

УДК 622.698

УДК 622.648

**В.С. БІЛЕЦЬКИЙ** (д-р техн. наук, проф.)**С.Ю. ПОТАПЕНКО** (магістрант)

Донецький національний технічний університет, Донецьк

## ГІДРАВЛІЧНИЙ ТРАНСПОРТ ВУГІЛЛЯ: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

У статті виконано огляд і аналіз проблеми гідравлічного транспортування вугілля та оцінка перспектив його розвитку. Запропонована періодизація розвитку гідротранспорту вугілля. Виділені основні проблемні питання, які обумовлені зміною технологічних характеристик вугілля під час його гідравлічного транспортування.

**Ключові слова:** гідравлічний транспорт, вугілля, технологічні характеристики.

**Постановка проблеми.** Нафтова криза 1973 року (див. рис. 1) спричинила різке збільшення цін на нафту, ініціювала пошук альтернативних енергетичних джерел, зокрема розвиток атомної енергетики та повернення до більш масштабного використання вугілля [1]. У цих умовах активізувалися дослідження з вугільних технологій, зокрема з гідравлічного транспортування вугілля – як промислового, так і магістрального [2]. Магістральні гідротранспортні системи (МГТС) являють собою транспортні артерії на зовнішніх комунікаціях підприємств, які можуть входити до складу як регіонального паливно-енергетичного або металургійного комплексу, так і міжрегіональної централізованої системи доставки сировини і палива. Основні термінальні операції початкових ланок гідротранспорту – подрібнення, пульпроприготування, акумулювання гідросуміші; кінцеві – прийом і розподіл пульпи, її зберігання, зневоднення. Гідравлічний транспорт вигідно відрізняється від альтернативного залізничного більшою економічністю, простотою реалізації, екологічністю, відсутністю транспортних втрат вугілля, високою технологічністю та підготовленістю до автоматизації [3].

Починаючи з середини 2000-х років розпочинається новий пік цін на нафту (рис. 1), що актуалізує новий інтерес до вугільних та вугільно-транспортних технологій – на новому техніко-технологічному та інформаційному витку розвитку.

У цьому зв'язку *мета статті* – огляд і аналіз сучасного стану гідравлічного транспорту вугілля та оцінка перспектив його розвитку.

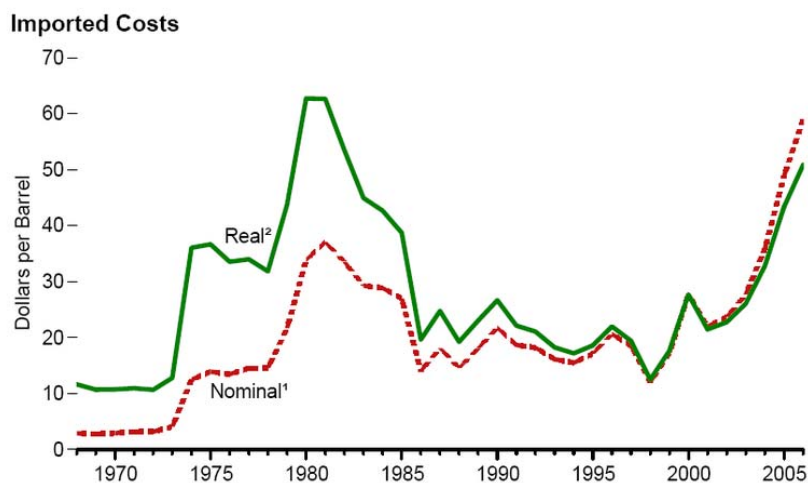


Рис. 1. Номінальні (пунктирна лінія) і порівняльні (суцільна лінія) ціни на нафту на світовому ринку з 1968 по 2006 рр.

**Виклад основного матеріалу.** Аналіз великого масиву існуючих наукових публікацій з гідравлічного транспорту сипких твердих матеріалів, в першу чергу вугілля, дає можливість авторам запропонувати класифікацію його видів за способом транспортування і рідинами-носіями (рис. 2).

