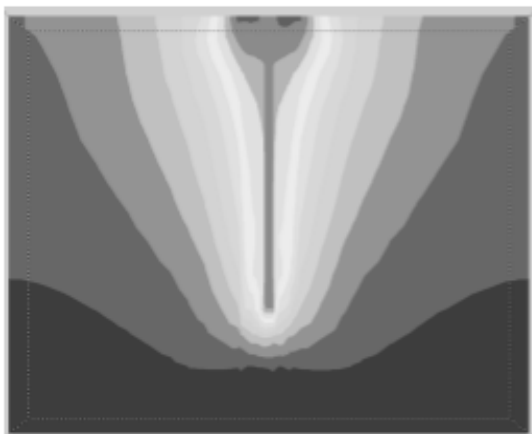


центральна паля

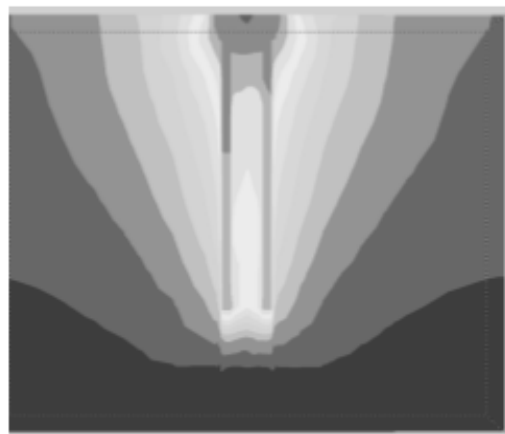


палі по контуру

в)



центральна паля



палі по контуру

Рис. 5. Деформації ґрунтової основи в залежності від наявності та типу ростверку: а) куц паль без ростверку; б) куц паль об'єднаних жорстким ростверком; в) куц паль об'єднаних гнучким ростверком

З графіків на рис. 3 і 4 видно, що ростверк має значний вплив на осадки групи паль, при цьому характер цього впливу залежить від його жорсткості. В цілому, група паль об'єднана ростверком дає менші значення осадок, що відбувається за рахунок передачі навантаження на основу не тільки палями, але й ростверком на верхні шари ґрунту. Особливо це характерно при використанні жорсткого ростверку; так його наявність зменшує осадки паль на 28 % і 26 % при відстані між ними в 3d і 6d відповідно.

Характер передачі навантаження на ґрунтову основу і її деформації при різних варіантах завантаження пального куца показано на рис. 5.

Таким чином при куці паль необ'єднаних ростверком (рис. 5 а) найбільші деформації основи відбуваються вздовж тіла палі по її довжині, а ґрунт в міжпальовому просторі і палі осідають не як одне ціле. При наявності жорсткого ростверку (рис. 5 б) найбільші деформації виникають у верхній частині основи, при чому рівномірно розподіляються під всією довжиною ростверку. При гнучкій конструкції ростверку видно, що він також передає навантаження на основу (рис. 5 в), але виникають прогини і максимальні деформації у проміжках між палями, оскільки ростверк не забезпечує достатню передачу навантажень на палю, а перевантажує верхні шари основи.

#### **Висновки.**

1. При вирішенні геотехнічних задач, пов'язаних з прогнозом роботи групи паль можна використовувати спеціальні програмні комплекси, що описують нелінійну поведінку ґрунту.

2. Низький ростверк має значний вплив на характер роботи пального фундаменту і деформації основи, при чому цей вплив залежить від жорсткості самого ростверку.

3. За даними комп'ютерного моделювання найбільш ефективним є жорсткий ростверк, що рівномірно передає навантаження не тільки на палі, але й певну його частку на верхні шари ґрунтової основи, що в цілому призводить до зменшення осадок пального фундаменту (до 28 %).

4. При влаштуванні гнучкого ростверку не забезпечується необхідна передача навантажень на палі, внаслідок чого під ростверком в проміжках між палями виникає перевантаження верхніх шарів ґрунту і з'являються прогини.

#### **Список літератури:**

1. ДБН В.2.1-10-2009. Основи та фундаменти споруд Зміна №1 – Київ, 2011.
2. СНиП 2.02.03-85. Свайные фундаменты – М.: 1986 г.
3. Сернов В.А. Исследование напряженно-деформированного состояния грунта в межсвайном пространстве / В.А. Сернов // Геотехника Беларуси: наука и практика – Минск, БНТУ, 2008 – С. 239-246.
4. Emiliós M. Comodromosa, Christos T. Anagnostopoulos, Michael K. Georgiadis Numerical assessment of axial pile group response based on load test - Computers and Geotechnics, Volume 30, Issue 6, September 2003 - Pages 505–515.
5. Сернов В.А. Опыт применения фундаментов из коротких конических свай с несущими ростверками / В.А. Сернов, О.А. Голубкова, К.Н. Макаров // Геотехника Беларуси: наука и практика – Минск, БНТУ, 2008 – С. 247-253.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Мецєряковим Л.І.  
Надійшла до редакції 29.10.13*

## **ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СВОЙСТВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ ОХЛАЖДАЮЩИХ ТРАКТАХ С ПЕРЕМЕННОЙ МАССОЙ ОХЛАДИТЕЛЯ**

Описан программный инструмент для представления теплофизических свойств теплоносителя при численном моделировании гидродинамики и тепломассообмена в теплонапряженных охлаждающих трактах с переменной массой охладителя и приведены результаты для некоторых свойств азотного тетраоксида.

Описано програмний інструмент для подання теплофізичних властивостей теплоносія при чисельному моделюванні гідродинаміки та тепломасообміну в теплонапружених охолоджуючих трактах зі змінною масою охолоджувача та наведено результати для деяких властивостей азотного тетраоксида.

A technique for presentation of the thermophysical properties of the heat carrier in the numerical modeling of fluid flow and heat and mass transfer in thermally cooling channels with variable mass refrigerant and results for certain properties of the nitrogen tetroxide.

**Введение.** Численное моделирование гидродинамики и тепломассообмена в теплонапряженных конструкциях предполагает использование большого массива данных, характеризующих теплофизические свойства теплоносителей в рабочем диапазоне температур и давлений. При моделировании течения в теплонапряженных охлаждающих трактах с переменной массой охладителя необходимо иметь данные о свойствах теплоносителя в разных агрегатных состояниях и на линии насыщения. Задание исходных данных существенно влияет на результат численных исследований, поэтому достоверность и объем этих данных приобретают исключительную важность.

Теплофизические свойства веществ, чаще всего, представлены в виде табличных зависимостей от одного (температура или давление) или двух (температура и давление) параметров. Основные задачи заключаются в подборе аналитических зависимостей, способных описывать табличные данные с удовлетворительной точностью, и определении параметров этих аппроксимирующих зависимостей. Согласованность аппроксимирующих функций для зависимостей конкретного свойства вещества в разных агрегатных состояниях необходима для правильного моделирования процессов в пограничной области и состыковка таких данных, взятых из различных источников, приобретает особую актуальность.

При создании многофункциональных программ численного расчета большое значение имеет возможность интегрирования программных средств в общий пакет программ, поэтому разработка программ обработки и представления информации о теплофизических свойствах теплоносителей является одним из основных направлений при разработке методического и программного обеспечения для численного расчета.

**Цель исследований.** В пакете программ численного моделирования гидродинамики и теплообмена в теплонапряженных охлаждающих трактах с переменной массой охладителя для описания свойств веществ используются аналитические зависимости. Такой подход способствует сжатию и, там где необходимо, сглаживанию данных. Он также позволяет применять аналитическое дифференцирование. Используемые аналитические аппроксимационные формулы могут быть общего или специального вида. Для подбора аппроксимирующих табличные данные формул и определения их коэффициентов используется специально разработанный программный инструмент.

**Изложение основного материала.** В основе методики аппроксимации лежит метод Пауэлла сопряженных направлений без вычисления производных [1]. Программная реализация методики предусматривает возможность вычисление минимизируемой функции (одной из норм невязки) и одномерный поиск минимума по методу золотого сечения.

Для оценки вычислений может быть выбрана:

- квадратичная норма невязки аппроксимации:

$$f_1 = \sum_{i=0}^{N-1} [y_i - F(x_i, p)]^2 + f_P,$$

где  $y_i, i = 0, \dots, N-1$  – значения аппроксимируемой величины,  $F(x_i, p)$  – значение аппроксимирующей функции с  $i$ -м вектором независимых переменных  $x_i$  и текущим вектором параметров  $p$ ,  $f_P$  – штраф, который может вычисляться при первом обращении к функции  $F$  с обновленным вектором  $p$  с целью неявного задания некоторых условий;

- квадратичная взвешенная норма невязки аппроксимации

$$f_1 = \sum_{i=0}^{N-1} w_i [y_i - F(x_i, p)]^2 + f_P,$$

с задаваемыми весами  $w_i, i = 0, \dots, N-1$ ;

- квадратичная норма относительной невязки аппроксимации

$$f_1 = \sum_{i=0}^{N-1} \left[ \frac{y_i - F(x_i, p)}{y_i^*} \right]^2 + f_P,$$

где  $y_i^* = \max\{|y_i|, \varepsilon_y\}$ ,  $\varepsilon_y$  – допуск на минимальное абсолютное значение  $y$ ;

- взвешенная квадратичная норма относительной невязки аппроксимации

$$f_1 = \sum_{i=0}^{N-1} w_i \left[ \frac{y_i - F(x_i, p)}{y_i^*} \right]^2 + f_P$$

- абсолютная норма невязки аппроксимации

$$f_1 = \sum_{i=0}^{N-1} |y_i - F(x_i, p)| + f_P,$$

соответствующая методу наименьших модулей;

- абсолютная норма относительной невязки аппроксимации

$$f_1 = \sum_{i=0}^{N-1} \left| \frac{y_i - F(x_i, p)}{y_i} \right| + f_P.$$

Программа позволяет преобразовывать исходные данные перед аппроксимацией с целью перехода к новым единицам измерения или к безразмерным величинам, использования более простой аппроксимирующей функции и в итоге сокращения объема вычислений при обращении к функции и ускорения сходимости алгоритма. Для этого используются целый ряд predetermined и зарегистрированных в виде отдельных программных блоков функций преобразования исходных данных.

Аппроксимирующая функция также может выбираться из написанных ранее и зарегистрированных функций или специально пишется для обрабатываемого набора данных. В число predetermined функций входит ряд широко используемых для аппроксимации данных зависимостей.

В качестве примера специализированных функций приведена полученная с использованием разработанного программного инструмента функциональная зависимость для давления насыщенных паров охладителя  $N_2O_4$ :

$$\bar{p} = P(\bar{T}) + 0,736510\bar{T}Q(\bar{T}),$$

где

$$P(\bar{T}) = ((0,186190\bar{T} + 0,0750474)\bar{T} + 0,0193452)\bar{T} + 0,00189253,$$

$$Q(\bar{T}) = (-0,930281\bar{T} + 1,5999)\bar{T} + 3,98639,$$

$$\bar{p} = p / p_{кр},$$

$$\bar{T} = (T - T_{пл}) / (T_{кр} - T_{пл}).$$

Полученная зависимость обеспечивает почти во всем диапазоне рабочих температур от температуры плавления  $T_{пл} \sim 261$  К до критической температуры  $T_{кр} \sim 431$  К точность порядка 0,2%, за исключением небольшой околокритической области параметров, где точность изменяется от 0,44% при  $T = 420$  К до 1,8 % при  $T_{кр} = 431$  К.

Многопараметрические зависимости свойств веществ, в основном, представлены в виде таблиц по одному из параметров (назовем этот параметр первичным; как правило, это температура) при ряде фиксированных значений остальных, вторичных (например, давления). Начальный этап обработки заключается в выборе как можно меньшего числа типов зависимостей от первичного параметра, хорошо аппроксимирующих данные во всех таблицах для данного свойства. Далее находятся коэффициенты аппроксимирующих зависимостей для каждой таблицы. Обычно количество этих коэффициентов, как и число табличных значений вторичного параметра, невелико, и для вычисления искомого свойства наиболее удобной может оказаться процедура, сочетающая функциональную аппроксимацию по первичному параметру с интерполяцией по вторичному.



Более последовательный подход, который применен в реализованной методике, состоит в исследовании и последующей функциональной аппроксимации зависимости каждого из коэффициентов от вторичных параметров. При этом, поскольку используются функции более общего вида, чем необходимо для каждой из таблиц в отдельности, часто обнаруживается взаимозависимость некоторых коэффициентов, которая хорошо видна при варьировании одного из них в окрестности оптимального значения. Такая взаимозависимость может проявляться лишь в некотором поддиапазоне изменения вторичного параметра и, в принципе, удобна для описания зависимостей коэффициентов от вторичного параметра, поскольку при сглаживании данных в упомянутом поддиапазоне получаются субоптимальные решения, не намного худшие, чем оптимальное. С учетом сказанного аппроксимацию коэффициентов надо производить последовательно, уточняя значения оставшихся.

В случаях нестыковки данных из различных источников производится искусственная состыковка отдельно построенных зависимостей за счет ухудшения аппроксимации в окрестности границы. Отметим, что использование этого приема для хорошо согласующихся данных также вполне приемлемо и не приводит к заметному снижению качества аппроксимации вблизи границы.

Рассмотрим методику стыковки данных на примере параметра, описанного функцией  $f(T, p)$  двух переменных – отнесенных к критическим значениям температуры  $T$  и давления  $p$ . Пусть известны зависимость  $T_S(p)$  температуры от давления на линии насыщения и зависимость параметра от давления насыщенных паров  $f_S(p)$  (здесь и далее подразумеваются относительные температура и давление). Для плавного перехода от данных на границе к данным внутри области определения функции  $f(T, p)$  можно использовать при  $p < 1$  вспомогательную функцию общего вида

$$f^*(T, p) = f(T, p) + [f_S - f(T_S, p)]\varphi(T - T_S),$$

где значения  $f_S$  и  $T_S$  определены при давлении  $p$ , а весовая функция  $\varphi(x)$ , такая что  $\varphi(0) = 1$ , быстро стремится к нулю с ростом  $x$ . В качестве функции  $\varphi$  можно предложить такие зависимости, как

$$\varphi(x) = \begin{cases} \left(1 - \frac{x}{T^* - T_S}\right)^m, & T < T^*; \\ 0, & T \geq T^*, \end{cases} \quad \varphi(x) = \exp\left(-\frac{kx}{T^* - T_S}\right), \quad T^* > T_S.$$

Значения параметров  $T^*$ ,  $m$ ,  $k$  подбираются эмпирически.

Более надежный, хотя и дающий менее гладкое сопряжение данных, способ – это линейная интерполяция между данными на границе и в некоторой точке внутри области определения описываемого свойства

$$f^*(T, p) = \begin{cases} f_S + [f(kT_S, p) - f_S] \frac{T - T_S}{(k-1)T_S}, & T < kT_S; \\ f(T, p), & T \geq kT_S. \end{cases}$$

Коэффициент  $k > 1$  выбирается из условия лучшей аппроксимации переходной области и может быть функцией давления или  $T_S$ .

Ниже приведены графические зависимости газовой постоянной паров  $N_2O_4$  от давления и температуры, построенные по табличным данным, а также полученные с использованием разработанного инструмента соответствующие аналитические зависимости.

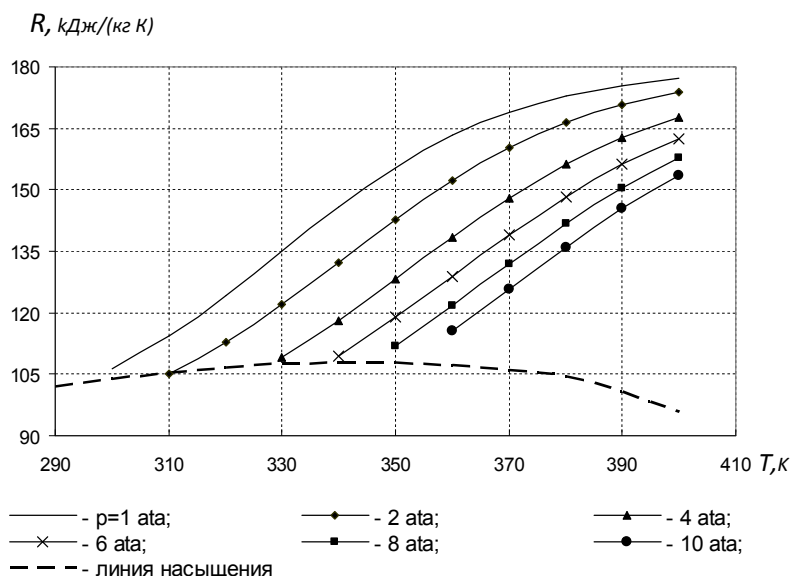


Рис. 1. Графики зависимости газовой постоянной  $N_2O_4$  от давления и температуры

Аппроксимирующая функция имеет вид при  $\bar{T} > 0$

$$R = R_s + R_1(\bar{T}) + R_2(\bar{T}),$$

где

$$R_2(\bar{T}) = R'_s T_{кр} (e^{-f_1 \bar{T} / 0,120721} - e^{-10\bar{T}}) / 10,$$

$$f_1 = (\bar{T} / 0,120721) f_2^{-1};$$

$$f_2 = 3,50982 - 2,7909 T_s / T_{кр};$$

$R_s$  и  $R'_s$  – значения газовой постоянной и ее производной на линии насыщения, соответственно;

$$\bar{T} = (T - T_s) / T_{кр}.$$

Для  $\bar{T} < 0$  или  $\bar{T} = 0$  принимается  $R = R_s$ .

Программа аппроксимации свойств теплоносителей предполагает протоколирование изменения коэффициентов получаемых зависимостей, а также графическое представление как самих аппроксимирующих формул, так и аналитических формул для первых (а в некоторых случаях и для вторых) производных.

Кроме построения графиков пользовательский интерфейс позволяет:

- читать, просматривать, редактировать и записывать файлы исходных данных;
- просматривать списки имеющихся аппроксимирующих функций и процедур, используемых для предварительного преобразования данных;

- запускать процесс решения задачи минимизации;
- просматривать результаты решения в виде текста.

**Выводы.** В составе пакета программ численного моделирования процессов гидродинамики и теплообмена в теплонапряженных охлаждающих трактах с переменной массой охладителя разработан программный инструмент для обработки и представления информации о термодинамических и теплофизических свойствах теплоносителей и материалов. Разработанная методика и ее программная реализация позволяют получать аналитические формулы, с удовлетворительной точностью аппроксимирующие табличные данные от нескольких параметров. Разработанный программный инструмент может использоваться автономно при решении подобного рода задач в любой области.

#### Список литературы

1. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 536 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Мецераковим Л.І.  
Надійшла до редакції 11.11.13*

УДК 519.6:504.3.054

© Н.Н. Беляев, Д.О. Затынайченко

## **АНАЛИЗ АЭРОИОННОГО РЕЖИМА В ПОМЕЩЕНИИ НА БАЗЕ CFD МОДЕЛИ**

Разработана численная модель для моделирования распространения ионов в помещении. Модель базируется на уравнении потенциального течения и уравнении массопереноса. Приводятся результаты вычислительного эксперимента.

Розроблено чисельну модель для моделювання поширення іонів в приміщенні. Модель базується на рівнянні потенціальної течії та рівнянні масопереносу. Наводяться результати обчислювального експерименту.

A numerical model was developed to simulate the air ions dispersion in the rooms. The model is based on the equation of the potential flow and equation of the mass transfer. The results of the numerical experiments are presented.

**Вступление.** Как известно, для обеспечения нормального микроклимата на рабочих местах необходимо, чтобы в рабочих зонах была определенная концентрация аэроионов [1,2,4,5]. Поэтому необходимо заранее уметь предопределять концентрацию аэроионов как во всем помещении, так и в рабочих зонах, с целью обеспечения требуемых параметров микроклимата. Решение данной задачи может быть найдено с помощью метода математического моделирования. Для практики важно иметь математические модели, позволяющие прогнозировать аэроионный режим (АР) в помещениях с учетом основных физических факторов, влияющих на процесс рассеивания аэроионов в помещении.

**Анализ публикаций.** В настоящее время, в Украине, расчет рассеивания аэроионов в помещениях осуществляется на базе аналитических моделей. Это модели построены на основе аналитического решения одномерного уравнения переноса примеси [2,3] или на основе аналитических зависимостей и полуэмпирических формул, полученных для свободных турбулентных струй [4,5]. Аналитические модели позволяют оперативно рассчитать концентрацию аэроионов в помещениях. Однако данные модели не учитывают следующие факторы:

1. Размещение в помещениях мебели, оборудования и других препятствий влияющих на формирование поля скорости воздушного потока в помещении, а значит – на распределение аэроионов в нем.

2. Различное положение отверстий приточно-вытяжной вентиляции в помещении и режим вентилирования помещения.

3. Присутствие в помещении не только специальных ионизаторов воздуха, но и иных источников эмиссии ионов, что приводит к необходимости учета их влияния на концентрацию аэроионов.

**Целью** работы является создание CFD модели для прогноза аэроионного режима в помещениях, и позволяющей при моделировании учитывать: положение отверстий приточно-вытяжной вентиляции, режим воздухообмена, размещение оборудования в помещении, его форму, режим эмиссии аэроионов в помещении и пылевое загрязнение воздушной среды в помещении.

**Уравнения модели.** Для расчета переноса аэроионов в помещении (как положительных ионов так и отрицательных - ОИ) будем использовать уравнение переноса [1,6,7]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) - \alpha CB - \beta CD + \sum Q_c(t) \delta(x - x_c) \delta(y - y_c), \quad (1)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial uB}{\partial x} + \frac{\partial vB}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial B}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial B}{\partial y} \right) - \alpha CB - \beta BD + \sum Q_B(t) \delta(x - x_B) \delta(y - y_B), \quad (2)$$

где  $C$ ,  $B$  – концентрация отрицательных и положительных аэроионов соответственно;  $u$ ,  $v$ , – компоненты вектора скорости движения воздушного потока в помещении;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициенты диффузии;  $t$  – время;  $\alpha$  – скорость рекомбинации ионов, имеющих различную полярность;  $\beta$  – скорость рекомбинации ионов с частицами пыли;  $Q_{Ci}$ ,  $Q_{Bi}$ , – интенсивность эмиссии отрицательных и положительных ионов в соответствующих точках с координатами  $x_{ci}$ ,  $y_{ci}$  и т.д.;  $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$  и т.п. – дельта-функция Дирака. Ось  $Y$  направлена вертикально вверх.

В уравнениях (1), (2) учитывается взаимодействие ионов различной полярности с частицами пыли, поэтому к данным уравнениям добавляется еще одно уравнение – уравнение рассеивания частиц пыли в помещении

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial uD}{\partial x} + \frac{\partial vD}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial D}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial D}{\partial y} \right) + \sum Q_{Di}(t) \delta(x - x_{Di}) \delta(y - y_{Di}), \quad (3)$$

где  $D$  – концентрация пылевых частиц.

Обозначение остальных параметров в данном уравнении совпадает с аналогичными обозначениями, приведенными для уравнений (1), (2). Поскольку рассматривается распространение в помещении пылевых частиц малого размера, то в уравнение переноса (3) не включено слагаемое, отвечающее за гравитационное оседание пылевых частиц.

Постановку граничных условий для уравнений модели (1) – (3) рассмотрим на примере уравнения (1), т.к. постановка граничных условий для других уравнений модели – аналогична. Для уравнения (1), на стенах комнаты, потолке, полу, а также твердых стенках различных препятствий в помещении (шкафы, стулья и т.п.) ставится граничное условие вида [6,7]:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

где  $n$  – единичный вектор внешней нормали к твердой поверхности.

На границе входа воздушного потока в помещение ставится условие:

$$C|_{ent} = C,$$

где  $C$  – известное значение концентрации ионов.

На выходе воздушного потока из помещения в дискретной модели ставится «циклическое» граничное условие вида

$$C(i+1, j) = C(i, j),$$

где  $i+1, j$  – номер разностной ячейки на выходе из расчетной области.

В начальный момент времени полагается  $C=C_0$ , где  $C_0$  – заданное значение концентрации ионов в расчетной области (в рассматриваемой ниже задаче, для отрицательных аэроионов – данная величина равна нулю).

Поскольку работа системы вентиляции, приводит к формированию неравномерного поля скорости воздушной среды внутри помещения, что крайне усложняет теоретическое решение задачи. Внутри помещений находятся различные препятствия, например – мебель, оборудование и т.п. Эти препятствия, а также положение приточных и вытяжных отверстий и определяют, в основном, аэродинамику воздушных потоков в помещениях. Поэтому, прежде чем решать задачу прогноза концентрации ионов в помещении, на базе приведенных уравнений, необходимо рассчитать компоненты вектора скорости воздушного потока в помещении с учетом нахождения в помещении препятствий. Эти компоненты вектора скорости должны удовлетворять уравнению неразрывности. Таким образом, необходимо решить гидродинамическую задачу.

Для расчета поля скорости воздушного потока в помещении необходимо решить гидродинамическую задачу. Для решения этой задачи используется модель потенциального течения. В этом случае для определения значений компонент вектора скорости воздушной среды в помещении следует, первоначально определить потенциал скорости. С этой целью необходимо проинтегрировать уравнение [8]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (4)$$

где  $P$  – потенциал скорости.

Для уравнения (4) ставятся следующие граничные условия [6,7,8]:

- на твердых стенках:  $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ , где  $n$  – единичный вектор внешней нормали

к твердой границе;

- на месте расположения приточного отверстия:  $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$ , где  $V_n$  – известное

значение скорости входящего воздушного потока;

-на месте расположения вытяжного отверстия:  $P = P^*(x = const, y) + const$ .

Для определения компонент вектора скорости воздушной среды используются зависимости [8]:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x},$$
$$v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

**Численное интегрирование уравнений модели.** При численном интегрировании уравнений модели используется прямоугольная разностная сетка. Для численного интегрирования уравнения (4) используется идея установления решения по времени, поэтому численно интегрируется следующее уравнение

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (5)$$

здесь  $\eta$  - фиктивное время.

При  $\eta \rightarrow \infty$  решение уравнения (5) будет стремиться к «установлению», т.е. к решению уравнения (4).

Для численного интегрирования уравнения (5) используется неявная схема суммарной аппроксимации [9].

После расчета поля потенциала скорости осуществляется расчет компонент вектора скорости потока на сторонах разностных ячеек:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x};$$
$$v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Перед началом численного интегрирования уравнения (5) задается поле потенциала скорости для «начального» момента фиктивного времени. Для численного интегрирования уравнений переноса (1-3) применяется их физическое расщепление на три шага. На первом шаге расщепления учитывается процесс переноса примеси под действием направленного движения воздушного потока, на втором шаге учитывается перенос под действием диффузии, а третье уравнение учитывает изменение концентрации примеси под действием источников (стоков). Для интегрирования полученных уравнений используется неявная попеременно – треугольная разностная схема [6,8]. В разработанном коде расчет каждого шага расщепления реализован в виде отдельной подпрограммы.

**Формирование вида расчетной области.** Формирование вида расчетной области (рис.1), т.е. формы помещения и размещения в нем оборудования, мебели и т.п. осуществляется с помощью метода фиктивных областей [6,7]. Для задания в численной модели положения отверстий приточно–вытяжной вентиляции, места эмиссии ионов или пыли используется метод маркирования [6,7]. Формирование вида расчетной области пользователь осуществляет в файле исходных данных. Изменение вида расчетной области не требует внесения изменения в разработанный код.

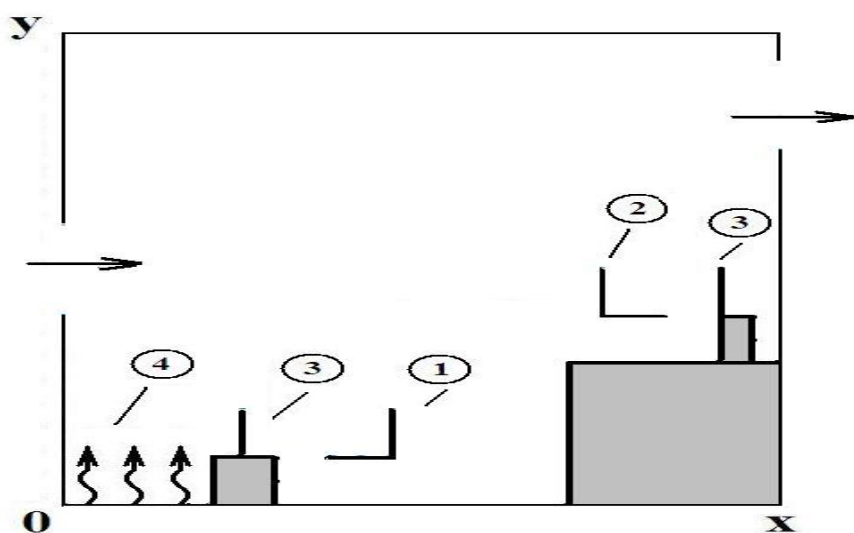


Рис.1. Схема расчетной области: 1 – первое рабочее место (стул); 2 – второе рабочее место (стул); 3 – источник эмиссии положительных ионов; 4 – место эмиссии пыли

**Исходные данные для проведения CFD моделирования.** Для практической реализации построенной CFD модели необходимо задать:

1. Форму помещения.
2. Размещение мебели, оборудования (или других объектов) в помещении.
3. Положение приточных и вытяжных отверстий вентиляции.
4. Скорость воздушного потока на выходе из приточного отверстия.
5. Значение коэффициентов диффузии.
6. Концентрацию отрицательных ионов на выходе из приточного отверстия вентиляции.
7. Положение и интенсивность других источников эмиссии ионов, пыли в помещении.

Задание исходных данных осуществляется в файле исходных данных типа «DAT».

**Результаты вычислительного эксперимента.** Разработанная численная модель была применена для решения задачи о прогнозе АР рабочем помещении, где находятся два рабочих места. Схема расчетной области – помещения, в котором моделируется аэроионный режим, показана на рис.1. Помещение име-

ет особенность – второе рабочее место находится на высоте относительно пола помещения. Будем говорить, что это рабочее место находится на втором уровне. В каждой рабочей зоне (рис.1, позиция 3) происходит эмиссия положительных ионов с интенсивностью  $3 \cdot 10^4$  частиц /с. Поступление отрицательных ионов в помещение происходит с приточным воздухом, т.е. в системе вентиляции установлено оборудование, осуществляющее генерацию отрицательных ионов. Приточное отверстие размещено на середине левой стены. С воздушным потоком в помещение поступают отрицательные ионы, с концентрацией  $C_0 = 174 \cdot 10^7$  частиц/  $m^3$ . Полагается, что на полу, возле левой стенки помещения имеет место постоянный выброс пыли в количестве  $6 \cdot 10^6$  частиц/с (данная зона условно показана волнистыми стрелками на рис.1). Остальные параметры задачи таковы: размеры расчетной области  $6.25m \cdot 12.3m$ ;  $\alpha = 1,5 \times 10^{-12} m^3/c$ ,  $\beta = 1 \times 10^{-12} m^3/c$  [1], коэффициенты турбулентной диффузии по всем направлениям приняты равными  $0.4m^2/c$ , скорость входа воздушного потока через приточное отверстие вентиляции равна  $1.8 m/c$ .

Результаты CFD моделирования на базе разработанной численной модели представлены ниже. На рис. 2 показано распределение концентрации отрицательных ионов внутри помещения. Результаты расчета представлены в виде

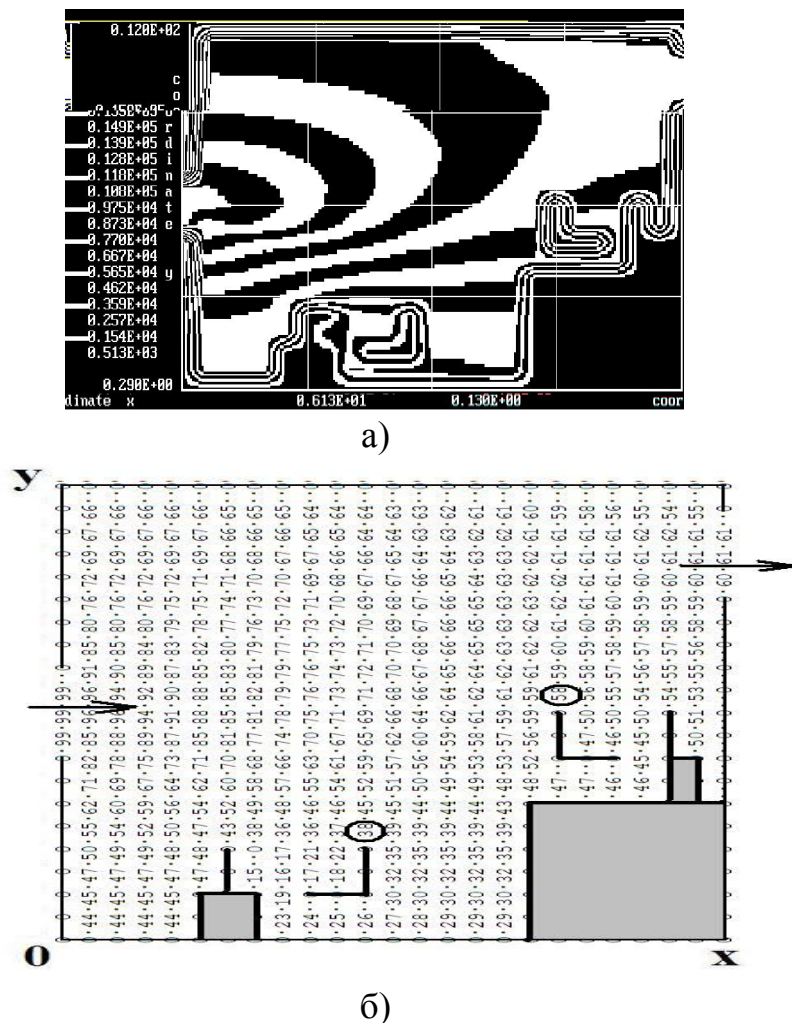


Рис.2. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении:  
 а) – изолинии концентрации ( $C \cdot 10^{-5}$ ); б) - поле концентрации.



изолиний концентрации и матриц значения концентрации. Здесь, на матрицах, значение концентрации представлено в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины максимальной (в данном случае – входной) концентрации. Вывод на печать чисел осуществлен по формату «целое число», т.е. дробная часть числа не выдается на печать. По требованию пользователя, разработанный код осуществляет вывод на печать результатов по формату *действительное число*, т.е. с сохранением дробной части числа.

Из рисунка 2 видно, что картина распределения отрицательных аэроионов в помещении условно делится на три подзоны – это две подзоны вблизи рабочих мест, где на характер распределения аэроионов основное влияние оказывает мебель и третья подзона – в середине помещения, где нет препятствий для движущегося воздушного потока.

Как известно, практический интерес представляет прогноз аэроионного режима в помещении в тех зонах, где находится персонал и органы дыхания работников. Для оценки аэроионного режима выбрана позиция над спинками стульев, т.е. там, где находится голова работника. Эта зона на рис.2,б условно представлена в виде «кружка». Результаты расчета концентрации отрицательных аэроионов для каждой такой зоны представлены в табл.1. В таблице также приведены значения скорости воздушного потока для каждой зоны, поскольку известно, что в рабочей зоне данная величина должна быть ограничена по величине для создания комфортных условий для работника.

Таблица 1

Концентрация отрицательных аэроионов в зоне дыхания работника и скорость воздушного потока в этой зоне (первый вариант задачи).

Рабочее место	Концентрация отрицательных аэроионов, частиц/м <sup>3</sup>	Скорость воздушного потока, м/с
Первое рабочее место	$5.99 \cdot 10^8$	0.167
Второе рабочее место	$9.04 \cdot 10^8$	0.580

Если принять во внимание, что минимальная концентрация отрицательных аэроионов составляет величину порядка  $6 \cdot 10^8$  частиц/м<sup>3</sup>, а нижняя граница их оптимальной концентрации равна  $30 \cdot 10^8$  частиц/м<sup>3</sup>, то видно, что на обоих рабочих местах, в зоне дыхания работников имеет место достаточная концентрация отрицательных аэроионов. Но с другой стороны, из таблиц видно, что скорость воздушного потока на втором рабочем месте значительно больше рекомендуемой величины – 15 – 20 см/с. Это объясняется «поджатием» воздушного потока, т.е. уменьшением размеров поперечного сечения потока в этом месте, а, следовательно, увеличением скорости потока. Для снижения величины скорости в этом месте установим экран перед стулом (рис.3, позиция 4) и расчетным путем определим влияние этого экрана на величину скорости воздушного потока на втором рабочем месте. Высота экрана 2.9м.

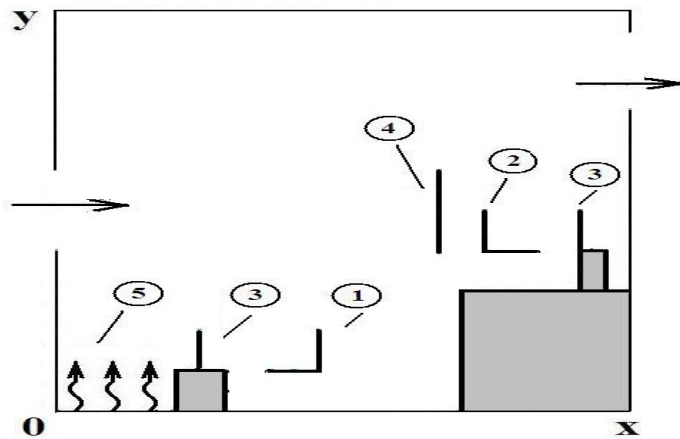
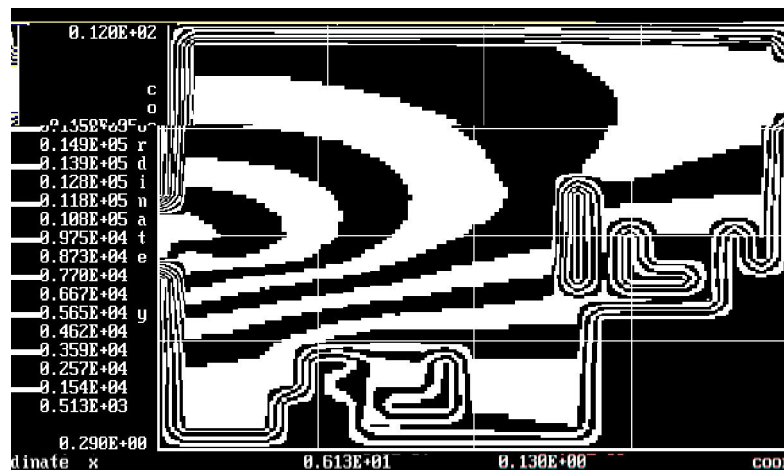
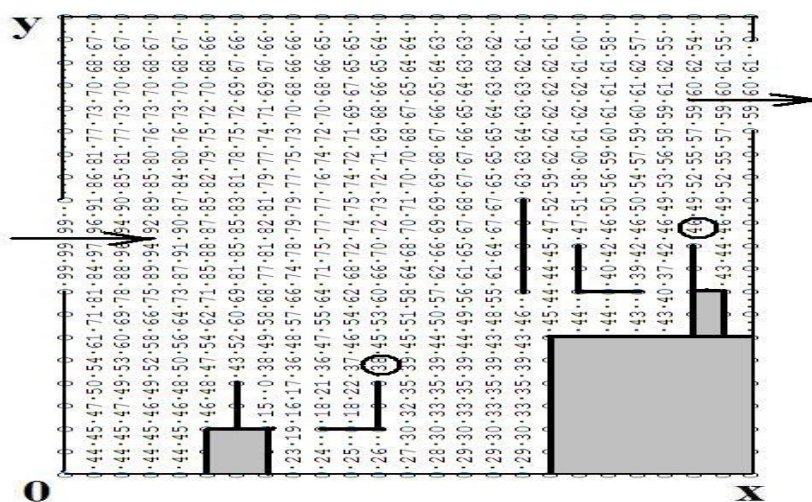


Рис.3. Схема расчетной области: 1 – первое рабочее место (стул); 2 – второе рабочее место (стул); 3 – источник эмиссии положительных ионов; 4 – экран; 5 – место эмиссии пыли.



а)



б)

Рис.4. Распределение концентрации отрицательных аэроионов в помещении при размещении экрана возле второго рабочего места: а) – изолинии концентрации ( $C \cdot 10^{-5}$ ); б) - поле концентрации.

Результаты расчета концентрации отрицательных аэроионов в помещении при установке экрана показаны на рис 4 и представлены в табл.2.

Таблица 2.

Концентрация отрицательных аэроионов в зоне дыхания работника и скорость воздушного потока в этой зоне при наличии экрана (второй вариант задачи).

Рабочее место	Концентрация отрицательных аэроионов, частиц/м <sup>3</sup>	Скорость воздушного потока, м/с
Первое рабочее место	6.00*10 <sup>8</sup>	0.181
Второе рабочее место	7.39*10 <sup>8</sup>	0.196

Как видно из табл.2 применение экрана позволило снизить скорость воздушного потока во второй рабочей зоне до комфортного уровня с сохранением концентрации отрицательных аэроионов на оптимальном, для человека, уровне.

В заключение отметим, что расчет одного варианта задачи на базе разработанной CFD модели составляет порядка 5с компьютерного времени.

**Выводы.** В работе разработана CFD модель для расчета аэроионного режима в помещениях. Расчет рассеивания аэроионов в помещении основывается на решении двух задач: первая задача – гидродинамическая (расчет поля скорости воздушного потока в помещении при выбранном режиме вентиляции), вторая задача – расчет транспорта аэроионов в помещении. Основной особенностью построенной CFD модели является то, что она позволяет быстро проводить расчет с учетом таких важных факторов как наличие мебели в помещении, положения приточных и вытяжных отверстий вентиляции и т.п. Построенная численная модель может служить инструментом решения задач по определению оптимального аэроионного режима в производственных, жилых и общественных помещениях. Дальнейшее развитие модели следует проводить в направлении создания пространственной численной модели прогноза аэроионного режима в помещениях.

#### Список литературы

1. Fletcher L.A., Noakes C.J., Sleigh P.A., Beggs C.B., Shepherd S.J. (2008) Air ion behavior in ventilated rooms. *Indoor and uilt Environment*, 17 (2). P. 173-182.
2. Запорожец О.І. Принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях / О.І. Запорожец, В.А. Глива, О.В. Сидоров // Вісник НАУ. 2011, №2. – С.120-124.
3. Бахрушин В.Е. Моделирование распределения концентрации ионов вблизи ионизатора/ В.Е. Бахрушин, М.А. Игнахина, Д.В. Вертинский, А.Ю. Евсюков // Складні системи та процеси. №1, 2002. – С.30-36.
4. Толкунов И.А. Теоретическое исследование процессов переноса аэроионов в потоках воздуха в помещениях специального назначения МЧС Украины / И.А. Толкунов, И.И. Попов, В.В. Барбашин // Проблеми надзвичайних ситуацій. Випуск 11,2010.С.137-145.
5. Толкунов И.А. Біполярна іонізація повітряного середовища приміщень функціональних підрозділів мобільного госпіталю МНС / Проблеми надзвичайних ситуацій. Випуск 14, 2011. – С.161-170.

6. Антошкина Л.И. Оценка экологического риска при авариях с химически опасными веществами / Л.И. Антошкина, Н.Н. Беляев, Е.Ю. Гунько // Наука и образование, Днепропетровск, 2008. – 132 с.
7. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наукова думка, 1997. – 368 с.
8. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. - М.: Наука, 1978. 735 с.
9. Самарский А. А. Теория разностных схем. - М.: Наука, 1983. 616 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Мещеряковим Л.І.  
Надійшла до редакції 11.11.13*

УДК 614.89

© В.І. Голінько, Т.І. Долгова, С.І. Чеберячко

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПРОТИПИЛОВИХ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ОРГАНІВ ДИХАННЯ**

В статті проаналізовано як помилки при випробуваннях протипилових респіраторів призводять до неточності у виборі засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД). Запропоновано схему визначення кількості неякісних протипилових півмасок, які можуть потрапити до користувачів через похибку вимірювань. Досліджено вплив невизначеності вимірювань методів випробувань та лабораторного обладнання на кількість неякісних респіраторів, які можуть пройти випробування.

В статті проаналізовано влияние качества испытаний респираторов на ошибки при выборе средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД). Предложена модель для определения количества некачественных противопылевых полумасок, которые могут попасть к пользователям из-за величины неопределенности измерений. Исследовано влияние погрешности измерений методов испытаний и лабораторного оборудования на количество некачественных фильтрующих респираторов, которые могут пройти испытание.

Tests in laboratory quality impact on respirators error in their selection analyzed in the article. We propose a model of low-quality respirators to determine the amount that can go to production because of the magnitude of measurement uncertainty. The effect of measurement error test methods and laboratory equipment to the number of low-quality respirators.

**Актуальність.** Проблема професійної захворюваності гірників на пневмокніоз стоїть дуже гостро. Не зважаючи, на наявний арсенал засобів знепилення концентрація пилу у гірничих виробках інколи сягає 300–400 мг/м<sup>3</sup>. В такому випадку основним захисним пристроєм є протипиловий респіратор. Його використання нормується низкою нормативних актів з охорони праці [1–3]. Крім того, відповідно до Закону України з охорони праці роботодавець повинен забезпечити працівника засобами індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД). Проте, кількість захворювань на пилову етіологію не зменшується. Тому, встановлення основних причин погіршення протипилового захисту працівників і пошук шляхів підвищення ефективності використання ЗІЗОД є актуальним питанням.

