

Топливо и энергетика

УДК 544.77.032.1

Макаров А.С., докт. техн. наук**Институт коллоидной химии и химии воды НАН Украины, Киев***бул. Акад. Вернадского, 42, 03680 Киев-142, Украина, e-mail: makarov.a.s1937@gmail.com*

Перспективы развития и использования водоугольного топлива (Обзор)

Рассмотрены перспективы получения топлив на основе углей разной степени метаморфизма и органических отходов. Водоугольное топливо представляет собой высококонцентрированную дисперсную систему, состоящую из высокодисперсной фракции угля и воды с добавками пластификаторов и стабилизаторов. Эти добавки вводятся в суспензии для снижения их вязкости, а также для обеспечения агрегативной и седиментационной устойчивости при высоких концентрациях твердой фазы в системах. Для обеспечения экологической чистоты продуктов сжигания в состав суспензии вводят по мере необходимости десульфураторы, ингибиторы коррозии. При этом получаемые суспензионные топлива обладают высокой калорийностью и экологичностью. Калорийность суспензионного топлива может достигать и даже превосходить энергоемкость каменного угля. Благодаря этому в качестве дисперсионной среды одной из составляющих можно использовать отработанные промышленные отходы. При высоких температурах (выше 1200 °С) все вредные органические компоненты разлагаются и сгорают. *Библ.24.*

Ключевые слова: водоугольное топливо, дисперсная система, седиментационная устойчивость.

Сложное состояние экономики Украины не в последнюю очередь связано с уровнем развития топливно-энергетического комплекса, который в настоящее время испытывает дефицит энергоносителей. Общая мощность электростанций, энергетической системы страны, составляет 52,0 ГВт, из которых 61 % обеспечивают тепловые (31,8 ГВт), 25 % атомные (12,8 ГВт), 9 % гидроэлектростанции (4,7 ГВт). Потребность тепловых электростанций в органическом топливе в предпоследние годы составляла: газ — 13–15 млрд м³; уголь — 30–50 млн т; мазут — 3–4 млн т. Эта потребность за счет собственного топлива обеспечивается лишь на 45 %. Из общего количества топливных ресурсов, которые используются в Украине, более 56 % приходится

на нефть и природный газ, причем за счет собственного производства на нефть приходится 10–15 %, на газ 20–25 %.

Учитывая, что запасы нефти и газа сокращаются, увеличивается стоимость их производства и поставки, уголь в Украине становится практически единственным энергоносителем местного происхождения. Для преодоления критической ситуации, которая сложилась в топливно-энергетическом комплексе страны, наметились тенденции по разработке и реализации программ энергосбережения, а также созданию и внедрению новых, эффективных, экологически чистых топливных технологий. Одной из главных считается переход на широкое использование водоугольного топлива (ВУТ) [1, 2].

Водоугольное топливо

Благодаря обширным научным исследованиям по созданию высококонцентрированных водоугольных суспензий и водоугольного топлива, которые проводились во ВНИИПИ гидротрубопровод, лаборатории физико-химической механики промышленных дисперсий Института коллоидной химии и химии воды АН УССР [1–16], удалось спроектировать и в 1989 г. ввести в эксплуатацию углепровод Белово – Новосибирск протяженностью 265 км. Опытный промышленный комплекс включал терминал производства ВУТ на базе шахты «Инская» производительностью 400 тыс. т/год, а также терминал приема и сжигания водоугольного топлива на ТЭЦ-5 в г. Новосибирске. Сжигание в энергетических установках в отличие от проектов США и Японии проводилось без предварительного обезвоживания.

Опыт проектирования, строительства и эксплуатации комплексов по приготовлению и сжиганию ВУТ подтвердил возможность использования водоугольного топлива в теплоэнергетике.

Водоугольное топливо представляет собой высококонцентрированную дисперсную систему, состоящую из высокодисперсных фракций угля (марки Д, Г, фракции менее 250 мкм) и воды с добавками пластификаторов и стабилизаторов. Эти добавки вводятся в суспензии для снижения их вязкости и сопротивления, а также для обеспечения агрегативной и седиментационной устойчивости при высоких концентрациях твердой фазы в системах. Для обеспечения экологической чистоты продуктов сжигания ВУТ в состав добавок вводятся по мере необходимости десульфураторы, денитрификаторы, а также ингибиторы коррозии.