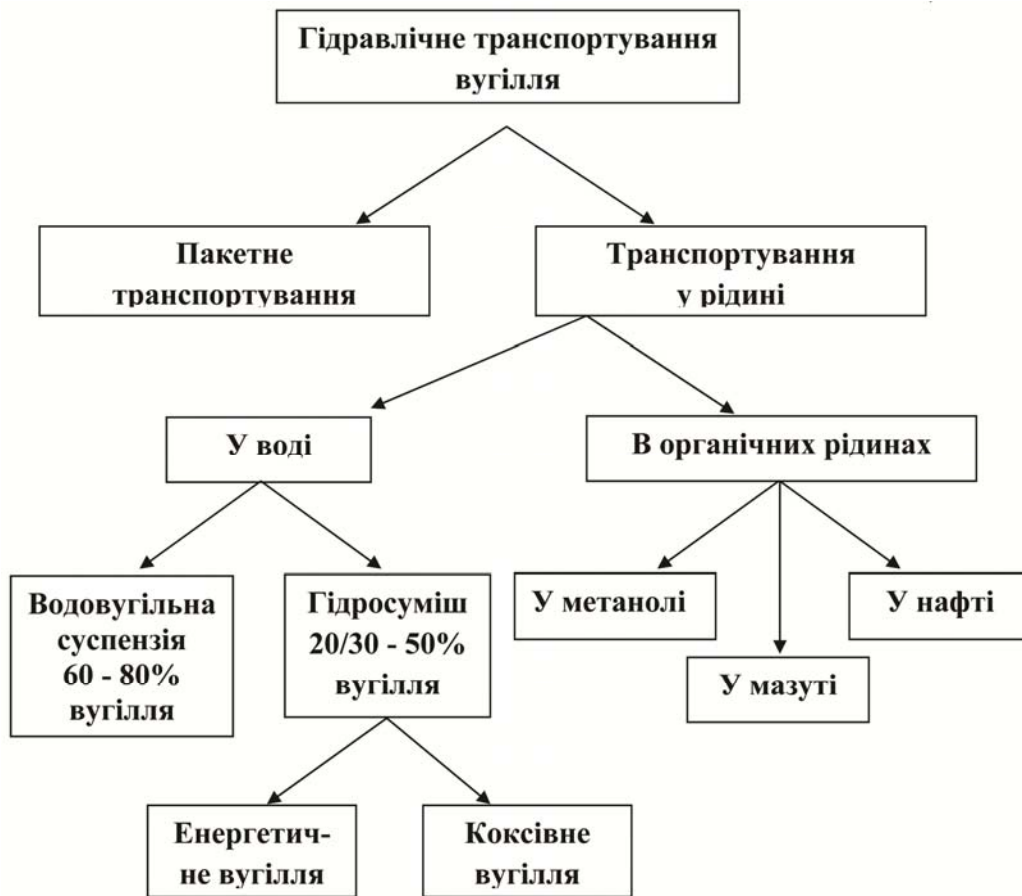


Рис. 2. Класифікація видів гідравлічного транспортування вугілля

Для кожного із зазначених способів виділяють промислові і магістральні установки гідравлічного транспорту. Розглянемо виділені види гідравлічного транспорту вугілля докладніше.

В якості несучої рідини, як правило, використовують воду, хоча її дефіцит і трудність зневоднення ініціюють пошук альтернативних носіїв. Пропонуються метанол і його суміші з водою, сира нафта, мазут, нафтопродукти і вуглекислий газ [4,5]. Відомі дослідження ряду вітчизняних і зарубіжних авторів, результати яких є передумовою для перспективного використання таких поліакриламідів, гуарової смоли, поліетиленоксиду або силікатного клею [6,7]. Роботи в цьому напрямку знаходяться на стадії досліджень і проектних пророблень. Принципові труднощі пов'язані з необхідністю виробництва неводних носіїв, їх дорожнечою, а щодо метанолу і з його токсичністю, пожежо- та вибухонебезпечністю. Варіант "вугілля-нафта" забезпечує низький вміст вугілля в суміші – не більше 25 мас.% через високу в'язкість суспензії [4].