Відомо, що вибір респіратор є важливою ланкою у системі збереження здоров'я працівників на виробництві. Допущені помилки можуть призвести до використання респіраторів, який не відповідає умовам експлуатації. Тому необхідно дуже зважено в цьому процесі оцінювати всі впливові фактори, особливо при обмеженій інформації. Важливою ланкою в забезпеченні якісними респіраторами працівників є перевірка їх ефективності у випробувальних лабораторіях. Однак, навіть при ретельній перевірці існує деяка похибка вимірювань, яка може призвести до потрапляння на підприємства неякісних фільтрувальних півмасок. Зі збільшенням похибки вимірювань ймовірність помилок при виборі ЗІЗОД зростає, і навпаки, зі зменшенням — знижується.

Відомо, що надійність захисту фільтрувальних респіраторів залежить від декількох складових на які слід звернути увагу – це вміння користуватись захисним пристроєм і якість складових конструкції півмаски [4]. Першу складову ми розглянемо в наступних публікаціях. Для визначення другої складової проводяться чисельні лабораторні і виробничі дослідження протипилових півмасок, які показують, що все ж таки основною причиною погіршення захисних властивостей респіраторів є нещільності за смугою обтюрації [5].

В багатьох публікаціях вказується про високу ймовірність помилок при виборі ЗІЗОД базуючись тільки на результатах лабораторних досліджень [6–9]. В той же час майже всі рекомендації вітчизняних авторів ґрунтуються на величині захисної ефективності респіраторів отриманих в лабораторних умовах [10]. Виходячи з чисельних виробничих випробувань в деяких зарубіжних країнах були переглянуті нормативи стосовно ступенів захисту ЗІЗОД та введені додаткові параметри для їх характеристики [11].

**Метою публікації** є встановлення взаємозв'язку між невизначеністю вимірювань і можливою кількістю потрапляння неякісних ЗІЗОД до користувачів та розробка рекомендацій щодо покращення процедури лабораторних випробувань.

**Матеріали та методи досліджень.** Однією із основних процедур з перевірки якості ЗІЗОД в лабораторних умовах є визначення захисних властивостей півмасок на добровольцях. Вважається, що одержаний результат можна використовувати для вибору респіраторів у виробничих умовах. Оскільки оцінка коефіцієнта захисту ЗІЗОД одночасно враховує і коефіцієнт проникнення через фільтр, і коефіцієнти підсмоктування за смугою обтюрації та клапанів видихання. Крім того, виконання спеціальних вправ випробувачами, які імітують роботу та розмову, сприяють підвищенню достовірності випробувань.

Представимо вибір ЗІЗОД наступною блок-схемою рис. 1. Для визначення кількості працівників, які будуть працювати у якісних ЗІЗОД, передбачений спеціальний коефіцієнт  $h$ , який показує долю респіраторів, які при лабораторних випробуваннях на людях показали відповідний результат із загальної їх кількості

$$N_1 = Nh,$$

де  $N$  – загальна кількість працівників, які використовують ЗІЗОД.

Відповідно, число працівників, які будуть використовувати неякісні ЗІЗОД складає

$$N_2=N(1-h).$$

Передбачимо можливість, що працівники першої групи  $N_1$ , можуть використовувати неякісні респіратори, які через помилку оператора отримали задовільні показники, їх кількість визначимо як

$$N_{12}=N_1b$$

де  $b$  – величина невизначеності вимірювань, яка показує долю неякісних ЗІЗОД, що пройшли випробування через помилку оператора.

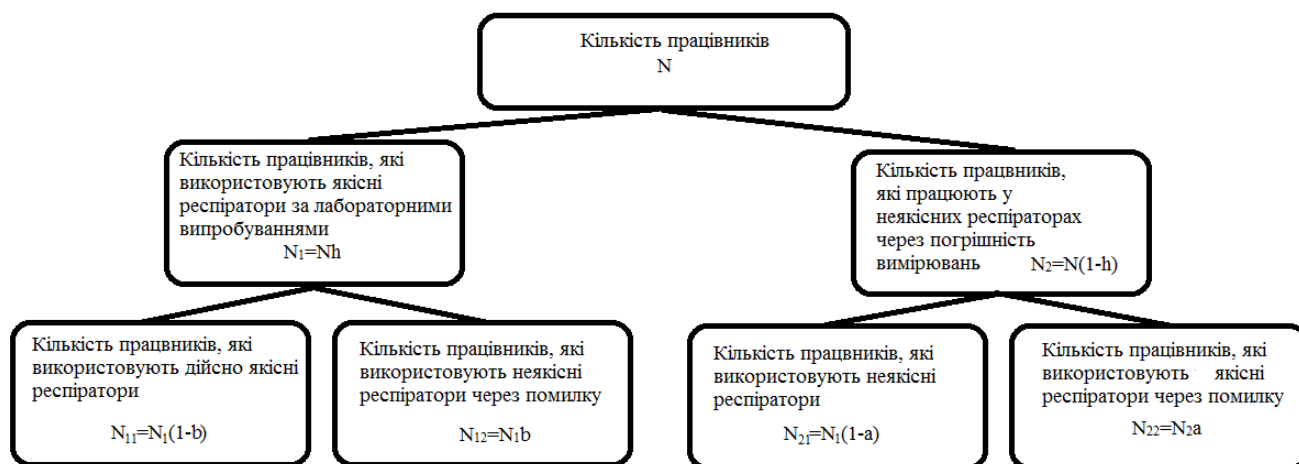


Рис. 1. Блок-схема для розрахунку кількості неякісних протипилових респіраторів, які потрапляють на виробництво через погрішність випробувань

Також мають місце випадки, коли якісний респіратор може не відповідати вимогам стандарту через помилку оператора. Кількість працівників, що користуються такими респіраторами дорівнює

$$N_{22}=N_2a,$$

де  $a$  – величина невизначеності вимірювань, яка характеризує точність методу випробувань.

Кількість працівників, що користуються неякісними респіраторами дорівнює

$$N_{21}=N_2(1-a).$$

За допомогою цієї блок-схеми можна вирішити декілька задач без проведення лабораторних досліджень ЗІЗОД, за умови відомих величин  $h$ ,  $a$  і  $b$ , а також оцінити вплив різних факторів, на достовірність методу випробувань. Так, можна визначити кількість працівників, які будуть працювати в неякісних півмасках, а отже у них збільшується ризик виникнення захворювань

$$N_{н.р.}=N_{12}+N_{21}.$$

Крім того, можна розрахувати величину помилки при виборі ЗІЗОД

$$d = \frac{N_{12}}{N_1}.$$

Модель дозволяє визначити точність методики перевірки якості ЗІЗОД, яка забезпечить мінімальну кількість неякісних респіраторів, що можуть потрапити на виробництво.

**Результати досліджень.** Коефіцієнт  $h$  розраховується за результатами перевірки фільтрувальних респіраторів на добровольцях і характеризує якість ізолювальних властивостей півмаски за смугою обтюрації. Для його визначення необхідно знати кількість випробувачів, у яких було зафіксовано коефіцієнт захисту респіратора не менший від наведеного у відповідних нормативних документах.

Відповідно до ДСТУ EN 149-2002 у випробуванні приймає участь 10 чоловік, які мають відповідні розміри обличчя, вміють користуватись респіраторами і знають процедуру випробувань. Так, для одітих відповідно до інструкцій виробника протиаерозольних фільтрувальних півмасок коефіцієнт підсмоктування повинен скласти: 25 % - FFP1; 11 % - FFP2; 5 % - FFP3 не менше ніж у 46 із 50 результатів окремих прав; і додатково не менше у 8 випробувачів середні арифметичні значення коефіцієнту підсмоктування не повинні перевищувати: 22 % - FFP1; 8 % - FFP2; 2 % - FFP3, відповідно. Тобто в першому випадку коефіцієнт  $h = 46/50=0,92$ , а в другому випадку 0,8. Щодо міждержавних стандартів, то величина складає  $h = 0,95$ , оскільки вони вимагають забезпечення необхідної ступені захисту для 95 % випробувачів.

Величини  $a$  і  $b$  залежать від роботи системи якості у випробувальній лабораторії: компетенції персоналу лабораторії, використання якісного обладнання з мінімальною невизначеністю вимірювань, умов проведення випробувань та ін.

Для визначення коефіцієнта  $h$  також можна скористатись публікаціями з результатами перевірки захисних властивостей різних типів сучасних фільтрувальних ЗІЗОД. Головне щоб в них містилась інформація про загальну кількість респіраторів, що випробовувались та долю тих, що забезпечили надійний захист. Наприклад, в роботі автори проаналізували захисну ефективність двадцяти фільтрувальних ЗІЗОД провідних світових виробників. Величина  $h$  встановлювалась, відповідно до очікуваного коефіцієнта захисту (ОКЗ), який дорівнює 10 або 5 (тобто любі фільтрувальні півмаски відповідно до американського стандарту “Стандарт США 29 CFR 1910.134 Respiratory protection” можна використовувати до 10 ПДК, а четвертьмаски до 5 ПДК). Наведені значення ОКЗ приблизно відповідають вітчизняним (європейським) вимогам до використання фільтрувальних півмасок першого (не більше 4 ПДК) і другого (не більше 12 ПДК) класів захисту ЗІЗОД.

Було проведено 100 випробувань, при імітуванні роботи двадцяти п'ятьма дослідниками, розподіл розмірів обличчя яких відповідає розмірам обличчя основної маси працівників, які підбираються за відповідними таблицями. Вважається, що це значно зменшує ймовірність потрапляння ЗІЗОД з неякісними ізолювальними властивостями до користувачів. Це ще одна відмінність американського і європейського підходів до перевірки якості ЗІЗОД. Результати показали, що у кращій моделі коефіцієнт захисту (КЗ) був у 99 випадках більший за очікуваний (ОКЗ=10), тобто  $h = 0,99$  тоді, як у гіршій КЗ > 10 було тільки у 44 випадках із 100 ( $h = 0,44$ ). При зменшенні величини ОКЗ до 5 суттєво покращились і показники коефіцієнта  $h$ , які знаходились в межах від 1 до 0,71. Отже, коефіцієнт  $h$  залежить від коефіцієнта захисту півмасок.

Результати обробки подібних випробовувань вітчизняних ЗІЗОД наведені в табл. 1. Вони показують що, перевірені ЗІЗОД, задовольняють вимогам стандарту ДСТУ EN 149-2002 за коефіцієнтом проникнення тест-аерозолі, який передбачає можливість відхилення незначної кількості показників захисної ефективності від затверджених вимог.

Таблиця 1

Значення коефіцієнта  $h$ , які розраховані при дослідженнях півмасок класу FFP2

Виробник / модель	Коефіцієнт $h$
Спецснаб / РПА-ТД	0,98
Укрфільтерсервіс / Пульс	0,98
Moldex / 2002	0,97
ФІХІЗНС і Л / Одісей	0,95

Однак, наскільки можна довіряти цим випробуванням. Деякі фахівці стверджують, що такий результат можна розповсюджувати тільки на працівників з параметрами обличчя, відповідної форми, що приймали участь у випробуваннях. У людей іншими відмінними параметрами – результат буде дещо інший. Існують дослідження, які підтверджують цей висновок [4-11]. Так, в роботі [8] було перевірено захисні властивості респіраторів на групі добровольців (без бороди і бакенбардів), яка охоплює набір характеристик обличчя типових споживачів. У результаті експерименту було отримано, що максимальне проникнення тест-аерозолі спостерігається або у випробувачів з малим або великим розміром обличчя. Тоді, як найкращий результат у випробувачів з середнім розміром.

В першому наближенні параметр  $a$  можна оцінити виходячи з розрахунку невизначеності вимірювань типу А, тоді як параметр  $b$  можна визначити — за невизначеністю вимірювань типу В.

Вважається, що значення параметру  $b$  знаходиться в діапазоні 0,01 — 0,05, тоді як величина коефіцієнта  $a$  може знаходитися в діапазоні від 0,01 % до 20 % (0 - 0,2). Використання методів дослідження з більшою погрішністю вимірювань є недоцільним, тому ці величини і використовувались в подальших дослідженнях. В таблицях 2 і 3 наведена відносну кількість працівників, які виберуть неякісний респіратор, виходячи із величини  $h$ , що задається ДСТУ EN 149 – 2003 та різних поєднань параметрів  $a$  і  $b$ .

В табл. 2 і 3 наведені результати розрахунку відносної кількості неякісних респіраторів, які потраплять на виробництво через погрішність випробувань. Бачимо, що кількість неякісних респіраторів, які можуть потрапити на виробництво, зі збільшенням погрішності методів перевірки різко зростає, тоді як погрішність вимірювань має значно менший вплив. Наприклад, на підприємстві працює 100 робітників, які користуються протипиловими респіраторами. Виходячи із нормативних показників, якщо величина  $h$  складає 0,92, а погрішність методу перевірки 10 % то 16 робітників можуть використовувати неякісний респіратор, при  $h=0,8$  їх кількість збільшиться до 27, а майже третина персоналу, у яких ризик виникнення захворювань різко



збільшиться. Тобто в цілому для підвищення кількості якісних респіраторів на виробництві необхідно мати респіратор з надійними ізолювальними властивостями і випробувальна лабораторія користувалась точними методами діагностики.

Таблиця 2

Результати розрахунку можливої частки неякісних респіраторів, які потраплять на підприємства при  $b = 0,05$  та різних значення параметру  $a$

Значення параметру $a$	Частка неякісних респіраторів при значенні $h$				
	0,95	0,92	0,9	0,85	0,8
0,05	0,09	0,12	0,14	0,18	0,23
0,1	0,14	0,16	0,18	0,22	0,27
0,2	0,23	0,26	0,27	0,31	0,35

Таблиця 3

Результати розрахунку можливої кількості неякісних респіраторів, які потраплять на підприємства при  $a = 0,05$  та різних значення параметру  $b$

Значення параметру $b$	Частка неякісних респіраторів при значенні $h$				
	0,95	0,92	0,9	0,85	0,8
0,05	0,09	0,12	0,14	0,18	0,23
0,1	0,09	0,12	0,14	0,18	0,23
0,2	0,09	0,12	0,14	0,18	0,23

В той же час на захисну ефективність респіраторів впливає багато різних факторів: температура повітря, вологість, режим праці, час експлуатації та інші, які суттєво можуть її зменшити. На жаль перевірок ЗІЗОД у виробничих досліджень фільтрувальних респіраторів, де можна оцінити вплив вище згаданих факторів майже не проводяться. Тоді як при лабораторних випробуваннях відтворити їх вплив не можна. Виникає задача у визначенні параметрів ЗІЗОД у виробничих умовах, які можна використовувати для реальної оцінки захисту працівників.

**Висновки.** За допомогою побудованої моделі можна визначити кількість респіраторів, які можуть потрапити на виробництво, через помилки при визначенні фільтрувальних властивостей ЗІЗОД у лабораторії. Зрозуміло, що збільшення невизначеності випробування веде до зростання кількості таких респіраторів. Отже, важливим елементом з підвищення індивідуального протипилового захисту працівників є проведення якісних випробувань респіраторів. Доцільно, постійне оновлення в лабораторіях, методів діагностики для зменшення похибок вимірювань. Крім того, покращення результатів досліджень можливе за рахунок автоматизації процедур визначення коефіцієнтів захисту, проникнення та підсмоктування ЗІЗОД. Важлива роль в цьому процесі відведена і системі якості лабораторії. Її впровадження дозволяє зменшити вплив на випробування людського чинника, несправного обладнання, умов навколишнього середовища, зовнішнього впливу та інших факторів. Вона вимагає

від керівництва лабораторії постійного контролю за своєю діяльністю через проведення внутрішніх аудитів, періодичного аналізу прийнятих рішень, роботою над невідповідностями та рекламаціями. Виникає потреба у модернізації обладнання, підбору, атестації та забезпеченні професійного зростання персоналу, заохоченні до сумлінного виконання своїх обов'язків.

#### Список літератури

1. НПАОП 0.00-4.01-08 Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту. Затверджено Державним комітетом України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду. Наказ №53 від 24.03.2008. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [p.http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0446-08](http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0446-08).
2. НПАОП 0.00-1.04-07 Правила вибору та застосування засобів індивідуального захисту органів дихання. Затверджено Державним комітетом України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду. Наказ №331 від 28.12.2007. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/z0285-08>
3. Тарасов В.И. Просто о непростом в использовании средств индивидуальной защиты / В.И. Тарасов, В.Е. Кошелев // Пермь: Стиль-МГ, 2007. - 280 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Зберовським О.В.  
Надійшла до редакції 19.11.13*

УДК 622.001.57

© В.Ф. Стоєцький, Л.В. Дранишников

## **ПРОГНОЗУВАННЯ НАСЛІДКІВ АВАРІЙ НА ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ВИРОБНИЧИХ ОБ'ЄКТАХ**

Виконано аналіз методик оцінки наслідків аварії на промисловому об'єкті з викидом шкідливих та небезпечних речовин в атмосферу і оцінки наслідків вибухів на потенційно небезпечних об'єктах. Показано, що наявні методики, істотно розрізняються за точністю, складністю та глибиною опрацювання процесів формування вражаючих чинників. Надано рекомендації щодо їх практичного використання при декларуванні промислової безпеки небезпечних виробничих об'єктів.

Выполнен анализ методик оценки последствий аварии на промышленном объекте с выбросами вредных и опасных веществ в атмосферу и оценки последствий взрывов на потенциально опасных объектах. Показано, что имеющиеся методики, существенно различаются за точностью, сложностью и глубиной исследования процессов формирования поражающих факторов. Приведены рекомендации относительно их практического использования при декларировании промышленной безопасности опасных производственных объектов.

The analysis of methods of estimation of consequences of failure is executed on an industrial object with the troop landings of harmful and dangerous matters in an atmosphere and estimations of consequences of explosions on potentially dangerous objects. It is shown that methods are, substantially differentiate after exactness, by complication and in depth working of processes of forming of striking factors. Recommendations are given in relation to their practical using for declaration of industrial safety of dangerous production objects.

Експертиза великих техногенних аварій і катастроф ХХ й початку ХХІ сторіччя засвідчила, що подальша розробка та реалізація програм науково-технічного розвитку сучасної цивілізації неможлива без системного наукового підходу до розв'язання проблем забезпечення безпечного функціонування структурно-складних систем і розробки математичного апарату для кількісної оцінки ризиків. Створення фундаментальних наукових, правових і економічних основ забезпечення безпеки є однією з цілей державної науково-технічної політики та державної науково-технічної програми з безпеки в промисловому, енергетичному, гірничодобувному, транспортному, будівельному, нафтогазовому й оборонному комплексах, зі створення нових матеріалів і технологій.

З 2001 р. діє Закон України про об'єкти підвищеної небезпеки (Відомості Верховної Ради.–2001.–№15.–с.73), з 2002р. – постанова Кабінету Міністрів України від 11.07.2002р. №956 (ДНАОП 0.00–8.22–02). Законодавчо встановлена та діє процедура про ідентифікацію і декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки (ОПН), а з 17.06.99р. затверджено «Положення щодо розробки планів локалізації і ліквідації аварійних ситуацій та аварій».

Відповідно до вимог закону розробка декларації безпеки передбачає ідентифікацію небезпеки, всебічний аналіз й оцінку ризиків аварії, а також аналіз ужитих заходів щодо попередження аварій і забезпечення готовності організації до експлуатації ОПН, розробку заходів, які спрямовані на зменшення масштабу наслідків аварії та розміру збитків, нанесених у разі аварії на ОПН. На кожній стадії аварії слід оцінити кількість небезпечних речовин, які застосовуються, встановити чинники ураження, оцінити наслідки дії чинників аварії на сусідні об'єкти з урахуванням їх взаємного розташування та впливу на людей, визначити масштаби зон руйнування, жертви серед населення й зараження місцевості. Оцінка наслідків аварії та окремих її стадій здійснюється за допомогою методик, наведених у нормативно-технічній документації та спеціальній літературі, аналіз же небезпеки подається у вигляді звіту. Для оцінки наслідків аварій, які супроводжуються викидом токсичних речовин, нині використовуються різні методики, які часто дають досить різні результати.

**Метою даної публікації** є визначення доцільної області використання наявних методик при декларуванні промислової безпеки небезпечних виробничих об'єктів.

Аварійні ситуації можуть призвести до розливу нафтопродуктів, утворення вибухонебезпечної хмари, вибуху, пожежі. Далі наведені деякі результати практичного використання моделей і програмних засобів для аналізу й оцінки наслідків аварійних вибухів паливно-повітряних сумішей (ППС) і кількісної оцінки наслідків аварії на промисловому об'єкті з викидом небезпечних хімічних речовин в атмосферу [1–5]. У збірник документів включені наступні методики: методика оцінки наслідків аварійних вибухів паливно-повітряних сумішей; загальні принципи кількісної оцінки наслідків вибухонебезпеки технологічних блоків; методика розрахунку маси речовини та радіусів зон руйнувань, які беруть участь у вибуху; методика оцінки наслідків хімічних аварій (ТОКСІ) [1,2]. Для оцінки наслідків аварій, які супроводжуються викидом токсичних речовин, використовується декілька методик [1,3,4]. Методики [3,4] спрямовані

на виконання завдань ЦО, оскільки вони дозволяють визначити тільки межі зони порогового ураження. Ці методики засновані на емпіричних і слабообґрунтованих співвідношеннях, які істотно завищують реальні наслідки аварій.

Методика ТОКСІ дозволяє визначити просторово-часове поле концентрацій небезпечної хімічної речовини (НХР), розміри зон хімічного зараження, що відповідають різному ступеню ураження людей, який визначається за інгалаційною токсодозою. На сьогодні існують три основних підходи для кількісного опису процесу розсіювання викиду газоподібних речовин в атмосфері:

- моделі Гаусівського розсіювання, або дисперсійні моделі;
- моделі розсіювання, що базуються на інтегральних законах збереження або в хмарі в цілому (миттєвий викид), або в поперечному перетині хмари (тривалий викид), іноді такі моделі називають моделями із зосередженими параметрами (одна з підгруп цих моделей називається моделями розсіювання «важкого газу»);

- моделі, побудовані на чисельному рішенні системи рівнянь збереження в їхньому оригінальному виді (методи прямого чисельного моделювання).

Наслідки викиду небезпечних речовин визначаються в три етапи: визначення потужності й швидкості викиду; визначення поширення забруднюючої речовини після викиду й визначення його впливу на досліджувані об'єкти.

Аварії в промисловості з викидом горючих рідин або зріджених газів можуть відбуватися як у замкнутих обсягах різних приміщень, так і в необмеженому просторі на відкритих технологічних установках. Однією з найбільш серйозних небезпек пожежовибухонебезпечних виробництв є газопарова хмара, що може утворитися при розгерметизації устаткування відкритих технологічних установок, руйнуванні резервуарів для зберігання й випаровування розливів рідин у необмеженому просторі. Утворення хмари може призвести до появи трьох типів небезпек: великої пожежі; вибуху газопароповітряних сумішей; токсичного впливу.

Аналіз аварійних ситуацій показує, що за аварійної розгерметизації устаткування й при наявності джерела запалення виникає пожежа розливів або смолоскипове горіння. Виникнення джерела запалення за умови небезпечних концентраційних меж поширення полум'я (у діапазоні від верхньої концентраційної межі до нижнього його значення), призводить до вибуху. При відсутності джерела запалення в початковий момент часу формується газопарова хмара, що розсіюється за напрямком вітру, становлячи токсичну небезпеку для прилеглих територій.

Розрізняють два основних типи вибуху газопароповітряних сумішей (ГППС) – детонаційний і дефлаграційний. При аварійних викидах горючих речовин на відкритих технологічних установках неможливо заздалегідь пророчити тип і швидкість вибухового перетворення хмари ГППС, тому що умови для виникнення детонації або дефлаграції з відповідною швидкістю фронту полум'я визначаються наприклад такими випадковими факторами як рівень чутливості небезпечної речовини до ініціювання вибухового процесу, наявністю обмеження в навколишньому просторі різними перешкодами, часом і місцем виникнення й потужністю джерела запалювання, ступенем відхилення локального складу

суміші від стехіометричного в момент запалення й т.п. Тому, при прогнозуванні наслідків аварій на пожежовибухонебезпечних об'єктах необхідно попередньо ідентифікувати найбільш імовірний режим вибухового перетворення хмари ГППС.

При детонації процес горіння в хмарі ГППС поширюється з надзвуковою швидкістю, і після закінчення детонації від границі хмари вибуху також з надзвуковою швидкістю починає рухатися повітряна ударна хвиля.

При розгляді детонаційних вибухів хмар ГППС користуються поняттям тротилового еквівалента, вважаючи ці вибухи аналогічними вибуху твердих (конденсованих) вибухових речовин (ВР). Однак такий підхід лише приблизно вірний при значних відстанях до осередку вибуху й приводить до серйозних похибок у ближній зоні, тому що на відміну від вибухів твердих ВР, що є точковим, вибух хмари ГППС є об'ємним.

Рівняння М.А. Садовського [5], що описує характер зміни надлишкового тиску  $\Delta P_\phi$  на фронті повітряної ударної хвилі при вибухах твердих ВР, у ряді методик пристосовано для оцінки наслідків детонаційних вибухів хмар ГППС.

Величина надлишкового тиску  $\Delta P$ , кПа, що виникає при згоранні газопароповітряних сумішей може визначатися як:

$$\Delta P_\phi = 100 \cdot \frac{\sqrt[3]{\alpha \cdot M_{\text{ГПВС}}}}{r} + \frac{\sqrt[3]{(\alpha \cdot M_{\text{ГПВС}})^2}}{r^2} + 1400 \cdot \frac{\alpha \cdot M_{\text{ГПВС}}}{r^3} \quad (1)$$

$$\Delta P_\phi = P_0 \cdot \left( 0,8 \cdot \frac{m_{\text{пр}}^{0,33}}{r} + 3 \cdot \frac{m_{\text{пр}}^{0,66}}{r^2} + 5 \cdot \frac{m_{\text{пр}}}{r^3} \right), \quad (2)$$

де  $P_0$  – атмосферний тиск, кПа (101 кПа);  $r$  – відстань від геометричного центру парогазового середовища, м;  $m_{\text{пр}}$  – наведена маса газу або пару.

Наведена маса газу або пару (кг) визначається за формулою:

$$m_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{cr}}}{Q_0} \cdot m \cdot z,$$

де  $Q_0$  – константа, рівна  $4,52 \cdot 10^6$  Дж/кг;  $Q_{\text{cr}}$  – питома теплота згорання газу або пару, Дж/кг;  $m$  – маса горючих газів або парів, що потрапили в результаті аварії в навколишній простір;  $z$  – коефіцієнт участі горючих газів і парів у горінні, що приймається рівним 0,1 для відкритого й 0,3 для замкнутого простору.

У рівнянні (1) маса речовини, що беруть участь у вибуху  $M_{\text{ГПВС}}$ , множить на коефіцієнт  $\alpha$ , рівний для ГППС  $\alpha \approx 0,7 - 1,0$  залежно від складу суміші. При цьому рівняння (1) справедливо для відстаней, де  $\Delta P_\phi \leq 500$  кПа. Рівняння (2), запропоноване Б.Е. Гельфандом [6], також ураховує тротиловий еквівалент вибуху газопароповітряних сумішей горючих речовин, але на відміну від (1), дозволяє врахувати вид горючої речовини, що беруть участь у вибуху, за його питомаю теплотою згорання.

Рекомендована у керівному документі Держтехнагляду Росії ПБ 09-170-97 [10] для оцінки наслідків вибухів ГППС емпірична залежність застосовується у світовій практиці для вибору безпечних відстаней від місць зберігання бри-

зантних ВР. Ця залежність отримана закордонними авторами на основі закону Хопкинсона в результаті досліджень реальних руйнувань будинків і споруд при вибухах авіаційних бомб під час Другої світової війни і має вигляд

$$r = K \cdot \frac{\sqrt[3]{W_T}}{\left[1 + \left(\frac{3180}{W_T}\right)^2\right]^{1/6}}, \quad (3)$$

$$W_T = \frac{0,4 \cdot q'}{0,9 \cdot q_T} \cdot z \cdot m,$$

де  $W_T$  – тротиловий еквівалент вибуху ГППС;  $K$  – константа відповідного рівня руйнувань;  $0,4$  – частка енергії вибуху парогазового середовища, яка витрачається безпосередньо на формування ударної хвилі;  $0,9$  – частка енергії вибуху тринітротолуолу (ТНТ), яка витрачається безпосередньо на формування ударної хвилі;  $q'$  – питома теплота згорання парогазового середовища, кДж/кг;  $q_T$  – питома теплота вибуху ТНТ, кДж/кг;  $m$  – наведена маса парогазових речовин, кг;  $z$  – частка наведеної маси парогазових речовин, що беруть участь у вибуху.

Авторами робіт [7] при порівняльному аналізі методик, на основі лінійної регресії, був установлений функціональний зв'язок  $\Delta P_\phi = f(K)$  і було відзначено, що модель (3), у якій вибух парової хмари рівняється з вибухом еквівалентної кількості ТНТ, не здатна представити явища, що відбуваються в ближній зоні об'ємного вибуху ГППС. При дефлаграційних вибухах максимальний надлишковий тиск на фронті повітряної ударної хвилі не залежить від кількості (маси) ГППС, що вибухає. Тому поняття тротилового еквіваленту при дефлаграційному вибуху не має сенсу.

Аналіз літературних джерел дозволяє стверджувати, що в нині немає апробованих математичних моделей вибухового перетворення газопароповітряних сумішей, які дозволяють однозначно прогнозувати швидкість поширення в хмарі фронту полум'я. Цілий ряд авторів і внутрішньовідомчих методик [1,8,11] пропонують для прогнозних оцінок режиму горіння використати експертну таблицю інституту хімічної фізики Російської академії наук (РАН), у якій речовини, здатні до утворення горючих сумішей з повітрям, розділені за чутливістю до ініціювання вибухових процесів, а навколишній простір розбитий на класи у відповідності зі ступенем його захаращеності.

Методики [1,2,8] призначені для кількісної оцінки параметрів повітряних ударних хвиль при вибухах паливоповітряних сумішей (ППС), що утворюються в атмосфері при промислових аваріях. За класом простору, що оточує місце займання хмари ППС і класом речовин, що беруть участь у вибуху з експертної таблиці Інституту хімічної фізики РАН визначається клас режиму горіння речовини. При оцінці передбачається часткова розгерметизація або повне руйнування обладнання, що містить горючу речовину в газоподібній, або рідкій фазі, викид цієї речовини в навколишнє середовище, утворення хмари (ППС), ініціювання ППС, вибухове перетворення (горіння або детонація) у хмарі ППС. Ме-

тодика дозволяє визначати ймовірний ступень ураження людей і ступень руйнування будинків від вибухового навантаження при аваріях з вибухами ППС. Береться до уваги, що в утворенні хмари ППС бере участь горюча речовина одного виду, в іншому випадку (для суміші декількох горючих речовин) характеристики ППС, що використовуються при розрахунках параметрів ударних хвиль, визначаються окремо.

Методика використовується при розробці планів заходів щодо запобігання надзвичайних ситуацій і зменшення величини збитку і величини дрейфу центра хмари ППС. За класом режиму горіння речовини визначається режим вибухового перетворення хмари ГППС і діапазон швидкостей поширення фронту полум'я  $\omega$ , м/с. Методика дозволяє урахувати 6 режимів вибухових перетворень хмар ППС: від детонації до дефлаграції зі швидкістю видимого фронту полум'я 100 м/с. Експертна оцінка діапазону швидкостей поширення фронту полум'я при вибухових перетвореннях хмари ГППС дозволяє для вихідних даних про поведінку газопарових хмари горючої речовини в навколишньому просторі, які складно формалізувати, кількісно оцінювати наслідки розвитку можливих аварій на прилеглий до потенційно небезпечного об'єкта території за тієї чи іншої моделі вибуху.

Відповідно до методики величину дрейфу центра хмари ППС слід приймати такою, що дорівнює 300 м при миттєвій розгерметизації резервуара і 150 м при тривалому витіканні, що відповідає 70 % всіх випадків аварій. Напрямок дрейфу хмари ППС варто приймати виходячи із напрямів вітрів даного регіону або розглядати найнебезпечніший випадок – спрямування вбік найближчого населеного пункту.

Незалежно від характеру розгерметизації, утворена хмара ППС у 20 % випадків розсіюється. Звідси виходить, що утворена маса речовини в хмарі у 20 % цих випадках приводить до забруднення повітряного середовища. В інших випадках відбувається загоряння хмари. Це з однаковою ймовірністю приводить до вибухового перетворення хмари або утворення вогневої кулі. Режим вибухового перетворення хмари ППС визначається за класом простору, що оточує місце загоряння хмари і за класом речовини.

Відповідно до обраного режиму вибухового перетворення, а також залежно від маси палива у хмарі і відстані, що розглядається, за методикою визначаються границі зон повних, сильних, середніх і слабких ступенів руйнування будинків і споруд житлової і промислової забудови. Розрахунки виконуються з використанням моделі оцінки інтенсивності теплових потоків для "вогневої кулі". Початковими даними для розрахунку параметрів ударних хвиль при вибуху хмари ППС є: характеристики горючої речовини, що міститься в хмарі ППС; агрегатний стан ППС (газова або гетерогенна суміш); середня концентрація горючої речовини в суміші; стехіометрична концентрація горючого газу з повітрям; маса горючої речовини, що міститься в хмарі; питома теплота згоряння горючої речовини. Основними структурними елементами алгоритму розрахунку є: визначення маси горючої речовини, що міститься в хмарі; визначення ефективного енергетичного запасу ППС; визначення очікуваного режиму вибухового перетворення ППС; розрахунок максимального надлишкового тиску й імпульсу фази стис-

кання повітряних ударних хвиль для різних режимів; визначення додаткових характеристик вибухового навантаження; оцінка вражаючого впливу вибуху ППС. Незалежно від характеру розгерметизації хмара ППС, що утвориться, в 20 % випадків розсіюється. Звідси витікає, що маса речовини в хмарі, що утворилася, в цих 20 % випадків призводить до забруднення повітряного середовища. В інших випадках відбувається запалення хмари. Це з рівною ймовірністю призводить до вибухового перетворення хмари або утворенню вогневої кулі.

Для обчислення параметрів повітряної ударної хвилі на заданій відстані  $r$  від центра хмари при детонації хмари ППС попередньо розраховується відповідна безрозмірна відстань за співвідношенням:

$$R_x = \frac{r}{(E/P_0)^{1/3}}$$

де  $r$  – відстань від центра хмари, м;  $P_0$  – атмосферний тиск, Па;  $E$  – ефективний запас енергії в суміші, Дж.

Далі розраховуються безрозмірний тиск  $P_x$ . У випадку детонації газової хмари і гетерогенної паливно-повітряної суміші розрахунок виконується за такими формулами:

$$P_x = \exp(-1,124 - 1,66 \ln(R_x) + 0,26(\ln(R_x))^2) \pm 10\%$$

$$P_x = \frac{0,125}{R_x} + \frac{0,137}{R_x^2} + \frac{0,023}{R_x^3} \pm 10\%;$$

У випадку дефлаграційного вибухового перетворення хмари ППС до параметрів, що впливають на величини надлишкового тиску та імпульсу позитивної фази, додається швидкість видимого фронту полум'я  $V_r$  і ступінь розширення продуктів згоряння  $\sigma$ . Для газових сумішей приймається  $\sigma = 7$ , для гетерогенних –  $\sigma = 4$ . Для розрахунку параметрів ударної хвилі при дефлаграції гетерогенних хмар величина ефективного енергетичного запасу суміші множиться на коефіцієнт  $(\sigma - 1)/\sigma$ .

Безрозмірний тиск визначається як:

$$P_{x1} = \left(\frac{V_r}{C_0}\right)^2 \frac{(\sigma - 1)}{\sigma} \left(\frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2}\right);$$

Після визначення безрозмірної величини тиску обчислюється відповідної розмірна величина:

$$\Delta P = P_x \cdot P_0,$$

де  $C_0$  – швидкість звуку в повітрі, м/с.

Деякі результати розрахунку надлишкового тиску при вибуху парів пропану в результаті протоки при розгерметизації автоцистерни за формулою (1) і за методикою ППС [1] (клас горючої речовини 2, середньо захарашений простір) представлені на рис. 1. Як видно з рис. 1 надлишковий тиск, обчислений за формулою (1) має суттєво більші значення на початковій ділянці кривої й шви-



дко падає з відстанню в порівнянні з методикою ТВС. Наприклад, на відстані 20 м  $\Delta P$  за формулою (1) буде дорівнює 2223 кПа, за методикою ТВС – 83,18 кПа, на відстані 100 м відповідно 59,9 кПа й 77,7 кПа, на відстані 500 м відповідно 5,7 кПа й 10 кПа. Аналогічні висновки можна зробити і за кривими імпульсу хвилі тиску. Відзначимо, що вибухові хвилі, що генеруються вибухами парогазових і дисперсних середовищ унаслідок малої щільності та інших особливостей процесів горіння, характеризуються нижчими параметрами, ніж вибухи речовин, що конденсуються. При швидкості поширення полум'я, що не перевищує швидкості звуку, виникає дефлаграційне, або вибухове, горіння, під час якого продукти згорання нагріваються до температури 1500–3000 °С і генеруються ударні хвилі з максимальним тиском 20...100 кПа [12]. В ударну хвилю переходить близько 40 % енергії вибуху. Методика ППС враховує клас займистої речовини та вид навколишнього простору. Для практичних розрахунків дефлаграційних вибухів можна рекомендувати методику РД 03-409-01 (ППС). Ту ж методику для детонаційних вибухів, але тільки в ближній і середній зонах осередку вибуху, за умови введення обмежень щодо відстані.

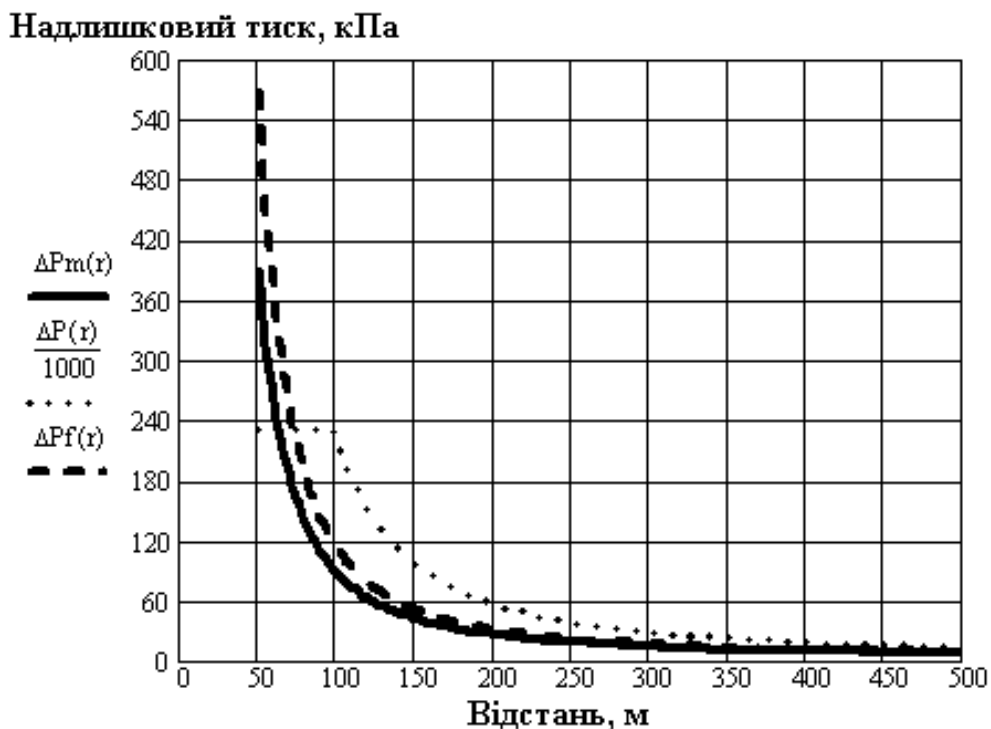


Рис. 1. Залежності надлишкового тиску (кПа) від відстані (м) при вибуху парів пропану в результаті витікання при розгерметизації автоцистерни (11,7 т), розраховані за різними методиками (суцільна крива – за формулою (2), пунктирна крива – за формулою (1), крапки – за методикою ППС)

### Висновки:

1. Методики для розрахунку детонаційних вибухів ГППС на основі тротилового еквівалента (ПБ 09-170-97, за Б.Є. Гельфанду [6], НПБ 107-97, ГОСТ Р 12.3.047-98 ССБТ) неадекватно відображають процес формування надлишкового тиску в детонуючій хмарі і на фронті повітряної ударної хвилі, значно зави-

щуючи (на кілька порядків) в ближній і середній зонах ураження і тільки наближено вірні на великих відстанях від центру вибуху.

2. Методику НТЦ «Промислова безпека» для детонаційних вибухів ГППС [1,2,8] можна використовувати для оцінок наслідків вибухів, але тільки в ближній і середній зонах осередку вибуху, за умови введення обмежень за відстанню.

3. Для практичних розрахунків дефлаграційних вибухів ГППС слід рекомендувати методику НТЦ «Промислова безпека».

#### Список літератури

1. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. Сборник документов. Серия 27. Выпуск 2. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: НТЦ по безопасности в промышленности и Госгортехнадзора России, 2002. – 206 с.
2. Моделирование аварийных ситуаций на опасных производственных объектах. Сборник документов. Серия 27. Выпуск 5. М.: ОАО НТЦ «Промышленная безопасность», 2006. – 250 с.
3. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте. РД 52.04.253-90. М.: Госгидромет СССР, 1991. – 23 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bgd.iate.obninsk.ru/metodika.doc>
4. Методика прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 10 квітня 2001 р. за № 326/5517. [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show>
5. Садовский М.А. Опытные исследования механического действия ударной волны взрыва // Труды сейсмологического института. М.-Л., 1945. – С. 67-89.
6. ГОСТ Р 12.3.047-98 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stroyoffis.ru/gost>
7. Козлитин А.М., Попов А.И., Козлитин П.А. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Вероятностные методы количественной оценки опасностей техно-сферы / А.М. Козлитин, А.И. Попов, П.А. Козлитин. - Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2002. - 178 с.
8. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливо-воздушных смесей. М.: Гос-технадзор России. НТЦ "Промышленная безопасность", 1996. – 22 с.
9. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. ПБ 09-540-03. Вып. 11. М: Науч.-техн. центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2004. – 108 с.
10. Управление техногенной безопасностью объектов повышенной опасности / В.Ф. Стоецкий, Л.В. Дранишников, А.Д. Есипенко и др. – Тернополь, «Изд-во Астон». 2006. – 424 с.
11. Мاستрюков Б.С. Безопасность в чрезвычайных ситуациях / Б.С. Мاستрюков. - М.: Изд. центр «Академия», 2003. – 336 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Голінком В.І.  
Надійшла до редакції 15.11.13*

## ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВЛИЯНИЯ ПРУДОВ-НАКОПИТЕЛЕЙ ШАХТНЫХ ВОД НА УРОВЕНЬ ЗАСОЛЕНИЯ ПОЧВ

Проанализировано влияние прудов-накопителей шахтных вод на экологическое состояние и степень засоления почв. Установлен уровень и характер засоления почв на территориях прилегающих к пруду-накопителю шахтных вод в б. Свидовок.

Проаналізовано вплив ставків-накопичувачів шахтних вод на екологічний стан та ступінь засолення ґрунтів. Встановлено рівень і характер засолення ґрунтів на територіях прилеглих до ставка-накопичувача шахтних вод в б. Свидовок.

The impact of mine water ponds on the ecological state and soil salinity degree is analyzed. The level and character of soil salinity in the territories adjacent to mine water pond in Svidovok gully is found.

Подземная добыча угля сопровождается комплексным негативным воздействием на все компоненты окружающей среды. В результате функционирования угледобывающих предприятий происходит деформация земной поверхности, подтопление и заболачивание территорий, загрязнение подземных и поверхностных вод, а также снижение способности водоемов самоочищаться. Такие нарушения приводят к засолению почв, снижению их плодородия, что в свою очередь вызывает уменьшение урожайности сельскохозяйственных культур и нарушение устойчивости экологических систем [1–3].

Серьезными источниками загрязнения поверхностных водоемов являются пруды-накопители шахтных вод [1, 4, 5]. На территории Днепропетровской области эксплуатируется 8 прудов-накопителей, из которых 5 расположены в районе Западного Донбасса. Большое число прудов-накопителей в сочетании с многочисленными хвосто- и водохранилищами различного масштаба приводит к формированию зон техногенной инфильтрации, что способствует устойчивому подъему уровней грунтовых вод повышенной минерализации, развитию процессов подтопления и вторичного засоления почв. Постоянное увеличение площадей деградированных почв и интенсивная дегумификация почв обуславливает необходимость изучения механизмов и особенностей развития процессов засоления почв в районах размещения прудов-накопителей шахтных вод.

Изучением экологических последствий влияния прудов-накопителей шахтных вод на экологическое состояние водных объектов занимались Кроик А.А., Пасечный В.Г., Божко В.Г., Чирва А.И., Захарченко М.А., Рыжикова И.А., Фиалко А.И., Шайдюк Н.И., Зубицкая Л.В. и др. Решению проблемы засоления почв посвящены исследования Срибного И.К., Свидерской С.М., Колесникова В.В., Буркинського Б.В., Галушкиной Т.П., Васильева А.Н., Долговой Т.И. и др. Однако в настоящее время недостаточно изучены вопросы засоления почв на территориях размещения прудов-накопителей шахтных вод угольных шахт.

Цель работы заключается в оценке степени воздействия прудов-накопителей шахтных вод на характер и степень засоления почв в угледобывающих регионах.