Преимущества водоугольного топлива

Экологические:

– экологически безопасно на всех стадиях производства, транспортирования и использования;

– позволяет в 1,5–3,5 раза снизить вредные выбросы в атмосферу (пыли, оксидов азота, бенз(а)пирена, двуокиси серы) [2];

– позволяет эффективно использовать образующуюся при сжигании летучую золу.

Технологические:

– перевод теплогенерирующих установок на сжигание ВУТ не требует существенных изменений конструкции агрегатов;

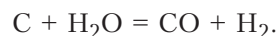
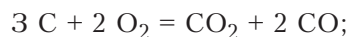
– позволяет легко механизировать и автоматизировать процессы приема, подачи и сжигания топлива.

Экономические:

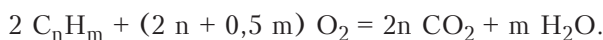
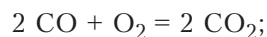
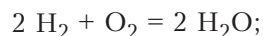
– стоимость ВУТ, готового для использования в котлах и топках в пересчете на 1 т условного топлива, ниже стоимости мазута в 2–4 раза [17].

По условиям горения и степени выгорания углерода высококонцентрированные водоугольные суспензии (ВВУС) существенно отличаются от угля и приближаются к жидким топливам. Минеральные компоненты угля при выгорании капли агломерируются, образуя высокопористые сферы, что позволяет вести процесс горения с малым избытком воздуха. Мелкодисперсные частицы золы при сгорании объединяются в крупные (0,3–0,5 мкм), прочные, пористые ксеносферы, которые легко выделяются в обычных механических сепараторах. Степень улавливания таких зольных агломератов достигает 99–99,5 %, что резко сокращает выбросы твердых частиц в атмосферу.

Особенности горения капель ВВУС состоит в том, что дисперсионная среда, исполняя роль промежуточного окислителя, практически на всех основных стадиях его горения активизирует поверхность частиц твердой фазы. Поэтому горение распыленных капель начинается не из воспламенения летучих паров, а из гетерогенных реакций на их поверхности, в том числе с водой и водяным паром. В результате сгорания углерода в потоке воздуха происходят следующие химические реакции:

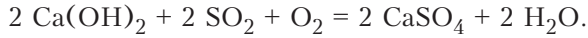
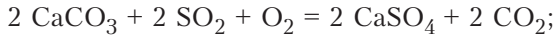
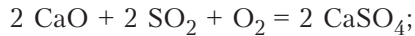


Вторичные реакции происходят при высокой концентрации водяного пара, который является катализатором горения монооксида углерода. Последняя реакция происходит непосредственно вблизи поверхности капли и тем самым обеспечивает отсутствие СО в атмосферных выбросах [18, 19]:

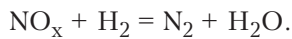
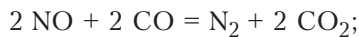


Оксиды щелочных металлов, которые входят в состав минеральной части сжигаемого угля хорошо связывают оксиды серы SO_x , обра-

зующиеся во время сжигания ВУТ. Связывание диоксида серы с соединениями кальция происходит по реакциям:



Во время горения капель ВУТ вокруг них формируется восстановительная среда зоны вторичных реакций, сопутствующая восстановлению оксидов азота:



Физико-химические основы создания ВУТ

Для транспортировки, хранения и сжигания ВВУС они должны обладать следующими свойствами: 1) максимально возможной высокой концентраций твердой фазы в дисперсионной среде; 2) агрегативной устойчивостью с весьма низким уровнем эффективной вязкости (которая колеблется в зависимости от марки и свойств угля $\eta_{\text{эфф}}$ не более 2 Па·с при градиенте скорости деформации сдвига $\dot{\epsilon} \approx 10 \text{ с}^{-1}$ и напряжении сдвига P_0 не более 5–10 Н/м² при $\dot{\epsilon} > 10 \text{ с}^{-1}$, характеризующихся линейной зависимостью $P(\dot{\epsilon})$); 3) седиментационной устойчивостью (это особенно трудно реализовать при наличии частиц размером до 200–250 мкм при весьма низкой эффективной вязкости и прочности структуры).