Специфічна особливість МГТС – технологічна і економічна взаємозв'язок вироблених операцій і зрощування її термінальних ланок з технологією попередніх і наступних комплексів переробки матеріалу [2,8,9].

Вуглезбагачувальну фабрику на головній станції слід розглядати як початкову ланку підготовки матеріалу до гідротранспорту, а зневоднення на приймальній станції - як частину технології з підготовки вугілля до подальшої переробки (спалювання, коксування, зрідження тощо). У випадку транспортування коксівного вугілля, приготування гідросуміші на головній станції виконується за наступною схемою:

- класифікація концентрату коксівного вугілля з отриманням двох класів крупності 0-3 (6) і 3(6)-100 мм;
- дроблення концентрату класу 3(6)-100 мм до крупності 3(6) мм;
- подача води в змішувальні резервуари (ємність до тисячі м<sup>3</sup>) для забезпечення масової концентрації 50%.

З резервуарів пульпа насосами подається в головну насосну станцію. На головній насосній станції гідросуміш відцентровими насосами нагнітається в акумулюючий резервуар, з якого вона закачується в трубопровід.

Транспортування гідросуміші здійснюється на відстань: а) у промислових системах – десятки і сотні метрів (перші кілометри); б) у магістральних – від десятків до тисяч кілометрів. При швидкості руху суміші 1,37-1,98 м/с і температурі від 25- 30° С до 10°С вугілля знаходиться в контакті з водою до декількох десятків діб. Гідросуміш проходячи ряд насосних станцій піддається перепаду тиску від 80-100 МПа. Тут же найбільш активно відбувається подрібнення вугілля.

Можна виділити три періоди:

- 1). Перші спроби промислового гідротранспорту (не пізніше XVII – початок XX ст.);
- 2). Розвиток механізованого і електрифікованого промислового гідротранспорту та перші магістральні вуглепроводи (1960-1990 рр.);
- 3). Сучасний період розвитку дальнього магістрального гідротранспорту.

Зупинимося на аналізі досвіду техніки і технології гідравлічного транспортування корисних копалин більш докладніше.

Перші промислові гідротранспортні установки у збагаченні корисних копалин з'являються на солепромислах, зокрема в Україні – на Торських та Бахмітських солепромислах у XVII-XVIII ст., а перший промисловий вуглепровід діаметром 200 мм був побудований в 1914 р. в Англії.

Найвідоміший у світі магістральний вуглепровід – від шахти Блек-Меса (Арізона, США) до ТЕС в Мохейві потужністю 790 МВт (рис. 3, табл. 1). Цей вуглепровід має довжину 439 км і продуктивність до 5,8 млн. т. / рік. У 1964 р. енергетична компанія Peabody Energy підписала контракт з племенами навахо і тапі про використання їх водних ресурсів для створення гідросуміші і її подальшого транспортування на ТЕС в Мохейві. Процес потребував великої кількості води, що викликало екологічну кризу на цих територіях. Під натиском соціальних та етнічно-релігійних рухів вуглепровід попри технологічну придатність та економічну ефективність був законсервований 31 грудня 2005 року [10].

Дефіцит водних ресурсів привів до того, що більшість МГТС було заморожено або їх будівництво (Вайомінг – Техас, протяжністю 1400 миль; Колорадо – Техас, 1300 миль; Іллінойс – Флорида, 1500 миль, Кузбас-Урал-Центр, близько 2500 км.) відкладено на невизначений термін [11]. Незважаючи на це, інтерес до проектів МГТС залишається великим.

Дослідники університету Міссурі запропонували принципово інший тип вуглепроводу: Coal Log Pipelines (CLP) використовує вугілля, спресоване в брикети діаметром на 5-10% менше ніж діаметр трубопроводу і довжиною близько двох діаметрів труби. Співвідношення вугілля і води за масою становить 3 (4) : 1. Такі

трубопроводи можуть конкурувати з існуючими системами транспортування вугілля на відстані від 50 до 1000 миль. Восьмидюймовий CLP має пропускну спроможність близько 2,5 млн. т/рік [12]. Він потребує на 70% менше води і має кращі теоретичні економічні показники, ніж класичні шламкові трубопроводи, але технологія ще не впроваджена на практиці, побудована пілотна установка в Міссурі [13].