Основными факторами, приводящими к развитию вторичного засоления территорий, прилегающих к прудам-накопителям, являются:

- горизонтальная и вертикальная инфильтрация шахтных вод с повышенной минерализацией из технических водоемов в почвенные и водоносные горизонты;

- повышение уровня залегания грунтовых вод, вынесение легкорастворимых солей из низлежащих горизонтов в верхние почвенные горизонты;

- изменение экологических показателей почвы, приводящее к снижению плодородия, экологического потенциала почв, их деградация вследствие подщелачивания и уменьшения содержания гумуса.

Ускорение миграции загрязняющих веществ из прудов-накопителей в почвенно-растительный слой приводит к загрязнению почв, увеличению содержания в них солей, как следствие, формируются почвы с разной степенью и химизмом засоления [3–5]. Кроме того, усиление негативного влияния процессов угледобычи на состояние окружающей среды может происходить во время ликвидации нерентабельных шахт [6, 7]. При закрытии шахт способом «мокрой» консервации затопленное минерализованными шахтными водами отработанное шахтное пространство становится источником поступления солей и различных загрязняющих веществ в подземные воды и почвы. При этом происходит загрязнение подземных вод, подтопление, проседание и заболачивание земной поверхности, а также локальные множественные поступления минерализованных шахтных и загрязненных сточных вод в поверхностные и подземные водные объекты.

Главными источниками загрязнения поверхностных водоемов на территории Западного Донбасса являются пруды-накопители шахтных вод, расположенные в балках Косьминная, Таранова и Свидовок. Причиной негативного влияния прудов-накопителей на состав подземных вод является их конструктивное несовершенство. Пруды-накопители расположены в эрозионных врезках балок и имеют в основании от 8 до 25 м суглинков с коэффициентом фильтрации от 1 до 3 м/сут., что обеспечивает активную инфильтрацию и превращает пруды-накопители в крупные источники загрязнения подземных и поверхностных вод, повышения их минерализации, а также засоления почв [4, 5].

Следует отметить, что с целью предотвращения фильтрации высокоминерализованных вод из пруда-накопителя в балке Свидовок в днище и откосах пруда был создан химический экран, который оказался мало эффективным и не смог предотвратить инфильтрацию. Одной из причин неэффективности применения экранирующих покрытий в условиях Западного Донбасса является активное действие в покрывающих породах напряжений растяжения, имеющих неравномерный характер.

Для изучения процессов вторичного засоления почв, выявления региональных особенностей этих процессов, их влияния на изменение плодородия почв была выбрана территория, прилегающая к пруду-накопителю шахтных вод расположенного в балке Свидовок. В пруд-накопитель поступает вода шахт «Терновская», «Благодатная» и из пруда-накопителя б. Таранова. Объем пруда-накопителя – 5,3 млн. м<sup>3</sup> (рис. 1). Воды, сбрасываемые шахтами, высокоминер-

рализованые – 3,2 г/дм<sup>3</sup>. Минерализация воды в пруде-накопителе максимальная по сравнению с другими техническими водоемами Западного Донбасса и составляет 22-25 мг/дм<sup>3</sup> [4, 5].

Пробы почв отбирали на расстояниях 100, 500, 1000, 1500 и 2000 м от пруда-накопителя в четырех направлениях света. В отобранных пробах было определено содержание водорастворимых солей, тяжелых металлов и гумуса.



Рис.1. Сброс шахтных вод в пруд-накопитель б. Свидовок

Результаты химического анализа содержания водорастворимых солей, гумуса и показатель рН в исследуемых почвах приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты химического анализа почв на территории, прилегающей к пруду-накопителю в б. Свидовок  
(в числителе – мг-экв на 100 г, в знаменателе – %)

№	∑ солей, %	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	Гумус, %	рН
1	0,18	<u>0,3</u> 0,0183	<u>0,2</u> 0,0072	<u>2,1</u> 0,1000	<u>0,5</u> 0,0100	<u>0,3</u> 0,0036	<u>1,8</u> 0,0419	0,0419	8,5
2	0,22	<u>0,3</u> 0,0183	<u>0,2</u> 0,0072	<u>2,6</u> 0,1248	<u>1,0</u> 0,0200	<u>0,2</u> 0,0024	<u>1,9</u> 0,0443	0,0383	8,3
3	0,21	<u>0,3</u> 0,0183	<u>0,2</u> 0,0072	<u>2,5</u> 0,1200	<u>0,7</u> 0,0140	<u>0,3</u> 0,0036	<u>2,0</u> 0,0466	0,0403	8,2
4	0,20	<u>0,3</u> 0,0183	<u>0,2</u> 0,0072	<u>2,3</u> 0,1104	<u>0,6</u> 0,0120	<u>0,3</u> 0,0036	<u>1,9</u> 0,0443	0,0419	8,6
5	0,11	<u>0,3</u> 0,0183	<u>0,2</u> 0,0072	<u>1,0</u> 0,0480	<u>0,7</u> 0,0140	<u>0,1</u> 0,0012	<u>0,7</u> 0,0163	0,0429	8,8

Анализ данных табл. 1 выявил, что почвы на исследуемой территории характеризуются химизмом засоления двух типов: сульфатным по анионному со-

ставу и натриевым по катионному со слабой степенью засоления в незасоленных почвах, а также кальциево-натриевым по катионному составу, и сульфатным по анионному в незасоленных почвах. Поступление ионов натрия в почвенный поглощающий комплекс (ППК) почв, ведет к его разрушению. Кроме того, накопление ионов натрия в почвенном растворе ухудшает условия и качество роста растений. Внедрение  $\text{Na}^+$  в ППК из нейтральных солей возможно только при большом преобладании в растворе натрия над щелочноземельными катионами (до 80 %  $\text{Na}^+$  против 20 %  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ ). В исследуемых образцах этот процент составляет от 70 % на минимальном удалении от пруда-накопителя и до 46 % на расстоянии 2000 м. Внедрение в ППК почв обменных катионов натрия характеризует начало новой стадии в развитии почвы – стадию солонца.

Влияние процесса соленакопления в почвенных системах на содержание в них органического вещества (гумуса) представлено на рис. 1.

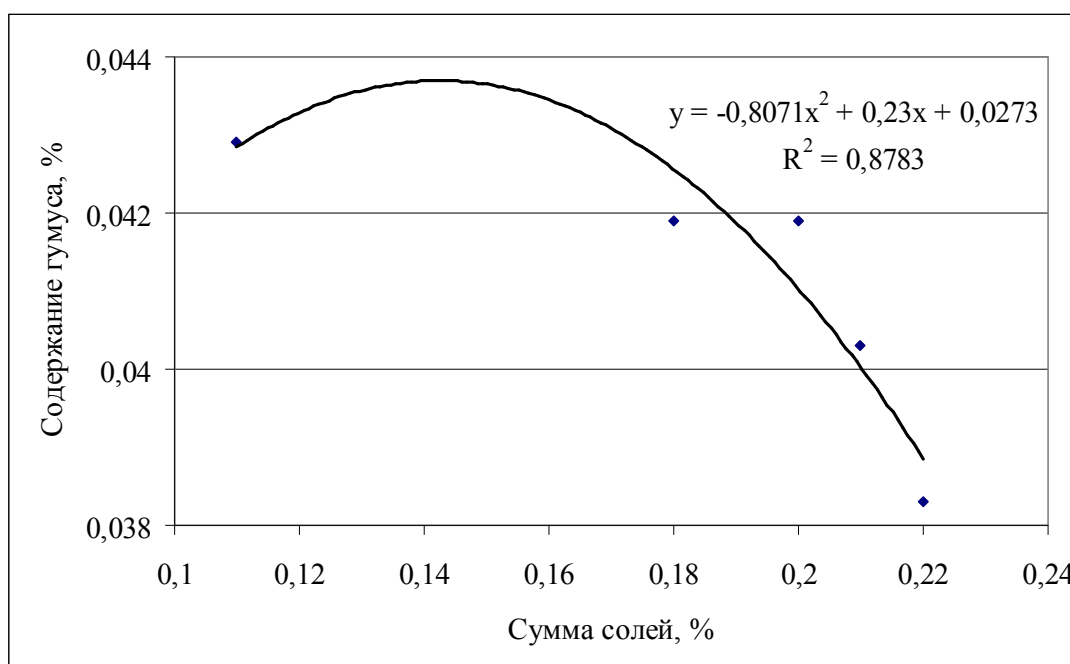


Рис. 1. Зависимость изменения количества гумуса в почвах от степени их засоления

Реакция почвенной среды может изменяться под воздействием различных факторов. В том числе под воздействием изменения концентрации солей в почвенном растворе. Графически зависимость этих показателей друг от друга в почвах, прилегающих к пруду в б. Свидовок представлена на рис. 2.

Анализ данных рис. 2 выявил, что для сульфатного, натриевого типа засоления почв характерно снижение показателя рН почвы при увеличении степени ее минерализации, что объясняется следующим: при данном типе засоления ( $\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} \geq 4$ ) в почвенный поглощающий комплекс внедряется катион  $\text{Na}^+$ , вытесняя кальций и магний; соли из верхних горизонтов выщелачиваются, коллоиды, насыщенные натрием, пептизируются, вымываются на определенную глубину, где образуют солонцовый горизонт. Процесс носит циклический характер, поскольку при поднятии уровня минерализованных грунтовых

вод, характерного для района исследования, соли из низлежащих горизонтов снова выносятся на поверхность.

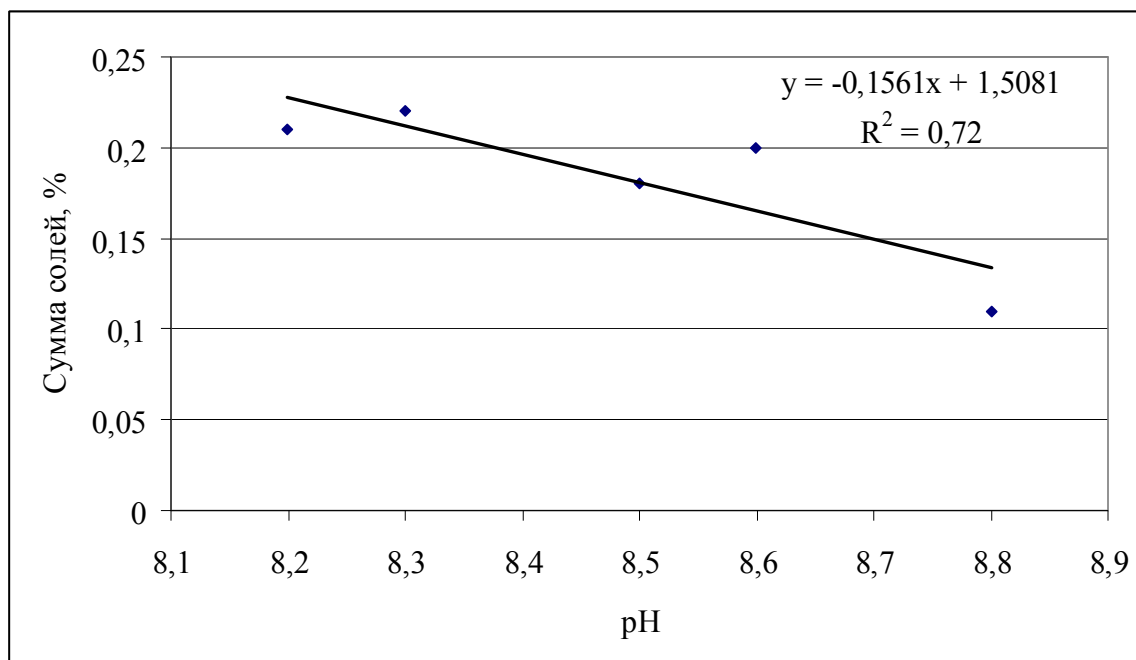


Рис. 2. График зависимости уровня засоления почв от показателя pH почвенной среды в условиях сульфатного, натриевого засоления

В табл. 2 приведены результаты определения концентрации тяжелых металлов в исследуемых почвах.

Таблица 2

Концентрация тяжелых металлов в почвах прилегающих к пруду-накопителю шахтных вод, мг/кг сухого веса

Тяжелые металлы	№ пробы					ПДК
	1	2	3	4	5	
Mn	31,15	32,89	32,41	32,48	41,49	140
Zn	0,87	0,62	0,53	0,51	0,80	23
Cu	0,35	0,26	0,19	0,03	1,13	3
Ni	1,82	1,50	1,30	1,12	1,08	4
Pb	4,72	4,39	4,85	3,02	3,66	30
Co	1,07	0,80	0,91	0,57	0,3	5
Cd	0,13	0,10	0,09	0,08	0,06	5

Анализ данных табл. 2 выявил отсутствие превышений предельно-допустимых концентраций по всем исследуемым тяжелым металлам.

В результате проведенных исследований установлены зависимости между показателем pH и концентрациями тяжелых металлов в почвах:

$$\text{Ni: } y=3,1123x^2-9,3082x+15,155; \quad R^2=0,868$$

$$\text{Pb: } y=-0,241x^2+1,6846x+5,7471; \quad R^2=0,626$$

$$\text{Co: } y=290,58x^2-60,134x+11,397; \quad R^2=0,805$$

$$\text{Cu: } y=1,0312x^2-0,9206x+8,5307; \quad R^2=0,660$$

$$\text{Mn: } y=0,014x^2-0,9857x+25,657; \quad R^2=0,626$$

Между концентрациями тяжелых металлов и степенью засоления почв:

$$\text{Mn: } y=0,0216x-0,4922; \quad R^2=0,901$$

$$\text{Cu: } y=-0,0955x+0,2214; \quad R^2=0,868$$

$$\text{Co: } y=-0,4788x^2+0,7454x-0,0702; \quad R^2=0,999$$

$$\text{Zn: } y=-0,9206x^2+1,2087x-0,1748; \quad R^2=0,985$$

Полученные закономерности позволяют прогнозировать степень засоления почв, а также уровень их загрязнения тяжелыми металлами.

Установленные закономерности и характер засоления почв находящихся в зоне влияния прудов-накопителей шахтных вод позволяют проводить оперативную оценку степени засоления почв, а также обосновывать и внедрять высокоэффективные мероприятия, позволяющие улучшить экологическое состояние почв в районах угледобычи. Для обеспечения экологически безопасной эксплуатации шламонакопителей, хвостохранилищ, прудов-накопителей необходимо проводить комплекс мероприятий направленных на повышение степени их гидроизоляции, а также усовершенствование технологий деминерализации шахтных вод, что снизит техногенную нагрузку на почвы и водные объекты в угледобывающих регионах Украины.

#### Список литературы

1. Кроик А.А. Оценка антропогенной нагрузки на подземные воды Западного Донбасса в зоне влияния прудов-накопителей шахтных вод / А.А. Кроик, Н.В. Белоус, Н.Е. Шрамко // Сб. научн. тр. ДДУ «Гидрохимические исследования поверхностных и подземных вод». – 1995. – С. 3-17
2. Яцечко Н.Е. Геохимическая оценка влияния прудов-накопителей шахтных вод на подземные воды Западного Донбасса / Н.Е. Яцечко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Гірничо-геологічна. Випуск 32 – Донецьк, ДонНТУ, 2001. – С. 167-168.
3. Перкова Т.І. Розробка й ідентифікація моделі підземної міграції мінералізованих шахтних вод у зоні розташування водовідстійників Центрального Кривбасу / Т.І. Перкова, Д.В. Рудаков // Геолого-мінералогічний вісник. – № 1 (27). – 2012. – С. 71-79.
4. Лаврик М.О. Сбросные шахтные воды пруда-накопителя «Свидовок» как фактор техногенного риска изменения галохимического состояния почв / М.О. Лаврик // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2012. – Т. № 1. – С. 98-103.
5. Лаврик М.О. Геоэкологические последствия ведения угледобычи для почв Западного Донбасса / М.О. Лаврик // Горный информационно-аналитический бюллетень. –2009. – Т.5. – № 12. – С. 278-285.
6. Ермаков В.Н. Развитие процессов подтопления земной поверхности под влиянием закрывающихся шахт / В.Н. Ермаков, А.П. Семенов, О.А. Улицкий, Е.П. Котелевец, А.В. Тарахало // Уголь Украины. – 2001. - №6. – С. 12-13.
7. Бузило В.І. Шляхи забезпечення екологічної безпеки при ліквідації вугледобувних підприємств / В.І. Бузило, А.В. Павличенко, С.Л. Кулина, В.В. Кіященко // Розробка родовищ: щорічний науково-технічний збірник. Д.: ТОВ ЛізуновПрес, 2013. – С. 437-440.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Колесником В.Е.  
Надійшла до редакції 11.11.13*



## **ИССЛЕДОВАНИЕ ХРАНИЛИЩ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ РАДИОАКТИВНЫХ РУД МЕТОДОМ ЕСТЕСТВЕННОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ДНЕПРОДЗЕРЖИНСКЕ**

В результате комплексирования двух геофизических методов – радиометрической съёмки и замеров естественного импульсного электромагнитного поля Земли удалось не только определить границы хвостохранилищ опасных радиоактивных отходов в пределах г. Днепродзержинска, но и установить техническое состояние ограждающих их дамб.

В результаті комплексування двох геофізичних методів – радіометричної зйомки і вимірів природного імпульсного електромагнітного поля Землі вдалося не лише визначити межі хвостосховищ небезпечних радіоактивних відходів у м. Дніпродзержинську, але й встановити технічний стан гребель, що огорожують їх.

As a result of complexing of two geophysical methods – radioactivity survey and measuring of the natural impulsive electromagnetic field of Earth it was succeeded not only to define the borders of radio-active waste placements within Dneprodzerzhinsk town, but also set the technical state of dams, which are the barriers to them.

Город Днепродзержинск Днепропетровской области долгое время был одним из центров по переработке уранового сырья. Благодаря этому, в городе сложилась напряженная ситуация с радиационным загрязнением почв, воздуха и водной среды, что отрицательно сказывается на социальных и экономических аспектах здоровья и работы населения. Вокруг предприятий, задействованных в технологических процессах уранового производства, накопилось большое количество соответствующих отходов, находящихся в хвостохранилищах и отстойниках. Параметры таких объектов, объемы отходов, уровни и дозы радиоактивного излучения в основном известны; они находятся на балансе государственного предприятия «Барьер», которое осуществляет мониторинг и проводит мероприятия по улучшению экологической ситуации в регионе.

Вместе с тем, существует ряд мелких хвостохранилищ, которые создавались на первых этапах работы урановых предприятий и находились в 50-х годах XX века далеко за пределами городской черты. К настоящему времени из-за разрастания города некоторые из них оказались в селитебной зоне. Этому немало способствовала закрытость специфической информации и утрата технической документации, случившаяся в период после распада СССР и остановки работы предприятий. В итоге территории в непосредственной близости от хвостохранилищ были застроены жилыми домами и производственными сооружениями, что существенно осложняет, а иногда делает невозможным, изучение положения границ таких экологически опасных объектов традиционными методами – радиометрией, разведочной геофизикой и бурением. Поэтому задача оконтуривания хвостохранилищ и определения объема отходов доступными дистанционными методами продолжает оставаться актуальной, тем более что сроки эксплуатации многих ограждающих дамб подошли к концу или исчерпаны.

Целью работы является изучение возможностей применения геофизического метода естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИ-ЭМПЗ) для оконтуривания границ хвостохранилищ на поверхности.

Идея применения метода ЕИЭМПЗ заключается в допущении, что при формировании хвостохранилища отходы складировались в жидком или пульпообразном состоянии. Несмотря на усадку и удаление растворов на сегодняшний день они остаются более обводненными, нежели окружающие их грунты и ограничивающие дамбы. Благодаря тому, что естественное электромагнитное излучение Земли способно поглощаться в зонах обводнения или повышенного увлажнения, становится возможным отделить отходы от пород и дамб вследствие их различных физико-механических свойств.

В качестве объекта для исследований выбраны хвостохранилища по ул. Лазо в г. Днепродзержинске (рис. 1-а). Одно из них – нижнее (рис. 1-б), достаточно хорошо изученное в результате выполнения исследовательских работ в 2005-2008 годах с применением эманационной съемки[1], послужило эталоном для сопоставления с данными ЕИЭМПЗ. Другое – верхнее (рис. 1-в) имеет предположительные контуры и, по выражению бывшего работника предприятия на пенсии, «находится где-то здесь». К сожалению, подобная «привязка» характерна для многих мелких хвостохранилищ в черте города.

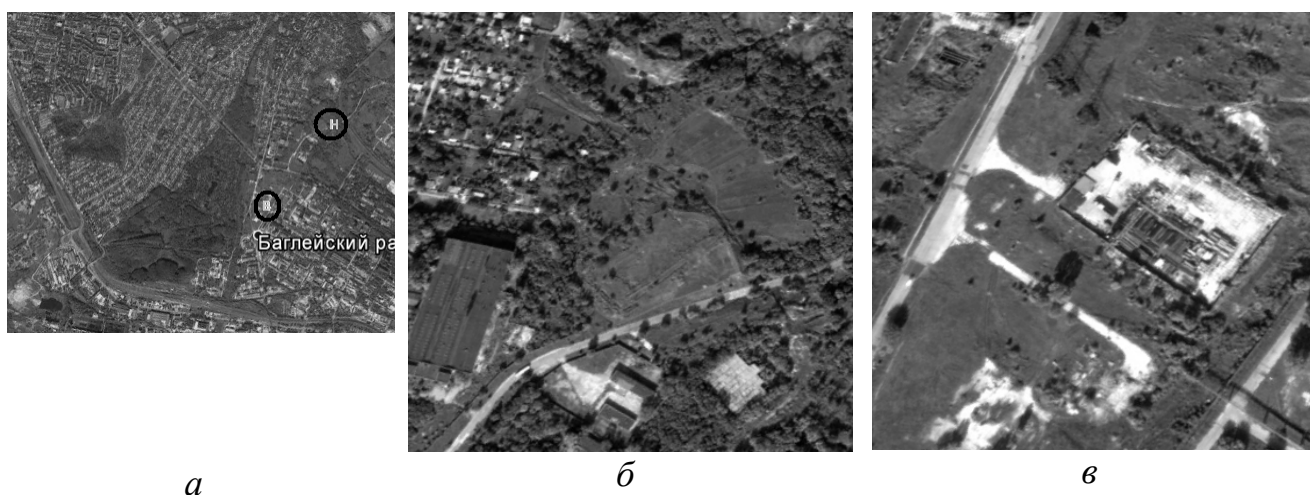


Рис. 1. Схема расположения нижнего (н) и верхнего (в) хвостохранилищ на ул. Лазо в г. Днепродзержинск (а) и общий вид нижнего (б) и верхнего (в) хвостохранилищ (по данным интернет-портала Google Earth)

Хвостохранилище было сформировано и находилось в эксплуатации в 50-60-х годах прошлого века. В нем содержатся отходы производственного объединения «Азот», использовавшего некоторое время в технологическом процессе продукты передела урановых руд производственного объединения «Приднепровский химический завод» (ПО «ПХЗ»). В период 1949–1991 гг. ПО «ПХЗ» осуществляло переработку урансодержащих руд, рудных концентратов и шлаков, которые образовались при выплавке чугуна из железоурановых руд Криворожья. Остатки гидрометаллургического производства закиси-окиси урана ней-

трализовались щелочными растворами и накапливались в прилегающих к территории завода глиняных карьерах и оврагах, которые расположены на склонах и террасе р. Днепр. Некоторое время на производственном объединении «Азот» использовалась технология извлечения фосфатов из фосфорсодержащих растворов (кислот) основного производства ПО «ПХЗ». Растворы содержали большое количество радия-226, свинца-210, полония-210 и других радионуклидов уранового ряда, которые затем попали в хвосты.

Для большинства мест накопления отходов производства построены дамбы, но дно и борта не имеют специальной инженерной защиты для долговременного и безопасного содержания отходов.

Хвостохранилище по ул. Лазо расположено в промышленной зоне ПО «Азот» в овраге, который протягивается с юго-запада на северо-восток. После заполнения хвостохранилище было покрыто слоем грунта толщиной от 2 до 4 м. В настоящий момент поверхность не спланирована и имеет вид неорганизованной свалки. Оно граничит на севере и северо-западе с незастроенной территорией, на востоке находится промышленная площадка ПО «ПХЗ», на юге - территории промышленных предприятий, на западе - жилая зона (индивидуальная застройка), вся территория кроме западного участка ограждена колючей проволокой (рис. 2). По дну оврага проходит закрытый действующий коллектор для сточных промышленных вод.

В пределах территории хранилища проложена автомобильная дорога, в месте пересечения тела дамбы она находится на 4 м ниже поверхности отходов.

В результате предшествующих исследований [1] выявлено, что в северной части территории отходы нижнего хвостохранилища по ул. Лазо классифицируются по содержанию альфа – излучающих радионуклидов как низкоактивные радиоактивные отходы второй категории. Глубина залегания технологических отходов в северной части территории от 2,0 м, а под дорогой – до 0,5 м. По данным гамма-съёмки, верхний слой покрывающих отходы грунтов не имеет значительных загрязнений и не представляет непосредственной угрозы для населения в настоящее время. В южной части территории, где расположено верхнее хвостохранилище, прилегающее к ПО «Азот», технологических отходов с повышенной радиоактивностью не обнаружено.

В качестве направления дальнейших исследований авторы [1] рекомендовали провести дополнительные работы для оценки надежности существующих гидро- и радиозащитных барьеров и определения объёмов отходов в хвостохранилищах. При этом было отмечено, что такие работы могут столкнуться с рядом трудностей. Например, в случае отсутствия радионуклидов в отходах применение радиометрических наблюдений не даёт ожидаемого результата. При просачивании техногенных грунтовых вод, загрязнённых радионуклидами, через тело дамбы, она может приобрести повышенный радиационный фон, из-за чего затухает контрастность аномалий. Буровые работы также ограничены следующими соображениями: во-первых, их дороговизной; во-вторых, труднодоступностью некоторых хвостохранилищ для размещения буровой установки; в-третьих, в случае вскрытия буровым снарядами участков (зон, линз) с повышенной радиоактивностью потребуются дезактивация механизмов, которая не всегда будет успешной.

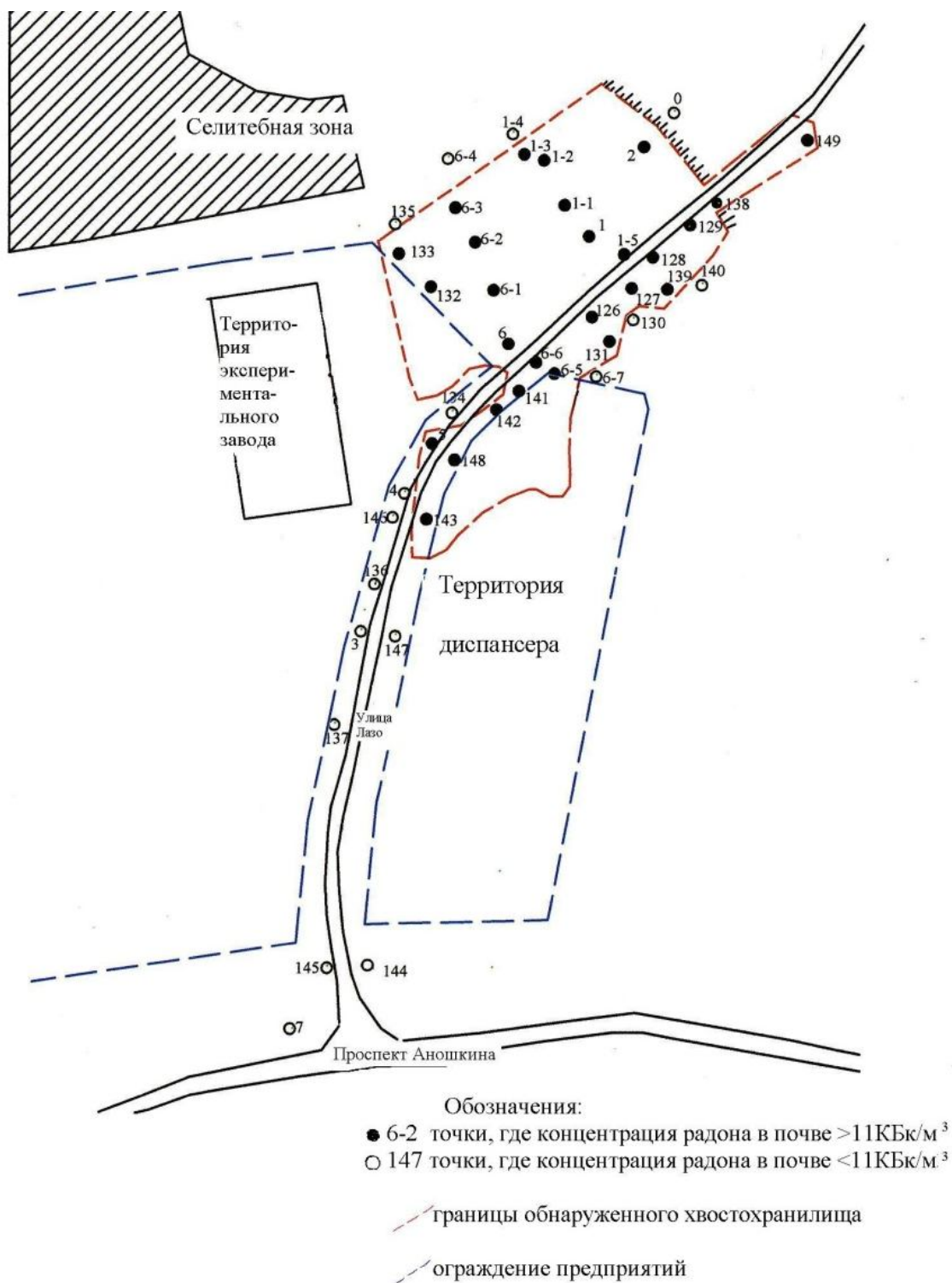


Рис. 2. Схематический план нижнего хвостохранилища по ул. Лаза (по данным [1])

Исходя из отмеченных соображений, в 2013 году проведены опытно-методические работы методом ЕИЭМПЗ для оценки его возможностей в установлении границ хвостохранилищ. Подробное описание метода и оборудования приведено в [2].

Полевые работы методом ЕИЭМПЗ проводились в профильно-площадном варианте. Расстояние между профилями – 3 м, между точками наблюдений – 3 м. По данным полевых исследований построены карты плотности

потока магнитной составляющей ЕИЭМПЗ по трем антеннам, ориентированным по направлениям С-Ю, З-В и вертикально. В основу интерпретации положена стандартная методика обработки геофизических данных и предположение о том, что разуплотненным обводненным отложениям хвостохранилища должны соответствовать в поле ЕИЭМПЗ зоны слабодифференцированного, «размытого» поля с пониженными значениями плотности потока импульсов. Рассмотрим результаты исследований.

#### 1. Нижнее хвостохранилище на ул. Лазо.

Карты-схемы плотности потока импульсов магнитной составляющей ЕИЭМПЗ приведены на рис. 3.

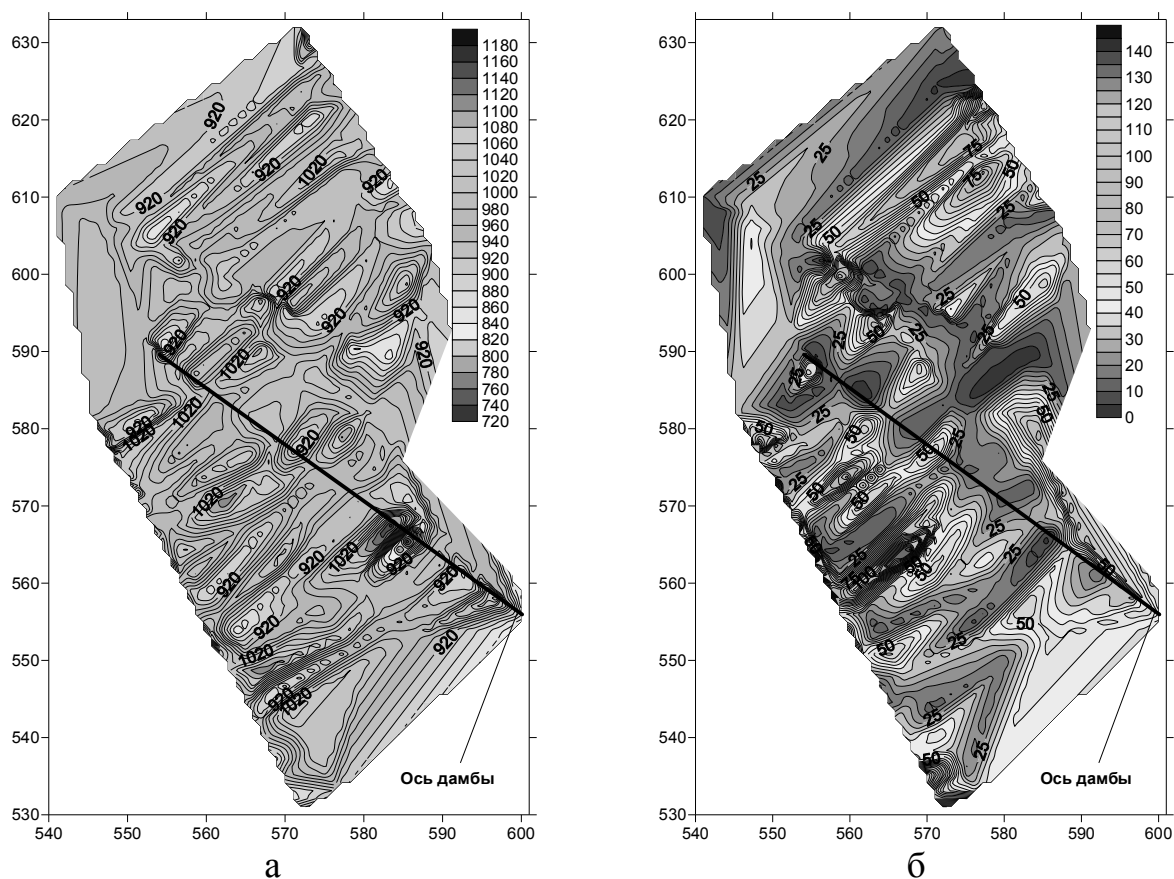


Рис. 3. Карты-схемы плотности потока импульсов магнитной составляющей ЕИЭМПЗ для нижнего хвостохранилища по ул. Лазо: а – по данным вертикальной антенны; б – по данным антенны запад-восток. Система координат условная в метрах. Градационная шкала – количество импульсов ЕИЭМПЗ

В результате совместной интерпретации карт плотности потока магнитной составляющей ЕИЭМПЗ по трем антеннам построена схема, на которой выделены зоны обводнения и разуплотнения в теле дамбы, оползни в нижнем бьефе дамбы, а также предположительные границы хвостохранилища (рис. 4). Центральная часть района исследований, судя по ЕИЭМПЗ, представлена плотными слабообводненными породами, предположительно здесь расположен водораздел между двумя балками либо борт балки. В нижнем бьефе дамбы на-

блюдаются три оползневые зоны, что обусловлено чрезмерным увлажнением тела дамбы. Визуальный анализ тела дамбы показал, что на гребне дамбы формируется еще одна трещина отрыва, которая может привести к образованию четвертого оползня. Дренажная система для отвода воды из хвостохранилища засорена и не выполняет полностью свои функции.

Учитывая результаты исследований, следует заметить, что необходимы неотложные меры по укреплению тела дамбы, а также по очистке дренажной системы, в противном случае ситуация может стать неуправляемой и экологически опасной.

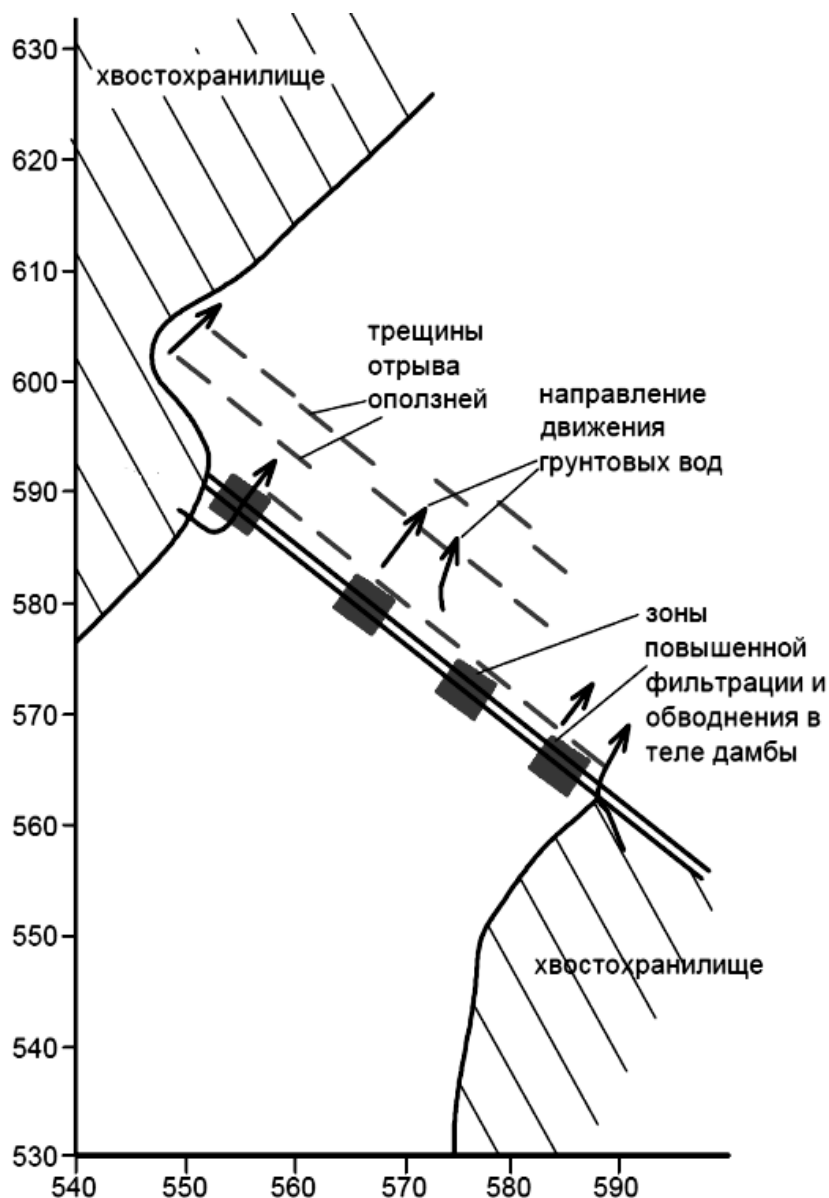


Рис. 4. Результаты интерпретации карт плотности потока магнитной составляющей ЕИЭМПЗ для нижнего хвостохранилища на ул. Лазо

## 2. Верхнее хвостохранилище по ул. Лазо.

Карты-схемы плотности потока импульсов магнитной составляющей ЕИЭМПЗ приведены на рис. 5.

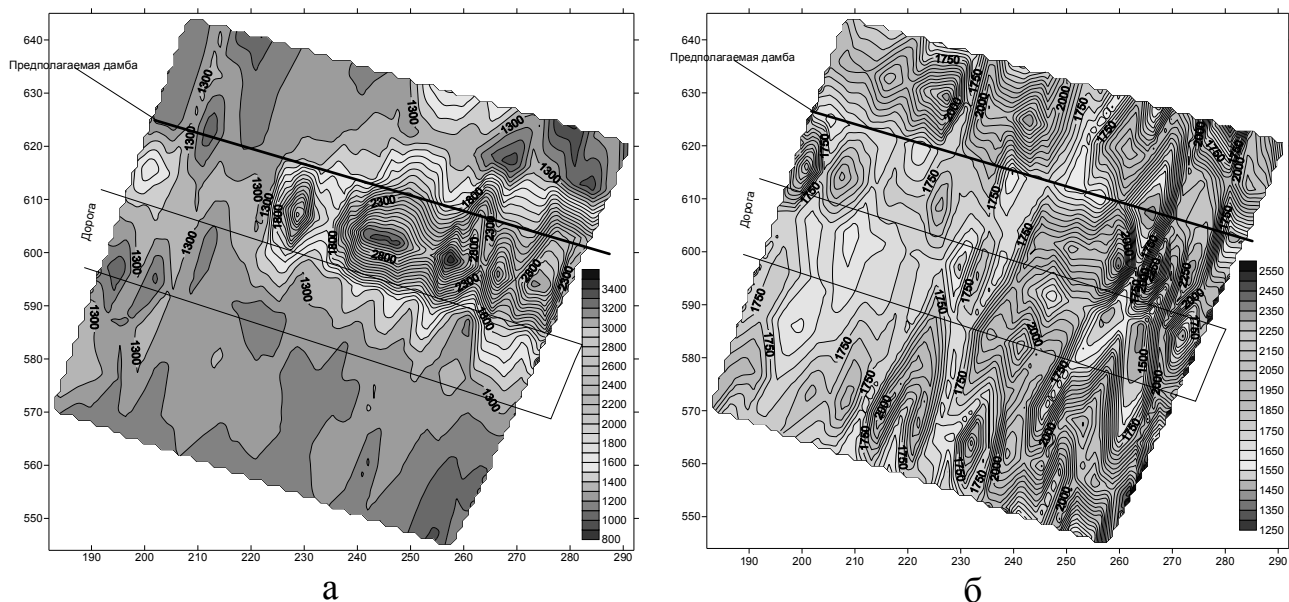


Рис. 5. Карты-схемы плотности потока импульсов магнитной составляющей ЕИЭМПЗ для верхнего хвостохранилища по ул. Лазо: а – по данным вертикальной антенны; б – по данным антенны запад-восток. Система координат условная в метрах. Градационная шкала – количество импульсов ЕИЭМПЗ

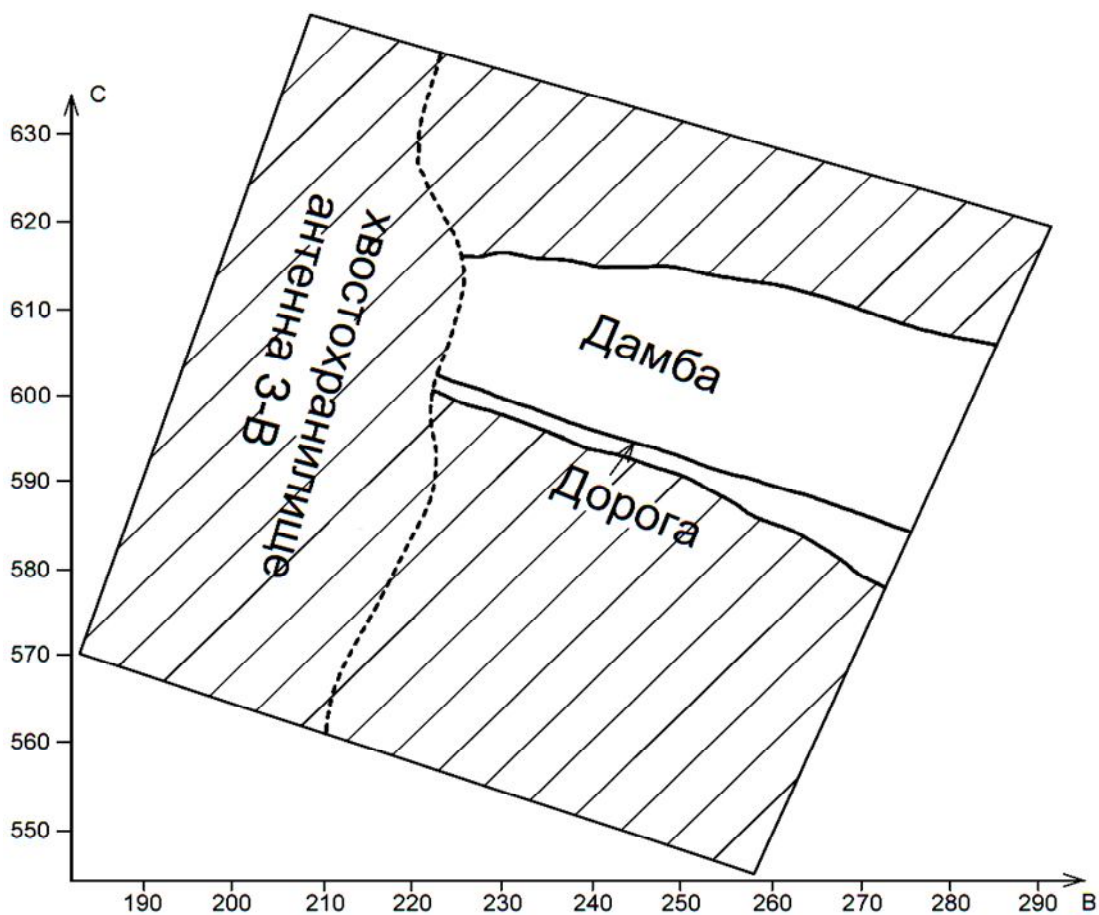


Рис. 6. Результаты совместной интерпретации карт плотности потока магнитной составляющей ЕИЭМПЗ для верхнего хвостохранилища на ул. Лазо

Интерпретация карт плотности потока магнитной составляющей ЕИЭМПЗ дает неоднозначные результаты. По двум картам, построенным по данным антенн, ориентированных вертикально и север-юг, повышенными значениями выделяются дамба и часть дороги, весь остальной участок заполнен отходами, границ хвостохранилища с естественным залеганием горных пород не выявлено. Интерпретация материалов карты с антенны запад-восток позволяет выделить часть дамбы и дороги, которые фиксируются повышенными значениями поля. Кроме того, на северо-западе и западе участка съемки выделяется зона слабоаномального поля, соответствующая породам хвостохранилища. Остальная часть территории представлена ненарушенными в естественном залегании горными породами. Результаты интерпретации этой карты сомнительны, поскольку хвостохранилище не может располагаться вне ограничивающей его дамбы. Причиной слабой достоверности этой карты может быть наличие в непосредственной близости от участка работ ЛЭП, которая проходит с севера на юг и создает помехи техногенного характера для антенны широтной ориентировки. Совместная интерпретация всех трёх карт приведена на рис. 6.