Решение каждой из поставленных задач вплотную зависит от физико-химической структуры ВВУС, представляющей собой дисперсную систему коагуляционного строения, образованную молекулярным сцеплением угольных частиц. При образовании коагуляционной сетки и отдельных ее элементов между частицами угля остается очень тонкая термодинамически устойчивая прослойка жидкой дисперсионной среды, толщина которой соответствует минимуму свободной энергии системы, наблюдаемой при сближении дисперсных частиц до весьма малого конечного расстояния. Сблизившись до этого расстояния, дисперсные частицы остаются связанными друг с другом до тех пор, пока тепловое, механическое или химическое воздействие не разрушит установившуюся связь, при этом коагуляционные контакты приводят к образованию устойчивых агрегатов, представляющих со-

бой кинетические единицы. Коагуляционное сцепление угольных частиц происходит за счет преодоления энергетических барьеров, созданных сольватными оболочками и выражающимся в их расклинивающим давлении. Преодоление энергетических барьеров осуществляется благодаря кинетической энергии соударяющихся угольных частиц коллоидного размера и за счет гравитационных сил в грубодисперсных суспензиях. Коагуляционное сцепление частиц возникает на участках с наименьшей гидрофильностью. Здесь возникают центры коагуляции на мозаичной поверхности. Такими участками, как правило, являются места наибольшей кривизны угля и ребра удлиненных частиц, которые в наименьшей степени защищены гидратными оболочками.

Коагуляционные взаимодействия непосредственно определяют реологические свойства ВВУС и зависят от концентрации дисперсной фазы, размера частиц, электрокинетического потенциала, концентрации стабилизирующих и диспергирующих добавок, ПАВ [20–23].

Исходя из методов регулирования структурно-механическими и реологическими свойствами концентрированных дисперсных систем, для получения ВУТ с необходимыми свойствами применяются следующие подходы к решению этой проблемы: 1) модифицирование поверхности частиц ВВУС с помощью ПАВ; 2) выбор оптимального гранулометрического состава — бимодальная упаковка частиц (содержание частиц при такой упаковке выше, чем при модальном, за счет заполнения промежутков между крупными частицами более мелкими).

Передовые технологии производства ВУТ

Создание улучшенных технологий производства водоугольного топлива предусматривает снижение стоимости производства и соблюдение при этом хороших эксплуатационных характеристик, прежде всего низкой вязкости, максимально высокой концентрации дисперсной фазы. Основными направлениями таких технологий в последние годы являются следующие разработки: кавитационное водоугольное топливо (КАВУТ), предназначенное для сжигания в паровых и водогрейных котлах, а также исходная смесь для приготовления синтез-газа и моторных топлив; искусственное композитное жидкое топливо (ИКЖТ), для производства используется кавитационная технология обработки угля [17]; высококалорийное топливо, получаемое предварительной деминерализацией природного сырья (ЭКОВУТ), сжигание осу-

ществляется при очень малых избытках воздуха. *Гидробаротермическая обработка* суспензий бурых углей (ВУТ) имеет повышенную теплоту сгорания и низкую вязкость.

Перспективные направления развития топливных композиций на основе угля

Кроме вышеизложенных высоких эксплуатационных качеств, ВУТ имеет такие недостатки:

- трудности достижения температуры в печном пространстве выше 1000 °С из-за низкой calorificity ВУТ;

- при использовании углей высокой степени метаморфизма не достигается высокая степень сжигаемости (большой процент недожога);

- невозможно создать эффективное топливо на основе бурого угля или отходов углеобогащения;

- небезопасно использовать отходы производств или отработанные промышленные воды, содержащие вредные органические примеси.

Все выше перечисленные недостатки устраняются при создании и использовании суспензионного топлива (СТ), в котором в качестве дисперсионной (жидкой) среды используются, кроме воды, органические жидкости [24–25]. В качестве таких жидкостей могут использоваться спирт, фракции переработки нефти, шахтные воды, промышленные отходы, отходы целлюлозно-бумажных комбинатов.

В этом случае можно получить эффективное суспензионное топливо на основе углей любой степени метаморфизма, начиная с бурого угля и кончая антрацитом, обеспечивая высокую степень сжигания. При этом calorificity суспензионного топлива достигается или даже превосходит энергоемкость каменного угля.

Благодаря высокой calorificity, при использовании СТ в печном пространстве можно достигать температуры до 1500 °С. Это дает возможность безопасно и почти бесплатно сжигать вредные органические отходы производств или отработанные промышленные воды, которые могут содержать ядовитые органические вещества, так как все органические яды при температуре выше 1200 °С разлагаются и в составе суспензионного топлива с форсунок полностью сгорают.

Устойчивое горение в широком интервале температур и высокая энергоемкость СТ в отличие от ВУТ позволяют использовать его не только в энергетических установках крупных электростанций, но и в небольших котельных, а также на других промышленных объектах, например, при обжиге кирпича в туннельных печах.