Таблиця 1 – Основні характеристики сучасних вуглепроводів

Система	Довжина, км	Діаметр, мм	Продуктивність (млн. т / рік)	Кількість насосних станцій	Рівень впровадження
Кадіс – Іст Лейк (США, Огайо)	174	254	1,3	4	Законсервованний. Працював в 1957-1963 рр.
Блек Меса – Мохейв (США, Арізона)	439	457	4,4 (до 5,8)	3	Законсервованний. Працював в 1970-2006 рр.
Белово – Новосибірськ (Росія)	252	500	3	3	Законсервованний. Працював в 1990-1994 рр.
Фрейлінг – Еміль (Франція)	9	386	2,5 – 3,0	–	Знаходиться в експлуатації з 1952 року
Порто Торрес (Італія)	4	406	3,5 – 4,1	–	Знаходиться в експлуатації
Шен - Вей (Китай)	729	559-610	10	6	Знаходиться в експлуатації

Висококонтентовані водовугільні суспензії (ВВВС), що спалюються безпосередньо у топках котлоагрегатів, також можуть транспортуватися МГТС – технологія “Densecoal”. Водовугільна суспензія – суміш, що містить 60-70% (у деяких видах ВВВС вміст вугілля досягає 80%) подрібненого до – 100-250 мкм енергетичного вугілля, 29-39% води, і 0,5-1,5% хімічних добавок – пластифікаторів, які зберігають гомогенність суспензії і не дозволяють їй розшаровуватися [14]. ВВВС має задані реологічні (в’язкість, напруга зсуву), седиментаційні (зберігання однорідності у статичних та динамічних умовах) і паливні (енергетичний потенціал, повнота вигорання органіки) характеристики. При цьому зола виносу і інші викиди суттєво менші ніж при спалюванні сухого вугілля. В’язкість кондиційних ВВВС, як правило, знаходиться в межах 0,5-1,2 Па·с, седиментаційна стабільність – 30 діб [15]. Найбільш технологічним, економічним і сприятливим фактором для максимально щільної упаковки частинок твердої фази в одиниці об’єму суспензії, є бімодальний характер розподілу частинок за розмірами з певним співвідношенням крупної (100-250 мкм) і дрібної (менше 40 мкм) фракцій. Доцільна частка дрібної фракції

від маси твердої фази суспензії – 30-40%. Забезпечення оптимального гранулометричного складу розв'язується індивідуально для кожного виду вугілля і залежить від його марки і властивостей: зольності, вологості, ступеня окиснення та індексу твердості. Найбільш перспективною технологією одержання ВВВС є мокре одно- або двостадійне подрібнення вугілля у млині. Застосовуються домішки на основі технічних лігносульфонатів (при виробництві паперу за сульфитною технологією), гумінові реагенти (солі гумінових кислот різних фракцій), поліфосфати, які ефективно діють в лужному середовищі (рН = 9-11). Виробництво седиментаційно стійкої ВВВС на основі збагаченого вугілля (зольність менше 8%) потребує більш складної технології, пов'язаної з обов'язковим двостадійним помелом вугілля для забезпечення бімодального гранулометричного складу, а також проведення процесу приготування ВВВС на двох паралельних технологічних лініях, на яких застосовуються неоднакові домішки-пластифікатори. Продукти двох паралельних технологічних ліній змішують з одержанням стабільної суспензії.