**Заключение.** Анализ исследований на хвостохранилищах, содержащих повышенные концентрации природных радионуклидов с помощью эманационной съемки и съёмки ЕИЭМПЗ в пределах двух хвостохранилищ показал хорошую сходимость результатов. Комплексование геофизических методов позволило существенно уточнить границы хвостохранилищ, а методом ЕИЭМПЗ установить и техническое состояние дамбы, ограждающей опасные отходы производства. В частности, обозначены пути фильтрации растворов из хвостохранилища, определено местоположение зарождающегося оползня в теле дамбы.

Таким образом, для выявления границ хвостохранилищ, содержащих повышенные концентрации природных радионуклидов и построенных в 50–60-е годы прошлого века, документация по которым утеряна, можно предложить комплекс геофизических методов, состоящий из радиометрических исследований (эманационной съемки) и съёмки ЕИЭМПЗ.

#### Список литературы

1. Сорока Ю. Н. Применение геофизических методов для поиска и оконтуривания старого захороненного хвостохранилища в селитебной зоне / Ю. Н. Сорока, К. Ю. Сорока, А. И. Молчанов [и др.] //Зб. статей V Міжнар. наук.-практ. конф. [«Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення»], (Алушта, 7-11 вересня 2009). – Т. 2. – Харків, 2009. – С.197-202.
2. Пикареня Д. С. Опыт применения метода естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) для решения инженерно-геологических и геологических задач / Д.С. Пикареня, О. В. Орлинская. – Днепропетровск: Изд-во «СВИДЛЕР», 2009. – 120 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Зберовським О.В.  
Надійшла до редакції 10.11.13*



## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ОПАСНОГО ВЕЩЕСТВА

Построена численная модель для расчета эффективности защиты здания от загрязнения при миграции в атмосфере токсичного вещества. Для защиты используется метод нейтрализации. Модель основана на уравнении переноса примеси и уравнении движения идеальной жидкости. Для численного интегрирования применяются неявные разностные схемы расщепления. Приведены результаты вычислительного эксперимента.

Побудована модель для розрахунку захисту будівлі від забруднення при міграції в атмосфері токсичного речовини. Для захисту використовується метод нейтралізації. В моделі використовується рівняння переносу домішки та рівняння течії нев'язкої рідини. Для чисельного інтегрування використовуються неявні різницеві схеми розщеплення. Наведені результати обчислювального експерименту.

A numerical model to compute the efficiency of the building local protection was developed. To protect building the neutralize substance supply is used. The transport equation and the equation of the inviscid flow are used in the model. The implicit difference schemes of splitting are used for the numerical integration. The results of the numerical experiments are presented.

**Вступление.** Хорошо известно, что аварии, сопровождающиеся выбросом, разливом токсичных веществ на химически - опасных объектах (ХОО) способны вызвать загрязнение окружающей среды, и поражение людей. В случае аварии на ХОО возникает важная задача по локализации и ликвидации зоны загрязнения с целью минимизации размеров зоны поражения [6]. В настоящее время, в рамках данной проблемы, за рубежом, выделяют класс задач, который получил особое название - «shelter - in - place». Это организация локальной защиты зданий от попадания в них опасных веществ. Известно, что наиболее уязвимым местом являются места размещения воздухозаборников системы вентиляции зданий. Поэтому, ставится задача минимизировать попадание опасных веществ в зону размещения воздухозаборника. Одним из наиболее эффективных способов решения данной задачи является применение метода нейтрализации, т.е. подачи реагента для понижения концентрации опасного вещества в атмосфере. Если на производстве, известны потенциально опасные места, где может быть выброс в атмосферу опасных веществ (например, места заправки – слива цистерн), то вблизи их можно разместить струйные установки, которые обеспечат подачу реагента при возможной эмиссии. Но при применении данного способа защиты необходимо заранее знать его эффективность. Эта эффективность зависит от комплекса факторов: метеоусловия, расположение зданий на месте нейтрализации, скорость осаждения нейтрализатора, скорость эмиссии реагента и т. д. Данные факторы определяют процесс переноса и «покрытия» реагентом обрабатываемой зоны, а значит - определяют эффективность планируемой защиты. Решение задачи по оценке эффективности метода нейтрализации может быть получено только на основе метода математического моделирования. Поэтому разработка математических моделей, служащих для поддержки принятия решений по проведению этого или иного

защитного мероприятия является важной задачей в области экологической и промышленной безопасности. Решение такой сложной прогнозной задачи, как оценка эффективности метода нейтрализации, проводимого в условиях застройки, может быть получено только с помощью метода численного моделирования [2,7,8]. Анализ литературных источников показывает, что существует ограниченное количество работ, посвященных решению этой проблемы. Так можно выделить работы [1,2], где рассматривается подача реагента для нейтрализации облака токсичного газа, но без учета влияния застройки. В работе [3] рассмотрена задача о подаче реагента от неподвижного вертолета в зону загрязнения, в условиях застройки, но для модельной ситуации – «точечный выброс», т.е. без учета гидродинамики процесса вытекания реагента.

**Целью** данной работы является разработка численной модели для расчета нейтрализации токсичного газа в атмосфере, которая проводится в условиях застройки при подаче реагента от стационарной струйной установки.

**Постановка задачи.** Пусть на территории ХОО, вследствие аварийной ситуации, происходит выброс в атмосферу опасного вещества. Выброс токсичного газа происходит на промышленной площадке, где расположены здания (рис.1). Для ликвидации зоны загрязнения в атмосфере, используется подача в облако токсичного газа реагента от стационарной струйной установки, расположенной на крыше первого здания.

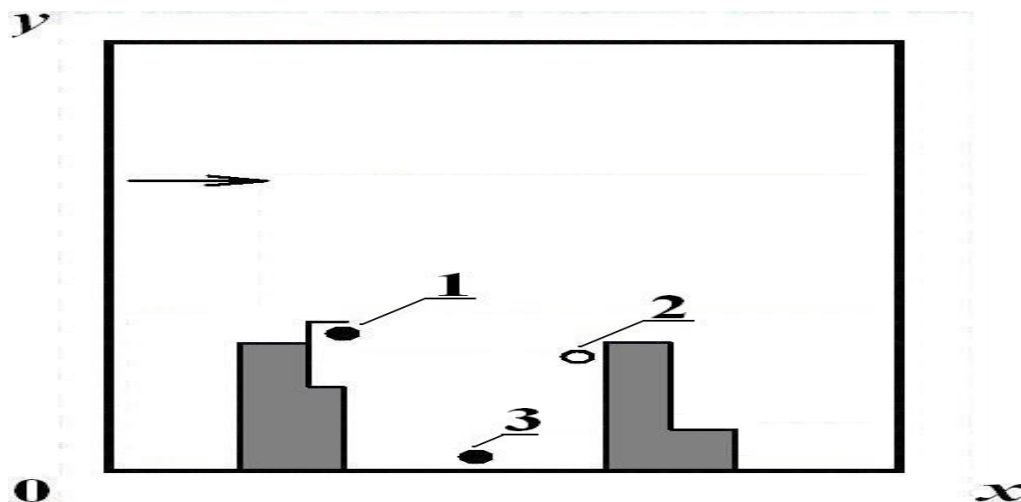


Рис. 1. Схема расчетной области: 1 – место подачи струи нейтрализатора; 2 – положение рецептора; 3 – место эмиссии опасного вещества

Требуется оценить эффективность нейтрализации при заданной метеоситуации и параметрах эмиссии реагента.

**Моделирующие уравнения.** Для расчета концентрации опасного вещества в атмосфере используется осредненное по ширине В переноса примеси (профильная задача) уравнение [2,4,5]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum Q_c(t) \delta(x - x_c(t)) \delta(y - y_c(t)), \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация примеси (опасное вещество);  $u, v$ , – компоненты вектора скорости движения ветрового потока;  $w$  - скорость гравитационного оседания примеси;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициенты атмосферной диффузии;  $t$ -время;  $Q_{Ci}$  – осредненное значение интенсивности точечного источника эмиссии примеси, размещенного в точке  $x_c, y_c$ ;  $\delta(x-x_c)\delta(y-y_c)$ – дельта-функция Дирака. Ось  $Y$  направлена вертикально вверх.

Аналогичное уравнение применяется для моделирования рассеивания реагента в атмосфере. В этом случае  $C$  – концентрация реагента.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работе [5].

Для расчета профиля скорости ветра (продольная составляющая) на входе в расчетную область и коэффициентов атмосферной диффузии используются такие зависимости [ 4 ]

$$u = u_1 \left( \frac{Y}{Y_1} \right)^n, \quad \mu_y = 0,11Y; \quad \mu_x = 0,2u;$$

где  $u_1$  – скорость ветра на высоте  $Y_1$ ,  $Y$  - текущее значение высоты,  $n=0.15$  – параметр.

Решение уравнения (1) можно получить, если известно поле скорости ветрового потока, которое формируется под влиянием застройки или других препятствий. Это поле скорости определяет конвективный перенос, как токсичного газа, так и реагента в атмосфере. Для расчета поля скорости ветрового потока в условиях застройки и для учета локального влияния на это поле скорости выхода потока реагента из емкости используется модель потенциального течения. Для решения задачи в такой постановке необходимо проинтегрировать уравнение [8, 11]

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (2)$$

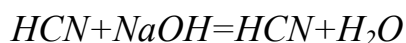
где  $P$  – потенциал скорости, ось  $Y$ , как отмечалось ранее - направлена вертикально вверх.

Постановка граничных условий для данного уравнения рассмотрена в [2,3 5]. Компоненты вектора скорости воздушной среды рассчитываются на основе зависимостей [8, 11]

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

**Численное интегрирование моделирующих уравнений.** Для численного интегрирования уравнений гидродинамики и массопереноса используется прямоугольная разностная сетка. Формирование вида расчетной области (место расположения зданий на промплощадке) осуществляется с помощью технологии ‘porosity technique’ [3,5]. Кроме этого, данная технология используется для задания места подачи реагента и места эмиссии опасного вещества. Для численного интегрирования уравнения (2) используется метод Ричардсона, а численное интегрирование уравнения (1) проводится с помощью попеременно – треугольной разностной схемы. [2,3,5].

**Практическая реализация модели.** На основе построенной модели создан код **“Jet-2D”**, реализованный на алгоритмическом языке *FORTRAN*. Разработанная модель была использована для моделирования процесса нейтрализации токсичного газа – HCN при его эмиссии на территории ХОО (рис.1). Моделирование проведено для следующих параметров задачи: интенсивность эмиссии составляет 200 г/с; размеры расчетной области 100м\*42 м; скорость невозмущенного ветрового потока – 3.5м (скорость потока  $u_1$ ); высота первого здания – 12м, второго – 12м; ширина первого здания 16м, второго - 20м. Рецептор – воздухозаборник располагается возле крыши второго здания (рис.1), его координаты  $x=58м$ ,  $y = 9м$ . Подача реагента начинается в момент времени  $t=17с$ ; угол подачи струи реагента составляет  $-60^0$ , скорость струи нейтрализатора -10м/с. Для нейтрализации опасного вещества используется подача 10 % раствора NaOH. Уравнение кинетики записывается в виде



Расчет процесса химического взаимодействия осуществляется в отдельной подпрограмме. Для моделирования взаимодействия другого опасного вещества с другим нейтрализатором необходимо внести изменения только файл исходных данных.

Рассмотрим результаты моделирования на базе разработанной модели. На рис. 2,3 представлено распределение концентрации опасного вещества для различных моментов времени после начала действия источника миссии и для различных моментов времени после начала подачи струи нейтрализатора (рис.4,5). Значение концентрации на этих рисунках представлено в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины максимальной концентрации на данный момент времени. Вывод на печать чисел осуществлен по формату «целое число», т.е. дробная часть числа не выдается на печать.

Видно, что достаточно быстро облако опасного вещества охватывает наветренную сторону второго здания, что создает прямую угрозу затекания его внутрь помещений.

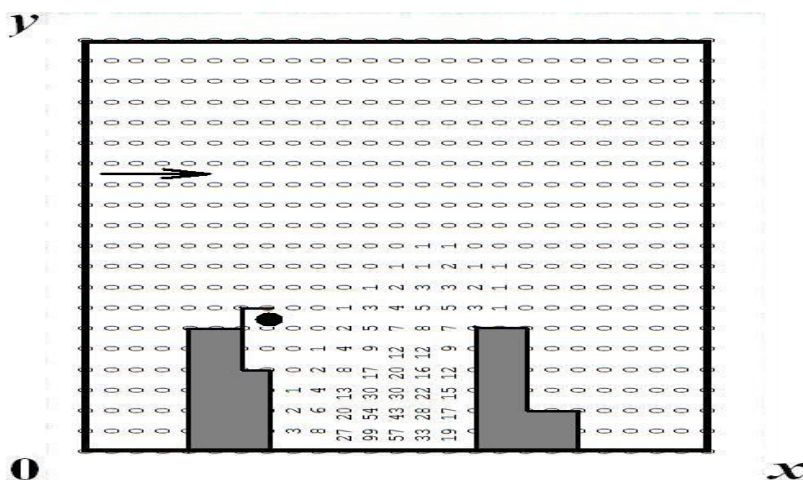


Рис. 2. Распределение концентрации HCN для момента времени  $t=6с$ .

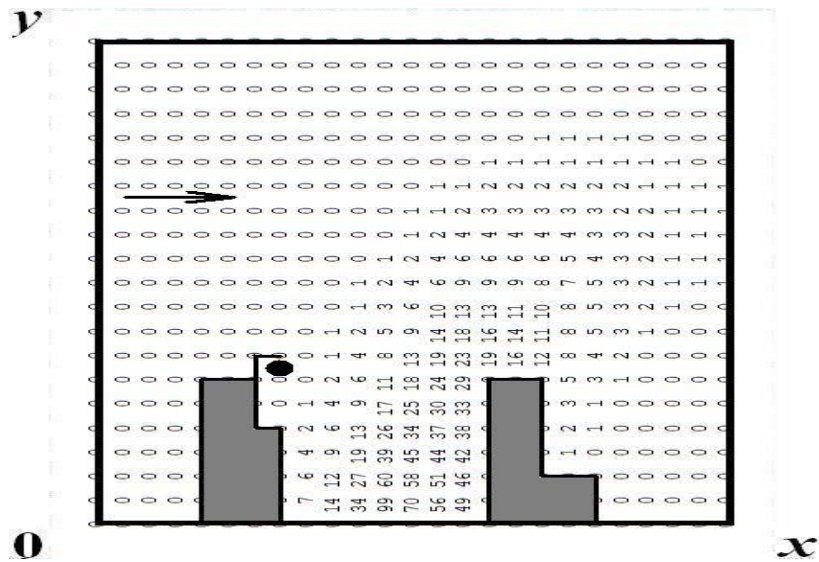


Рис. 3. Распределение концентрации NCH для момента времени  $t=15\text{с}$ .

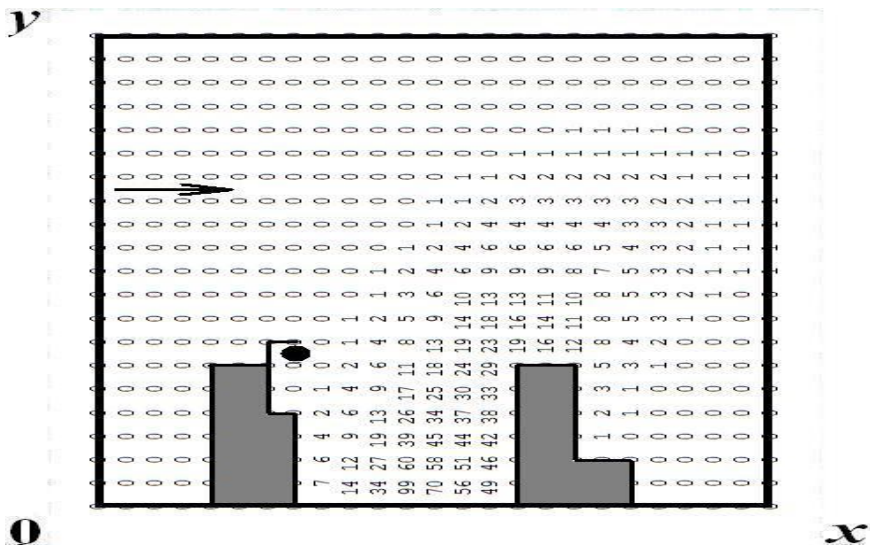


Рис. 4. Распределение концентрации HCN для момента времени  $t=19\text{с}$ .

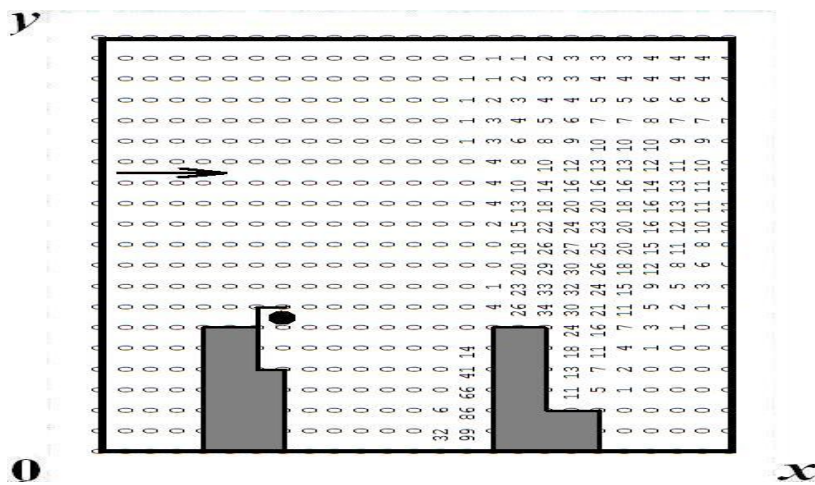


Рис. 5. Распределение концентрации HCN для момента времени  $t=22\text{с}$ .

После начала подачи реагента картина загрязнения приземного слоя атмосферы – меняется: струя нейтрализатора быстро ликвидирует зону загрязнения, как близи источника эмиссии, так и возле второго здания.

Далее представлены результаты решения аналогичной задачи, но при условии, что вокруг места эмиссии опасного вещества располагаются защитные стенки, высотой 2м (рис.6).

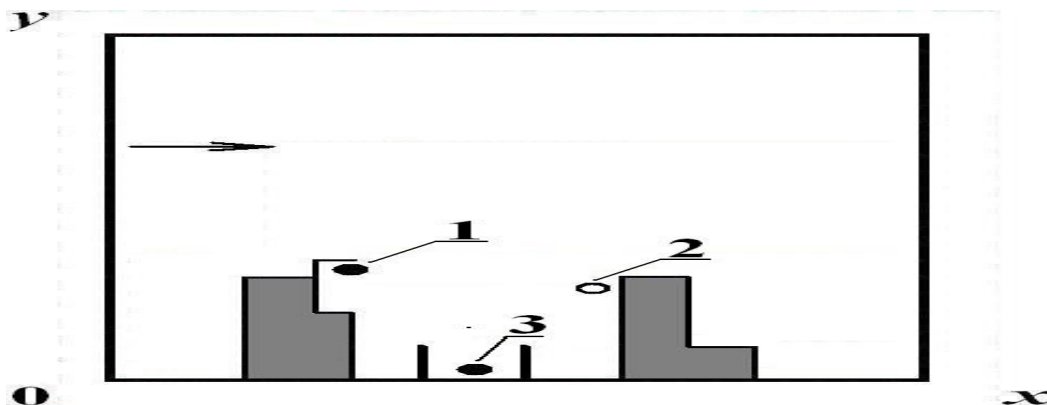


Рис.6. Схема расчетной области: 1 – место подачи струи нейтрализатора; 2 – положение рецептора; 3 – место эмиссии опасного вещества, огражденное защитными стенками

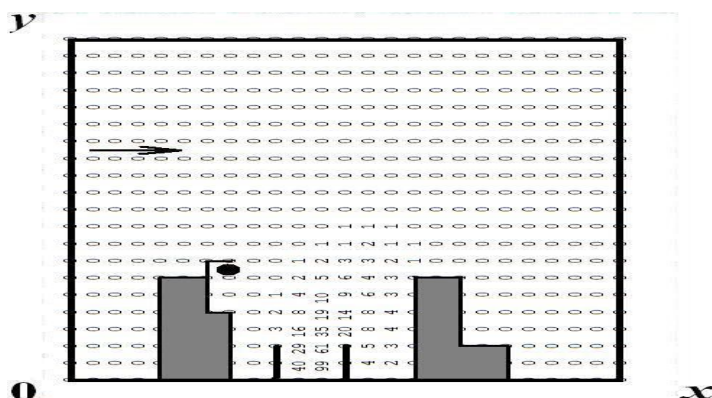


Рис. 7. Распределение концентрации HCN для момента времени  $t=6с$ .

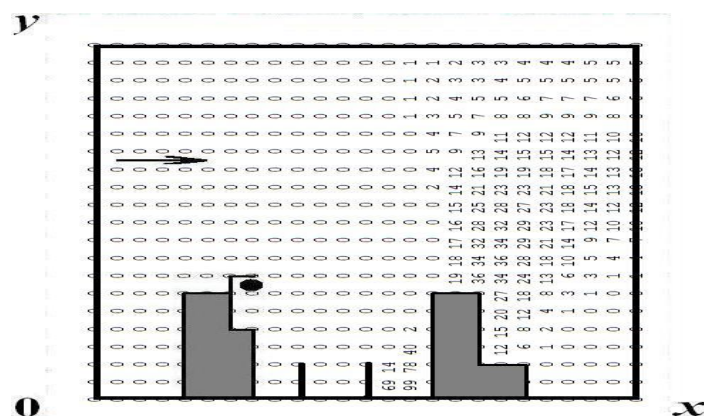


Рис. 9. Распределение концентрации HCN для момента времени  $t=22с$ .

Если сравнить рис. 2 и рис.7, то видно, что защитные стенки направляют загрязнитель вверх и область загрязнения. В табл.1 представлены значения концентрации опасного вещества в точке расположения рецептора, позволяющие оценить темп снижения ее с течением времени для каждого сценария.

Таблица 1

Значение концентрации токсичного вещества в точке расположения рецептора

t, с	Концентрация, мг/м <sup>3</sup> (нет защитных стенок)	Концентрация, мг/м <sup>3</sup> (есть защитные стенки)
6	2.17	1.33
13	7.61	5.83
16	9.38	7.66
21	7.41	4.47
22	1.70	0
23	0	0

Если проанализировать данные из табл.1, то видно, что с течением времени защитный эффект стенок все таки сохраняется – концентрация токсичного газа в точке расположения рецептора ниже, чем для ситуации, когда отсутствуют стенки.

В заключение отметим, что расчет задачи на базе разработанной модели составляет 10с компьютерного времени.

**Выводы.** В работе представлена новая CFW модель для расчета эффективности нейтрализации токсичного вещества в атмосфере в случае проведения этого процесса в условиях застройки. Моделирование основывается на предварительном расчете поля скорости ветрового потока на базе модели потенциального течения. Для расчета переноса токсичного вещества и реагента в атмосфере используется модель Марчука Г. И. Для практической реализации на ПК разработанной модели требуется несколько секунд времени, что является крайне важным для ее практического применения как в режиме «on - line», так и в случае проведения серийных расчетов при разработке ПЛАСа (план ликвидации аварийной ситуации). Разработанная модель может служить инструментом решения комплекса задач в области экологической и промышленной безопасности. Дальнейшее развитие данной тематики следует вести в направлении построения модели подачи реагента (нейтрализатора) от самолета.

#### Список литературы

1. Беляев Н. Н. Защита атмосферы от загрязнения при аварийных выбросах и разливах токсичных веществ / Н. Н. Беляев, В. М. Лисняк // Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій: Зб. наук. пр. - Донецьк: Норд-Прес, 2004. – Вип. 8. - С. 32-40.
2. Беляев Н. Н. Защита атмосферы от загрязнения при миграции токсичных веществ: Монография / Н. Н. Беляев, В. М. Лисняк. Д.: ООО «Инновация», 2006. 150 С.

3. Беляев Н.Н., Гулько Е.Ю., Машихина П.Б. Математическое моделирование в задачах экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций: Монография. / Н.Н. Беляев, Е.Ю. Гулько, П.Б. Машихина. Д.: «Акцент ПП», 2013. – 159 с.
4. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / Берлянд М. Е. – Л. : Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
5. Згуровский М. З. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. Купаев В. И. Методы локализации очага аварии и ликвидации ее последствий на химически опасных объектах железнодорожного транспорта / В. И. Купаев, С. В. Рассказов // Транспорт. наука, техника, управление. - 2003. - №4. - С.28-34.
7. 2. Belayev N. N. Computer simulation of the pollutant dispersion among buildings / N. N. Belayev, M. I. Kazakevitch, V. K. Khrutch // Wind Engineering into 21st Century: Proceedings of the Tenth Intern. Conf. on Wind Engineering, Copenhagen (Denmark) A. A. BALKEMA / Rotterdam - BROOKFIELD, 1999. - P. 1217-1220.
8. 3. Biliaiev M.M. Numerical simulation of indoor air pollution and atmosphere pollution for regions having complex topography /Biliaiev M.M., Kharytonov M.M. / Conference Abstracts of 31st NATO / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, 27 September – 01 October, Torino, Italy, 2010. № P1.7.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Колесником В.Е.  
Надійшла до редакції 11.11.13*

УДК 622.271.322

© Є.В. Малєєв, А.Ю. Дриженко

## **ТЕХНОЛОГІЯ ЗАУКІСКИ БОРТІВ ГЛИБОКИХ КАР'ЄРІВ**

Розглянута технологія заукіски робочих та неробочих бортів глибоких кар'єрів шляхом буріння вертикальних та нахилених екрануючих свердловин. Наведені результати дослідних підривань на кар'єрах ПівдГЗК й ПолтГЗК.

Рассмотрена технология заоткоски рабочих и нерабочих бортов глубоких карьеров путем бурения вертикальных и наклонных экранирующих скважин. Приведены результаты опытных взрывов на карьерах ЮГОКа и ПГОКа.

Technology of zaotkoski of workings and non-working sides is considered deep kar'e-ditch by the boring drilling of vertical and sloping screening mining holes. Re-zul'taty of experimental explosions is resulted on the careers of YUGOKa and PGOKa.

Стійкість укосів робочих і неробочих бортів кар'єрів значною мірою залежить від способів підривання й конструкції зарядів екрануючих свердловин. При цьому великі незручності у практиці гірничих робіт створюють фактичні відхилення поверхні укосу уступів від проектних профілів, як за нормаллю, так і по їх довжині. Спостереження, які виконані в умовах кар'єру ПівдГЗК, показують, що відхилення верхньої брівки уступів углиб масиву досягають у багатьох випадках понад 10 м. У таких місцях спостерігаються заколи вглиб масиву, виникають значні труднощі у розмітці й бурінні свердловин, установленні й



наїзді верстатів на місця їх буріння. Розміри проектної сітки буріння свердловин у цих випадках не дотримуються. У першому ряді доводиться бурити спарені свердловини або, принаймні, зменшувати відстань між ними. Це призводить у більшості випадків до їх сполучення, а буровий шлам заповнює вже пробурені свердловини до граничних позначок.

Через наявність хвилястої, ламаної поверхні укосу уступу величини лінії супротиву по підшві (л.с.п.п.) для свердловин першого ряду змінюються у широкому діапазоні й мають залежно від напрямку різні значення. В одних випадках вони можуть бути завищеними, а в інших – заниженими. При цьому завищення величин л.с.п.п. можуть перевищувати проектні в 1,2 – 1,6 рази, а в окремих випадках і більше. Для цих же зарядів, але в інших напрямках величини л.с.п.п. можуть бути на кілька метрів менше проектних. Такі заряди при малих значеннях л.с.п.п. викликають посилений розліт осколків, а при більших – непророблення підшви уступу. Крім того, криволінійна форма вибою ускладнює роботу й пересування екскаваторів, що впливає на профіль залізничної колії, викликає додаткові її вигини. Тим самим збільшується довжина залізничних колій, можливість сходу поїздів з рейок. Значно ускладнюються роботи з орієнтації й бульдозерного зачищення верхньої площадки уступу, а також наїзди на свердловини зарядних машин. При більших значеннях л.с.п.п. збільшується й сейсмічна дія вибуху, що впливає на охоронювані об'єкти.

Встановлено, що захист робочих і неробочих бортів кар'єру, а також різних промислових об'єктів і устаткування, що перебувають на його площадках та в прилеглий зоні, від дії вибуху досягається за рахунок зниження ступеня порушення масиву породи в уступах, одержання стійких проектних укосів, керування величиною л.с.п.п. на робочих горизонтах кар'єру, можливості застосування оптимальних параметрів буропідривних робіт, зменшення до допустимого рівня розмірів небезпечних зон. Комплекс заходів, передбачений спеціальною схемою буропідривних робіт (рис.1), дозволяє формувати уступи підвищеної стійкості при незначних витратах. Найбільш нестійкими частинами уступу є його верхня зона, порушена на глибину 5 – 22 діаметрів заряду й частина породи, що безпосередньо примикає до укосу. Найбільш схильна до обвалення частина уступу знаходиться у районі верхньої брівки. Шляхом захисту цих слабких місць підвищується стійкість уступів і бортів кар'єрів у цілому.

Формування проектних профілів уступів здійснюють шляхом попереднього підривання екрануючих щілини 3 у їх верхній частині, потім технологічних свердловин 2, споряджених зарядами зменшеної дії у напрямку до охороняемого масиву, певного розташування цих свердловин з різною довжиною перебуру щодо підшви уступу. Так, наприклад, на кар'єрі ПівдГЗК застосовують свердловини з диференційованим перебуром. У першому ряді довжина перебуру залежно від величин л.с.п.п. становить 3 – 5 м, у другому перебуру не виконують, у третьому приймають 2,1 м. Довільне розміщення свердловин щодо верхньої брівки й укосу уступу призводить до небажаних порушень породи в районі цих зон. Більш доцільно розміщувати свердловини з максимальним перебуром таким чином, щоб вони перебували на відстані більше радіуса зони небезпечних деформацій, що виникають від дії вибуху. Цього можна досягти,

якщо відстань між дном свердловини й планованим укосом уступу  $O_1'''$  (м) буде відповідати умові

$$O_1''' \geq R = n_{\partial} D_{св},$$

де  $R$  – радіус зони залишкових деформацій, визначений через кількість  $n_{\partial}$  діаметрів свердловин;  $D_{св}$  – діаметр свердловини, м; приймають в діапазоні 5 – 22 і уточнюють спеціальними вимірами.

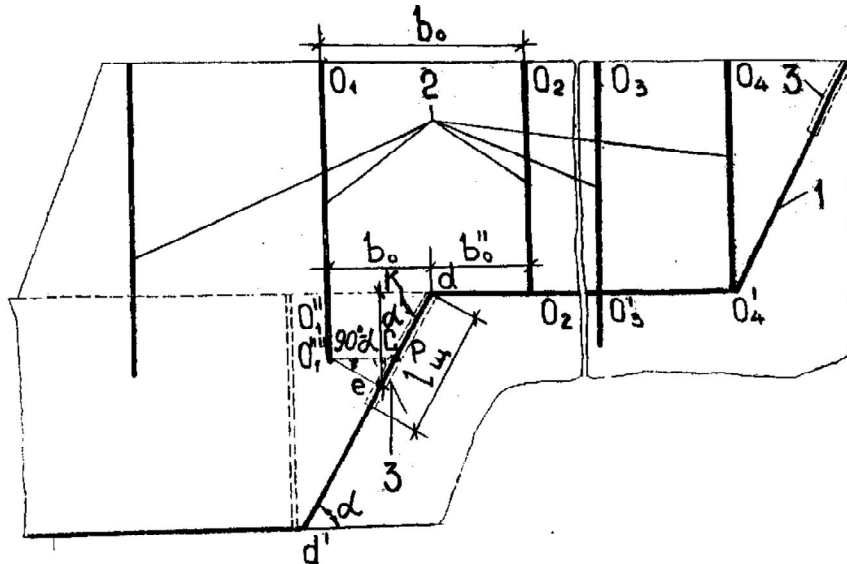


Рис. 1. Схема формування проектних контурів уступу підвищеної стійкості: 1 – проектний контур борту кар'єра; 2 – технологічні свердловини; 3 – екрануюча щілина

Тоді ряд свердловин  $O_1'$ ,  $O_1'''$  повинен бути віднесений від верхньої брівки на відстань

$$e'_o = (n_y D_{св} + h_n \cos \alpha_y) / \sin \alpha_y, \text{ м,}$$

де  $h_n$  – величина перебуру, м;  $\alpha_y$  – кут закладення укосу уступу, град.

Відстань від верхньої брівки до наступного ряду свердловин, що забурюють до позначки поверхні уступу  $e_o''$  (м), становить

$$e_o'' = e_o - [(n_y D_{св} + h_n \cos \alpha_y) / \sin \alpha_y].$$

Свердловини крайнього ряду, що формують укіс уступу, забурюють до позначки його підосви, а попереднього ряду – з перебуром, що забезпечує її пророблення. Таке розміщення свердловин на верхньому горизонті відносно нижнього уступу дозволяє на 3–5 м зменшити межу верхньої зони деформацій масиву.

На Каранському гранітному кар'єрі для заукіски уступів застосовують вертикальні свердловини з контурними зарядами. Використання цієї схеми заукіски на кар'єрі ПівдГЗК дозволило з дослідних вибухів на робочих уступах перенести її на неробочі при постановці їх у кінцеве положення (рис. 2). При цьому Західна ділянка борту в граничному положенні заукошувалася за вищенаведеною технологією вертикальними свердловинами заукіски. На ділянці уступу довжиною 50 м за 6 год 30 хв. верстатом СБШ-250МН було забурено 15 сверд-

ловин глибиною до 7 м. Продуктивність буріння склала 105 м за зміну при нормативній – 50,4 м. Підвищена швидкість буріння пояснюється проведенням свердловин на глибину меншу за довжину однієї штанги. Крім того, буріння виконувалося у верхній частині уступу, ослабленій впливом попередніх вибухів на верхньому горизонті. Вода у свердловинах при веденні бурових робіт була відсутня. Пересування бурового верстата здійснювалося практично по прямій лінії та при мінімальній тривалості його встановлення на позначку свердловини. Глибина буріння контурних свердловин була на 0,5–1 м більшою за потужність порушеного шару й становила 5,3–6,9 м.

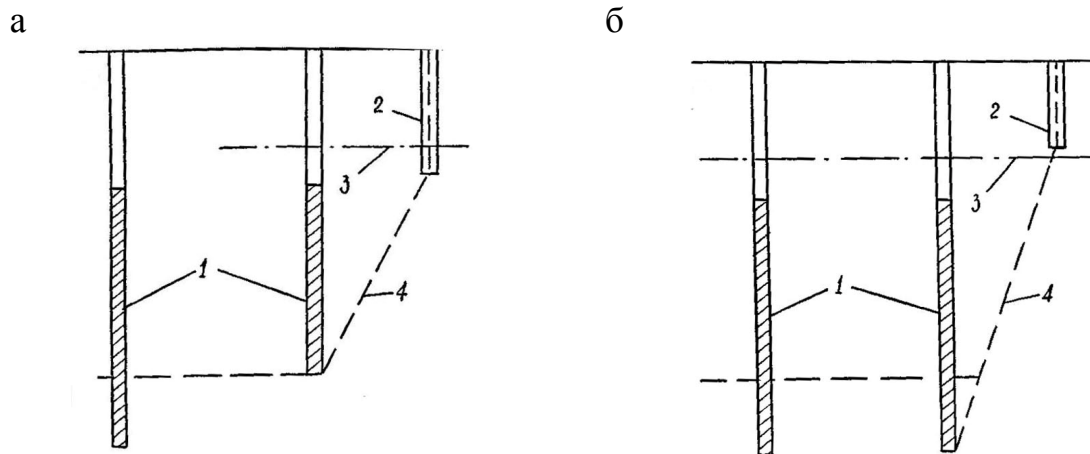


Рис. 2. Схема заукіски неробочих (а) і робочих уступів (б) вертикальними свердловинами: 1 – технологічні свердловини; 2 – екрануючі свердловини; 3 – межа порушеного шару у верхній частині уступу; 4 – проектний контур уступу

Відстань між свердловинами заукіски перебувала в інтервалі 2,5–3,4 м, а між свердловинами розпушування тильного ряду – 6,9–8,1 м. Відстань між рядами цих свердловин становила 5–6,3 м. Конструкція заряду в свердловинах заукіски являла собою гірлянду з патронів амоніту 6ЖВ діаметром 90 мм, а також 32 мм, прикріплених шпагатом до 2–4 ниток детонувального шнура. У нижній частині гірлянди розміщували по дві тротиліві шашки Т-400. Гірлянди патронів були суцільними або з повітряними проміжками. Нижня частина гірлянди перебувала на віддаленні 0,1–0,15 м від дна свердловини. Гірлянди були зміщені до контакту ВР із стінками свердловин у напрямку від непорушеного масиву.

Над зарядом заукіски розміщувалася паперова пробка. Забійка свердловин довжиною 2,5–3,5 м здійснювалася забійною машиною. Щільність зарядів як постійна по висоті заряду, так і змінна зі зменшенням її до поверхні уступу, перебувала в діапазоні 4–2,8 кг/пог.м. Гірлянди закріплювали на дерев'яних брусах, розташованих над устями свердловин. Довжина контурних зарядів становила 2–3 м. Свердловини розпушування тильного ряду мали глибину 18–19,5 м. Довжина заряду становила 13,5–19 м, а довжина забійки 0–6 м. Чотири свердловини були заряджені на повну глибину. Свердловини заукіски підривали на 50–200 м/с раніше від технологічних свердловин розпушування.

Заукіска уступів із застосуванням вертикальної екрануючої щілини у верхній частині уступу дозволяє при незначних трудовитратах одержувати проектний профіль, а також результуючі й складові кути укосу. Застосування локальних екрануючих щілин на робочих горизонтах (рис. 3), дозволяє зробити розглянутий вище спосіб більш економічним. При виконанні підривних робіт на непідібраний вибій глибина цієї щілини може бути мінімальною (1–2 м) і визначатися повинна за умови можливості формування укосу під дією вибуху в напрямку до щілини. Це дозволить розширити можливість даного способу й застосовувати його для керування величиною л.с.п.п., а також дальністю розльоту уламків породи.

Використання вертикальної або похилої екрануючої щілини, виконаної у верхній частині уступу в сполученні з похилими свердловинами, дозволяє додатково зменшити дію вибуху в напрямку тилу масиву. Однак буріння глибоких похилих свердловин на кар'єрах Кривбасу на цей час не знаходить широкого застосування. Тому варто орієнтуватися на переважне буріння вертикальних свердловин заукіски.

Останніми роками на кар'єрі ПолтГЗК гірничі роботи на нижніх горизонтах ведуться уступами висотою 12 м. У цьому зв'язку виконані дослідження послужили основою інституту УКРДІПРОРУДА для розробки паспортів заукіски уступів при постановці їх у кінцеве положення. Роботи із заукіскою уступів планують вести шарами висотою по 5 м. Свердловини заукіски бурять вертикально уздовж проектного контура укосу неробочого борту. Відстань між ними у контурному ряді 2 м. Заряд суцільний з низькобризантних ВР типу аміачної селітри або ГЛТ-20, а також з патронованої ВР у вигляді гірлянд. Висота колонки заряду не перевищує 2,5–3 м. При спільному підриванні зі свердловинами розпушування, випередження вибуху контурних зарядів становить 35–70 мс.

Дослідне підривання по заукісці укосу уступу на південному борті горизонту –54 м показало, що після підривання свердловин заукіски й розпушування верхня брівка укосу уступа утворилася уздовж лінії їх буріння. У верхній частині укосу уступу збереглися сліди свердловин. Поверхня укосу після підривання була рівною. Розкриті тріщини в тилу масиву були відсутні, що підтверджує екрануючі властивості щілини. Нижня частина укосу, що утворена зарядами розпушування, являла собою поверхню менш зруйновану й більш рівну ніж при звичайному підриванні свердловинних зарядів.

У результаті підривання породного блоку щілина була закидана роздробленою масою, викинутою у тил масиву на відстань 2–10 м. Висота навалу перебувала у межах 0,2–2,5 м. Після вирівнювання поверхні уступу підробка розвалу гірничої маси зверху уступу екскаватором ЕКГ-8І на відстань 7–10 м до нижньої брівки відслонилася й розкрилася щілина шириною до 80 см (рис. 4). При цьому максимальна її ширина перебувала у районі свердловин, що збігалися по напрямку з свердловинами розпушування.

Результати експериментального підривання показали працездатність апробованих варіантів заукіски уступу. Незважаючи на те, що частина зарядів з виробничих причин знаходилась близько 24 годин у воді у всіх випадках укіс утворився в площині свердловин заукіски, а на його поверхні збереглися їх сліди. Кут

завідкошеного уступу після виймання породи екскаватором склав  $65^\circ$ .

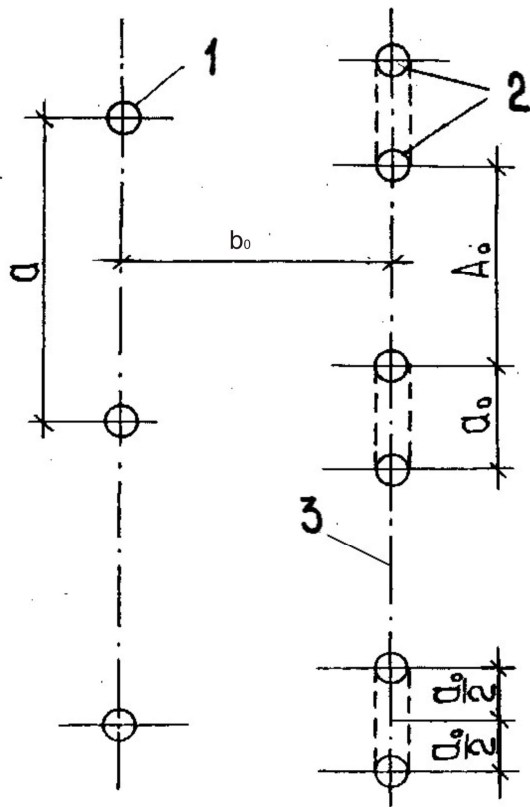


Рис. 3. Схема заукіски уступу:  
1 – технологічні свердловини;  
2 – свердловини заукіски;  
3 – контур щілини



Рис. 4. Загальний вигляд екрануючої щілини на кар'єрі ПГЗК

На відміну від відомих способів заукіски уступів свердловинами, що забурюють на повну висоту уступу або нижче його підшви, запропонований метод дозволяє значною мірою знизити витрати на буріння й підривання. Виходячи з умов можливості конструктивного здійснення способу заукіски й необхідності захисту найбільш зруйнованої верхньої частини уступу витрати знижуються для уступів висотою 15 м в 2–3, а 30 м – в 3–4 рази. Застосування цього методу на робочих бортах кар'єру дозволяє отримати проектні значення величин л.с.п.п., регулювати ступінь дроблення й дальність розльоту кусків породи. У цьому випадку свердловини заукіски досить бурити на глибину менше за 0,2–0,7 висоти уступу. На робочих горизонтах, особливо при підриванні на непідібраний вибій, досить обмежитися витратами на утворення мінімальної глибини екрануючої щілини.

Буріння свердловин заукіски у верхній частині уступу дозволяє уникнути значної їх обводненості, що спрощує процес їх заряджання. З'являється можливість застосовувати неводостійкі типи ВР. На підірваному блоці рівень ґрунтових вод склав 5–10 м від поверхні уступу. Для свердловин заукіски застосовували амоніт 6 ЖВ, у той час як у обводнених свердловинах розпушування розмішувалися заряди з водостійкого й дорогого тротилу. Швидкість буріння све-

рдловин заукіски у верхній частині уступу виявилася вище в 1,2–2,5 рази ніж на глибинах 12–15 м. Витрата бурових доліт зменшилася. Запропонований спосіб заукіски дозволяє одержати з високою точністю й якістю проектний укіс уступу, зменшити розкриття тріщин і руйнування бортів кар'єру від дії масових вибухів, підвищити кут закладення укосу уступів і бортів кар'єру.

#### Список літератури

1. Спосіб відстройки неробочих бортів глибоких кар'єрів. Патент України 14321 / А.Ю. Дриженко, В.П. Мартиненко, М.П. Бенько та інші. Опубл. 12.02.1997. Бюл. № 2.
2. Спосіб відроблення при контурної золи залізородних кар'єрів. Патент України № 76884 / А.В. Сокурєнко, В.О. Шерємет, А.Ю. Дриженко та інші. Опубл. 20.12.2004. Бюл. № 9.
3. Дриженко А.Ю. Кар'єрні технологічні горнотранспортні системи: моногр. / А.Ю. Дриженко.-Д.:Державний ВНЗ "НГУ", 2011.-542с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Симоненком В.І.  
Надійшла до редакції 18.11.13*

УДК 504.064.3; 57.084.1

© О.В. Ащеулова, О.В. Зберовський, Т.К. Клименко,  
О.А. Демидов, О.М. Савотченко

## **ВИВЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ОБСТАНОВКИ НА РЕКУЛЬТИВОВАНИХ ТЕРИТОРІЯХ ВІЛЬНОГІРСЬКОГО ГМК**

У роботі наведені результати досліджень геоекологічних, фізико-хімічних та біологічних властивостей рекультивованих земель на територіях Вільногірського ГМК.