Выводы

Обобщенный анализ исследований, выполненных в лабораториях, на пилотных и промышленных установках, а также опыт эксплуатации существующих комплексов подтверждает техническую возможность получения в Украине из угля различных марок суспензионного топлива, а также его сжигания в энергетических котлах, топках и котельных установках бытового и промышленного характера.

С помощью методов физико-химической механики можно исследовать и эффективно разрабатывать новые виды топлива на основе углей и шламов с необходимыми реологическими и коллоидно-химическими свойствами. Такие разработки активно ведутся в Институте коллоидной химии и химии воды им. А.В.Думанского НАН Украины.

Список литературы

1. Ходаков Г.С. Водугольные суспензии в энергетике. *Теплоэнергетика*. 2007. № 1. С. 35–45.
2. Макаров А.С., Янко С.В. Проблемы использования высококонцентрированного водугольного топлива на основе углей Украины. *Уголь Украины*. 1992. № 3. С. 3–5.
3. А.с. 1166507 СССР, МКИ⁴ С 10/32. Водугольная суспензия. А.С.Макаров, З.П.Васильева, В.В.Способный, Н.Н.Круглицкий, Е.П.Олофинский, Б.С.Степин, Э.И.Рукин, Ю.Г.Свитлый, Т.В.Карлина. Оpubл. 01.03.85.
4. А.с. 1274291 СССР, МКИ⁴ С 10/32. Способ приготовления водугольной суспензии. А.С.Макаров, З.П.Васильева, В.В.Способный, Н.Н.Круглицкий, Е.П.Олофинский, Б.С.Степин, Э.И.Рукин, Ю.Г.Свитлый, Т.В.Карлина. Оpubл. 01.08.86.
5. А.с. 1372926 СССР, МКИ⁴ С 10/32. Водугольная суспензия. А.С.Макаров, В.А.Сушко, Ю.Т.Свитлый, Е.П.Олофинский, Т.Д.Дегтяренко, В.В.Васильев. Оpubл. 08.10.87.
6. А.с. 1372927 СССР, МКИ⁴ С 10/32. Добавка к водугольной суспензии. Э.И.Рукин, А.С.Макаров, З.Л.Шевко, А.В.Гамера, В.В.Васильев, В.Ю.Третьинник, А.Ф.Гафарова. Оpubл. 08.10.87.
7. А.с. 1392897 СССР, МКИ⁴ С 10/32. Способ приготовления водугольной суспензии. А.С.Макаров, В.В.Васильев, В.И.Мурко, В.А.Завгородный, Е.П.Олофинский, А.В.Гамера. Оpubл. 03.01.88.
8. А.с. 1422658 СССР, МКИ⁴ С 10 L 1/32. Добавка к водугольной суспензии. А.С.Макаров, А.В.Гамера, Т.Д.Дегтяренко, И.А.Чиненков. Оpubл. 08.05.88.
9. А.с. 1482178 СССР, МКИ⁴ С 10 L 1/32. Комплексная добавка для водугольной суспензии. В.Д.Беденко, А.П.Ижик, С.П.Костовецкий, А.С.Макаров, В.Г.Правдин, Н.Б.Урьев, Е.П.Олофинский, Э.И.Букин, В.В.Васильев. Оpubл. 22.01.89.
10. А.с. 1559693 СССР, МКИ⁴ С 10 L 1/32. Способ получения водугольной суспензии и устройство