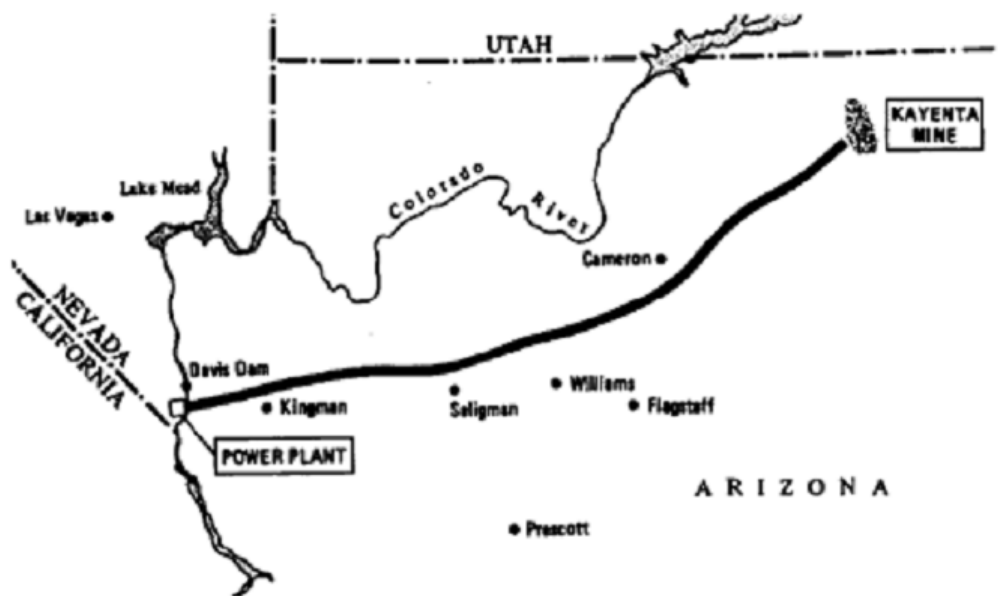


Рис. 3. Схема вуглепроводу Блек-Меса

Водовугільне паливо транспортують в МГТС, в автомобільних та залізничних цистернах. Це ефективна екологічно чиста альтернатива природному газу і нафті. У порівнянні з сухим меленим (пилоподібним) вугіллям, ВВВС, використовувана для теплоенергетичних цілей, допомагає скорочувати викиди оксидів, азоту, сірки і чадного газу на 20-35%, і гарантує 99% згорання органічної маси, покращуючи екологічну ситуацію [14,15, 21].

Інтенсивні наукові дослідження по створенню водовугільного палива і його транспортування в МГТС почалися у 80-і рр. ХХ ст. в Японії, США, Італії, ФРН, Китаї, а з 1985 р. – у СРСР. Вітчизняні науково-організації у співробітництві з фірмою «Снампрожетті» (Італія) розробили, збудували і запустили в експлуатацію в 1990 р. дослідно-магістральний вуглепровід Белово-Новосибірськ (Росія) довжиною 262 км з продуктивністю 3 млн. т. вугілля за рік на суху масу. В середині 1990-х років фінансування проекту було припинено і вуглепровід розпродали по частинах у приватну власність. За кордоном технології-аналоги інтенсивно розробляються і впроваджуються. Так корпорація в галузі енергетики та охорони довкілля (EERC) (шт. Огайо, США) розробила технологію "Cofiring" спільного спалювання висококонцентрованого водовугільного палива (ВВП) з традиційними па-

ливами [16]. Фірма “Снампрожетті”, Італія – комплекс Порто Торрес з повним циклом збагачення, гідротранспортування та спалювання водовугільного палива з колумбійського вугілля продуктивністю 3,5-4,1 млн. т/рік [17].

Але технології спалювання ВВВС властивий ряд принципових недоліків: істотне здорожчання і ускладнення приготування пульпи, пов'язане з необхідністю отримання вугільних композицій спеціального гранулометричного складу; застосування дорогих пластифікаторів, склад яких являє ноу-хау; перевитрата палива в порівнянні зі спалюванням пилоподібного вугілля на 3-10 % [4], обумовлена додатковою енергією на випаровування води і віднесення тепла з паром [15, 21].

Великий інтерес являють станції з комбінованим циклом внутрішньої газифікації вугілля (IGCC). Розробляється проект першої в світі комерційної IGCC-електростанції з підземним похованням CO<sub>2</sub>, яка повинна бути побудована в Лонгбич, штат Каліфорнія. В Таїланді (район Wiang Naeng) дослідниками з США побудовано пілотну установку гідротранспортування вугілля з його наступною газифікацією [18].