В работе приведены результаты исследований геоэкологических, физико-химических и биологических свойств рекультивированных земель на территориях Вольногорского ГМК.

The results of geo-ecological studies, two physical-chemical and biological properties of reclaimed land in the territories Vilnohirsk MMP.

**Вступ.** Високі темпи росту видобутку корисних копалин спричиняють все більший вплив на природне середовище. Відомо що кожні 4м<sup>2</sup> землі, порушених відкритими розробками, впливає приблизно на 4м<sup>2</sup> прилягаючої території. На даний час немає єдиної загальновизнаної класифікації техногенних порушень природного середовища при веденні відкритих гірничих робіт. Наприклад, землі під активними спорудженнями становлять 25–90 % земельного відводу гірничого підприємства, землі під неактивними спорудженнями на кар'єрах з терміном служби більше 15–20 років становлять 12–29 % земельного відводу, а землі, займані житловими й культурно-побутовими будинками, 4–9%. При веденні відкритих гірничих робіт загальна площа земель, що порушуються, в 12 разів перевищує площу самого кар'єру, тому що додатково займаються землі під: зовнішні відвали, хвостосховища, промислові площі, транспортні під'їзди, лінії електропередач і інші інженерні мережі. Всі ці порушення можна від-

нести до поверхневого порушення природного середовища. Однак крім порушення ландшафту відбуваються забруднення повітряного й водного басейнів прилеглих територій. Ці порушення ставляться до розряду екологічних порушень природного середовища і їх необхідно враховувати в гірничій практиці [1]. У зв'язку з цим проблема рекультивації та повернення в народногосподарське використання порушених земель стає першочерговим завданням в гірничодобувних районах України, а дослідження агрохімічних властивостей земель та вивчення екологічних змін на рекультивованих територіях є важливою та актуальною екологічною задачею.

**Метою дослідження** є вивчення екологічної обстановки на рекультивованих територіях за допомогою агрохімічних властивостей ґрунту.

**Результати досліджень.** Дослідження фізико-хімічних та геоекологічних параметрів рекультивованих земель проводилися на територіях Вільногірського гірничо-металургійного комбінату де природоохоронні заходи носять системний характер і розглядаються з тим же рівнем пріоритетності, що й основні технологічні процеси. Комбінатом використовується повний замкнений цикл оборотного водопостачання, що не допускає попадання промислових вод в природні водойми. Одночасно з виконанням гірничих робіт здійснюється рекультивація порушених земель.

Роботи по відновленню земель і поверненню їх землекористувачам розпочаті на комбінаті ще в 1976 році і останнім часом щорічно здійснюється рекультивація як мінімум 60–80 га. Комплекс рекультиваційних робіт проводиться у два етапи: гірничотехнічний та біологічний. Проводячи гірничотехнічну рекультивацію, порушені землі готують до їх подальшого використання: здійснюють планування поверхні, будують дороги, гідротехнічні і меліоративні споруди. Біологічна рекультивація здійснюється після технічної й передбачає комплекс заходів, спрямованих на поліпшення фізичних і агрохімічних властивостей ґрунтів на рекультивованих землях. Найбільший розвиток набув напрям лісогосподарської рекультивації. Набутий досвід такої рекультивації свідчить про те, що вона є ефективним природоохоронним заходом і дозволяє повернути в продуктивний кругообіг порушені землі при добуванні титано-цирконієвих та ільменітових руд, істотно знизити забруднення навколишнього середовища продуктами вітрової і водної ерозії, відновити господарську та естетичну цінність територій, на яких проводились гірничі роботи. Насадження лісових культур на рекультивованих землях володіють цінними фіто-меліоративними властивостями і є джерелом обсіменіння, що сприяє природному відновленню рослинного покриву порушених територій. Для ведення робіт з рекультивації земель на комбінаті існує спеціалізований виробничий підрозділ, персонал якого активно працює над розробкою сучасних технологій рекультивації земель з метою оптимізації виробничих витрат і мінімізації впливу на навколишнє природне середовище.

Геоекологічна оцінка рекультивованих земель була виконана у два етапу: перший – дослідження фізичних та агрохімічних властивостей чорноземів довготривалого зберігання у буртах, що використовуються для рекультивації порушених земель [1]; другий – дослідження геоекологічних параметрів ґрунту рекультивованих земель за 20–30 річний термін після рекультивації.

На другому етапі досліджувались властивості ґрунтів рекультивованих земель, які були сформовані у різні роки. Зразки проб ґрунту і рослин відбиралися у липні 2012 та 2013 рр. в вегетаційний період на ключових ділянках, які закладалися з урахуванням терміну проведення рекультивації у 1976, 1981, 1985, 1991, 1997, 2001, 2006, 2011 та 2012 року. На рис. 1 приведений загальний вигляд рекультивованої ділянки 2011–2012 років. Ґрунтові зразки відбиралися ручним буром на глибину ґрунтового профілю до границі залягання пустої породи (мінімум 40 максимум 70 см). Усього було відібрано понад 150 проб.

За допомогою стандартних методик визначалися такі показники: вологість ґрунту, об'ємна вага, питома вага, пористість, гранулометричний склад, вміст органічної речовини та вміст гумусу, біологічна характеристика найбільш поширеніших видів рослин, характеристика пробних ділянок, родючість штучних ґрунтів.

Проби ґрунту були відібрані на шести пробних ділянках (ПД) рекультивованих земель, а саме: ПД №1 – 1976 року, площа якої складає 10 га; ПД №2 – 1981 року, площа якої складає 15 га; ПД №3 – 1984–1985 років, площа якої складає 150 га; ПД №4 – 2004 року, площа якої складає 60 га; ПД №5 – 2006–2007 років, площа якої складає 120 га; ПД №6 – 2011–2012 років, площа якої складає 110 га.



Рис. 1. Загальний вигляд рекультивованої ділянки 2011–2012 рр.

На рис. 2 приведений загальний вигляд першої пробної ділянки (ПД №1), що рекультивована у 1976 році загальною площею 10 га. Було виконано опис рослинності: перший ярус робінія псевдоакацієва, поодинокі лох сріблястий, висота дерев: 3–7 м. Щодо трав'янистого покриву, то на цій ділянці переважають рослини, які відносяться до родини айстрові (*Asteraceae*), життєві форми яких відносяться до багаторічників. Переважають рослини світлолюбів з помірно зволуженим середовищем існування, також спостерігаємо штучні акацієві насадження. Геоморфологічні ознаки: слабо похила рівнина. Інтенсивність механічних міграцій: елювіальний ландшафт. Замкнутість крон – світлий ліс. Проективне покриття – 40–50%.





Рис. 2. Вигляд пробної ділянки №1

Проби на ПД №1, як і на всіх інших ПД, були відібрані на двох прикопках. Розріз ґрунтового профілю на прикопці №1 наведено на рис. 3, а на прикопці №2 – на рис. 4.

Товщина насипного шару ґрунту прикопки №1 до пустої породи становить 63 см. Було виконано опис розрізу ґрунтового профілю: вологість – свіжий ґрунт; зафарбування – однорідне, при переході до породи – неоднорідне з вмістом плям більше 20%. Плями – контрастні; основний колір – буро-чорний; структура – кубовидна; тріщинуватість – не має; великих пор не має; включення – коріння дерев та трав'янистих рослин, гіпс.



Рис. 3. Розріз ґрунтового профілю ПД №1 (прикопка №1)

Товщина насипного шару ґрунту прикопки №2 до пустої породи становить 58–59 см. Опис розрізу ґрунтового профілю включає: вологість – свіжий ґрунт; зафарбування – однорідне; плями – менше 2%; основний колір – буро-сірий; структура – кубовидна, глибиста, комкувата; тріщинуватість – неглибока; включення – пуста порода.

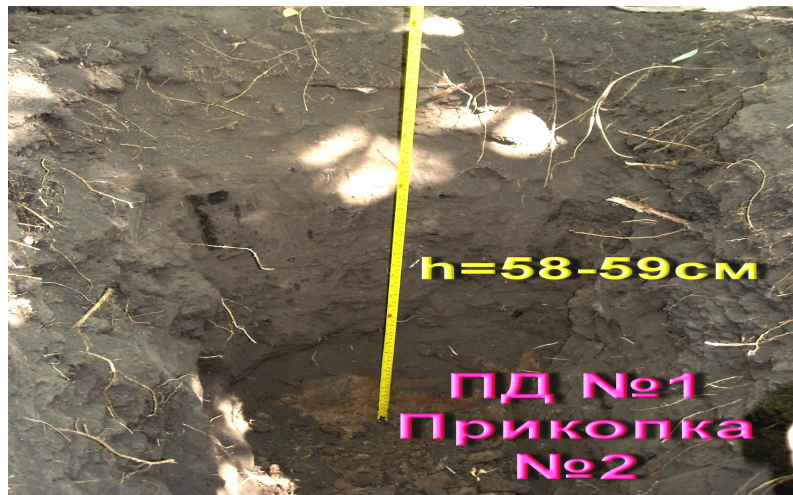


Рис. 4. Розріз ґрунтового профілю ПД № 1 (прикопка №2)

Майже на усіх прикопках пробних ділянок характеристика опису розрізу ґрунту однакова.

Наприклад, ПД № 3, яка була рекультивована у 1984–1985 рр. (рис. 5), загальної площею 150 га, з яких 34 га передано підсобному хазяйству ВГМК, 32 га Верхньодніпровському лісгоспазу під висадку лісу, 76 га – садовому товариству ВГМК, 8 га – комбінату для повторного використання. За геоморфологічною характеристикою має ознаки субгоризонтальної рівнини. На території ділянки є проявлення ерозії, що пояснюється певними особливостями рельєфу.



Рис. 5. Вигляд пробної ділянки № 3

На ПД № 2 домінантом є робінія псевдоакацієва. У трав'янистому ярусі спостерігаються рослини, які відносяться до родин злакових (Poaceae), айстрових (Asteraceae) та молочайних (Euphorbioideae). Рослинність розріджена, проективне покриття 20–25%. Переважають рослини багаторічники, посухостійкі, світлолюби.

Рельєф – рівнинний, мікрорельєф – зміна височин та низовин з різницею висоти до 50 см. Замкнутість крон – світлий ліс.

Площа ПД № 4 складає 60 га. На ділянці спостерігаємо степову цілину, великі площі пирію повзучого. Розподіл рослинності рівномірний, нижній ярус злаки, верхній – айстрові, злаки, хрестоквітні, зонтичні. Проективне покриття – 70–80 %.

ПД № 5 загальної площею 120 га була рекультивована у 2006–2007 рр. і передано під висадку лісу. Ділянка степової цілини. Поруч розташовані масиви лоха сріблястого, поодинокі дерева робінії псевдоакацієвої. Проективне покриття 40–50%. Рослинний покрив однорідний, у верхньому ярусі – айстрові та злаки.

ПД № 6 була рекультивована 2011–2012 рр. (рис. 1) і має загальну площу 110 га, з яких 50 га передано під висадку лісу та 60 га для сільського господарства. На ділянці спостерігається штучна посадка робінії псевдоакацієвої. У трав'янистому ярусі – злаки та айстрові. Проективне покриття 20–25%.

Виконані дослідження біологічної характеристики найбільш поширених видів рослин дозволяють розділити увесь період рекультивації порушених земель на два періоди:

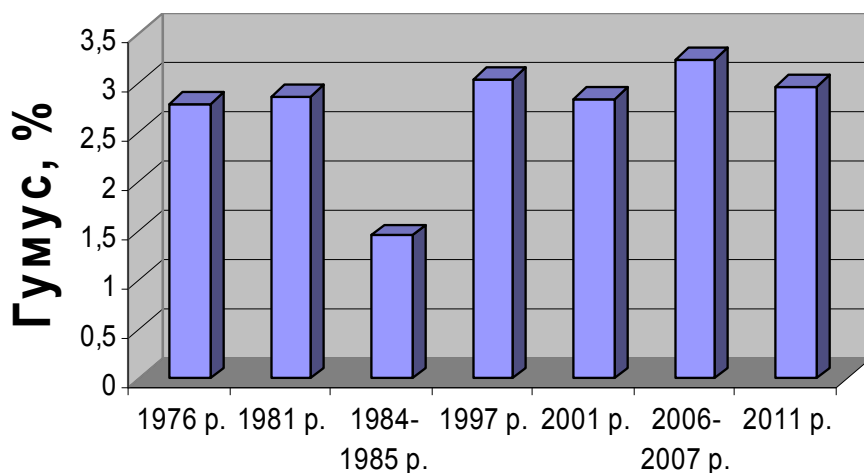
1. 1976 – 1985 рр. на даній території рекультивованих земель переважає робінія псевдоакацієва, рослини які відносяться до родин злакових (Poaceae), айстрових (Asteraceae) та молочайних (Euphorbioideae), життєві форми яких відносяться до багаторічників.

2. 1997 – 2013 рр. на даній території рекультивованих земель переважає масиви лоха сріблястого, поодинокі дерева робінії псевдоакацієвої, розподіл рослинності рівномірний, нижній ярус злаки, верхній – айстрові, злаки, хрестоквітні, зонтичні, спостерігається степова цілина та штучна посадка робінії псевдоакацієвої.

Встановлено, що на досліджуваних ділянках переважають рудеральні багаторічні види рослин, а також формуються деревно-кущові ценози. Під впливом цієї рослинності на порушених землях починається формування нового ґрунтового покриву.

Для даної географічної території характерний такий тип ґрунтів, як чорноземи звичайні, які сформувались на лесовидних суглинках. Чорноземи в порівнянні з іншими ґрунтами характеризуються більш високою природною родючістю, мають потужний гумусовий шар, значно більше містять гумусу і загального азоту із поступовим зниженням їх по профілю. Результати дослідження вмісту гумусу на усіх розглянутих рекультивованих ділянках наведено на рис. 6.

Встановлено, що максимальне значення вміст гумусу має у ґрунтовому шарі 0–10 см на ділянках рекультивації 1976 р та 1981р, відповідно 3,27% та 3,41%. Майже на всіх пробних ділянках у ґрунтовому шарі 0–50 см вміст гумусу перевищує 2%, що показує на відновлення окремих властивостей штучних ґрунтів та їх наближення до природних у процесі довготривалої лісотехнічної рекультивації на Вільногірському ГМК.



### Рік рекультивації

Рис. 6. Вміст гумусу в ґрунтах на рекультивованих ділянках Вільногірського ГМК

#### Висновки.

1. Встановлено, що на досліджуваних рекультивованих ділянках переважають рудеральні багаторічні види рослин, а також формуються деревно-кущові ценози. Під впливом цієї рослинності на порушених землях починається формування нового ґрунтового покриву.

2. Встановлено, що майже на всіх пробних ділянках у ґрунтовому шарі 0–50 см вміст гумусу перевищує 2 %, а на деяких навіть 3 %, це свідчить про те, що у процесі довготривалої лісотехнічної рекультивації має місце відновлення окремих властивостей штучних ґрунтів до природних.

3. За біологічною характеристикою найбільш поширеніших видів рослин увесь період рекультивації порушених земель можливо розділити на два періоди: 1976 – 1985 рр. та 1997 – 2013 рр.

4. Особливістю рекультивації порушених земель на Вільногірському ГМК є те, що розкривні породи, які розміщують у відвалах, характеризуються низькою токсичністю, високим вмістом елементів зольного живлення рослин, хорошими фізико-хімічними властивостями і відносяться до придатних для лісогосподарської та біологічної рекультивації.

#### Список літератури

1. О.В. Ащеулова, О.В. Зберовський, Т.К. Клименко, О.А. Гаркуша. Дослідження фізичних та агрохімічних властивостей ґрунтів при їх довготривалому зберіганні в буртах.- Сбірник наукових праць НГУ.- Дніпропетровськ: РИК НГУ.- 2012.-№39,- С. 239-245
2. Боярский В.А. Проблемы рекультивации нарушенных земель и использования горных выработок. – М.: «Наука», 1972, с. 109-124.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Собком Б.Ю.  
Надійшла до редакції 15.11.13*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА ВЫБРОСАМИ ПРЕДПРИЯТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДФАКЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Предложена модель оценки риска для использования в экологическом мониторинге крупных предприятий, на которых проводятся подфакельные измерения, с целью принятия управленческих решений, обеспечивающих высокую надежность не превышения концентрациями загрязняющих веществ своих ПДК<sub>мр</sub>.

Запропоновано модель оцінки ризику для використання в екологічному моніторингу великих підприємств, на яких проводяться підфакельні вимірювання, з метою прийняття управлінських рішень, що забезпечують високу надійність не перевищення концентраціями забруднюючих речовин своїх ГДК<sub>мр</sub>.

The model of risk assessment for use in environmental monitoring of large enterprises, on which the podfakelnye measurements, in order to make management decisions that ensure high reliability does not exceed the concentrations of pollutants their MAC.

Экологическая обстановка в Украине, обусловленная антропогенным воздействием на окружающую среду, особенно в старопромышленных регионах, является весьма напряженной. Несмотря на то, что в Украине приняты самые жесткие из рекомендованных Всемирной организацией здравоохранения критерии [5], выполнение которых не должно допускать влияние на человека загрязнения окружающей среды, дело дошло до того, что в результате этого загрязнения существенно увеличилась заболеваемость как детского, так и взрослого населения [6] и даже возникли негативные изменения в организмах людей на генном уровне, создавая опасность для их жизней.

Оценка здоровья населения Украины от действия мутагенных экологических факторов в соответствии с принятой шкалой [7] показывает на конфликтно – угрожающее состояние его в конце прошлого и начале текущего столетий.

Как видно из представленных в таблице 1 данных на первом месте среди заболеваемости населения по Днепропетровской области стоят болезни органов дыхания, которые вызывают такие вредные загрязняющие вещества как диоксид азота, диоксид серы и которые выбрасываются обычно при превышениях ПДК предприятиями коксохимической и черной металлургии, как например ПАО «Евраз ДМЗ им. Петровского» (металлургическое производство), ПАО «Евраз ДМЗ им. Петровского» (коксохимическое производство), ОАО «Днепропетровский трубный завод «ОАО» Днепротяжмаш».

Например, общие выбросы загрязняющих веществ в г. Днепропетровске (по данным многолетних наблюдений) составляют около – 170 тыс. т/год, в Днепропетровской области – 1165 тыс. т/год, в Донецкой области – 1600 тыс. т/год. Наблюдается превышение предельно допустимых концентраций по пыли в 2,7 раз (г. Кривой Рог), фенола в 2 раза, формальдегида в 3,3 раза (г. Днепродзержинск) и др. О том, что экосистема города не справляется с имеющимся

объемом выбросов загрязняющих веществ, наиболее убедительно свидетельствуют данные инструментальных наблюдений за качеством атмосферного воздуха в разных районах Днепропетровска.

Таблица 1

Заболеваемость населения по Днепропетровской области

Год	Кількість зареєстрованих випадків захворювань									
	У тому числі:									
	всего, тыс.	новообразования	болезни нервной системы	болезни системы кровоснабжения	болезни органов дыхания	подкожные болезни	Болезни костно-мышечной системы	болезни мочепушковой системы	врожденные аномалии	травмы, отравления и др.
2000	2800,2	36,3	61,7	150,4	1244,6	186,5	178,6	178,6	4,4	174,3
2001	2774,6	37,0	61,9	184,1	1130,1	190,0	185,7	207,4	4,6	167,4
2002	2731,4	36,5	60,2	179,9	1079,8	181,1	191,8	209,5	4,6	165,2
2003	2734,9	37,3	58,9	176,7	1110,5	176,9	182,6	212,9	4,0	168,1
2004	2709,7	37,8	56,4	178,3	1081,4	170,6	178,4	232,0	4,1	165,2
2005	2812,0	38,4	56,5	184,8	1156,1	170,5	189,1	240,7	3,9	170,2
2006	2729,7	40,9	54,4	190,6	1072,1	162,6	183,0	253,8	3,9	171,4
2007	2780,5	40,3	51,9	191,3	1125,2	165,9	185,6	248,6	3,8	166,1
2008	2794,7	40,7	54,2	191,9	1108,2	166,7	193,9	261,4	3,8	159,5
2009	2882,4	39,7	53,4	196,3	1180,2	171,2	201,1	262,3	4,5	145,4
2010	2888,3	42,7	51,6	185,4	1183,4	174,7	190,0	276,9	4,3	151,4
2011	2807,9	43,0	49,9	179,1	1160,2	170,8	178,3	257,2	4,2	149,4
2012	2652,9	43,2	50,1	190,6	1055,2	162,3	167,2	236,8	4,5	154,9

Результаты многолетних наблюдений за уровнем загрязнения атмосферы г. Днепропетровска показывают систематическое превышение среднегодовых концентраций загрязнителей:

- пыли - 1.86 ПДК;
- диоксида азота - 2.02 ПДК;
- формальдегида - 2.88 ПДК;
- бенз (а) пирена - 1.35 ПДК.

Близкие к критическим среднегодовые концентрации аммиака (0.95 ПДК), фенола (0.95ГДК) и оксида углерода (0.7ГДК).

По данным постов наблюдений Госкомгидромета в Днепропетровске наиболее загрязненный атмосферный воздух в районе пл. Островського, проспекта Петровского, где содержание пыли, оксидов азота, оксидов углерода, сернистого ангидрида, сероводорода стабильно превышает ПДК в 3-4 раза.

В целом в 15% проб атмосферного воздуха, которые исследовались в течение двух последних лет, наблюдается превышение ПДК по 10 загрязнителям.

Приведенные данные свидетельствуют о тесной взаимосвязи между объемами выбросов загрязняющих веществ и их концентрациями в приземном слое атмосферы.

Изменение качества воздушной среды, т.е. изменение его состава при наличии примесей, происходит вследствие выбросов в нее различных веществ в результате природных процессов и хозяйственной деятельности человека. Все это говорит о необходимости совершенствования методов и способов оценки антропогенного влияния на окружающую природную среду и принятия мер по его уменьшению.

В настоящее время в проектах строительства предприятий, зданий и сооружений при прогнозных оценках величин приземных концентраций  $C_j$   $j$ -тых загрязняющих веществ (ЗВ), образующихся от выбросов источников, применяются детерминированные зависимости (так называемая модель Берлянда [1]). Недостатком их является то, что они не учитывают случайные отклонения проектных параметров источников и характеристик внешней среды в рассматриваемый промежуток времени. В реальных условиях это может приводить к превышению с некоторой вероятностью  $\alpha$  принятого в Украине норматива качества атмосферного воздуха – максимальных разовых предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ для населенных мест (ПДК<sub>мп</sub>).

С целью исключения этого недостатка установлены закономерности стохастического поля приземных концентраций ЗВ, которое в фиксированной точке А местности в окрестности источников выбросов образует систему (вектор) коррелированных случайных величин  $(C_1, C_2, \dots, C_n)$ .

Математическая модель этого поля определяет в точке А плотность распределения случайных изменений концентраций, а числовые характеристики плотности определяются путем статистической обработки данных подфакельных измерений концентраций:

- математические ожидания  $j$ -тых ЗВ

$$C_j^* = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m C_{jk}$$

- среднеквадратические отклонения

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (C_{jk} - C_j^*)^2}{m-1}},$$

- корреляционные моменты  $K_{jp}$  и коэффициенты корреляции между  $j$ -тым и  $p$ -ым ЗВ

$$K_{jp} = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (C_{jk} - C_j^*)(C_{pk} - C_p^*), \quad r_{jp} = \frac{K_{jp}}{\sigma_j \sigma_p},$$

где  $C_{jk}$  - полученные в  $k$ -том измерении концентрации  $j$ -тых ЗВ,  $m$  - число измерений.

Так как  $k$ -тые измерения проводятся при условиях, отличных от наилучших, для которых определены ПДК<sub>мпj</sub>, то в измеренные концентрации вводи-

лись поправки  $\Delta C_{jk}$ , учитывающие это отличие и определяемые на основании модели Берлянда по формуле (величины с нижним индексом «к» относятся к условиям измерений):

$$\Delta C_{jk} = \frac{AM_j F_j m n \eta}{H^2 \sqrt[3]{\frac{\pi D^2}{4} w_0 (T_z - T_e)}} r(u) \cdot S_1(x) \cdot S_2(x, y) - \frac{A_k M_{jk} F_{jk} m_k n_k \eta_k}{H_k^2 \sqrt[3]{\frac{\pi D_k^2}{4} w_{0k} (T_{zk} - T_{ek})}} \cdot r(u_k) \cdot S_1(x_k) \cdot S_2(x_k, y_k),$$

где:

- характеристики внешней среды:  $A$  – коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы и определяющий условия вертикального и горизонтального рассеивания ЗВ в атмосферном воздухе;  $T_e$  – температура окружающего атмосферного воздуха, °C;  $\eta$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности;  $u$  – величина скорости ветра, м/с;  $\varphi$  – отклонение азимута ветра скорости в период измерений, рад;
- геометрические проектные параметры:  $H$  – высота источника выброса, м;  $D$  – диаметр устья источника выброса, м;  $x, y$  – координаты рассматриваемой точки  $A$  вдоль оси факела и по перпендикуляру к ней ( $x = R \cdot \cos \varphi$ ;  $y = R \cdot \sin \varphi$ ,  $R$  – расстояние от основания источника до рассматриваемой точки местности);
- технологические проектные параметры:  $M_j$  – масса выброса  $j$ -го ЗВ, г/с;  $F_j$  – безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания загрязняющих веществ в атмосферном воздухе;  $T_z$  – температура выбрасываемой газовой смеси, °C;  $w_0$  – средняя скорость выхода газовой смеси (ГВС) из устья источника выброса, м/с.

Остальные величины:  $m$  и  $n$  – безразмерные коэффициенты, учитывающие условия выхода ГВС из устья источника выбросов;  $r(u)$  – коэффициент, учитывающий влияние величины скорости ветра  $u$ ;  $S_1(x)$ ,  $S_2(x, y)$  – коэффициенты, учитывающие влияние изменения расстояния  $x, y$  при изменении в процессе измерений угла  $\varphi$  [1].

Математическая модель величины экологического риска для человека, определяется как вероятность превышения хотя бы одной  $j$ -той ( $j = \overline{1, n}$ ) концентрацией своей максимальной разовой предельно допустимой концентрации для населенных мест:

$$\alpha = \int_{\text{ПДК}_{\text{мп1}}}^{\infty} \dots \int_{\text{ПДК}_{\text{мпn}}}^{\infty} f(C_1, C_2, \dots, C_n) dC_1 \cdot dC_2 \dots dC_n,$$

где  $f$  – плотность распределения концентраций ЗВ в рассматриваемой точке местности с полученными выше числовыми характеристиками.

Такой риск является интегральным показателем качества атмосферного воздуха и при обеспечении его малой величины с высокой надежностью гарантируется отсутствие превышения концентраций загрязняющих веществ ПДК<sub>мп</sub>.

С использованием полученных математических моделей разработана методика оценки экологического риска по данным подфакельных измерений.



Методика включает:

- алгоритм по оценке экологического риска по данным подфакельных измерений концентраций ЗВ от одиночного точечного источника выбросов [2];
- алгоритм по оценке экологического риска по данным подфакельных измерений концентраций ЗВ от группы точечных источников выбросов [3].

На основании методики и данных подфакельных измерений выполнена оценка экологического риска для предприятия ОАО «Днепрококс», г. Днепропетровск [3].

Она показала на высокий фактический риск превышения концентраций ЗВ своих ПДК<sub>мр</sub> ( $\alpha = 0,952$ ). Одной из причин этого является то, что в проектах строительства (реконструкции) предприятия ПАО ЕВРАЗ (ОАО «Днепрококс») и предприятий, оказывающих влияние на величину концентраций ЗВ в точке измерений, не учитывался стохастический характер поля концентраций.

Полученные результаты математического моделирования позволяют перейти к решению задачи управления риском  $\alpha$  с целью достижения высокой надежности не превышения концентрациями ЗВ своих ПДК<sub>мр</sub>. Управляемыми величинами здесь должны выступать проектные параметры источников, выбирая которые достигается малый риск  $\alpha$ . Выбранные оптимальные величины их реализуются путем реконструкции предприятий.

Методика рекомендуется для использования в экологическом мониторинге крупных предприятий, на которых проводятся подфакельные измерения, с целью принятия управленческих решений, обеспечивающих высокую надежность не превышения концентрациями ЗВ своих ПДК<sub>мр</sub>.

#### Список литературы

1. ОНД – 86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеиздат.-1987. - 94 с.
2. Полторацкая В.Н. Алгоритм оценки составляющей экологического риска, обусловленной загрязнением атмосферного воздуха, по данным подфакельных измерений концентраций // Вісн. Придніпровської держ. академ. будівництва та архітектури. – Дніпропетровськ, 2007. - №12. - С. 36-48.
3. Алгоритм решения задачи оценки экологического риска от группы точечных источников выбросов по данным измерений / Артамонова А.В., Долодаренко В.А., Полторацкая В.Н., Фалько В.В.//Матер. IV наук.- практ. конф. «Проблеми природокористування, сталого розвитку та техногенної безпеки регіонів», 02-05 жовтня 2007 р., ч. II. – Дніпропетровськ. – 2007. – С. 11, 12.
4. Полторацкая В.Н., Полищук С.З., Тимошенко Е.А. Оценка экологического риска на примере точечных источников выбросов предприятия ОАО «Днепрококс», г. Днепропетровск // Строительство, материаловедение, машиностроение». Сб. научн. трудов. Вып. 48, ч.2. – Днепропетровск, ПГАСА, 2009. – С. 218 – 225.
5. Предельно допустимые концентрации (ПДК) и ориентированные безопасные уровни воздействий загрязняющих веществ (ОБУВ) в атмосферном воздухе населённых мест. – Донецк: Укр НТЭК, 1998. – 139 с.
6. Основні методологічні положення та оцінка впливу забруднення навколишнього середовища на здоров'я людини / Горова А.І., Огір Л.Б., Сокульский А. А. [та ін.] // Екологія і природокористування. – Дніпропетровськ, 2003. – Вип.5. – С. 88–93.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Зберовським О.В.  
Надійшла до редакції 10.11.13*

## АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНИХ ТА СОЦІАЛЬНИХ НАСЛІДКІВ РОЗМІЩЕННЯ ВІДХОДІВ ВУГЛЕВИДОБУТКУ НА ЗЕМНІЙ ПОВЕРХНІ

Проаналізовані екологічні та соціальні наслідки розміщення відходів вуглевидобутку. Вивчено особливості впливу породних відвалів на екологічний стан промислових, сільськогосподарських та селітебних територій.

Проанализированы экологические и социальные последствия размещения отходов угледобычи. Изучены особенности влияния породных отвалов на экологическое состояние промышленных, сельскохозяйственных и селитебных территорий.

The environmental and social impacts of coal waste disposal are analyzed. The features of dumps impact on the ecological state of industrial, agricultural and residential areas are studied.

**Вступ.** Відходи вугільної галузі в більшості випадків являють собою масштабні техногенно-створені джерела постійного негативного впливу на об'єкти навколишнього середовища. Аналіз досліджень М.П. Зборщика, Л.Г. Зубової, А.Ф. Горового, Н.А. Шевчука, В.С. Мельникова, Г.А. Кроїк, В.В. Осокіна, Л.О. Петрової, М.Ф. Смирного, Н.В. Олійник та інших дозволяє зробити висновок, що на всіх етапах існування породних відвалів – з моменту видачі відвальної маси на земну поверхню до згасання внутрішніх та зовнішніх фізико-хімічних, мінералоутворюючих, біологічних та інших процесів – відбувається поступове внутрішнє нагрівання породних мас, окислення нестійких сполук, вилуговування активних елементів, кислотне стікання новоутворених розчинів, повітряна та водна ерозія схилів відвалів тощо. При вивченні внутрішніх та зовнішніх особливостей, притаманних породним масам, виникають проблеми, пов'язані саме з комплексними перетвореннями у відвалах, адже більшість реакцій проходять одночасно, нівелюючи або підсилюючи хімічну активність окремих компонентів [1–3].

Невирішеними залишаються питання, які стосуються особливостей міграції забруднюючих речовин в залежності від стану відвалів, а саме: стадій внутрішніх та зовнішніх фізико-хімічних перетворень, штучного або природного втручання в перебіг процесів, порушення цілісності тіла та схилів раніше створеного відвалу тощо. У зв'язку з цим виникає необхідність розробки наукових основ управління екологічними ризиками для природного середовища та людини на територіях розміщення відходів вугледобувних підприємств.

Однією з важливих проблем на шляху успішного розвитку вугільних підприємств є безперервне накопичення відходів всіх типів, найбільш масштабними з яких є відвали пустих та розкривних порід. Лише в Луганській області, відходи вуглевидобутку у вигляді 495 млн. м<sup>3</sup> розкривних і шахтних порід розташовані на площі близько 3 тис. га, вилученій з господарського користування. На території області розташовано 566 відвалів, з яких 159 діючих та 66 горять [4].

**Метою роботи** є аналіз екологічних та соціальних наслідків розміщення відходів вуглевидобутку у вигляді породних відвалів вугільних шахт.

**Викладення матеріалу та результати досліджень.** Відходи вуглевидобутку стають техногенним компонентом довкілля у гірничодобувних регіонах, а негативні наслідки їх розміщення на земній поверхні очевидні. Породні відвали є одним з джерел привнесення у довкілля значної кількості забруднюючих речовин (токсичного пилу, отруйних газів, продуктів реакцій тощо), які прямо або опосередковано впливають на стан здоров'я населення. Агресивні сполуки у вигляді кислот, лугів, солей важких металів та інших компонентів змиваються з поверхні відвалу та зрештою потрапляють до ґрунтових вод, ґрунтів, призводять до їх забруднення.

Гірничі породи, що складають породний відвал, на земній поверхні потрапляють в інші, ніж у надрах, термодинамічні умови, стають в повітряних умовах значно нестабільними і зазнають небезпечних фізико-хімічних перетворень. Під впливом вологи та повітря вони інтенсивно окислюються, що обумовлено властивістю шарів відвалу адсорбувати кисень, що вступає до хімічних реакцій з вугіллям. Цей процес супроводжується виділенням тепла та підвищенням температури, що ще більше підсилює реакції окислення [3]. Потрапляючи в атмосферне повітря, небезпечні сполуки та пил призводять до негативних змін у хімічному складі повітря, згубно впливають на фітоценози, а також призводити до збільшення захворюваності населення.

Екологічна небезпека породних відвалів залежить від багатьох факторів: хімічного та мінералогічного складу порід, особливостей фізико-хімічних внутрішніх та зовнішніх перетворень у поєднанні з кліматичними та гідрогеологічними умовами, схильності до деградаційних процесів тощо. Кожен породний відвал, залежно від місця розташування, має певні характерні особливості і свою специфіку негативного впливу на довкілля і здоров'я людини. Характер та інтенсивність впливу цього техногенно-створеного джерела небезпеки безпосередньо залежить від умов його розташування та об'єктів, на які спрямовано негативний вплив. Крім того, в процесі накопичення хімічний склад розкривних та пустих порід зазнає серйозних перетворень і не співпадає з початковим, що означає також і невідповідність попередньо визначеному класу небезпеки.

Результати проведених досліджень екологічних та соціальних наслідків розміщення породних відвалів залежно від умов їх розташування та видів негативного впливу на об'єкти навколишнього середовища приведені в табл. 1.

Аналіз даних табл. 1 виявив, що найбільшу небезпеку становлять породні відвали, які в процесі розвитку підземних робіт та розростання населених пунктів потрапляють в межі селітебної зони шахтарських міст. Небезпека пов'язана з надходженням забруднюючих речовин в атмосферне повітря, ґрунти та водні об'єкти населених міст. Породні відвали, розташовані у межах селітебної зони, можуть стати причиною підвищення рівня загальної захворюваності, послабляють імунну систему та репродуктивну функцію. Крім того, відвали є багатотонними нагромадженнями грубоуламкової суміші гірських порід, схильних до проявів деформацій, раптових викидів продуктів внутрішніх реакцій або зсувів поверхні, і є потенційно небезпечними для людини як фактор можливих тілесних пошкоджень та втрати працездатності.

## Групи породних відвалів в залежності від умов їх розташування

Об'єкт негативного впливу	Розташування породних відвалів			
	в межах селітебної зони	на територіях сільськогосподарських угідь	на територіях з природним ландшафтом	на промисловій території
Атмосферне повітря	+	+	+	+
Ґрунти	+	+	+	+
Підземні та поверхневі води	+	+	+	+
Флора і фауна	±	+	+	±
Родючість ґрунтів	±	+	+	±
Врожайність сільськогосподарських угідь	±	+	±	±
Здоров'я населення	+	±	±	±
Здоров'я працівників	±	-	-	+

Примітка: «+» – безпосередній сильний негативний вплив на об'єкт, «±» – ймовірний середній опосередкований вплив, «-» – вплив відсутній або незначний.

Інша ситуація спостерігається у разі розміщення породних відвалів вугільних шахт на територіях сільськогосподарських угідь. Окрім прямого відчуження земель та вилучення їх із сільськогосподарського використання, вплив відвалів на екологічний стан ґрунтових систем пов'язаний з цілим комплексом техногенних процесів, у тому числі – кислотним стіканням з поверхні, а також вилуговуванням мінералів. Винесення компонентів з поверхні породних відвалів сприяє переходу у розчин солей лужних та лужноземельних елементів, сульфідів, а також важких металів: Co, Ni, Cu, Pb, Cd, Zn, Fe, Mn та ін. Одним з основних шляхів потрапляння токсичних речовин в організм людини є трофічний, тобто небезпека для здоров'я людини посилюється у випадку вживання продуктів, вирощених на забруднених територіях [5].

Результатом складних хімічних перетворень є формування в районах відвалів сульфатно-кислих ґрунтів замість кальцієвих, які є характерними для степової зони України. На території впливу відвалів відбувається також зміна кислотно-основних умов, має місце вимивання гумітів, відзначається деструктуризація ґрунтової маси у верхніх горизонтах ґрунтового профілю.

Також до негативних процесів, ініційованих розміщенням відвалів, відносять посилення міграційної активності токсикантів, формування геохімічних аномалій, руйнування кристалічних решіток глинистих мінералів ґрунтів, засо-

лення, пригнічення біологічної активності ґрунтів, деградацію гумусу та втрату родючості.

Випадки несанкціонованого видобування корисних копалин з відвалів призводять до порушення поверхневого шару ґрунту та засмічення земель. Так у західній та південній частині Луганської області спостерігаються фрагментарні та локальні забруднення ґрунтів важкими металами.

Важкі метали, що змиваються в результаті ерозії з поверхні відвалів, у зв'язку з підкисленням середовища переходять в рухомі форми і включаються до біологічного кругообігу. Сільськогосподарські угіддя у районі розташування породних відвалів виснажені техногенно-спричиненими процесами і втрачають свою придатність до використання за головним цільовим призначенням.

Породні відвали, які розташовані на території природних ландшафтів, спричиняють виникнення ділянок з пригнобленою рослинністю, на яких переважають рудеральні види. Продукти внутрішніх процесів відвалів негативно впливають на природну флору та фауну в районах розміщення порід. Значного негативного впливу зазнає ґрунтовий покрив, і це призводить до заміни видів, притаманних даній території, більш витривалими у складних умовах. Має місце зникнення характерних для певного ландшафту видів, що призводить до руйнації трофічних зв'язків та порушення стійкості степових екосистем. Породні відвали також є джерелом постійного потрапляння в атмосферне повітря отруйного пилу, газів та парів.

Відвали, розташовані на територіях промислових підприємств, являють собою своєрідний резерв компонентів, що містяться в нагромадженнях порід. Негативний вплив на довкілля, описаний вище, стосується і цієї групи відвалів, проте особливої уваги заслуговує уповільнена взаємодія з навколишнім середовищем. Процеси потрапляння забруднюючих речовин залежать від особливостей промислової зони, і, на відміну від відкритого простору сільськогосподарських угідь і природних ландшафтів, шляхи привнесення забруднювачів в об'єкти довкілля дещо обмежені.

Відвальна маса є потенційною загрозою для здоров'я обслуговуючого персоналу підприємства, а також джерелом екологічної небезпеки для об'єктів довкілля на прилеглих територіях.

Породні відвали незалежно від умов розміщення впливають на екологічний стан таких об'єктів довкілля, як атмосферне повітря, ґрунти, поверхневі та підземні води, біоту та здоров'я населення, проте існують певні особливості. Основними негативними наслідками розміщення породних відвалів в межах селітебної зони є забруднення об'єктів навколишнього середовища і, як наслідок, збільшення захворюваності населення.

Найбільший негативний вплив породних відвалів, розташованих на територіях сільськогосподарських угідь, зазнають ґрунти, атмосферне повітря, що, в свою чергу, призводить до зменшення врожайності.

Відвали, розташовані на територіях з природним ландшафтом, представляють найбільшу небезпеку для природного стану об'єктів довкілля – атмосферного повітря, поверхневих та підземних вод, ґрунтів та біоти. В результаті тривалого впливу на стан об'єктів довкілля змінюється видовий склад рослинного та тваринного світу, а також знижується біорізноманіття ландшафтів.

Породні відвали, розташовані на території промислового майданчика підприємства, можуть негативно впливати на стан здоров'я працівників вугільних шахт. Крім того, породні відвали можуть підсилювати негативний вплив на довкілля інших технологічних об'єктів шахт.

Комплексні наукові, методичні та прикладні дослідження екологічних ризиків на територіях розміщення відходів вугільних шахт дозволять сформувати сучасну інформаційну та картографічну бази екологічних даних, на основі яких необхідно розробляти управлінські природоохоронні заходи.

**Висновки.** Розміщення відходів вуглевидобутку на земній поверхні є одним з вагомих факторів екологічної небезпеки для прилеглих територій та стану здоров'я населення вуглевидобувних регіонів. Інтенсивність та характер впливу породних відвалів безпосередньо залежить як від їх внутрішніх характеристик, так і параметрів навколишнього середовища. Склад порід, їх фізико-хімічні показники та процеси, спричинені зовнішніми кліматичними, гідрогеологічними та іншими умовами, дозволяють прогнозувати зміни стану відвалів та перетворення у часі. Особливості розташування породних відвалів, в свою чергу, дозволяють розробити способи зниження ризиків забруднення об'єктів навколишнього середовища на територіях складування твердих відходів вугледобувної промисловості шляхом удосконалення технології проведення технічної рекультивації з використанням природних матеріалів. Крім того, необхідно впроваджувати технології переробки та вилучення з відходів корисних для різних галузей народного господарства компонентів.

#### Список літератури

1. Кроїк, Г.А. Закономірності розподілу техногенних та токсичних елементів у відходах добування та переробки вугілля Західного Донбасу [Текст] / Г.А. Кроїк, О.В. Мельник // Вісник ДНУ, серія «Геологія. Географія». – Д.: Вид-во ДНУ, 2012. – Вип. 14. – Т. 20. – № 3/2. – С. 77-82.
2. Кузік, І.М. Вплив породних відвалів шахт на компоненти довкілля та визначення можливостей щодо його зменшення [Текст] / І.М. Кузік // Екологія і природокористування. – 2012. – № 15. – С. 31-37.
3. Павличенко, А.В. Екологічна небезпека породних відвалів ліквідованих вугільних шахт [Текст] / А.В. Павличенко, А.А. Коваленко // Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 110. – С.114-120
4. Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Луганській області у 2009 році [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: <http://www.menr.gov.ua/content/article/7789/>.
5. Демура, В.І. Розподіл та накопичення важких металів в рослинах та ґрунтах на територіях розміщення відходів вуглевидобутку [Текст] / В.І. Демура, В.О. Готвянська, А.В. Павличенко // Геотехнічна механіка: міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 111. – С.22-28

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Колесником В.Є.  
Надійшла до редакції 21.10.2013*

## УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИКОЙ СХВАТЫВАНИЯ РАСТВОРОВ ВЯЖУЩИХ ВЕЩЕСТВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА

Описаны результаты экспериментов по исследованию изменения прочностных характеристик разных типов растворов во времени подверженных динамическому воздействию.

Описано результати експериментів з дослідження зміни характеристик міцності різних типів розчинів у часі підвернених динамічному впливу

The results of the experiments conducted on the Exploration the changes strength characteristics of different types of solutions of time that yielded the dynamic impact.

**Введение.** В работе [1] предложена технология формирования траншеи с помощью взрыва, которая предусматривает одновременное крепление её стенок за счёт использования незаряженных скважин в качестве резервуаров для укрепляющих вяжущих суспензий.

Устойчивость стенок траншеи от обвала обеспечивается за счёт комплексного использования явлений, которыми сопровождается взрыв системы скважинных зарядов, а именно: перемешивание укрепляющей суспензии с грунтом по периметру траншеи и разжижение во взрывной полости под действием продуктов детонации и температуры [2].

В данной технологии в качестве укрепляющих суспензий предусмотрено применение строительных растворов с разными видами вяжущих.

Одной из главных технологических характеристик при применении этого метода является время твердения раствора в связи с наличием в грунтовом массиве поверхностных и подземных водных потоков, которые могут влиять на схватываемость растворов за счёт вымывания из них вяжущей составляющей.

Для представления полной картины изменения прочностных характеристик строительных растворов во времени при динамическом воздействии на них, проведена серия экспериментов на натуральных материалах.

**Цель работы.** Установить зависимость изменения прочностных характеристик различных типов укрепляющих растворов во времени при воздействии на них динамической нагрузки.

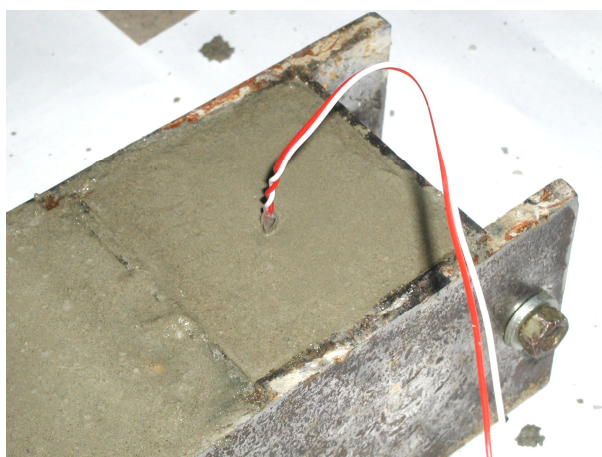
**Материал и результаты исследований.** Для изучения механизма влияния динамической нагрузки от действия взрыва одиночного заряда на прочностные характеристики закрепляющих растворов во времени проведено исследование стандартных образцов размером 70,7×70,7×70,7 мм., изготовленных на основе цементно-глинистого, цементно-песчаного и цементно-известкового растворов в нормальных условиях при воздействии на них взрывного импульса и без него [3].

Характерной особенностью данных исследований является то, что для получения достоверной оценки прочностных характеристик, их показатели должны сниматься через каждые 7 дней до достижения в исследуемых образцах проектной прочности (28 суток в нормальных условиях).

В связи с этим прочностные характеристики исследуемых образцов определялись неразрушающим методом с помощью склерометра «Schmidt Hammer 225». Поскольку этот метод является неточным и может содержать значительную погрешность, для достоверности полученных результатов исследования проводились дополнительно гидравлическим прессом типа ПСУ - 10.

Исследуемые образцы подвергались динамической нагрузке следующим образом. В образец - куб, расположенный в металлической форме, устанавливался заряд диаметром 8 мм и высотой 25 мм на глубину 45 мм с таким расчетом, чтобы он находился примерно в центре образца. В качестве взрывчатого вещества (ВВ) использовали дымный порох. Масса заряда составляла 1 гр. Инициирование производилось с помощью электровоспламенителя, который состоит из смеси роданистого свинца и бертолетовой соли (рис.1,а). Открытая часть формы с образцом раствора накрывалась металлическим листом и сверху нагружалась (рис.1, б).

а)



б)



Рис. 1. Приложение динамической нагрузки на образец-куб: а – подготовка образца; б – проведение эксперимента



Рис. 2. Опытные образцы-кубы после освобождения из металлической формы



Образцы выдерживались при температуре  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $(65 \pm 10)\%$ . Через  $(24 \pm 2)$  часа образцы-кубы освобождались из формы (рис. 2) и измерялась погрешность с помощью штангенциркуля, которая составляла 0,1 мм, что не превышает допустимой (рис.2).

Показатели высоты упругого отскока (Н), полученные склерометром «Schmidt Hammer 225» фиксировались каждые 7 суток до достижения образцами проектной прочности (28 суток). Затем, с помощью тарировочных кривых определялась прочность образцов на сжатие  $R$  для цементного, цементно-известкового и цементно-глинистого растворов (рис. 3) как при воздействии на них динамической нагрузки, так и без неё.

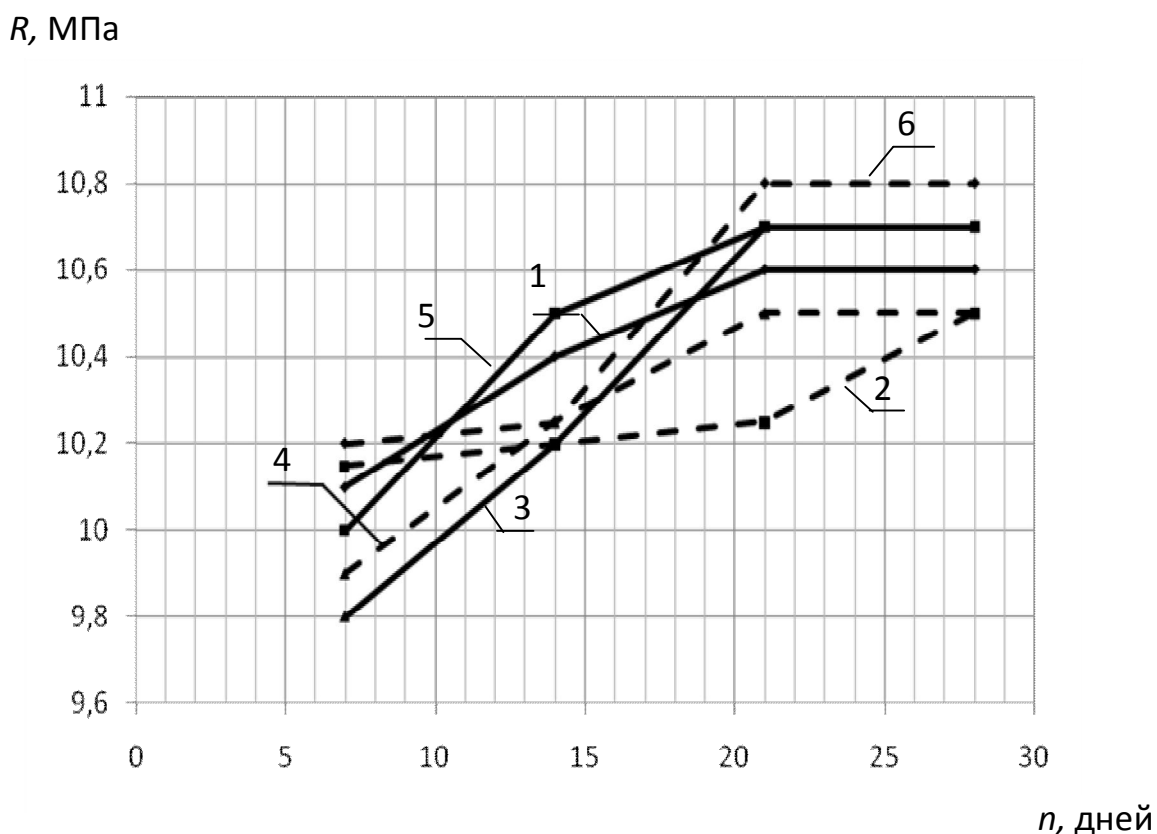


Рис. 3. Зависимость прочности растворов на сжатие от времени твердения: 1– цементный раствор, 2 – цементный раствор, который подвергался действию взрыва, 3– цементно-известковый раствор, 4 – цементно-известковый раствор, который подвергался действию взрыва, 5– цементно-глинистый раствор, 6 – цементно-глинистый раствор, который подвергался действию взрыва

Из рисунка 3 видно, что на седьмой день схватывания образец из цементного раствора, который подвергался воздействию взрыва, набрал прочность равную 10,15 МПа, а обычный образец – 10,0 МПа. Затем картина характерно изменяется: примерно на 9-й день их прочность сравнялась и достигла отметки в 10,18 МПа. На 21 день схватывания прочность обычного цементного образца достигает 10,7 МПа, а прочность образца, который подвергался действию взрыва – 10,25 МПа. На 28-й день - обычный образец достиг прочности 10,7 МПа, а при воздействии динамической нагрузки - 10,5 МПа.

Примерно та же тенденция роста прочности наблюдается для образцов, приготовленных на основе цементно-известкового раствора. На 7 день схватывания образец, который подвергался воздействию взрыва, набрал прочность 9,9 МПа, а обычный аналогичный образец - 9,8 МПа. На 14 день прочность обоих образцов возрастала планомерно. Затем, на 15-ый день их прочность сравнялась и составила 10,3 МПа. На 21 день прочность обычного образца (10,7 МПа) заметно увеличивается по сравнению с образцом, который подвергался воздействию взрыва (10,5). На промежутке с 21 по 28 день прочность обоих образцов осталась неизменной и полностью совпала с приобретенной прочностью (28 суток) аналогичных образцов на основе цементного раствора.

Анализируя изменение прочности образцов, приготовленных из цементно-глинистого раствора, видно, что на 7 день схватывания образец, который подвергался воздействию взрыва, достиг прочности в 10,2 МПа, а обычный образец - 10,0 МПа. Примерно на десятый день их прочность сравнялась и составляла 10,22 МПа, на 14-й день прочность обычного образца резко повысилась до 10,5 МПа, а прочность образца, который подвергался воздействию взрыва, практически не изменилась – 10,25 МПа. Затем скорость роста прочности образцов снова менялась и на 19-й день сравнились, составляя 10,63 МПа. На 21-й день обычный образец набрал прочности 10,7 МПа, а образец который подвергался динамической нагрузке - 10,8 МПа. Эта величина до конца исследований оставалась неизменной.

После выдержки образцов в течение 28 суток в нормальных условиях прочность на сжатие образцов цементного, цементно-известкового и цементно-глинистого растворов дополнительно определялась с помощью гидравлического пресса ПСУ-10 (рис. 4).

#### Вид раствора

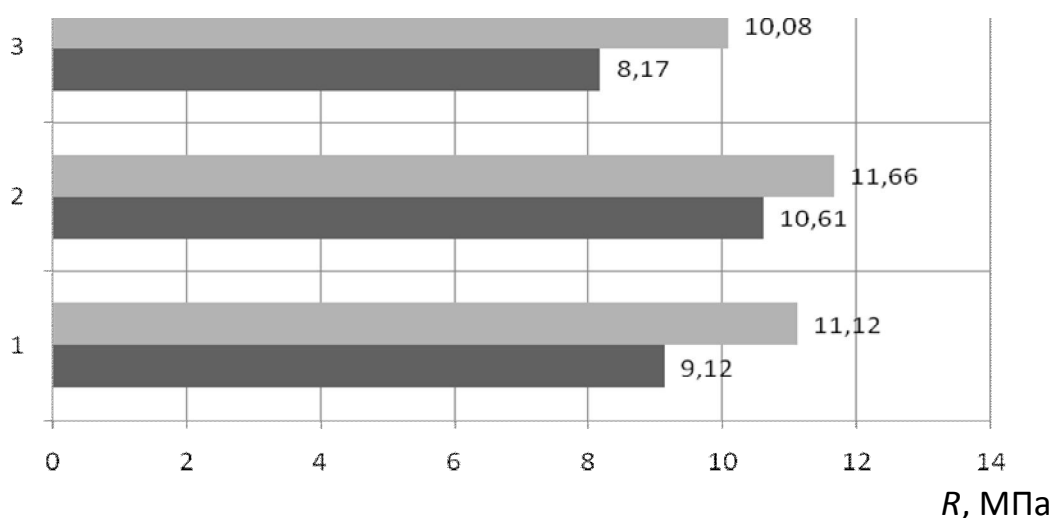


Рис. 4. Результаты определения прочности на сжатие стандартных кубиков прессом ПСУ-10 № 1753: 1 - цементный, 2 - цементно-известковый 3 - цементно-глинистый

Результаты определения прочности на сжатие прессом ПСУ - 10 показали, что обычный образец цементного раствора достиг прочности 9,12 МПа, что на 17,3 % (1,58 МПа) меньше, чем при определении прочности этого же образца с помощью склерометра. Аналогичный цементный образец, который подвергался динамическому воздействию, набрал прочность 11,12 МПа, что на 10,5 % (0,62 МПа) больше, чем при определении прочности этого же образца с помощью склерометра. Для цементно-известкового раствора соответственно: прочность стандартного образца достигла 10,61 МПа, что на 0,9 % (0,09 МПа) меньше, чем при определении прочности с помощью склерометра; прочность образца, который поддавался динамическому воздействию - 11,66 МПа, что на 11,0 % (1,16 МПа) больше, чем при определении прочности с помощью склерометра. Для цементно-глинистого раствора соответственно: прочность стандартного образца составила 8,17 МПа, что на 23,6 % (2,53 МПа) меньше, чем при определении прочности с помощью склерометра; прочность образца, который подвергался динамическому воздействию - 10,08 МПа, что на 6,67 % (0,72 МПа) меньше, чем при определении прочности с помощью склерометра.

Из сравнения полученных результатов видно, что разница прочности на сжатие исследуемых образцов, полученных с помощью склерометра и прессы, находится в пределах  $0,9 \div 23,6$  %, что не превышает допустимой погрешности, которая составляет 30 %.

На основе полученных данных можно сделать вывод, что исследуемые образцы цементного, цементно-известкового и цементно-глинистого растворов, которые подвергались динамической нагрузке, на первом этапе твердения (7 суток) приобрели прочность значительно выше, чем необработанные аналогичные образцы. Это значит, что время твердения первых образцов будет быстрее, чем вторых, что, в свою очередь, повышая надёжность растворов против вымывания из них вяжущих составляющих при использовании их в качестве укрепляющих суспензий для повышения устойчивости стенок траншеи от обвала.

**Выводы.** Следовательно, воздействие динамической нагрузки в виде взрыва при применении цементных растворов в качестве укрепляющих суспензий на первом этапе твердения (7 суток) обеспечивает значительное повышение прочности закрепляющих растворов, а соответственно и устойчивость стенок траншеи от обвала в начальный период ее проходки.

Достоверность полученных результатов определяется разницей прочностных характеристик исследуемых образцов, полученных с помощью склерометра и прессы, которая находится в пределах  $0,9 \div 23,6$  %, что не превышает допустимой погрешности в 30 %.

#### Список литературы

1. В.Г.Кравець. Розвиток вибухових технологій в геобудівництві/ В.Г.Кравець, В.В.Вапнічна, Л.В. Шайдецька//Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2005. – Вип.12. – С.42 – 45.
2. Шайдецька Л.В. Дослідження показників міцності ґрунту в закріпленій зоні при динамічному впливі / Л.В. Шайдецька // Вісник КТУ. – 2008. – Вип. 20. – С. 45–47.
3. Малинин А.Г. Струйная цементация грунтов / А.Г. Малинин. – Пермь: Пресстайм, 2007.- 168 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Соболевим В.В.  
Надійшла до редакції 15.11.13*

## КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ НЕРАБОЧИХ БОРТОВ КАРЬЕРА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ШТОКООБРАЗНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАТОКА

Для условий штокообразного месторождения Катока выбран и обоснован метод расчета устойчивости нерабочих бортов. По одному из типичных разрезов карьерного поля выполнены исследования по обоснованию рационального конструктивного оформления нерабочего борта выпуклого (многогранного профиля) и его устойчивости.

Для умов штокоподібного родовища Катока вибраний і обґрунтований метод розрахунку стійкості неробочих бортів. По одному з типових розрізів кар'єрного поля виконані дослідження по обґрунтуванню раціонального конструктивного оформлення неробочого борту опуклого (багатогранного профілю) і його стійкості.

For the terms of штокообразного deposit Катока is chosen and reasonable method of calculation of stability of non-working sides. On one of typical cuts of the quarry field executed research on the ground of rational structural registration of non-working side of protuberant (many-sided profile) and his stability.

Из теории управления состоянием горных массивов известно, что многообразии геологических и гидрогеологических особенностей разрабатываемых месторождений исключает существование какого-то универсального метода решения задачи по определению предельных параметров нерабочего борта карьера пригодного для всех конкретных условий. В связи с этим выбор метода расчета рекомендуется производить на основе двух групп критериев - общих и частных. Общие критерии определяют обоснованность метода в теоретическом отношении, частные - возможность использования данного метода в конкретных практических условиях.

Общие условия следующие:

- метод должен обеспечивать установление в массиве формы и положения определенной зоны, в каждой точке которой соблюдается условие предельного равновесия, величины и направления напряжений действующих в этой зоне.

- метод должен позволять находить форму и положение в массиве наиболее сложной поверхности, отвечающей условию  $\sum F_{y\delta} / \sum F_{c\delta v} \rightarrow \min$  и управлениям равновесия статики, а также величину и направление напряжений, действующих по этой поверхности ( $\sum F_{y\delta}$  и  $\sum F_{c\delta v}$  соответственно сумма удерживающих и сдвигающих сил).

Частные критерии следующие:

Выбранный метод расчета должен основываться на таком типе механико-математической модели массива горных пород, который наиболее полно отражает свойства реального массива в данных конкретных условиях; в выбранном методе расчета должна учитываться схема деформации реального откоса, а также величина и направление внешних сил, действующих на реальный откос. Метод может быть рекомендован для практического использования лишь при условии, что он удовлетворяет одному из общих критериев и всем частным. Кроме того, при вы-

боре метода расчета устойчивости откоса (помимо двух перечисленных групп критериев) следует учитывать еще два немаловажных момента:

1) контур откоса, определенный данным методом, должен обеспечивать экономичность вскрышных работ.

2) метод должен быть удобен на практике (минимальное число расчетов и графических построений, возможность использования графиков, таблиц, номограмм и пр.).

Необходимо указать, что ни один из известных методов расчета не отвечает в полном объеме упомянутым критериям. Поэтому в каждом конкретном случае требуется оценить, хотя бы приближенно, знак и величину погрешности коэффициента запаса устойчивости, обусловленных несоответствием применяемого метода общим или частным условиям.

Анализ геологических и гидрогеологических условий месторождения трубки «Катока» показали, что данное месторождение является сложноструктурным. С целью более точного и полного учета факторов, влияющих на устойчивость бортов карьера, месторождение (карьерное поле) разделено на четыре участка: северный (1-1), восточный (2-2), южный (3-3), и западный (4-4). На каждом из этих участков горные породы, слагающие нерабочие борта имеют, в среднем, примерно одинаковые прочностные характеристики (сцепление, угол внутреннего трения и плотность). Как показал выполненный анализ, а также установленные зависимости их изменения с увеличением глубины карьера значения этих характеристик возрастают более резко до глубины 100-150 м. После 150 м возрастание их происходит медленнее.

С учетом геологического строения месторождения и установленных закономерностей изменения прочностных характеристик (сцепление -  $C$ , угол внутреннего трения -  $\varphi$ , плотность -  $\rho$ , коэффициент структурного ослабления -  $\lambda$ ) с глубиной, толщину пород нерабочего борта карьера следует рассматривать как двухслойную. Прочность пород в верхнем слое значительно отличается от нижнего и увеличивается с глубиной. В таких условиях целесообразно придать борту 2-х гранную форму его профиля, хотя по технологическим условиям (наличие перегрузочных пунктов) профиль борта может быть многогранным.

Экономическая целесообразность конструирования бортов выпуклого профиля в однородной среде достаточно обоснована в работах С.И. Попова, Г.Л. Фисенко, В.Т. Сапожникова [1,2]. Теоретический криволинейный профиль выпуклого борта представляет собой геометрическое место точек, в каждой из которых соблюдается условие предельного напряженного состояния. Методика построения борта с реальным профилем заключается в том, чтобы вписаться в этот криволинейный профиль [3]. Значения параметров борта приближаются к оптимальным, но не достигают их. Для оптимизации параметров борта необходимо прежде всего разграничить призмы активного давления и упора, составляющие общую призму возможного обрушения.

Для условий месторождения «Катока» по одному из типичных разрезов карьерного поля (рис.1) выполнены исследования по обоснованию рационального конструктивного оформления нерабочего борта выпуклого (многогранного профиля) и его устойчивости.

В качестве базового варианта конструктивного оформления нерабочего борта карьера  $H_k=450$  м принята конструкция борта ВНИМИ (на рис 1 правый борт). Схема этого борта показана на рис. 2, из которой видно, что его конструкция многогранная (выпуклая форма). Отстройка борта производилась с учетом установленных, в соответствии с нормами технологического проектирования и правилами ТБ, параметров нерабочих уступов (высоты и углов откосов) и параметров нерабочих площадок (берм). Угол откоса нерабочего борта при плоском его профиле составляет  $\alpha = 39^0-40^0$ . Выпуклая форма борта не изменяет величину угла  $\alpha$  и позволяет существенно уменьшить объем вскрышных пород, извлекаемых в конечных контурах карьера, что является преимуществом такой формы борта.

Следует отметить, что при конструировании борта по рассматриваемому базовому варианту не учтена важная технологическая особенность разработки месторождения «Катока» – применение циклично-поточной технологии (автомобильно-конвейерного транспорта), предусматривающей сооружение на нерабочем борту перегрузочных пунктов (ПП). Наличие ПП требует оставления на борту соответствующих площадок увеличенной ширины (40-60 м) Их число при конечной глубине карьера  $H_k=450$  м будет равно 3 [4]. Последний ПП будет располагаться на расстоянии равном  $\approx 1/3 H_k$  от дна карьера (по вертикали). Откорректированный, с учетом вышеизложенного, профиль борта выпуклой формы показан на рис. 3.. На этом рисунке прямая 1 характеризует плоский профиль борта, а кривая 2 – выпуклый профиль. Предельный угол откоса плоского борта ( $\alpha_{пр}$ ) определяется по методике [6,7], т.е.

$$\alpha_{пр} = \arctg \frac{tg \varphi_{расч}}{1 - \frac{H_c}{H_k}}, \quad \text{град},$$

где  $\varphi_{расч}$  – расчетный угол внутреннего трения пород в массиве борта, градусы.

$$\varphi_{расч} = \varphi_{ср} / K_{з.у.расч.}, \quad \text{град},$$

где  $\varphi_{ср}$  – среднее значение угла внутреннего трения,  $\varphi_{ср}=35,8^0$ ,  $K_{з.у.расч.}$  – расчетный коэффициент запаса устойчивости.

Тогда

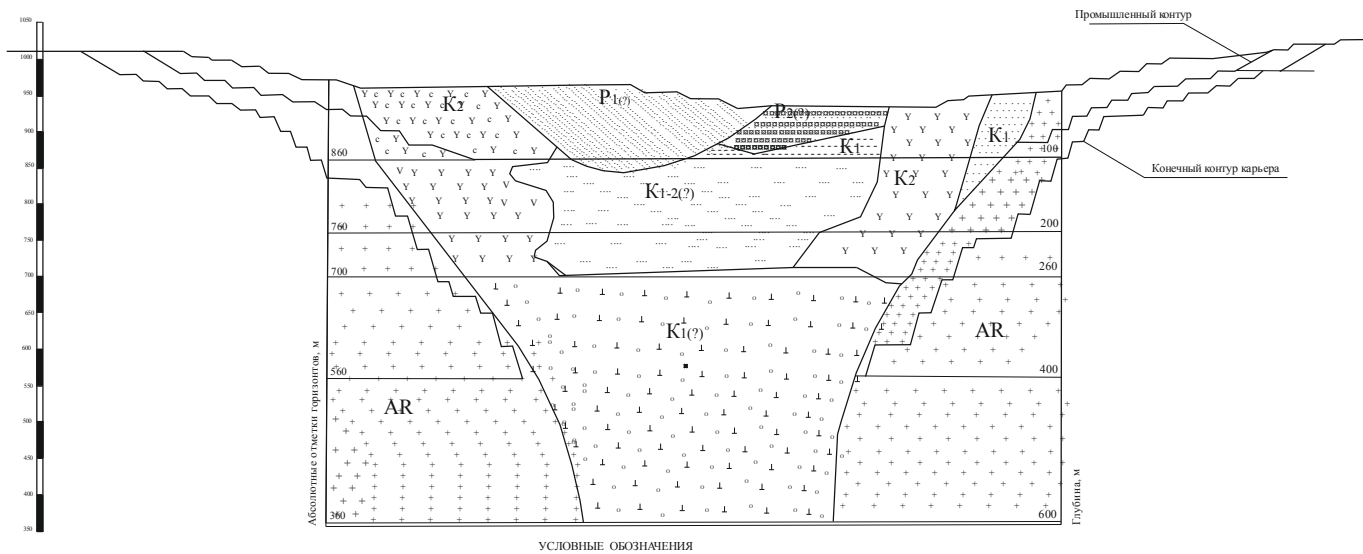
$$\alpha_{пр} = \arctg \frac{tg 18^0}{1 - \frac{271}{450}} = 39^0$$

где  $271 \text{ м} = H_c$  – параметр связности пород массива борта,

$$H_c = \frac{6,14 \cdot C_{расч}}{\rho} ctg(45 - \frac{\varphi_{hfcx}}{2}), \text{ м}$$

$$C_{расч} = \frac{C \cdot \lambda_{ср}}{K_{з.у.расч}} = \frac{379 \cdot 0,4}{2} = 75,8 \text{ м} / \text{м}^2$$

$$H_c = \frac{6,14 \cdot 75,8}{2,35} ctg(45 - \frac{18}{2}) = 271 \text{ м}$$



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Перекрывающие породы		Рудное тело	
P 2 (?)	Мезоформационные пески (мфи)	K 2 (?)	Кимберлитовые брекчи с массивной текстурой цемента (КБМ)
P 1 (?)	Мезоформационные слабосцементированные песчаники (мфи I)	K 2 (?)	Слюзистые КБМ
K 1 (?)	Вулканогеи-осадочные породы (воп)	K 1 (?)	Автолитовые кимберлитовые брекчи (АКБ)
AR	Вмещающие породы	K 1-2 (?)	Кимберлитовые туфобрекчи, туфосланцы второй фазы формирования с высоким содержанием алмаза (КТБ)
	Гнейсы, кристаллические сланцы, гранитоиды	K 1 (?)	Кимберлитовые туфобрекчи, туфосланцы, первой фазы формирования с низким содержанием алмаза (К1Б)

Рис. 1. Типичный профильный разрез карьера

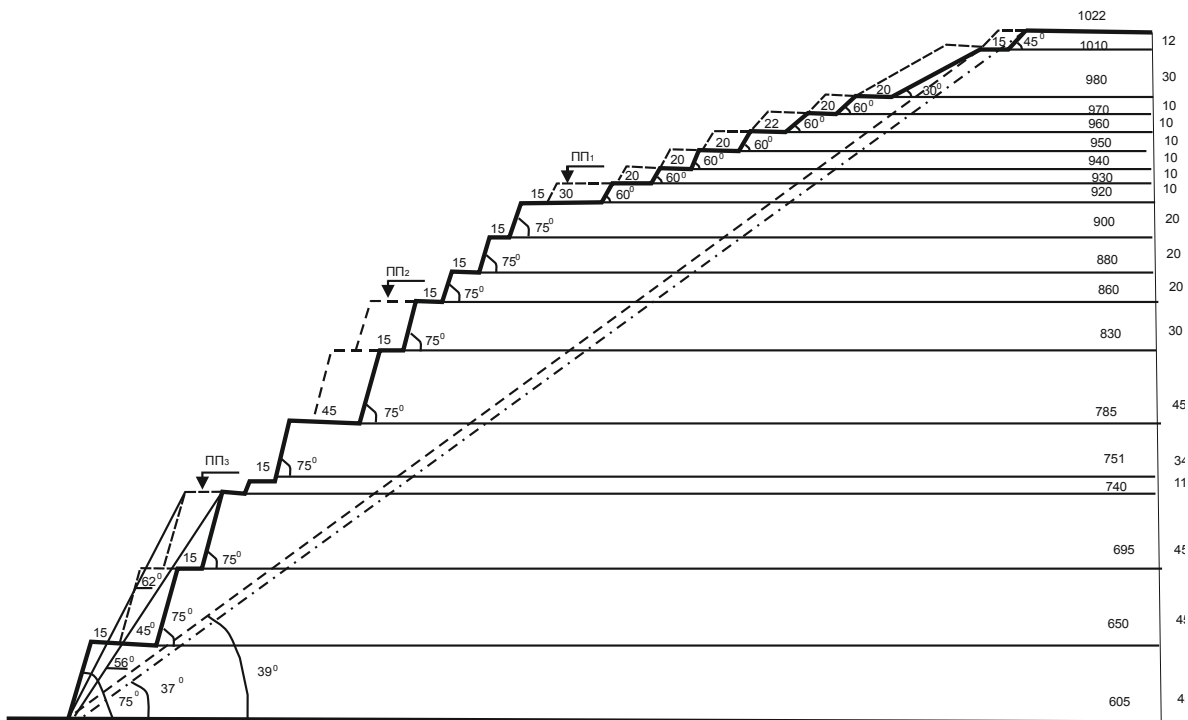


Рис.2. Конструктивное оформление нерабочего борта трехгранной (выпуклой) формы

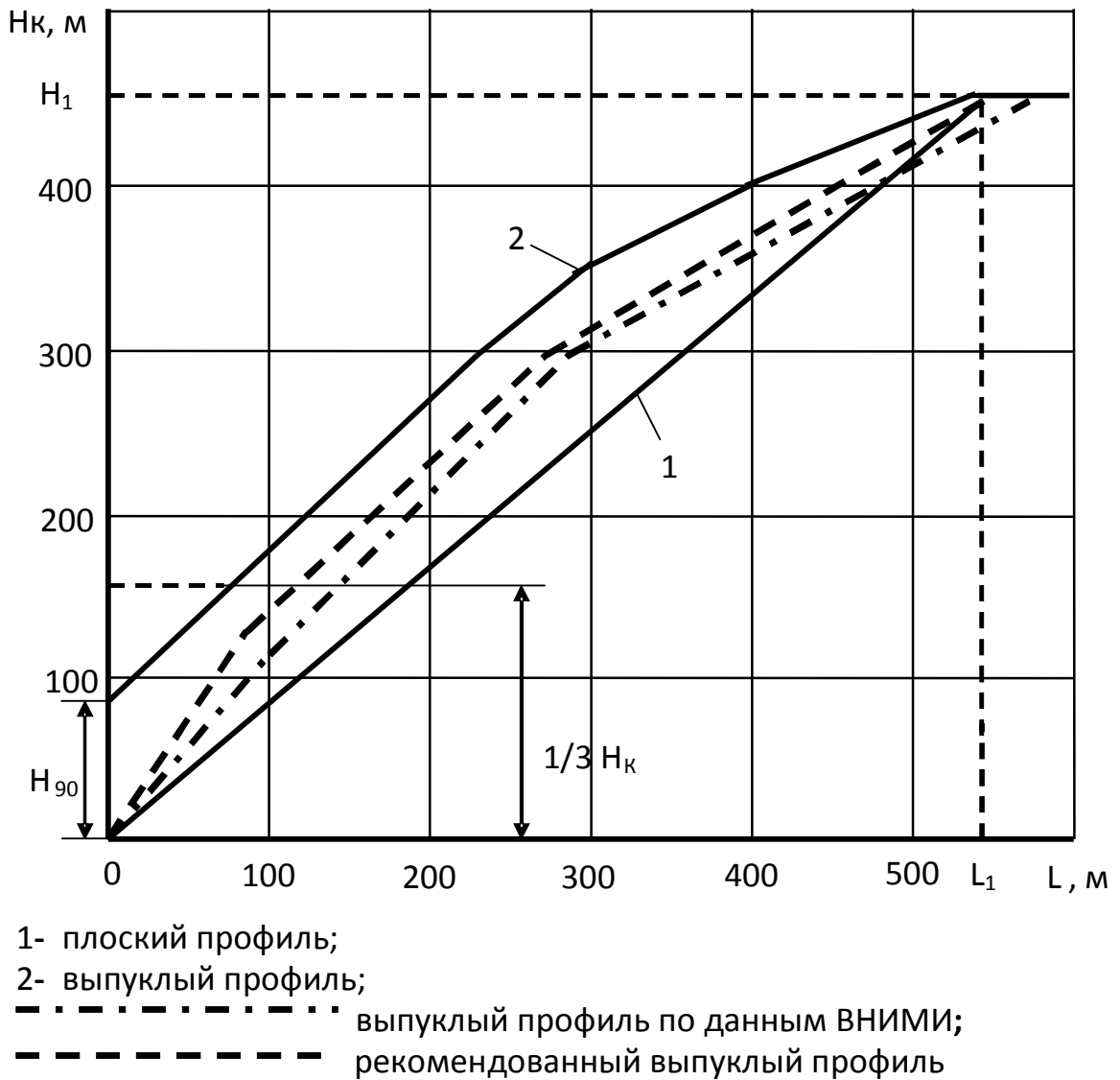


Рис. 3. Схема сравнения профилей откоса нерабочего борта карьера в предельном напряженном состоянии его массива

Построение выпуклого профиля борта производим в следующем порядке [5] : по расчетным прочностным характеристикам пород ( $K_{з.у.расч.}$ ,  $\Phi_{расч}$ ,  $\gamma_{расч}$  и  $C_{расч}$ ) вычисляется предельная высота вертикального обнажения  $H_{90}$ . Затем определяется приведенная глубина карьера:

$$H_1' = H_1 / H_{90}, \text{ м,}$$

где  $H_1'$  – соответствует конечной глубине карьера,  $H_1' = H_k$ .

По значению  $H_1'$  на основе табличных данных [5] определяется приведенное заложение борта  $L_1'$ . Истинное значение заложение борта составит

$$L_1 = L_1' \cdot H_{90}, \text{ м}$$



В начале координат  $H_1 L$  (см. рис. 3.) откладывается высота  $H_{90}$  и строится положение точки 1 ( $H_1, L_1$ ), соответствующее верхней бровке откоса борта. Берутся промежуточные значения глубины карьера  $H_i \leq H_1$  и для этих глубин ( $i$  – точки откоса) находятся аналогичным образом значения  $L_i$  и строятся точки, определяющие контур борта карьера с выпуклым профилем (рис 3, кривая 2).

Поскольку наличие вертикальных откосов недопустимо, нижняя часть откоса (на высоту  $1/3H_k$ ) принимается плоской с максимально возможным углом  $\alpha_1$ , который принимается равным максимальному технологически допустимому углу с учетом берм и съездов.

Таким образом, при конструктивном оформлении нерабочего борта многогранного (выпуклого) профиля корректировка выполнена по методике, изложенной в работах [5,6], в которых отмечается, что откос любого плавного профиля в зоне выпуклого и вогнутого расчетных откосов имеет одинаковый коэффициент запаса устойчивости. Т.е если базовый (ВНИМИ) и рекомендуемый профили борта находятся в зоне между прямой 1 и кривой 2, то они оба являются устойчивыми. Однако рекомендуемый вариант имеет преимущество в сокращении объема вскрышных пород, извлекаемых из карьера в конечных его границах.

Величина сокращения объема вскрыши ( $\Delta V_B$ ) определяется по формуле:

$$\Delta V_B = 0,5H_k^2 (\text{ctg}\alpha_2 - \text{ctg}\alpha_1) \cdot 1000 = 0,5 \cdot 450^2 (\text{ctg}37^\circ - \text{ctg}39^\circ) \cdot 1000 = 9112500 \text{ м}^3,$$

где  $37^\circ$  и  $39^\circ$  соответственно средние предельные углы откоса борта по базовому и рекомендуемому вариантам.

Таким образом, сокращение объема вскрышных пород составляет  $9,1$  млн.м<sup>3</sup> на  $1000$  м длины нерабочего борта. Экономия затрат только на извлечение и транспортировку пород комплексами «экскаватор-автосамосвалы» состави:

$$\Xi = \Delta V_B \cdot \text{Стр} = 9,1 \cdot 3,0 = 27,3 \cdot 10^6 \text{ грн},$$

где Стр – удельные затраты на извлечение и транспортирование пород вскрыши грн/м<sup>3</sup> (при среднем расстоянии транспортирования 2-3 км), Стр = 3 грн/м<sup>3</sup> (по данным карьеров Кривбасса, ПГОКа).

**Выводы.** С учетом особенностей геологического строения месторождения трубки «Катока», а также закономерностей изменения с глубиной прочностных характеристик массивов горных пород, слагающих откосы уступов и бортов карьера установлена целесообразность конструктивного оформления нерабочих бортов многогранной (выпуклой) формы. Построение такого борта (на примере типичного профильного разреза карьера) выполнено по известным в теории управления состоянием горного массива методам Фисенко Г.Л., Арсентьева А.И., Галустьяна Э.Л. С учетом технологических особенностей разработки месторождения (применение ЦПТ – наличие перегрузочных пунктов) рекомендован трехгранный (выпуклый) профиль нерабочего борта, что позволяет уменьшить объемы вскрышных пород, извлекаемых в конечных контурах карьера на  $9,1 \cdot 10^6 \text{ м}^3$  на  $1$  км длины борта.

#### Список литературы

1. Фисенко Г.Л. Укрепление откосов в карьерах / Г.Л. Фисенко, М.А. Ревазов, Э.Л. Галустьян. – М.: Недра, 1974. – 206 с.
2. Попов С.И., Совместное определение угла погашения и глубины открытых работ. Сб. "Горное дело". Тр. Горно-метал. Инст., Metallurgizdat, Свердловск, 1951. С 67-75.
3. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров. / Л.: ВНИМИ. –1972. –164 с.
4. Новожилов М.Г. Высокопроизводительные глубокие карьеры / М.Г. Новожилов, А.Ю. Дриженко, А.М. Маевский и др.. – М.: Недра, 1984. – 188 с.
5. Арсентьев А.И., Букин И.Ю., Мироненко В.А. Устойчивость бортов и осушение карьеров. Учебник для вузов. М.: Недра, 1982. – 165 с.
6. Галустьян Э.Л. Конструирование бортов глубоких карьеров с оптимальными параметрами. Проектирование открытой разработки месторождений. Сб. науч. трудов. Л.: изд ЛГИ. 1984. С –20-26.
7. Галустьян Э.Л. Управление геомеханическими процессами в карьерах – М.: Недра, – 1980. – 182 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Симоненком В.І.  
Надійшла до редакції 21.12.13*

УДК 622.271

© Б.Е. Собко, А.М. Маевский, Н.В. Несвитаило, М.А. Чебанов

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ШИРИНЫ ЗАХОДКИ ЭКСКАВАТОРА-ДРАГЛАЙНА ПРИ РАБОТЕ ЕГО В КОМПЛЕКСЕ С АВТОСАМОСВАЛАМИ**

Приведены результаты исследований по установлению оптимальной ширины заходки экскаватора, работающего совместно с большегрузными автосамосвалами. Разработан методологический подход к определению производительности экскаватора, позволяющий в одном аналитическом выражении учесть основные факторы, влияющие на достижение ее максимальной величины.

Наведені результати досліджень по встановленню оптимальної ширини заходки экскаватора, працюючого сумісно з великовантажними автосамоскидами. Розвинутий методологічний підхід до визначення продуктивності экскаватора, дозволяє в одному аналітичному виразі врахувати основні фактори, які впливають на досягнення її максимальної величини.

The results of investigations to establish the optimum width stope excavator working together with heavy dump. Developed a methodological approach to the determination of the performance of the excavator, which allows one to take into account the analytical expression of the main factors affecting the achievement of its maximum value.

Горнотранспортные комплексы циклического действия, включающие экскаваторы-драглайны и большегрузные автосамосвалы применяют при разработке мягких вскрышных пород и, в особенности, при сложных гидрогеологических условиях, когда несущая способность пород существенно снижается. Такие комплексы оборудования в настоящее время работают на Еристовском (ПГОК) и Матроновском (ВГМК) карьерах. Основной задачей обеспечения эффективности их

работы является повышение производительности экскаваторов -драглайнов, которая в сравнении с бестранспортной схемой снижается на 10–15 %.

В теории открытой разработки месторождений вопросы определения производительности драглайнов, как выемочно-погрузочного оборудования, исследованы недостаточно.

Анализ ранее выполненных научных исследований по рассматриваемому вопросу показывает, что при установлении зависимости производительности драглайна, работающего в комплексе с автосамосвалами, от ширины его заходки не учитывается ряд факторов: угол поворота на разгрузку; место установки автосамосвала на погрузку; схема работы экскаватора в забое (верхнее или нижнее черпание) и др. Так в работе [1] приведены результаты исследования по установлению оптимальной ширины заходки экскаватора при усложненной бестранспортной системе разработки марганцеворудных месторождений. Приведена зависимость производственной мощности карьера  $Q_k$  от параметров забоя драглайна ( ширины заходки –  $A$  и высоты уступа –  $H$ ). Область оптимальных значений  $A$  от 10–20 м до 40 м (при  $H=28$ м), т.е. диапазон большой. В приведенной зависимости  $Q_k = f(A)$  не учитывается угол поворота экскаватора из забоя на разгрузку, который зависит от величины  $A$ . Кроме того, эта зависимость не предназначена для комплекса "драглайн + автосамосвалы", хотя такие факторы влияния на производительность драглайна как продолжительность его перешагивания при отработке смежных блоков и продолжительность заоткоски уступов должны учитываться при установлении зависимости  $Q_3 = f(A)$  для рассматриваемого комплекса.

В целом, анализируя результаты исследования [1], следует отметить, что принятый критерий достижения  $Q_{k.max}$ , при определении оптимальной ширины заходки не дает полного и точного обоснования  $A_{opt}$ .

В работе [2] детально рассмотрен вопрос по определению оптимальной ширины заходки драглайна, работающего в комплексе с автосамосвалами. В качестве основного критерия для определения  $A_{opt}$  авторами приняты потери годовой производительности драглайна в зависимости от угла поворота драглайна, который зависит от ширины заходки, а также потерь времени на перешагивание и заоткоску уступов.

Определение  $A_{opt}$  произведено аналитически и графически, но зависимости  $Q_3^{год} = f(A)$  нет. Поэтому невидна четкая взаимосвязь между годовой производительностью драглайна и шириной его заходки. Кроме того, такой методологический подход также характеризуется большим диапазоном изменения  $A_{opt}$  в области экстремума.

В развитие методологического подхода к установлению зависимости  $Q_3^{год} = f(A)$  авторами данной статьи рекомендуется рассматривать годовую производительность драглайна как

$$Q_{3.ф}^{год} = f(Q_{3.т}^4; K_{у.б}; K_{у.з}), м^3/год, \quad (1)$$

где  $Q_{3.ф}^{год}$  – фактическая (эксплуатационная) производительность экскаватора;  $Q_{3.т}^4$  – техническая производительность экскаватора,  $м^3/ч$ ;  $K_{у.б}, K_{у.з}$  – соответственно коэффициенты использования экскаватора в течение года, учитывающие

потери времени на перешагивание его при обработке смежных блоков ( $t_6$ ) и на заоткоску уступов ( $t_3$ ).

Все указанные величины:  $Q_{э.м}^ч$ ,  $K_{и.б}$  и  $K_{и.з}$  являются зависимыми от ширины заходки драглайна. Рассмотрим детально эти зависимости.

Годовую эксплуатационную производительность драглайна можно представить в виде

$$Q_{э.ф}^{год} = Q_{э.м}^ч \cdot T, \text{ м}^3/\text{год} \quad (2)$$

где  $T$  – годовой фонд времени работы экскаватора, ч

$$T = T_{см} \cdot n_{см} \cdot n_{р.д} \cdot K_{и}, \quad ч \quad (3)$$

где  $T_{см}$  – продолжительность смены работы экскаватора, ч;  $n_{см}$  – количество смен в сутки;  $n_{р.д}$  – количество рабочих дней в году;  $K_{и}$  – коэффициент использования экскаватора во времени в течение смены.

$$Q_{э.м}^ч = \frac{E \cdot 3600 \cdot K_n}{T_{ц} \cdot K_p}, \quad \text{м}^3/\text{ч} \quad (4)$$

где  $E$  – объем ковша экскаватора,  $\text{м}^3$ ;  $K_n$  – коэффициент наполнения ковша экскаватора;  $K_p$  – коэффициент разрыхления породы в ковше экскаватора;  $T_{ц}$  – время рабочего цикла экскаватора, с.

Время цикла складывается из отдельных операций, которые могут быть разделены на две части: независимую от ширины заходки экскаватора ( $t_n$ ) и зависимую ( $t_n$ ), т.е.

$$T_{ц} = t_n + 2t_n, \quad (5)$$

где  $t_n$  – время затрачиваемое на черпание, разгрузку ковша и др., с. По данным хронометражных наблюдений  $t_n=19,6$  с (для ЭШ-14/50;  $t_n$  – время поворота экскаватора на разгрузку, с.

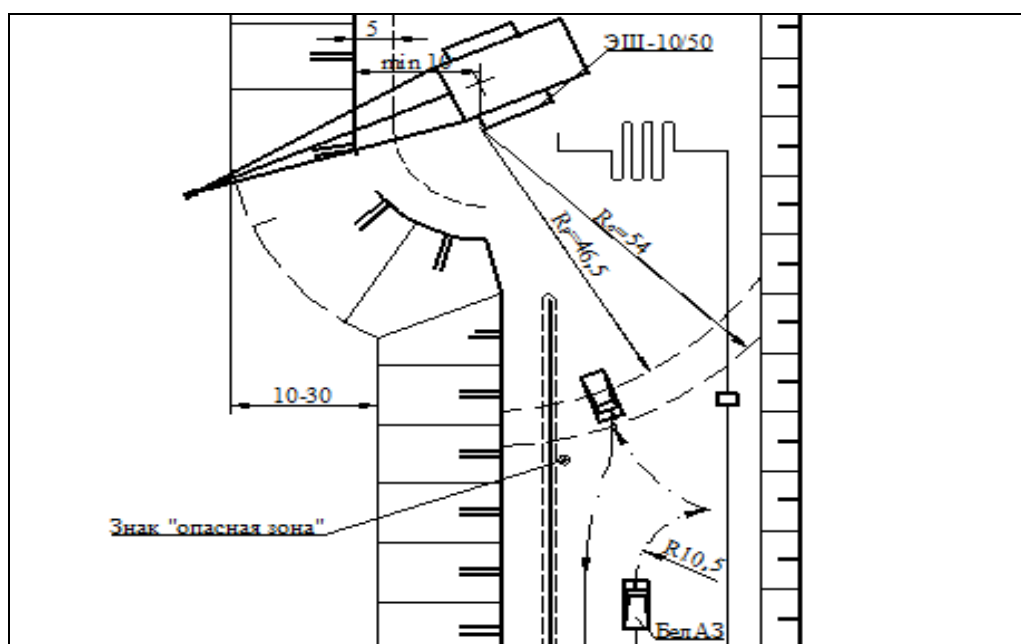


Рис. 1. Схема работы экскаватора ЭШ-10/50 при обработке добычного уступа с погрузкой в автосамосвал в условиях Мотроновского карьера (ВГМК)

Продолжительность поворота экскаватора определялась по эмпирической формуле [3]

$$t_n = \left(0,5 + \frac{2,5}{E}\right) \cdot \sqrt[3]{\frac{(103 \cdot E - 300)^{5/3} \cdot \varphi_n^2}{E}}, \text{ с} \quad (6)$$

где  $\varphi_n$  – угол поворота драглайна, рад.