Відома також технологічна схема IPTACCS, при використанні якої шляхом помелу вугілля до необхідного розміру і змішання його з водою і нафтою утворюються стабілізовані суспензії різних цільових призначень [19]. При цьому вугілля легко відділяється від частинок породи, а окремі частки вугілля утворюють з нафтою невеликі агломерати, які при подальшому транспортуванні збільшуються до 3-4 мм. Примітно, що в результаті цього зольність вугілля знижується з 45 до 7-10%, а вміст вугілля в відокремленої породі знижується від 15-20% до не більше 1%.

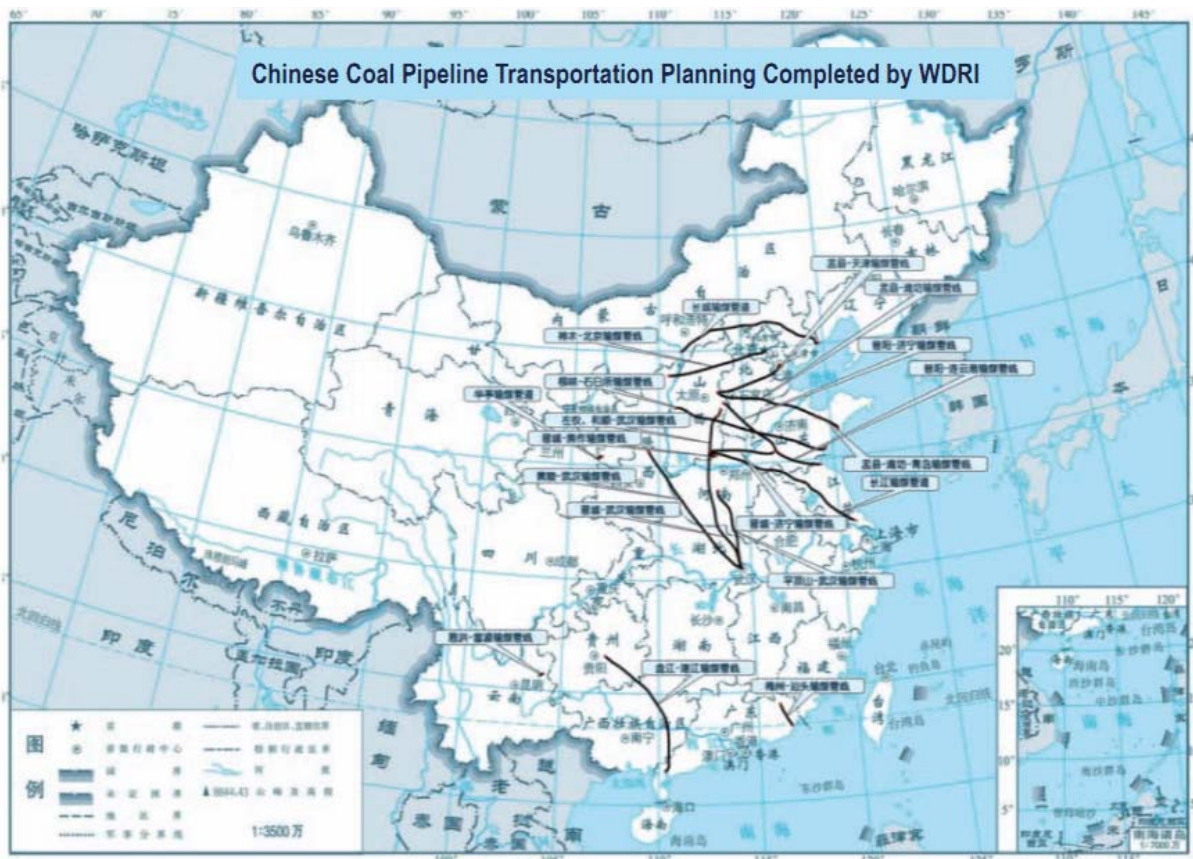


Рис. 4. Схема побудованих вугільних трубопроводів у Китаї



Уханьським проектним і науково-дослідницьким інститутом вугільних технологій (Wuhan Design & Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group) WDRI – провідним проектним та науково-дослідницьким вугільним інститутом Китаю за останні 20-25 років було спроектовано близько двадцяти трубопроводів для транспортування вугілля, зокрема: «Meizhou – Shantou», «Shenmu – Beijing», «Changcheng», «Zuoquan and Heshun-Wuhan», «Pingdingshan – Wuhan» і.т.д (рис. 4). Останній проект магістрального трубопроводу цього інституту має назву «Шен-Вей» (Shen-Wei). Його пропускна здатність 10.00 млн.т /год та довжина - 729 км [20].

Аналіз технологічних рішень сучасних МГТС вугілля дозволяє виділити такі їх особливості:

1. При збагаченні і приготуванні пульпи, її зберіганні в акумуляторах і гідравлічному транспортуванні відбувається зміна поверхневих властивостей вугілля, збільшення його капілярної вологи і подрібнення, що погіршують ефективність зневоднення механічними методами. Фактори подрібнення, окиснення і зміни форми зерен вугілля, розмокання породи знижують технологічні властивості вугілля для коксування.

2. Ситовий склад вугілля, що передається МГТС, вибирається за умовами оптимізації процесу гідротранспорту, без урахування параметрів зневоднюваності гідросуміші.

3. На головному (підготовчому) і гідротранспортному терміналі МГТС відсутні засоби по збереженню первинної зневоднюваності і здатності вугілля до коксування, а на приймальному – засоби по їх відновленню. Причому подрібнення вугілля в трубопроводі і погіршення зневоднюваності та коксуючих властивостей вугілля збільшується із зростанням дальності транспортування.