Угол поворота определяем по формуле, исходя из схемы работы экскаватора ЭШ-10/50

$$\varphi_n = \arctg \frac{0,5 \cdot A + H \cdot \text{ctg } \gamma + z}{R_q - H \cdot \text{ctg } \gamma}, \text{ град} \quad (7)$$

где  $A$  – ширина заходки, м;  $H$  – высота уступа, м;  $R_q$  – радиус черпания экскаватора, м;  $z$  – ширина призмы возможного обрушения, м;  $\gamma$  – угол откоса уступа, град.

По формуле (6) для экскаватора ЭШ-14/50 та ЭШ-11/70 можно получить следующую зависимость (рис. 2).

Из графика видно, что время поворота  $\sum t_n$  логично увеличивается с увеличением угла поворота  $\varphi_n$  от  $\sum t_{n.min1} = 7,0$  с,  $\sum t_{n.min2} = 6,1$  с при  $\varphi_n = 10^\circ$  до  $\sum t_{n.max1} = 37,0$  с,  $\sum t_{n.max2} = 31,8$  с при  $\varphi_n = 180^\circ$ .

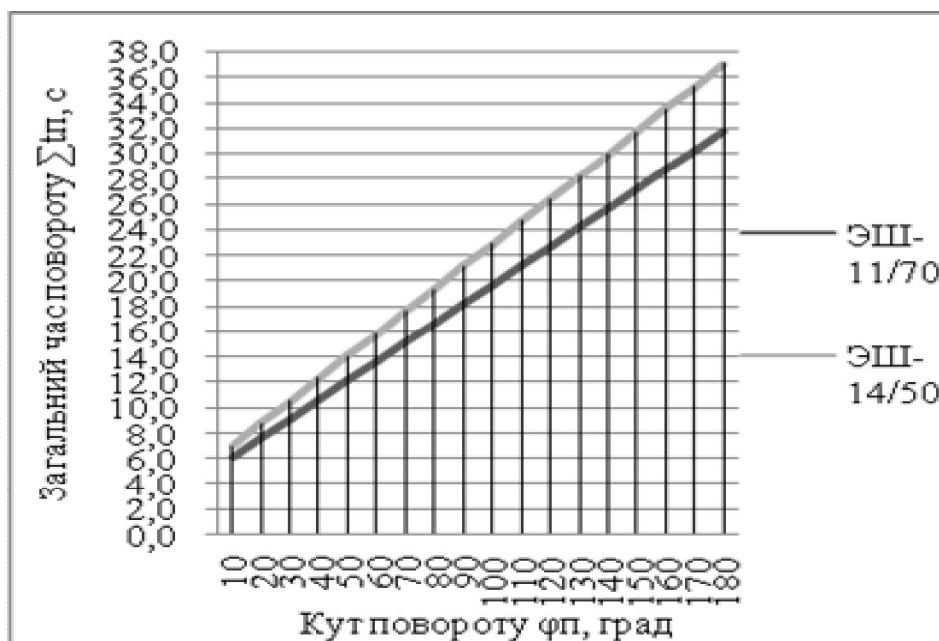


Рис. 2. Зависимость времени поворота  $\sum t_n$  от угла повороту  $\varphi_n$  для экскаваторов ЭШ-14/50 и ЭШ-11/70 (по формуле М. Г. Домбровского)

Можно сделать вывод, что значения продолжительности поворота являются заниженными и не отвечают практическим данным, полученным с помощью хронометража.

Воспользуемся эмпирической формулой для определения времени поворота, предложенной В. В. Ржевским [3], а также построим зависимость  $\sum t_n = f(\varphi_n)$  (рис. 3.).

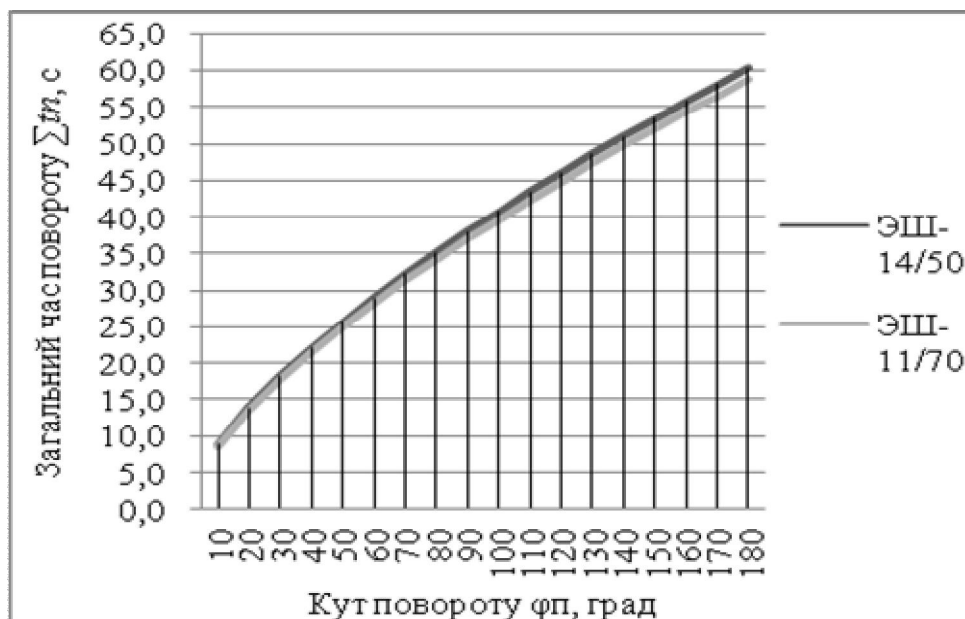


Рис. 3. Зависимость времени поворота  $\sum t_n$  от угла поворота  $\varphi_n$  для экскаваторов ЭШ-14/50 и ЭШ-11/70 (по формуле В.В. Ржевского)

Где  $Q_{э.т.}^ч$  - фактическая (эксплуатационная) часовая производительность драглайна, учитывающая потери времени на его перешагивание и выполнение заоткоски уступа, м<sup>3</sup>.

Тогда окончательное выражение для определения  $Q_{э.т.}^ч$  представляется как

$$Q_{э.ф.}^ч = Q_{э.т.}^ч \left( 1 - \frac{Q_{э.ф.}^ч \cdot t_б}{A \cdot H \cdot l} \right) \left( 1 - \frac{Q_{э.ф.}^ч \cdot t_з}{A \cdot \sin \gamma} \right) \text{ м}^3/\text{ч} \quad (13)$$

По данному выражению выполнены расчеты для определения  $Q_{э.т.}^ч$ ,  $K_{и.б.}$  и  $K_{и.з.}$ , которые представлены в таблице 3 и на рис. 4.

Таблица 3

Значения  $Q_{э.т.}^ч$ ,  $K_{и.б.}$  и  $K_{и.з.}$

Ширина заходки А, м	$K_{и.з.}$	$K_{и.б.}$	Часовая производительность, $Q_3^ч$ м <sup>3</sup> /ч
10	0,86	0,872	610
20	0,93	0,938	736
30	0,96	0,959	773
40	0,97	0,97	785
50	0,97	0,976	791
60	0,98	0,98	788
70	0,98	0,984	786
80	0,98	0,986	784

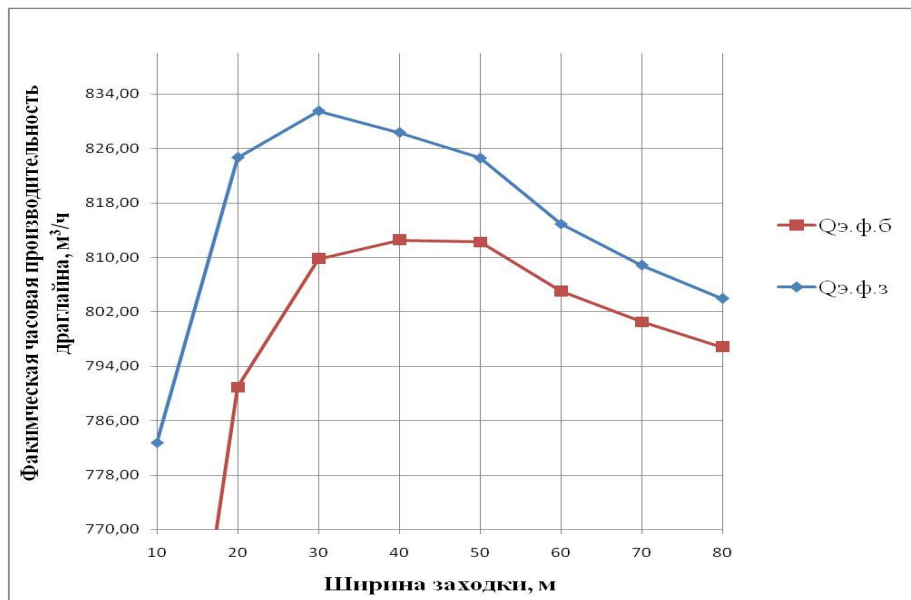


Рис. 4. График зависимостей часовой производительности драглайна по фактору перешагивания ( $G_{э.ф.б}$ ) и ( $G_{э.ф.з}$ ).

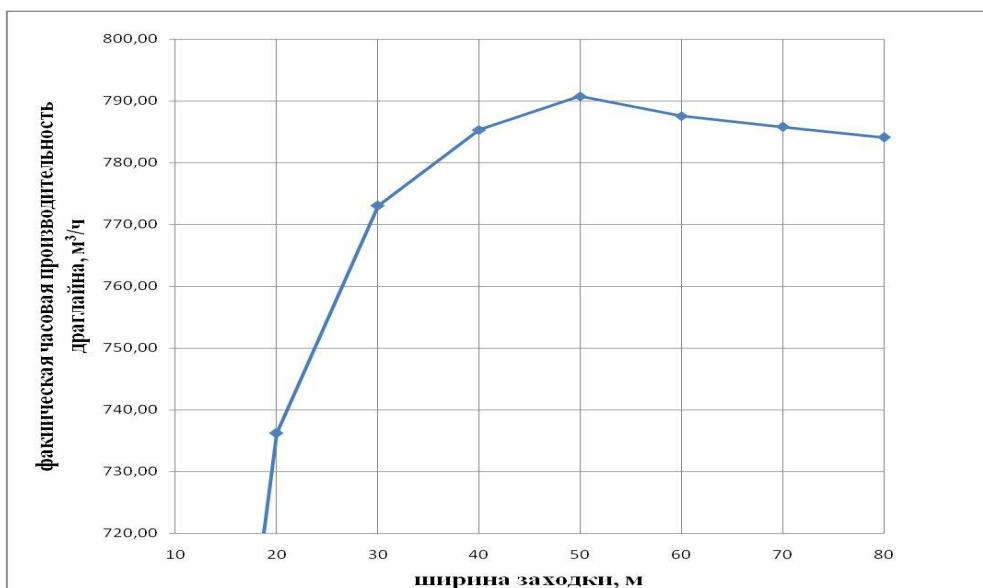


Рис. 5. График зависимости  $Q_{э.ф.}^ч$  с учетом совместного влияния двух факторов

Как видно из приведенных результатов расчетов максимальная производительность драглайна достигается при зношениях  $A = 40-60$  м. Учитывая то, что расчеты выполнены для экскаватора ЭШ-14/50, оптимальная ширина его заходки  $A_{опт}$  составляет 50 м, что видно из графиков (рис. 4 и 5).

Таким образом, полученные результаты расчетов показывают, что зависимость  $Q_{э.ф.}^ч = f(A)$  имеет область экстремума, а аналитическое выражение для определения часовой производительности драглайна (13) может использоваться и для определения его годовой производительности по формуле (12).

**Выводы.** На основе проведенных исследований впервые установлена аналитическая зависимость производительность экскаватора драглайна от ширины его заходки при работе в комплексе с автосамосвалами с учетом совместного влияния трех факторов:

- 1) угла поворота экскаватора на разгрузку ковша и обратно в забой;
- 2) потерь времени на перешагивание экскаватора при отработке смежных блоков;
- 3) потерь времени на заоткоску уступов.

Разработана методика расчета производительности может быть использована при установленной оптимальной ширины заходки для конкретных условий транспортной системы разработки с мягкими породами вскрыши и полезного ископаемого. Результаты исследований могут быть также использованы при обосновании технологических схем и их параметров в условиях использования бестранспортной системы разработки месторождений.

#### Список литературы

1. Новожилов М.Г., Эскин В.С., Корсунский Г.Я. Теория и практика открытой разработки горизонтальных месторождений.– М.: Недра, 1978.– 328 с.
2. Маевський А.М., Дробаха А.В. Оптимізація параметрів забою екскаваторів-драглайнів, що працюють у комплексі з автосамоскидами. Науково-виробничий збірник: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського.–Кременчук: КНУ, 2010 (6). С–72-81.
3. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Часть 1. Производственные процессы. Учебник для вузов.– 4-е изд., перераб. и доп.– м.: Недра, 1985.– 509 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Симоненком В.І.  
Надійшла до редакції 23.11.13*

УДК 622.271

© Собко Б.Е.

## **ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ГОРНОТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОТРОНОВСКО-АННОВСКОГО УЧАСТКА МАЛЫШЕВСКОГО РОССЫПНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ**

Проведені дослідження по обґрунтуванню та вибору різних варіантів застосування основного гірничотранспортного обладнання для виконання розкривних та видобувних робіт в умовах Мотронівсько-Аннівської дільниці Малишевського родовища титано-цирконієвих руд.

Проведены исследования по обоснованию и выбору различных вариантов применения основного горнотранспортного оборудования для производства вскрышных и добычных работ в условиях Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения титано-циркониевых руд.

Researches are conducted on a ground and choice of different variants of prime-neniya of basic mine transport equipment for the production of stripping and do-bychnykh works in the conditions of Motronovsko-Annovskogo of area of Malyshevskogo mestorozhdeniya of titano-zirconia ores.



Производственная деятельность горнодобывающих предприятий в современных рыночных условиях требует постоянного контроля рынка спроса и потребления выпускаемой продукции, подготовки и ввода в эксплуатацию новых участков месторождений титаноциркониевых руд. Таким участком для решения проблем поддержания плановых объемов добычи рудных песков на Вольногорском ГМК является Мотроновско-Анновский участок Малышевского месторождения.

При этом вопросам выбора и обоснования рациональных современных горнотранспортных комплексов для открытой добычи руд должно уделяться первоочередное значение, как с точки зрения повышения производительности горнотранспортного оборудования, так и поддержания эффективности работы предприятия в целом.

Мотроновско-Анновский участок расположен в северо-западной части Малышевского месторождения. Карьерное поле участка характеризуется пересеченностью его поверхности тремя крупными поперечными балками: Дмитровской, Мотроновской и Новопавловской. Мощность вскрыши при этом колеблется от 70 до 80 м между балками и от 20 до 30 м – по балкам. Такой рельеф поверхности карьерного поля влияет на выбор и эффективность применения горнотранспортных комплексов оборудования. Рудный пласт Мотроновского участка представлен песками полтавской свиты, которые находятся сверху безрудных песков харьковской свиты. Средняя мощность пласта полезного ископаемого равна 10 м.

Рассмотрим возможность применения различных комплексов основного горнотранспортного оборудования для разработки россыпей на примере Мотроновско-Анновского участка Малышевского месторождения титаноциркониевых руд. В работе рассмотрены три варианта комплексов оборудования для производства вскрышных работ и добычных работ: 1) комплекс оборудования непрерывного действия с применением роторного экскаватора; 2) комплекс оборудования с применением гидравлических одноковшовых экскаваторов и автосамосвалов; 3) комплекс оборудования с применением экскаваторов драглайнов и автосамосвалов.

При применении комплекса оборудования непрерывного действия были рассмотрены стандартные роторные экскаваторы (производительностью 6000 и 3500 м<sup>3</sup>/час и компактные роторные экскаваторы с производительностью до 2000 м<sup>3</sup>/час.

Применение роторных экскаваторов может осуществляться на различных горизонтах карьера. Установка роторного экскаватора осуществляется на вскрышном уступе, на кровле рудного тела. При этом высота вскрышного уступа составляет 28 м, длина фронта работ на уступе составляет примерно 2,5 км. Транспортирование вскрышных пород осуществляется при помощи системы конвейеров на северо-восток. Складирование пород вскрыши осуществляется при помощи отвалообразователя в граничащую с севера балку. При применении роторных экскаваторов на кровле рудного тела и при высоте уступа 28 м, необходимые годовые объемы вскрышных пород для обеспечения

вскрытия 2,7 млн. м<sup>3</sup> рудного песка в год составляют примерно 7,0 млн. м<sup>3</sup>.

Рабочая площадка второго роторного экскаватора находится на уровне 28 метров над кровлей рудного тела, на абсолютных отметках +125 до +130 м. Высота выемочного блока составляет 28 метров. Вследствие изменяющегося рельефа поверхности и присутствия балок средняя высота выемочного блока сократится. Необходимые годовые объемы перемещения вскрышных пород с верхнего вскрышного уступа составляют примерно 6,0 млн. м<sup>3</sup>. Разработка вскрышных пород может осуществляться компактным роторным экскаватором. При этом максимальная высота уступа для таких экскаваторов составляет 14–16 м. Годовые объемы с каждого вскрышного уступа составляют примерно 3 млн. м<sup>3</sup>.

При отработке тех же объемов вскрышных пород гидравлическими одноковшовыми экскаваторами в работе рассмотрено применение трех различных типоразмеров экскаваторов и самосвалов:

- экскаватор (ёмкость ковша 22 м<sup>3</sup>) с самосвалом грузоподъемностью 144т/78,2м<sup>3</sup>;

- экскаватор (ёмкость ковша 16,5 м<sup>3</sup>) с самосвалом грузоподъемностью 96т/60,5м<sup>3</sup>;

- экскаватор (ёмкость ковша 10 м<sup>3</sup>) с самосвалом грузоподъемностью 52,4 т/ 35,6 м<sup>3</sup>.

Выбор рационального оборудования для отработки полезного ископаемого был рассмотрен при применении экскаваторов драглайнов ЭШ – 10/50 и 14/50 с самосвалами грузоподъемностью 63 т, гидравлических экскаваторов ЭГ -7 и роторных экскаваторов ЭР-2000.

При анализе и обосновании применения наиболее рационального комплекса оборудования проводилась оценка инвестиционных и эксплуатационных затрат по каждому из вариантов оборудования для основных производственных процессов: экскавация, транспортирование, отвалообразование на период 20 лет. Сравнение вариантов применения основного горнотранспортного оборудования было проведено на основе ожидаемой средней стоимости разработки одного кубометра вскрышных пород и добычи рудного песка. Расчет средней стоимости был проведен для всех вариантов с учетом ставки дисконтирования 10 %.

В табл.1 представлен анализ затрат для рассматриваемых комплексов оборудования непрерывного действия (роторный экскаватор - ленточный конвейер - отвалообразователь). Анализ затрат был проведен с учетом только основных производственных процессов: экскавация, транспортирование и отвалообразование и не включает в себя затраты на вспомогательные и прочие расходы.

Анализ данных представленных на рис. 1 показывает, что для Мотроновско-Анновского карьера с годовой производительностью по рудным пескам, составляющим 2,7 млн. м<sup>3</sup> (в массиве) самая низкая себестоимость разработки вскрышных пород достигается при применении роторного экскаватора ЭР-3500, которая составляет 1,60 евро/м<sup>3</sup>. Более высокая себестоимость разработки вскрышных пород (2,6 евро/м<sup>3</sup>) при применении экскаватора ЭР- 6000 возника-

ет по причине того, что эти экскаваторы достаточно мощные и не могут быть эффективны для вскрытия необходимого объема рудных песков - 2,7 млн. м<sup>3</sup>/год. Полная загрузка экскаваторов ЭР- 6000 и связанные с этим низкие удельные затраты до 1 евро/м<sup>3</sup> были бы реальны при годовых объемах добычи рудного песка, составляющих более 6 млн. м<sup>3</sup> в год.

Таблица 1

Анализ затрат на производство вскрышных работ комплексами оборудования непрерывного действия

Роторный экскаватор	ЭР- 6000 верхний уступ	ЭР- 6000 нижний уступ	ЭР-3500 верхний уступ	ЭР- 3500 нижний уступ	ЭР-2000
Система ленточных конвейеров					
Ширина ленты, мм	2000	2000	1800	1800	1600
Длина ленты, км	7,3	7,3	7,3	7,3	7,3
Количество станций, шт	6	6	6	6	6
Отвалообразователь	7500 м <sup>3</sup> /час	7500 м <sup>3</sup> /час	4000 м <sup>3</sup> /час	4000 м <sup>3</sup> /час	4000м <sup>3</sup> /час *
Годовая производ, млн. м <sup>3</sup>	4 -6	4 - 7	4 - 6	4 - 7	3
Капитальные затраты, млн. евро:					
экскаватор	30	30	21	21	3,6
конвейерный перегружатель			2	2	1,2
ленточный конвейер	38,5	38,5	33,4	33,4	33,4
отвалообразователь	13	13	7,2	7,2	3,6
Эксплуат. затраты млн. евро/ год	2,8 – 3,1	2,8 – 3,3	2,5 – 2,8	2,5 – 3,0	1,8

\*частично используется двумя экскаваторами

На рис. 1 представлена диаграмма средних затрат на 1 м<sup>3</sup> вскрыши с применением роторных вскрышных комплексов.

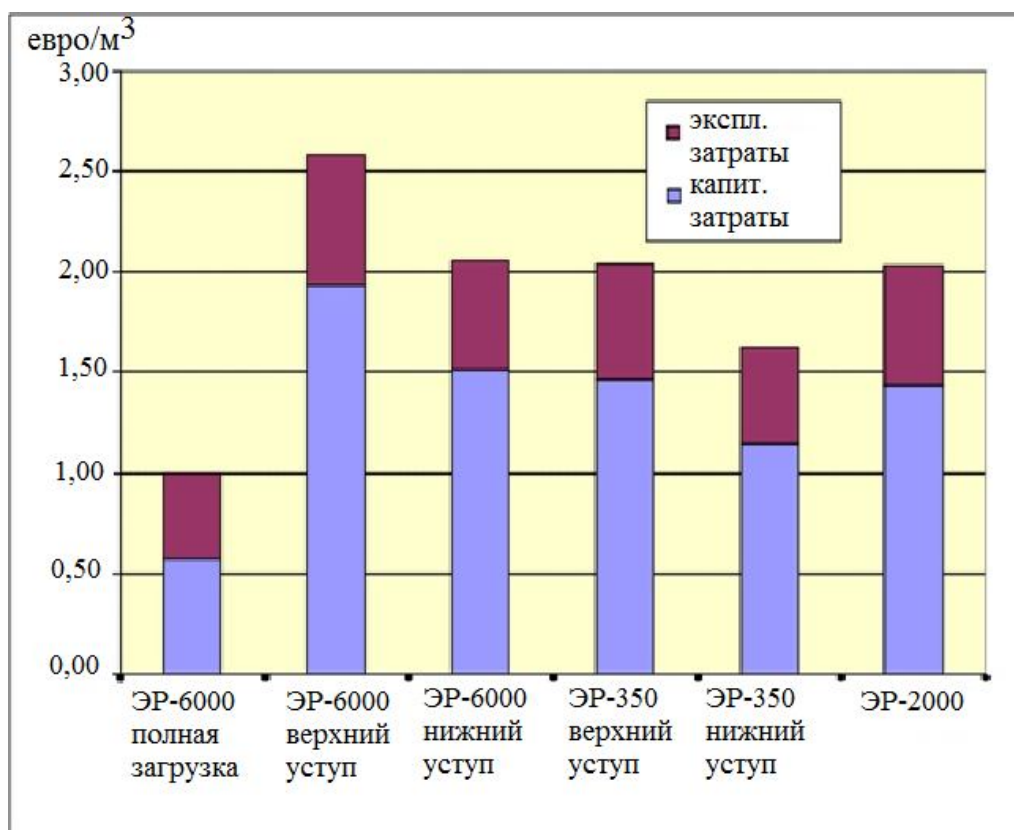


Рис. 1. Средние затраты на 1 м<sup>3</sup> вскрыши (варианты с применением вскрышных комплексов)

Результаты анализа затрат при применении комплекса оборудования «гидравлические экскаваторы и автосамосвалы» для производства вскрышных работ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Затраты на производство вскрышных работ при применении гидравлических экскаваторов и автосамосвалов

Экскаваторы	ЭГ	ЭГ	ЭГ
Емкость ковша ,м <sup>3</sup>	22	16,5	10
Самосвалы, т / м <sup>3</sup>	144 / 78,2	96 / 60,5	54,2 / 35,6
Количество самосвалов	8	8	8
Годовая производительность,	6,4	5,0	3,1
Капит. затраты, млн. евро:	22	15,5	9,9
Экскаваторы	5,2	3,7	2,7
Самосвалы	16,8	11,8	7,2
Эксплуат. затраты, млн. евро/год	5,2	4,0	2,4

Средние затраты на разработку 1 м<sup>3</sup> вскрышных пород с применением гидравлических экскаваторов и автосамосвалов представлены на рис. 2.

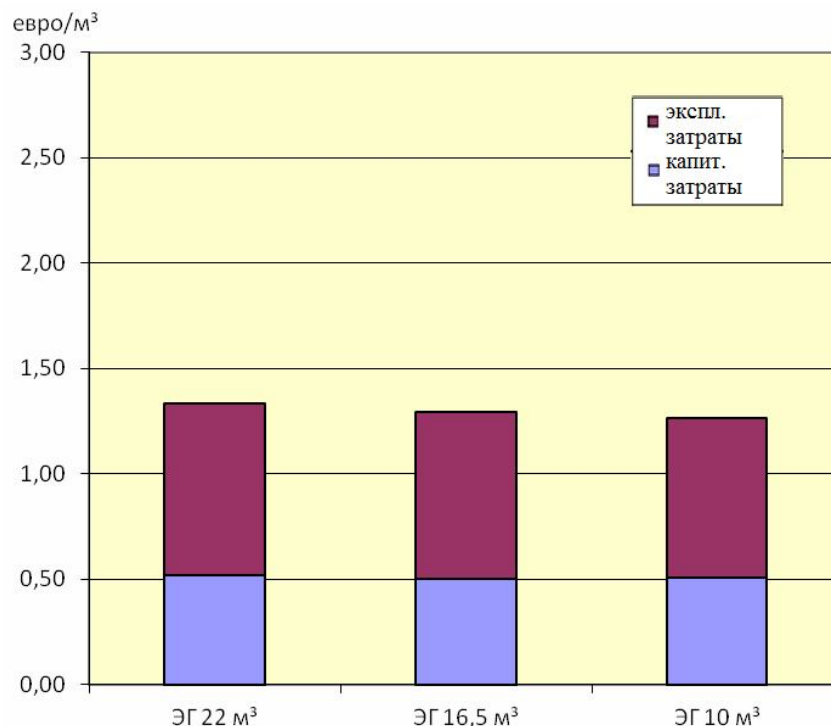


Рис. 2. Средние затраты на разработку 1 м<sup>3</sup> вскрыши с применением гидравлических экскаваторов и автосамосвалов

Анализ данных приведенных на рис. 2 показывает, что удельные затраты на 1 м<sup>3</sup> для основных процессов (экскавация, транспортирование и отвалообразование) при применении комплекса оборудования с применением гидравлических экскаватор и автосамосвалов составляют примерно 1,30 евро/м<sup>3</sup>, что экономически выгоднее чем применение комплексов оборудования непрерывного действия. Кроме этого относительно низкие объемы производства вскрышных работ, составляющие от 10 до 15 млн. м<sup>3</sup> в год должны быть распределены для отработки на всю мощность вскрыши, достигающей 70 м в зонах возвышенностей. Такое распределение обеспечивается за счет применения одноковшовых экскаваторов. При этом наиболее предпочтительным является вариант с применением экскаваторов ЭГ-10 (емкостью ковша 10м<sup>3</sup>).

В табл. 3 представлена оценка затрат для вариантов основного горного оборудования для добычи рудного песка.

Варианты комплекса оборудования с применением драглайнов и одноковшовых гидравлических экскаваторов предусматривают автотранспорт рудного песка с применением карьерных самосвалов.

Результаты исследований средних затрат на разработку 1 м<sup>3</sup> рудных песков с применением различных вариантов основного горнотранспортного оборудования представлен в виде диаграммы на рис. 3.

Таблица 3

## Оценка затрат по вариантам оборудования для добычных работ

Экскаваторы	ЭГ-7	ЭШ-10/50	ЭШ-14/50	ЭР-2000
Количество экскаваторов	2	2	2	
Самосвалы, т / м <sup>3</sup>	54,2 / 35,6	54,2 / 35,6	63 / 41,5	
Количество самосвалов	7	7	6	
Система ленточных конвейеров				
Ширина, мм				1 600
Длина, км				3,8
Количество станций				5
Отвалообразователь				2000 м <sup>3</sup> /час
Годовая производительность карьера по руде, млн. м <sup>3</sup>	2,7	2,7	2,7	2,7
Капит. затраты, млн. евро:	8,7	26,3	25,9	29,7
экскаватор	2,4	20	20	3,6
конвейерный перегружатель				1,2
ленточный конвейер				23,4
отвалообразователь				1,5
самосвалы	6,3	6,3	5,9	
Эксплуат. затраты, млн. евро/ год	3,1	3,8	4,0	1,2

Анализ данных диаграммы, приведенной на рис. 3 показывает, что самые низкие удельные затраты на экскавацию рудного песка и транспорт достигаются при применении роторного экскаватора ЭР-2000 и гидравлического экскаватора ЭГ-7 в комплексе с карьерными самосвалами. Применение драглайнов в комбинации с карьерными самосвалами является более дорогостоящим.

Однако превосходство экскаваторов драглайнов заключается в том, что при их применении осуществляется прямая перевалка вскрышных пород, для драглайнов свойственно низкое давление на грунт и возможность применения этих экскаваторов для работ на грунтах с низкой устойчивостью. К таким грунтам и относятся рудные пески на Мотроновско-Анновском участке.

Таким образом, проведенные исследования позволили установить, что вариант применения оборудования автотранспортной системы разработки (одноковшовые экскаваторы и самосвалы) при разработке вскрышных работ для обеспечения 2,7 млн. м<sup>3</sup>/год рудного песка показал при сравнении лучший результат.

Поэтому этот вариант был рекомендован как наиболее предпочтительный для условий Мотроновско-Анновского участка. Исходя из этого, применение одноковшовых экскаваторов и самосвалов рекомендуется также для производства добычных работ.

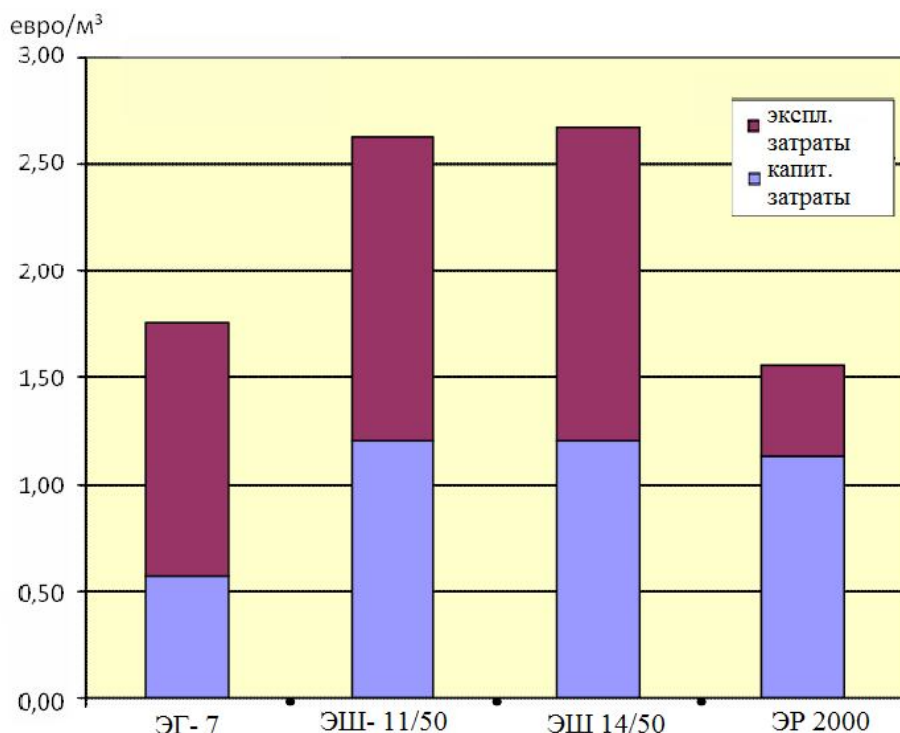


Рис. 3. Средние затраты на разработку 1 м³ рудного песка по вариантам применяемого оборудования для добычных работ

Применение роторного экскаватора целесообразно в том случае, если при разработке и перемещении вскрышных пород также занято оборудование непрерывного действия. Применение роторных экскаваторов для экскавации рудного песка в комбинации с автотранспортной системой разработки принципиально возможно с технологической точки зрения, но связано с рядом недостатков. Вследствие установки ленточных конвейерных линий на рабочей площадке добычного уступа расстояния транспортирования вскрышных пород автотранспортом до внутреннего отвала увеличиваются. Превосходство гибкой конфигурации фронта работ на горизонтах и ведения горных работ в соответствии с изменением коэффициента вскрыши при этом теряется.

#### Список литературы

1. Новожилов М. Г., Эскин В. С., Корсунский Г. Я. Теория и практика открытой разработки горизонтальных месторождений, – М.: Недра, 1978. – 328 с.
2. Мельников Н. В. Краткий справочник по открытым горным работам. – 4-е изд., перераб и доп. – М., Недра, 1982 – 414 с.

*Рекомендовано до публікації, д.т.н., проф. Симоненко В.І.  
Надійшла до редакції 23.11.13*

## ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СТРУКТУРНОЇ МІЦНОСТІ ЛЕСОВИХ ҐРУНТІВ, ЩО СКЛАДАЮТЬ СХИЛИ РІЧКОВИХ ДОЛИН

Проведено аналіз методів визначення структурного зчеплення лесових ґрунтів та їх недоліків. Показано необхідність правильного вибору схеми випробувань, яка б найточніше моделювала особливості роботи ґрунту при зсувних процесах, та методу обробки результатів досліджень.

Проведен анализ методов определения структурного сцепления лесовых грунтов и их недостатков. Показана необходимость правильного выбора схемы испытаний, которая бы наиболее точно моделировала особенности работы грунта при оползневых процессах и метода обработки результатов исследований.

The analysis of methods for determining structural loess soils coupling and their shortcomings was being made. The necessity of proper selection of circuit testing that would most accurately modeled features of the soil during shear processes, and the method of processing the results of research was being shown.

**Вступ.** Однією з особливостей інженерно-геологічної будови Полтавського лесового плато є наявність улоговин у покрівлі водотривкого шару, який розміщується на глибині близько 16–18 м від поверхні землі. Улоговини мають різноманітні розміри, форму та походження [1], але характерною їх особливістю є утворення в них потоків ґрунтових вод, що розвантажуються з плато на схили річкових долин, ярів та балок. Вплив таких ґрунтових потоків на стан ґрунтів проявляється у зменшенні їх міцності, що особливо характерно для лесів. Відбувається це внаслідок того, що під впливом ґрунтових вод лесові ґрунти переходять у текучий стан, у їх товщі виникають процеси суфозії, що призводить до виникнення зсувів. Однак улоговини розташовані не лише на схилах, а й на плато, і потоки ґрунтових вод створюють вплив на стан лесових ґрунтів, які є основою для фундаментів будівель і споруд.

**Огляд останніх джерел досліджень і публікацій.** Питання визначення достовірних характеристик лесових ґрунтів у свій час вивчали такі вчені, як В.Г. Березанцев, Г.М. Біч, І.П. Бойко, Ю.Л. Винников, С.С. Вялов, М.Л. Зоценко, М.В. Корнієнко, М.М. Маслов, С.Р. Месчян, В.Ф. Разорьонов, М.О. Цитович, В.Б. Швець, Н.С. Швець, О.В. Школа, А.В. Яковлев та інші. Однак проблема визначення достовірних характеристик міцності ґрунтів і на цей момент залишається доволі актуальною. Численні дослідження з визначення характеристик міцності лесового ґрунту показують, що після зволоження вони різко зменшуються. Так, за даними Ю.К. Зарецького, кут внутрішнього тертя знижується на 3–5°, а зчеплення зменшується в 3–5 разів [2]. Аналогічні дані отримано Ю.М. Абелевим [3] для лесових ґрунтів м. Грозний. За його даними кут внутрішнього тертя зменшується на 3–5°, а зчеплення – в 4–5 разів. Така тенденція підтверджується іншими дослідниками. Так, за дослідженнями Я.Д. Гільмана, С.М. Клепікова, А.В. Яковлева [4, 5, 6] зменшення питомого зчеплення відбувається в 1,7–2 рази, кута внутрішнього тертя  $\varphi$  – в 1,1–1,2 разу; за



Є.М. Сергєєвим [7]  $c$  зменшується вдвічі; за даними професора П.О. Коновалова [8]  $c$  – утричі,  $\phi$  – удвічі. Унаслідок цього лесові основи, що мали достатньо високу первинну несучу здатність при природній вологості, значно втрачають міцність після досягнення коефіцієнта водонасичення  $S_r=0,8$  [8, 9], причому втрата міцності відбувається, незважаючи на просідання ґрунтів, що призводить до їх ущільнення.

Значний вплив на визначення характеристик лесових ґрунтів мають умови проведення випробувань зразків, тому **метою** досліджень було визначення характеристик міцності ґрунту, що відповідають його природному стану та порівняння їх з характеристиками, отриманими за стандартними методиками. Для отримання таких значень необхідно також правильно вибрати методику обробки результатів дослідів. Це дозволить з більшою точністю оцінити стійкість схилу та запроєктувати протизсувні споруди з необхідною надійністю. Однак, крім зволожуючого фактора ґрунтових вод, необхідно враховувати вплив їх потоку на зміну характеристик міцності ґрунту.

**Основний матеріал і результати.** Стійкість схилів в багатьох випадках залежить від характеристик міцності ґрунтів та їх фізичного стану. Особливий вплив на міцність лесових ґрунтів створюють ґрунтові води, адже їх розвантаження з плато відбувається як раз через схили. Ґрунтові води рухаються по улоговинам – заглибленням в покрівлі водотривкого шару, що призводить до розвитку суфозії та зменшення механічних характеристик ґрунту. В результаті обводнення лесові ґрунти переходять у текучо-пластичний чи навіть у текучий стан, що унеможлиблює відбір зразків ґрунту при проведенні польових вишукувань, тому зазвичай користуються методом аналогій розповсюджуючи характеристики ґрунту, відібраного вище рівня ґрунтових вод на увесь шар лесового ґрунту.

Нормами регламентується проведення випробувань на зрушення за двома схемами – консолідовано-дренованого та неконсолідовано-недренованого випробування. Перед проведенням випробувань проводять попереднє ущільнення ґрунтів при різних вертикальних тисках. В залежності від схеми випробування та стану ґрунту значення тисків коливається в межах 0,05–0,30 МПа. Однак ці значення вертикального тиску часто перевищують природний тиск на ґрунт, що приводить до ущільнення ґрунту і отримання завищених результатів.

Для прикладу візьмемо лесовий суглинок з території зсуву на Інститутській горі в м. Полтава. В природному стані ґрунт має такі характеристики:  $\rho=1,64$  т/м<sup>3</sup>;  $\rho_s=2,67$  т/м<sup>3</sup>;  $\rho_d=1,39$  т/м<sup>3</sup>;  $W=0,18$ ;  $W_L=0,30$ ;  $W_P=0,20$ . При замоканні ґрунту до  $S_r=0,9$  вологість ґрунту становитиме  $W_{sat}=0,31$ , а значення показника текучості складе  $I_L=1,1$ . Після попереднього ущільнення вертикальним тиском 0,3 МПа внаслідок деформації зразка ґрунту значення коефіцієнту пористості  $e$  зменшилося з 0,92 до 0,82, відповідно вологість водонасичення становитиме 0,277, а показник текучості  $I_L=0,77$ . Таким чином ми бачимо, що після ущільнення ґрунт, який у природному стані набував текучої консистенції при замоканні, може досягти лише текучопластичного стану (а в деяких випадках – лише м'якопластичного). Таким чином, ми свідомо зміцнюємо ґрунт перед випробуванням і отримуємо завищені значення характеристик міцності. Наведе-

ний приклад спонукає нас зробити висновок, що похибка утворюється в результаті ущільнення ґрунту вертикальним навантаженням, що перевищує природне.

З іншого боку при використанні неконсолідовано-недренованої схеми випробувань термін його проведення не повинен перевищувати двох хвилин. Випробування вважаються закінченими, якщо при прикладанні чергового ступеня дотичного навантаження відбувається миттєвий зріз (зрив) однієї частини зразка по відношенню до іншої або загальна деформація зрізу буде перевищувати 5 мм. Та якщо для консолідовано-дренованої схеми випробування така умова цілком прийнятна, то прискорені випробування за другою схемою знову ж таки дають завищені результати.

Уникнути цього явища можна використовуючи обробку результатів випробувань у логарифмічних координатах (рис. 1.).

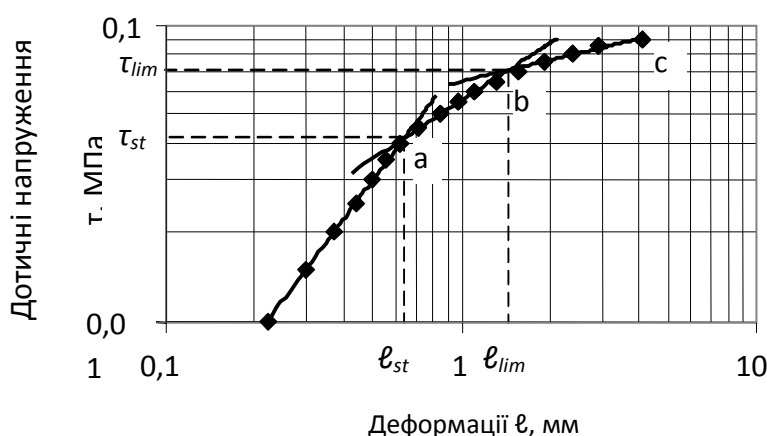


Рис. 1. Графік залежності деформацій  $\ell$  від дотичних напружень  $\tau$  в логарифмічних координатах:  $a$ ,  $b$  і  $c$  – точки зміни фаз деформування;  $\ell_{st}$  і  $\ell_{lim}$  – деформації, при яких руйнуються структурні та загальні зв'язки відповідно

На графіках така залежність має вигляд ламаної лінії з переломом у двох точках (рис. 1). Перша точка ( $a$ ) відповідає закінченню фази ущільнення та початку фази локальних зрушень та прийнята за структурний опір ґрунту зрушенню. Друга точка ( $b$ ) відповідає закінченню фази локальних зрушень та початку фази пластичних деформацій і відповідає довготривалому опору.

В лабораторних умовах проведено визначення характеристик міцності лесового суглинку з такими фізичними характеристиками: щільність ґрунту  $\rho=1,78$  т/м<sup>3</sup>, вологість  $W=0,195$ , щільність частинок ґрунту  $\rho_s=2,67$  т/м<sup>3</sup>, вологість на межі текучості  $W_L=0,30$ , вологість на межі пластичності  $W_p=0,20$ .

Для порівняння характеристик міцності ґрунту, отриманих після попереднього ущільнення різними тисками було проведено дві серії дослідів. В одній серії ущільнення проводилось при вертикальних тисках 0,1 МПа, 0,2 МПа, 0,3 МПа, а в іншій – при тисках, що не перевищували природний тиск. Результати випробувань приведені на рис. 2.

Як видно, при ущільненні ґрунту вертикальним тиском, що перевищує природний тиск відбувається зміцнення ґрунту і значення питомого структурного зчеплення, отримане таким чином буде завищене. Таким чином можна зробити висновок, що випробування на зрушення необхідно проводити при вертикальних тисках, які не перевищують природного тиску.

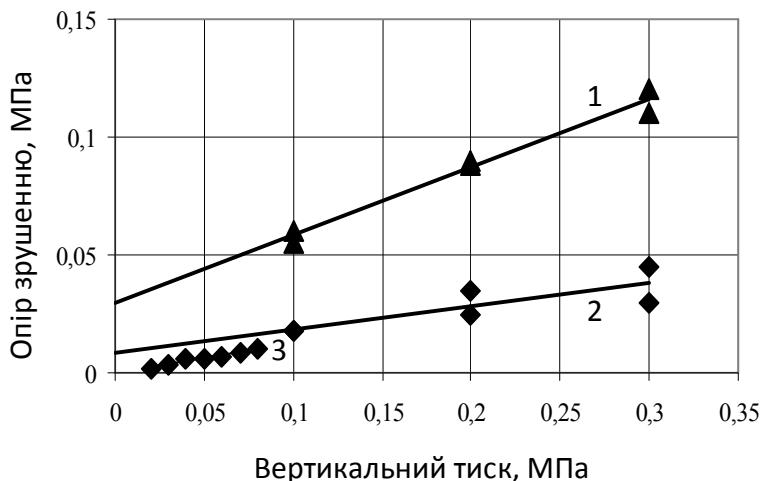


Рис. 2. Результати випробувань лесового суглинку на зрушення: 1 – за методикою довготривалого зчеплення; 2 – за методикою структурного зчеплення; 3 – за методикою структурного зчеплення при малих вертикальних тисках

Для вивчення зміни фізико-механічних властивостей ґрунтів улоговин під дією ґрунтових вод у лабораторних умовах було проведено серію досліджень. Для випробувань було відібрано зразки лесового суглинку. Зразки ґрунту відбиралися у кільця з площею поперечного перерізу  $A=40 \text{ см}^2$  та висотою  $h_0=35 \text{ мм}$ . Після відбору зразків ґрунту визначалися його фізичні характеристики. Для дослідження впливу фільтрації води через зразок ґрунту кільце з ґрунтом розміщували у стакані (рис. 3), й зазор між стінкою стакана та кільцем герметизувався. На кільце одягали спеціальні герметичні прокладки, які щільно прилягали до зовнішнього боку кільця й стінок стакана. Ці прокладки були необхідні для того, щоб фільтрація води відбувалася лише через зразок ґрунту. Після встановлення прокладок зазор між стаканом та верхом кільця заповнювався епоксидною смолою для герметизації.

Для вивчення впливу потоку ґрунтових вод на зміни характеристик ґрунту було сконструйовано прилад, конструкцію якого наведено на рис. 4. Під час дослідів через відібрані зразки ґрунту пропускали воду знизу вгору при різних значеннях напірного градієнта.

Для забезпечення тривалої фільтрації води необхідний запас води зберігався в ємності 1. Постійність напірного градієнта забезпечувалася підтриманням рівня води в ємності 2 за допомогою поплавкового клапана 3. Безпосередньо з ємності 2 вода потрапляла в нижню частину приладів для випробування ґрунту на тривалу дію фільтраційного потоку води 4. Після фільтрації через зразок ґрунту 5 вода вільно

витікала через отвір 6 у верхній частині приладу. Ємності та прилади для випробування зразків були з'єднані між собою гнучкими трубками для забезпечення постійної фільтрації води при сталому значенні напірного градієнта.

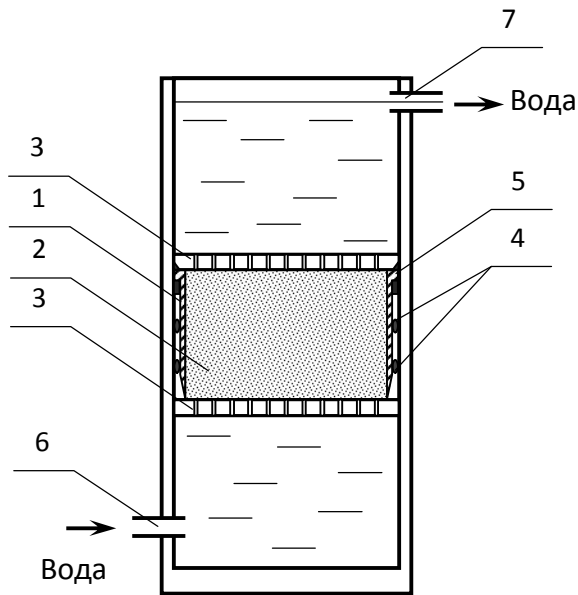


Рис. 3. Схема установки кільця в стакан для випробування ґрунту на тривалу дію фільтраційного потоку води: 1 – металеве кільце; 2 – зразок ґрунту; 3 – дірчаті штампів; 4 – герметизуючі прокладки; 5 – герметик (епоксидна смола); 6 – отвір для подачі води; 7 – отвір для виходу води

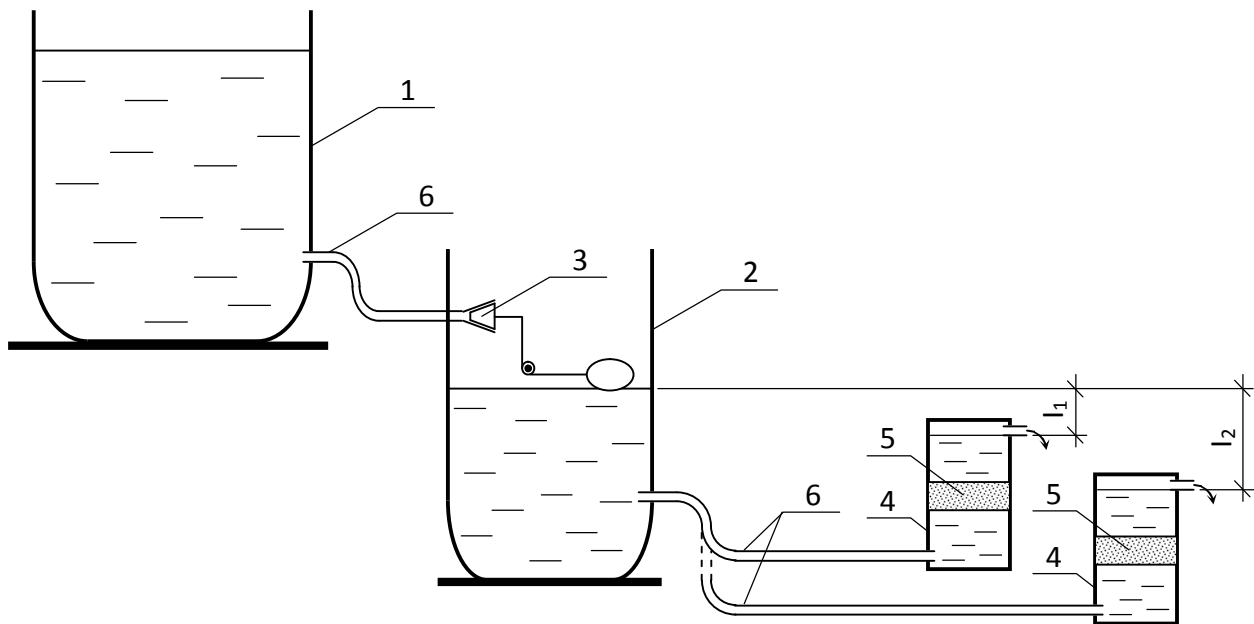


Рис. 4. Схема приладу для визначення впливу фільтраційного потоку на характеристики ґрунту: 1 – бак з водою; 2 – ємність з водою для підтримання постійного напірного градієнта; 3 – клапан поплавкового типу; 4 – стакан; 5 – зразок ґрунту; 6 – з'єднувальні трубки

З метою вивчення впливу напірного градієнта випробуванню піддавалися кілька груп зразків ґрунту, відібраного з одного і того ж майданчика. Випробу-

вання кожної групи проводилися при різних напірних градієнтах. У кожній групі зразки було поділено на серії. Тривалість витримки кожної серії зразків при постійному значенні напірного градієнта варіювалась у межах від 3-х до 18-ти місяців, після чого зразки використовувалися для визначення механічних характеристик ґрунтів у приладі одноплощинного зрушення.

Результати випробування на зрушення оброблялись у логарифмічних координатах з метою отримання характеристик міцності за методом структурного та довготривалого зчеплення.

За результатами проведених досліджень було виявлено, що питоме зчеплення ґрунту зменшилось у 2,2 разу, кут внутрішнього тертя – на  $6 - 8^\circ$ , а модуль деформації ґрунту – майже вдвічі. Однак особливої уваги заслуговує той факт, що структурне зчеплення лесового ґрунту в результаті тривалої дії потоку ґрунтових вод зникає повністю.

В результаті проведених випробувань можна зробити такі **висновки**. По-перше при визначенні характеристик міцності лесових ґрунтів за результатами одноплощинного зрушення попереднє ущільнення зразків необхідно проводити при вертикальних тисках, що не перевищують природний. По-друге обробка результатів випробувань у логарифмічних координатах дозволяє уникнути завищення результатів при проведенні швидкого зрушення за неконсолідовано-недренованою схемою. А також на основі проведених лабораторних досліджень з урахуванням впливу дії потоку ґрунтових вод в улоговинах можна зробити висновок про зменшення характеристик міцності й деформативності лесового ґрунту.

#### Список літератури

1. Біда, С.В. Особливості зсувних процесів на схилах річкових долин / С.В. Біда // Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. збірник. Вип. 75: у 2-х кн.: Книга 2. – К.: ДП НДІБК, 2011. – С. 371–377.
2. Зарецкий, Ю.К. Вязкопластичность ґрунтов и расчеты сооружений / Ю.К. Зарецкий. – М.: Стройиздат, 1988. – 352 с.
3. Абелев, Ю.М. Основы проектирования и строительства на просадочных макропористых ґрунтах / Ю.М. Абелев, М.Ю. Абелев. – М.: Стройиздат, 1979. – 272 с.
4. Гильман, Я.Д. Основания и фундаменты на лессовых просадочных ґрунтах / Я.Д. Гильман. – Ростов-на-Дону: Изд-во РИСИ, 1991. – 217 с.
5. Клепиков, С.Н. Расчет сооружений на деформируемом основании / С.Н. Клепиков. – К.: НИИСК, 1996. – 204 с.
6. Яковлев, А.В. Особливості проектування, будівництва, експлуатації будівель і споруд на лесовому ґрунті та зсувонебезпечній території України / А.В. Яковлев, Ю.Л. Винников. – К.: НМК ВО, 1992. – 252 с.
7. Сергеев, Е.М. Ґрунтоведение / Е.М. Сергеев. – М.: Издат. Моск. ун-та, 1959. – 333 с.
8. Коновалов, П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий / П.А. Коновалов. – М.: ВНИИТПИ, 2000. – 318 с.
9. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти / М.Л. Зоценко, В.І. Коваленко, А.В. Яковлев, О.О. Петраков, В.Б. Швець, О.В. Школа, С.В. Біда, Ю.Л. Винников. – Полтава: ПолтНТУ, 2004. – 568 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Долговою Т.І.  
Надійшла до редакції 25.11.13*



## РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА РАБОТЫ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ

Рассмотрены принципы создания автоматизированной системы экологического мониторинга работы большегрузных автосамосвалов в карьерах, обеспечивающей минимальный расход топлива и снижение загрязнения атмосферы.

Розглянуті принципи створення автоматизованої системи екологічного моніторингу роботи великовантажних автосамоскидів у кар'єрах, що забезпечує мінімальну витрату палива й зниження забруднення атмосфери.

The principles of an automated system for environmental monitoring of heavy dump trucks in quarries for optimal speed, minimum fuel consumption and reduce air pollution.

**Введение.** На крупных карьерах Украины ежедневно для перевозки горной массы используют от 40 до 80 карьерных автосамосвалов разной грузоподъемности и модификации с различным удельным расходом топлива. Большегрузные автосамосвалы являются интенсивными передвижными источниками загрязнения воздуха, постоянно действующими в карьерах, а расход топлива определяет уровень загрязнения атмосферы продуктами его сгорания. Образование токсичных веществ при сжигании дизельного топлива карьерными автосамосвалами связано с режимом работы двигателя, который зависит от технических характеристик автосамосвала, скорости движения, веса груза, характеристики трассы, ее протяженности и уклонов в карьере. Дизельные двигатели карьерных автосамосвалов 40-60% времени транспортного цикла работают в режиме полной нагрузки, 20-30% - на частичных нагрузках и 15-20% - на холостых оборот [1]. Снижение расхода топлива при работе карьерных автосамосвалов прямо пропорционально снижению уровня загрязнения атмосферы выхлопными газами, поэтому создание системы экологического мониторинга работы большегрузных автосамосвалов в карьерах и минимизация с её помощью расхода топлива является актуальной экологической задачей, которая совпадает с приоритетными научными направлениями МОН, утвержденными КМ Украины (секция 9 "Охрана окружающей среды").

**Последние достижения. Формулирование целей статьи, постановка задач.** В последнее время для контроля работы карьерного автотранспорта используются различные автоматизированные системы. Например, для решения проблем безопасности движения автосамосвалов на рабочих площадках карьеров применяются камеры видеонаблюдения и системы, основанные на радарах или обнаружении электромагнитных полей. Известна также система для предупреждения препятствий, созданная совместно исследователями из Spokane Research Laboratory Национального Украины и других стран внедрены автоматизированные системы мониторинга горных работ в т.ч. для контроля за работой горного и транспортного оборудования.

Сегодня на крупных карьерах Украины используются технологии, основанные на определении местоположения с помощью GPS в их обычном применении – для маркшейдерских и геодезических работ, координирования и отслеживания, точного позиционирования бурового и горнотранспортного оборудования, а также для диспетчеризации автотранспорта. Например, на Вольногорском горно-металлургическом комбинате внедрена система диспетчеризации на основе спутниковой навигации для автоматизации работы горнотранспортного оборудования в карьерах [2]. Однако вопросы применения GPS и ГИС-технологии для создания автоматизированной системы экологического мониторинга работы большегрузных автосамосвалов в карьерах до настоящего времени детально не исследованы.

**Формулирование целей статьи, постановка задач.** Целью работы является разработка автоматизированной системы экологического мониторинга работы большегрузных автосамосвалов в карьерах с применением GPS и ГИС-технологии. При этом были поставлены и решены следующие задачи:

- исследовать топливно-энергетические характеристики и скоростные режимы работы большегрузных автосамосвалов в карьерах;
- определить принципы создания автоматизированной системы экологического мониторинга работы большегрузных автосамосвалов в карьерах;
- разработать технические требования для создания навигационной системы экологического мониторинга работы горно-транспортного оборудования на карьерах с применением ГИС-технологий.

#### **Изложение основного материала исследований.**

Одной из главной составляющей экологической характеристики большегрузного автосамосвала в карьере можно считать экологическую характеристику установленного на нем двигателя внутреннего сгорания, при этом, как отмечено ранее, при расчетах загрязнения атмосферы необходимо рассматривать разные уровни концентраций вредных веществ, выбрасываемых в атмосферу, которые прямо пропорциональны текущему расходу топлива.

Одним из важных экологических и технологических показателей эксплуатации карьерных автосамосвалов является топливно-энергетические характеристики и скоростные режимы их работы. Уровень загрязнения атмосферы выхлопными газами зависит от величины путевого расхода топлива, который в свою очередь зависит скорости движения автосамосвала а также от многих других, как учтенных, так и неучтенных или трудно учитываемых факторов, влияние которых может быть выявлено только экспериментально.

К существенным факторам, влияющих на расход топлива и скоростной режим эксплуатации карьерного автотранспорта, относятся: дорожные условия; климатические условия; режим работы (дневной, ночной, круглосуточный); горнотехнические условия (способ залегания полезного ископаемого, сложность выемки и транспортировки горных пород, эксплуатационные характеристики карьера); техническое состояние и структура парка большегрузных автосамосвалов (технические характеристики и типы применяемых автосамосвалов, их возраст и техническое состояние, состояние производственно-технической базы, квалификация обслуживающего персонала и т.д.). Существенную роль играет также и



субъективный человеческий фактор, заставляющий водителей автосамосвалов увеличивать путевой расход топлива и превышать допустимые скорости движения в карьере в угоду увеличения количества рейсов и сменной нормы выработки. Стремление к увеличению производительности за счет повышения скорости приводит к перерасходу топлива и повышению уровня загрязнения атмосферы выхлопными газами.

Таким образом, экологическая характеристика автосамосвалов в карьерах тесно связана с процессом их движения, который представляет собой сложный, динамичный и ресурсоёмкий процесс, характеризующийся большой вариативностью условий эксплуатации, необходимостью высокой точности расчета и контроля расхода топлива и скоростей движения, чтобы с одной стороны достичь максимально возможную среднетехническую эксплуатационную скорость движения автосамосвалов в заданных условиях, а с другой – недопустить необоснованного перерасхода топлива и повышения выбросов в атмосферу вредных выхлопных газов и обеспечить безопасность труда водителей, исключив превышения допустимых по правилам ТБ скоростей движения автосамосвалов.

Особый интерес в этой связи представляет исследование топливно-энергетических характеристик и скоростных режимов работы большегрузных автосамосвалов в производственных условиях.

Нами был выполнен комплекс натуральных наблюдений в карьерах Вольногорского ГМК за изменением расхода топлива и выбросов в атмосферу выхлопных газов, а также скорости движения карьерных автосамосвалов с использованием действующей системы диспетчеризации горно-транспортного оборудования. Результаты наблюдений были представлены в виде компьютерных баз данных, анализ которых позволил оценить реальные экологические и технические параметры эксплуатации автосамосвалов, предложить принципы и требования по созданию автоматизированной системы экологического мониторинга работы большегрузных автосамосвалов в карьерах.

На рис. 1 приведен пример графика контроля за изменением расхода топлива автосамосвалом БелАЗ-7548 в литрах за каждые 20 секунд работы двигателя. На рисунке 2 приведен пример графика контроля скорости движения автосамосвала БелАЗ-7548 в карьере. На рисунке 3 приведен пример графиков изменения вредных выбросов в атмосферу при работе всех автосамосвалов БелАЗ-5748 в карьере по месяцам года.

Как следует из графика на рис. 1, значения расхода топлива являются величинами переменными, а не заданными, что позволяет по предложенной в работе [3] математической модели рассчитать оптимальную скорость движения транспортных средств, обеспечивающую минимальный удельный расход топлива и выброс выхлопных газов в атмосферу, а также максимальную производительность автосамосвалов БелАЗ-5748 в карьере.

Как следует из графика на рис. 2, скоростные режимы движения автосамосвалов в карьере в различное время суток фактически превышают допустимые (40км/ч) по правилам ТБ скорости движения. Установлено, что наибольшее количество нарушений происходит в периоды 6-8 и 15-17 часов рабочей

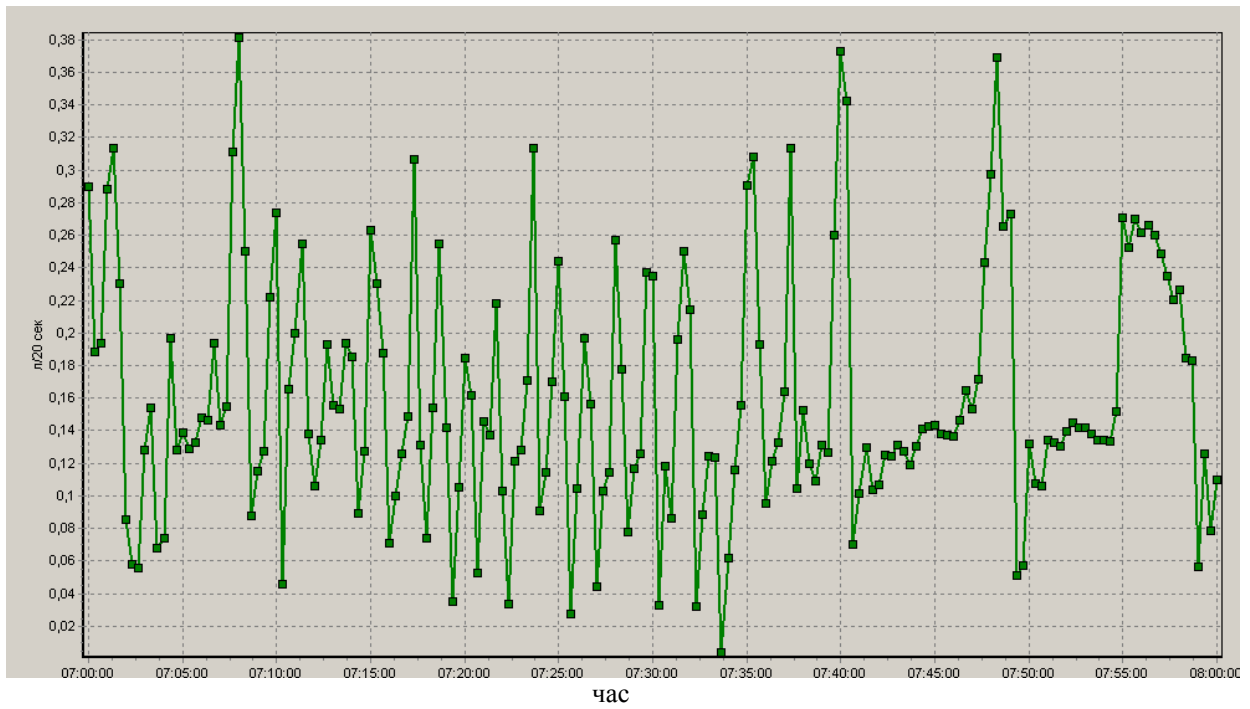


Рис. 1. Пример графика изменения расхода топлива по данным оперативного контроля за 1 час работы автосамосвала

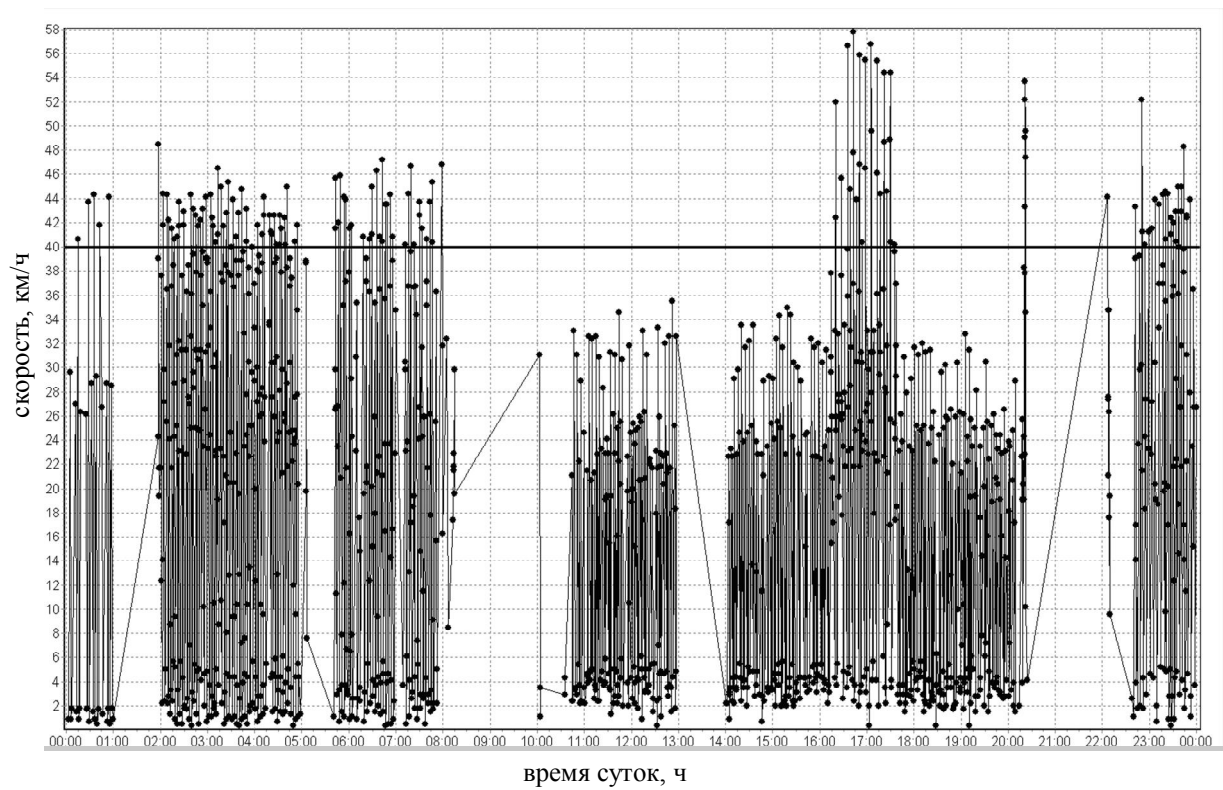


Рис. 2. Пример графика изменения скорости движения автосамосвала в карьере

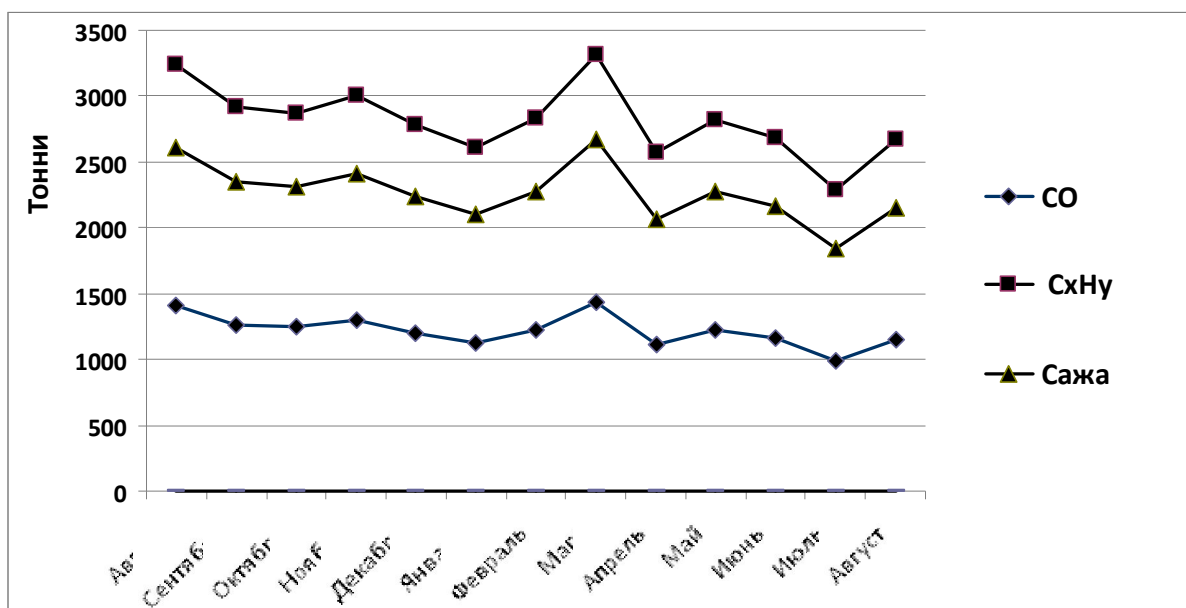


Рис. 3. Пример графиков изменения вредных выбросов в атмосферу при работе автосамосвалов БелАЗ-5748 в карьере по месяцам года

смены. Таким образом, превышения скорости приводит к перерасходу топлива и повышению уровня загрязнения атмосферы выхлопными газами.

Несмотря на достаточный объем НИР по моделированию режимов работы автомобильных комплексов в карьерах, вопросы создания автоматизированной системы экологического мониторинга работы большегрузных автосамосвалов в карьерах детально не рассматривались. Существующие методы и модели расчетов не позволяют решать задачи дистанционного контроля уровня загрязнения атмосферы выхлопными газами автосамосвала в реальном масштабе времени и вопросы автоматизированного управления охраной атмосферы окружающей среды.

В этой связи представляет интерес создание автоматизированной системы экологического мониторинга работы большегрузных автосамосвалов в карьерах. Нами были определены принципы создания автоматизированной системы экологического мониторинга работы большегрузных автосамосвалов в карьерах и разработаны технические требования для создания навигационной системы экологического мониторинга работы горно-транспортного оборудования на карьерах с применением ГИС-технологий.

Создание системы экологического мониторинга работы карьерных автосамосвалов базируется на следующих основных принципах:

1. Использование дифференциальных GPS приемников и радиоборудования на всех автосамосвалах находящихся в карьере для:

- вычисления в реальном времени местоположения каждого автосамосвала;
- вычисления в реальном времени расхода топлива, скорости движения каждого автосамосвала и уровня загрязнения атмосферы выхлопными газами;
- передачи информации о каждом автосамосвале и её накоплении в компьютерной базе данных;

- подачи визуального и звукового предупреждения в кабину автосамосвала в момент, когда транспортное средство нарушает установленные экологической службой карьера параметры.

2. Использование цифровых планов карьеров, планов горных работ, планов территории карьера и геоинформационного обеспечения для создания трехмерных моделей загрязнения атмосферы карьеров и прилегающей территории, визуализации карьерной сети автодорог.

3. Использование GPS приемников карьерных автосамосвалов и средств электронной геодезии для поддержания в актуальном состоянии и обновлении трехмерной цифровой карты карьерных автодорог.

Указанный подход позволил разработать автоматизированную систему экологического мониторинга работы карьерных автосамосвалов по фактору минимального расхода топлива и загрязнения атмосферы с соблюдением скоростного режима движения на каждом этапе трассы в зависимости от сезона или погодных условий и в соответствии с изменением состояния дорог.

Измерения текущих координат, скорости и курса движения автосамосвала выполнялось с использованием штатного навесного навигационного оборудования, включающего GPS приемник с радиопередатчиком, размещенных над кабиной автосамосвала. Общий вид навесного навигационного оборудования автосамосвала БелАЗ-7548 приведен на рис. 4.



Рис. 4. Общий вид навигационного оборудования автосамосвала БелАЗ-7548

Система позволяет получать данные о расходе топлива, уровне загрязнения атмосферы выхлопными газами, скорости движения и координатах до 8 автосамосвалов в секунду, которые автоматически передаются и накапливаются в компьютерной базе данных на сервере диспетчера карьера. Автоматизированная радионавигационная система экологического мониторинга по своему построению является распределенной многоуровневой информационной управляющей системой. Такие системы базируются на 3-х основных базовых составляющих:

- технические средства радиосвязи, навигации и обработки данных;
- геоинформационные системы и электронные карты местности;
- прикладное программно-технологическое обеспечение для управления экологическими параметрами автотранспорта.

Технические средства для систем экологического мониторинга и управления транспортом – это радиостанции, приемники глобальной спутниковой навигации, микрокомпьютеры в кабинах автосамосвалов, а также компьютеры и вычислительные сети в диспетчерских центрах в соответствии с рис. 5.



Рис. 5. Технические средства для систем экологического мониторинга

Геоинформационные системы представляют собой электронные компьютерные карты карьера и территории комбината, которые включают привязанную дорожно-маршрутную сеть, и способны с высокой точностью отражать в динамике местоположение и перемещение горно-транспортных средств. ГИС - технологии основаны на применении эффективных баз данных и программного обеспечения по обработке графических данных.

Прикладное программно-технологическое обеспечение – это та составная часть системы экологического мониторинга и управления транспортом, которая должна в полной мере и адекватно отражать все особенности и нюансы управления горно-транспортными процессами, учитывать экологические реалии современной производственно-хозяйственной деятельности комбината.

Основой системы контроля параметров работы карьерного автосамосвала БелАЗ-7548 служит бортовой микроконтроллер, который предназначен для учета количества расхода дизельного топлива, израсходованного двигателем, измерения скорости движения и непрерывного контроля местоположения автосамосвала с точностью 2-5 метров в плане при скорости до 60 км/час. Общий вид бортового контроллера автосамосвала приведен на рис. 6.

Результаты выполненных исследований были использованы для разработки рекомендаций по применению системы экологического мониторинга работы большегрузных автосамосвалов в карьерах, позволяющие снизить расход топлива и выброс в атмосферу выхлопных газов на 10-20%.



Рис. 6. Общий вид бортового контроллера автосамосвала

**Выводы:**

1. Определены основные принципы и технические требования создания автоматизированной системы экологического мониторинга при работе большегрузных автосамосвалов в карьерах.

2. Выполнен комплекс натурных наблюдений в карьерах Вольногорского ГМК за изменением расхода топлива и выбросов в атмосферу выхлопных газов, а также скорости движения карьерных автосамосвалов с использованием действующей системы диспетчеризации горно-транспортного оборудования.

3. Показано, что экологическая характеристика автосамосвалов в карьерах тесно связана с процессом их движения, который представляет собой сложный, динамичный и ресурсоёмкий процесс, характеризующийся большой вариативностью условий эксплуатации, что требует высокой точности расчета выбросов вредных выхлопных газов в атмосферу на основе контроля расхода топлива и скоростей движения автосамосвалов.

4. Применение ГИС и GPS-технологий позволяет, моделируя реальный профиль автодорог и используя значения фактического удельного расхода топлива, проводить оперативный расчет загрязнения атмосферы выхлопными газами большегрузных карьерных автосамосвалов.

5. Впервые разработана автоматизированная система экологического мониторинга работы карьерных автосамосвалов, позволяющая осуществлять контроль за выбросом вредных выхлопных газов в атмосферу с использованием цифровых планов горных работ, расхода топлива, скорости движения и веса перевозимого груза.

6. Предложенная система экологического мониторинга может выдавать рекомендации оператору диспетчерского пункта по параметрам движения большегрузных карьерных автосамосвалов на участках дороги с различным рельефом и при различных метеоусловиях с целью оптимизации режима движения, сокращения топливо-энергетических затрат и снижения загрязнения атмосферы выхлопными газами.

### Список литературы

1. Филатов С.С. Вентиляция карьеров.- М.: Недра, 1981, 206 с.
2. Баранов Ю.Д. Основные положения и технические требования создания навигационной системы управления горно-транспортным оборудованием карьера.- Сборник научных трудов НГУ №18, Днепропетровск; РИК НГУ, 2003, С. 174-185.
3. Зберовский В.А. Повышение технологической и экологической эффективности эксплуатации карьерных автосамосвалов. - Збірник наукових праць Національного гірничого університету №39.- Дніпропетровськ: РИК НГУ.- 2012, С. 253-261.

*Рекомендована к публикации д.т.н. Голинком В.И.  
Поступила в редакцию 5.12.2013*

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Азюковський О.О.** – к.т.н., доцент кафедри електроприводу ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ

**Ащеулова Олеся Валентинівна** – аспірантка кафедри екології та охорони навколишнього середовища Дніпродзержинського державного технічного університету

**Барташевский Станислав Евгеньевич** – к.т.н., доцент кафедри транспортних систем и технологий ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

**Беляев Николай Николаевич** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Гидравлика и водоснабжение» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

**Біда Сергій Васильович** – к.т.н., доцент кафедри ВНГ і Г ПНТУ ім. Ю. Кондратюка

**Гавриш Анатолий Васильевич** – к.т.н., инженер, фирма «Liquid Dynamics int'l Inc. Company», USA, Hampstead, NC

**Ган Анатолій Леонідович** – к.т.н., доцент кафедри геобудівництва та гірничих технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», м. Київ

**Гапіч Геннадій Васильович** – аспірант кафедри екології та охорони навколишнього середовища ДДТУ, м. Дніпродзержинськ

**Гембарська Марина Олександрівна** – аспірантка НТУУ «КПІ», м. Київ

**Голінько Василь Іванович** – д.т.н., професор, завідувач кафедри аерології та охорони праці ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ

**Горобец Лариса Жановна** – д.т.н., професор ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

**Грачѐв Олег Владимирович** – к.т.н., доцент кафедри системної інженерії ВНУ ім. В. Даля

**Денищенко Александр Валерьевич** – к.т.н., доцент кафедри транспортних систем и технологий ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

**Долгова Тетяна Іванович** – д.т.н., професор кафедри аерології та охорони праці ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ

**Дранишников Леонид Васильович** – к.т.н., професор кафедри програмного забезпечення систем ДГТУ, м. Дніпродзержинськ

**Дриженко Анатолій Юрьович** – д.т.н., професор кафедри открытых горных работ ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск



**Жанчив Билэгсайхай** – генеральний директор Урановой энергетической компании «Мон-Атом», г. Улан-Батор, Монголия

**Зберовський Виктор Олександрович** – аспірант кафедри екології та охорони навколишнього середовища Дніпродзержинського державного технічного університету

**Затынайченко Дмитрий Олегович** – асистент кафедри «Гидравлика и водоснабжение» Днепропетровского національного университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

**Зберовський Олександр Владиславович** – д.т.н., проф., зав. кафедри екології та охорони навколишнього середовища Дніпродзержинського державного технічного університету

**Зуэвська Наталья Валерьевна** – д.т.н., доцент НТУУ «КПІ», м. Київ

**Казола Аугусто Домингус** – аспірант кафедри ОГР ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

**Клименко Тетяна Карлівна** – к.б.н., доцент кафедри екології та охорони навколишнього середовища ДДТУ

**Кондратець Василь Олександрович** – к.т.н., професор кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського національного технічного університету

**Костенко Елена Михайловна** – к.т.н., доцент кафедри безпеки жизнедеятельности, проректор по научно-педагогической работе государственной аграрной академии, г. Полтава

**Кошевой Николай Дмитриевич** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой авиационных приборов и измерений НАН им. М.Е. Жуковского

**Кравець Віктор Георгійович** – д.т.н., професор кафедри геобудівництва та гірничих технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», м. Київ

**Краснопер Валерий Петрович** – главный инженер Вольногорского горно-металлургического комбината, Вольногорск, Днепропетровская обл.

**Крыжановская Светлана Витальевна** – студентка гр. АП-13-2с механико-машиностроительного факультета ГВУЗ

**Куц Ольга Валеріївна** – асистент кафедри ТБВ і ОП ПНТУ ім. Ю. Кондратюка

**Лаврик Марія Олегівна** – аспірантка кафедри екології ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ

**Маевский Анатолий Марьянович** – к.т.н., доцент кафедри ОГР ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

**Малєєв Євген Володимирович** – магістр ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ

**Мещеряков Леонід Іванович** – д.т.н., професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ

**Молчанов Олександр Іванович** – начальник вимірювальної лабораторії ООО «Центр радіоекологічного моніторингу», м. Жовті Води

**Несвитайло Николай Владимирович** - к.т.н., доцент кафедри ОГР ГВУЗ «Національний горний університет», г. Днепропетровск

**Новодранова Вікторія Анатоліївна** – старший викладач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ

**Орлінська Ольга Вікторівна** – д.геол.н., професор, завідувач кафедри ЕГМС та ТБ ДДАУ, м. Дніпропетровськ

**Павличенко Артем Володимирович** – к.б.н., доцент кафедри екології ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ

**Пікареня Дмитро Сергійович** – д.геол.н., професор кафедри екології та охорони навколишнього середовища ДДТУ, м. Дніпродзержинськ

**Полторацкая В.Н.** – к.т.н., ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», г. Днепропетровск

**Прядко Наталия Сергеевна** – к.т.н., старший научный сотрудник Института технической механики НАН и ГКА Украины, г. Днепропетровск

**Прядко Олександр Валерійович** – магістр кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ

**Росточило Наталья Васильевна** – ассистент кафедры «Гидравлика и водоснабжение» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна

**Рудаков Дмитрий Викторович** – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой гидрогеологии и инженерной геологии ГВУЗ «Національний горний університет», г. Днепропетровск

**Савотченко Олена Миколаївна** – магістр кафедри екології та охорони навколишнього середовища Дніпродзержинського державного технічного університету

**Собко Борис Ефимович** – д.т.н., професор кафедри ОГР ГВУЗ «Національний горний університет», г. Днепропетровск

**Соболевская Юлия Генриховна** – к.т.н., доцент Львовского филиала Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта, г. Львов

**Сорока Юрій Миколайович** - к.т.н, ст. викладач кафедри екології та охорони навколишнього середовища ДДТУ, м. Дніпродзержинськ

**Соцков Вадим Александрович** – аспирант кафедры подземной разработки месторождений ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

**Стоецкий Василий Федорович** – аспирант кафедры аэрологии и охраны труда ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

**Сухомлин Роман Андреевич** – аспирант Национальной металлургической академии Украины, г. Днепропетровск

**Таран Игорь Александрович** – д.т.н., доцент, заведующий кафедры Управление на транспорте ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

**Токарева Елена Леонидовна** – м.н.с. института технической механики АН України

**Трубицин Михаил Николаевич** - к.т.н., доцент кафедры Управление на транспорте ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

**Фомичев Вадим Владимирович** – к.т.н., доцент кафедры подземной разработки месторождений ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

**Хоменко Олег Евгенович** – доцент, докторант, ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

**Ценджав Лхагва** – соискатель, Монгольский государственный университет науки и технологии, г. Улан-Батор, Монголия

**Чебанов Максим Александрович** – студент ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

**Чеберячко Сергій Іванович** – к.т.н., доцент кафедри аерології та охорони праці ДВНЗ «Національний гірничий університет», м. Дніпропетровськ

**Чуйко Алексей Сергеевич** – аспирант кафедры авиационных приборов и измерений НАН им. М.Е. Жуковского

**Шайдецька Любов Валентинівна** – старший викладач кафедри геобудівництва та гірничих технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», м. Київ

**Шевцова Ольга Сергеевна** – ассистент, кафедра программного обеспечения, ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

**Шедловский Игорь Анатольевич** – к.т.н., зам. декана факультета информационных технологий, ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

**Ширин Артем Леонидович** – аспирант кафедры программного обеспечения компьютерных систем ГВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепропетровск

## З М І С Т

1	<b>Б. Жанчив, О.Е. Хоменко, Д.В. Рудаков, Л. Ценджав</b> Моделирование фильтрации продуктивного раствора при обработке урановых месторождений Монголии.....	5
2	<b>В.В. Фомичев, В.А. Соцков</b> Исследование устойчивости надрабатываемого дренажного штрека при приближении очистного забоя для условий ШП «Самарская».....	11
3	<b>О.В. Грачёв</b> Анализ влияния изменения минимальной и максимальной граничной плотности на устойчивость модели описания фракционного состава угля.....	19
4	<b>Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко, А.С. Чуйко</b> Оптимизация комбинаторных планов эксперимента.....	26
5	<b>Л.И. Мещеряков, В.А. Новодранова, А.В. Прядко</b> Разработка системы анализа данных акустического мониторинга струйного измельчения.....	33
6	<b>Н.С. Прядко, Л.Ж. Горобец, В.П. Краснопер, Ю.Г. Соболевская, Р.А. Сухомлин</b> Система анализа акустических сигналов газоструйной мельницы.....	38
7	<b>О.О. Азюковський</b> Електротехнічна система електрохімічного захисту від корозії підземних сталевих трубопроводів .....	43
8	<b>А.В. Гавриш, О.С. Шевцова, И.А. Шедловский</b> Моделирование гидроударных явлений в напорных трубопроводах промышленного назначения.....	49
9	<b>И.А. Таран, М.Н. Трубицин, С.В. Крыжановская</b> Решение транспортной задачи методом перебора вершин.....	59
10	<b>С.Е. Барташевский, А.В. Денищенко</b> Совершенствование конструкции тормозной системы шахтного электровоза.....	66
11	<b>Л.И. Мещеряков, А.Л. Ширин</b> Технологическое обоснование структуры автоматизированной системы управления процессами транспортирования породы напочвенными канатными дорогами..	71
12	<b>В.О. Кондратець</b> Дослідження випадкового процесу навантаження опорного ролика конвеєра в умовах осередненого потоку руди.....	79
13	<b>Н.В. Зуєвська, М.О. Гембарська</b> Використання програмного комплексу для аналізу напружено-деформованого стану основи палевого фундаменту.....	88

14	<b>Е.Л. Токарева</b> Представление свойств теплоносителя при численном моделировании гидродинамики и теплообмена в теплонапряженных охлаждающих трактах с переменной массой охладителя.....	94
15	<b>Н.Н. Беляев, Д.О. Затынайченко</b> Анализ аэроионного режима в помещении на базе cfd модели.....	99
16	<b>В.І. Голінько, Т.І. Долгова, С.І. Чеберячко</b> Підвищення ефективності використання протипилових засобів індивідуального захисту органів дихання.....	108
17	<b>В.Ф. Стоєцький, Л.В. Дранишников</b> Прогнозування наслідків аварій на потенційно небезпечних виробничих об'єктах .....	114
18	<b>М.О. Лаврик, А.В. Павличенко</b> Оценка степени влияния прудов-накопителей шахтных вод на уровень засоления почв.....	123
19	<b>Д.С. Пикареня, О.В. Орлинская, Ю.Н. Сорока, А.И. Молчанов, Г.В. Гапич</b> Исследование хранилищ отходов переработки радиоактивных руд методом естественного импульсного электромагнитного поля земли в Днепродзержинске.....	129
20	<b>Н.Н. Беляев, Н.В. Росточило</b> Моделирование процесса нейтрализации опасного вещества.....	137
21	<b>Є.В. Малєєв, А.Ю. Дриженко</b> Технологія заукіски бортів глибоких кар'єрів.....	144
22	<b>О.В. Ащеулова, О.В. Зберовський, Т.К. Клименко, О.А. Демидов, О.М. Савотченко</b> Вивчення екологічної обстановки на рекультивованих територіях Вільногірського ГМК.....	150
23	<b>В.Н. Полторацкая</b> Математическая модель оценки экологического риска для человека от загрязнения атмосферного воздуха выбросами предприятий с использованием подфакельных измерений.....	157
24	<b>А.А. Коваленко, А.В. Павличенко</b> Аналіз екологічних та соціальних наслідків розміщення відходів вуглевидобутку на земній поверхні.....	162
25	<b>В.Г. Кравец, А.Л. Ган, Л.В. Шайдецкая</b> Управление динамикой схватывания растворов вяжущих веществ с применением энергии взрыва.....	167
26	<b>А.М. Маевский, Н.В. Несвитайло, Б.Е. Собко, А.Д. Казола</b> Конструктивное оформление нерабочих бортов карьера при разработке штокообразного месторождения Катока.....	172
27	<b>Б.Е. Собко, А.М. Маевский, Н.В. Несвитайло, М.А. Чебанов</b> Определение оптимальной ширины заходки экскаватора-драглайна при работе его в комплексе с автосамосвалами.....	178

28	<b>Собко Б.Е.</b> Выбор рационального комплекса горнотранспортного оборудования для разработки Мотроновско-анновского участка Мальшевского россыпного месторождения.....	<b>184</b>
29	<b>С.В. Біда, О.В. Куц</b> Визначення характеристик структурної міцності есових ґрунтів, що складають схили річкових долин.....	<b>192</b>
30	<b>В.О. Зберовський</b> Разработка автоматизированной системы экологического мониторинга работы карьерных автосамосвалов	<b>198</b>

**Збірник наукових праць  
Національного гірничого університету  
№ 43**

Підп. до друку 24.12.2013. Формат 60×84/16.  
Ум. друк. арк. 11,91. Обл.-вид. арк. 12,3.  
Тираж 100 прим. Зам. № \_\_\_\_\_

Підготовлено до видання та видруковано  
у Державному ВНЗ «НГУ»  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842  
від 11.06.2007р.

49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19