Таким чином, *по-перше*, слід констатувати, що гідравлічний транспорт вугілля є перспективним засобом промислової і дальньої магістральної передачі вугілля, який активно розвивається; *по-друге*, розробка вискоефективних засобів збереження технологічних властивостей гідротранспортованого вугілля є одним з основних завдань по вдосконаленню сучасних МГТС.

У подальших дослідженнях планується розглянути проблему збереження під час гідротранспорту технологічних властивостей коксівного вугілля.

### Список використаної літератури

1. Annual Energy Review [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.eia.gov/totalenergy/data/annual/index.cfm>.
2. Быховский И.И. Магистральный гидротранспорт угля / И.И. Быховский, В.М. Резников // Строительство трубопроводов. – 1985. – №4. – С. 44-46.
3. A Technology Assessment of Coal Slurry Pipelines. March 1978. For sale by the Superintendent of Documents, U.S. Government Printing Office. Washington, D.C. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ota-cdn.fas.org/reports/7817.pdf>.
4. Смолдырев А.Е. Гидро- и пневмотранспорт в металлургии (техника и технология, инженерные расчеты) / А.Е. Смолдырев. – М.: Металлургия, 1985. – 280 с.
5. Wikipedia, the free encyclopedia: Pipeline transport [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://en.wikipedia.org/wiki/Pipeline\\_transport](http://en.wikipedia.org/wiki/Pipeline_transport).
6. Гидродинамически активные полимерные композиции в пожаротушении / А.Б. Ступин, А.П. Симоненко, П. В. Асланов, Н. В. Быковская. – Донецк: ДонНУ, 2000. – 198 с.
7. Обоснование параметров и режимов работы систем гидротранспорта горных предприятий / Ю. Д. Баранов, Б. А. Блюсс, Е. В. Семенов, В. Д. Шурыгин. – Д.: Новая идеология, 2006. – 416 с.
8. Белецкий В.С. Технологические основы рационального использования масляной агломерации для обезвоживания и облагораживания гидравлически транспортируемых углей: диссерт. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / В.С. Белецкий. – Донецк, 1986. – 230 с.

9. Гірничий енциклопедичний словник: т. I-II / В.С. Білецький, В.С. Бойко, О.А. Золотко // За редакцією В.С. Білецького. – Донецьк. – 2001. – 515 с., 632 с.
10. Klein A.D. Black Mesa and Kayenta Mines, Life-of-Mine Plans and Water Supply Project [Federal Register: December 1, 2004 (Volume 69, Number 230)] / A.D. Klein. – Електронний ресурс. Режим доступу: [<http://www.epa.gov/EPA-ИПАСТ/2004/December/Day-01/i26439.htm>].
11. Trelease F. J. “Water Law, policies and Politics: Institutions for decision making” / F. J. Trelease. – Електронний ресурс. Режим доступу: [[www.kc.frb.org/PUBLICAT/SYMPOS/1979/S79TRELE.pdf](http://www.kc.frb.org/PUBLICAT/SYMPOS/1979/S79TRELE.pdf)].
12. Long-Distance Transport of Coal by Coal Log Pipeline – Електронний ресурс. Режим доступу: [<https://mospace.umsystem.edu/xmlui/bitstream/handle/10355/9946/PublishersBlurbLongDistance.pdf?sequence=8>].
13. 3-year progress report of Capsule Pipeline Research Center. – University of Missouri-Columbia, 1995.– 162 p.
14. Gao Lu. The use of wire mesh reactors to characterize solid fuels and provide improved understanding of larger scale thermochemical processes / Gao Lu, Wu Long, N. Paterson, D. Dugwell, Kandiyoti // Int. J. Oil, Gas and Coal Technology. – Vol. 1. – 2008. – P. 152-170.
15. Овчинников Ю.В., Луценко С.В. Искусственное композиционное жидкое топливо из угля и эффективность его использования - доклад на конференции «Перспективные энергосберегающие технологии и способы сжигания твердого топлива в котлах малой и средней мощности» / Ю.В. Овчинников, С.В. Луценко. – г. Кемерово. – 15-18 ноября 2005.
16. Leonard III J.W. Method for continuously co-firing pulverized coal and a coal-water slurry / J.W. Leonard III, R.D. Stoessner // US Patent Issued on January 10, 1995. – Електронний ресурс. Режим доступу: [<http://www.patentstorm.us/patents/5380342.html>].
17. Placet M. An analysis of markets for small-scale advanced coal-combustion in Spain, Italy, and Turkey / M. Placet, P.A. Gerry, D.M. Kenski. – Illinois, 1989. – 106 p.
18. Anderson C.M. Wiang Haeng Coal-Water Fuel Preparation and Gasification Thailand / C.M. Anderson, M.A. Musich, B.C. Young. – Topical Report. – July 1996. – 135 p.
19. Транспортирование твердых материалов по специальным трубопроводам. Пер. с англ. Парцевского А. Б. – М.: Недра, 1966. – 164 с.
20. Wuhan Design & Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group – Електронний ресурс. Режим доступу: [<http://www.zmwhy.com.cn/en/gczs/gdsm.asp>].
21. Круть О.А. Водовугільне паливо: стан і перспективи / О.А. Круть, В.С. Білецький // Вісник НАН України. – 2008. – № 8. – С. 58-65.

*Надійшла до редакції 26.12.2013*

В.С. Белецький, С. Ю. Потапенко

#### ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ТРАНСПОРТ УГЛЯ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В статье выполнен обзор и анализ проблемы гидравлического транспортирования угля и оценка перспектив его развития. Предложена периодизация развития гидротранспорта угля. Выделены основные проблемные вопросы, которые обусловлены изменением технологических характеристик угля при его гидравлической транспортировке.

Ключевые слова: гидравлический транспорт, угля, технологические характеристики.

V. Biletsky, S. Potapenko

#### HYDRAULIC TRANSPORT OF COAL: STATUS AND PROSPECTS

This article gives an overview and analysis of the problem of hydraulic transportation of coal and assessment of the prospects for its development. Periodization of the development of coal hydraulic transport is given. The basic problems caused by changes in technological characteristics of coal during its hydraulic transport are considered.

Keywords: hydraulic transport of coal, technological characteristics.