- для його здійснення. А.С.Макаров, Т.Д.Дегтяренко, В.А.Завгородній, Э.И.Букин, А.В.Гамера, Э.М.Воронова, В.И.Мурко. Оpubл. 22.12.89.
11. А.с. 1594974 СССР, МКИ⁴ С 10 L 1/32. Способ - получения водоугольной суспензии. А.С.Макаров, Е.П.Олофинский, Э.И.Рукин, В.Ю.Третинник, В.В.Васильев. Оpubл. 22.05.90.
 12. А.с. 1669180 СССР, МКИ⁴ С 10 L 1/32. Способ - получения водоугольной суспензии. А.С.Макаров, Т.Д.Дегтяренко, В.А.Завгородній, Э.И.Рукин, Л.Г.Примачева, З.П.Васильева, Г.Н.Делягин. Оpubл. 08.04.91.
 13. Пат. 8748 Укр., МПК С 10 L 1/32. Добавка до водовугільної суспензії. А.С.Макаров, В.А.Завгородній, Т.Д.Дегтяренко, А.В.Гамера, З.П.Васильева. Оpubл. 30.09.96, Бюл. № 3.
 14. Пат. 8749 Укр., МПК С 10 L 1/32. Спосіб одержання добавки до водовугільної суспензії. А.С.Макаров, Л.Г.Примачова, Е.І.Рукін, Т.Д.Дегтяренко, В.А.Завгородній, З.П.Васильева. Оpubл. 30.09.96, Бюл. № 3.
 15. Пат. 8750 Укр., МПК С 10 L 1/32. Спосіб одержання водовугільної суспензії та пристрій для його здійснення. А.С.Макаров, Т.Д.Дегтяренко, В.А.Завгородній, В.І.Мурко, А.В.Гамера, Е.М.Воронова. Оpubл. 30.09.96, Бюл. № 3.
 16. Пат. 41597 Укр., С 04 В 35/10, С 04 В 33/02. Спосіб одержання розріджувача. В.О.Яременко, В.Ю.Третинник, А.С.Макаров, В.А.Завгородній. Оpubл. 15.04.2004, Бюл. № 4.
 17. Овчинников Ю.В., Луценко С.В. Искусственное композиционное жидкое топливо из угля и эффективность его использования. *Науч.-практ. конф. «Перспективные энергосберегающие технологии и способы сжигания твердого топлива в котлах малой и средней мощности»*, Кемерово, 15–18 нояб. 2005 г. Новосибирск : Новосиб. гос. техн. ун-т, 2005.
 18. Делягин Г.Н. Вопросы теории воспламенения и горения распыленной водоугольной суспензии // Кинетика и аэродинамика процессов горения топлив. М. : Наука, 1969. С. 111–127.
 19. Круть О.А. Водовугільне паливо. Київ : Наук. думка, 2002. 169 с.
 20. Макаров А.С., Егурнов А.И., Борук С.Д., Сочикан О.М. Высококонцентрированные суспензии на основе отходов углеобогащения. Получение, реологические характеристики и энергетическая ценность. *Хімічна промисловість України*. 2007. № 2. С. 56–60.
 21. Макаров А.С., Егурнов А.И., Борук С.Д., Сочикан О.М. Взаимодействие частиц дисперсной фазы в высококонцентрированных водоугольных суспензиях. *Уголь Украины*, 2005. Ноябрь. С. 37–39.
 22. Егурнов А.И., Макаров А.С., Борук С.Д., Савицкий Д.П. Получение водоугольного топлива на основе бурого угля, модифицированного органическими веществами. *Збагачення корисних копалин*. 2007. № 29–30. С. 156–166.
 23. Пат. 75264 Укр., С 10 L 1/32. Спосіб одержання водовугільної суспензії. О.І.Егурнов, О.Л.Коханюк, В.А.Завгородній, О.М.Крупник, А.С.Макаров. Оpubл. 15.03.2006, Бюл. № 3.
 24. Пат. 102159 Укр., С 10 L 1/32. Водоспиртова суспензія вугілля. Д.П.Савицький, А.С.Макаров, В.А.Завгородній, І.І.Токарев. Оpubл. 11.02.13, Бюл. 3.
 25. Пат. 113871 Укр., С 10 L 1/32. Рідке паливо. А.С.Макаров, С.Д.Борук, О.І.Егурнов, Я.Ю.Тевтуль, О.В.Коренчук, В.М.Соколик, Н.М.Запoтична, О.Ю.Лобанов. Оpubл. 27.03.17, Бюл. № 6.

Поступила редакцію 14.03.18

Макаров А.С., докт. техн. наук
Інститут колоїдної хімії та хімії води НАН України, Київ
 бул. Акад. Вернадського, 42, 03680, Київ-142, Україна, e-mail: makarov.a.s1937@gmail.com

Перспективи розвитку та використання водовугільного палива (Огляд)

Розглянуто перспективи отримання палив на основі вугілля різного ступеня метаморфізму та органічних відходів. Водовугільне паливо є висококонцентрованою дисперсною системою, що складається з високодисперсної фракції вугілля та води з добавками пластифікаторів та стабілізаторів. Ці добавки вводяться у суспензії для зниження їх вязкості, а також для забезпечення агрегативної та седиментаційної стійкості при високих концентраціях твердої фрази у системах. Для забезпечення екологічної чистоти продуктів спалювання до складу суспензії вводять у міру необхідності десульфурізатори, інгібітори корозії. При цьому одержувані суспензійні палива мають високу калорійність та екологічність. Калорійність суспензійного палива може досягати та навіть перевершувати енергоємність кам'яного вугілля. Завдяки цьому як дисперсійне середовище однією зі складових можна використовувати відпрацьовані промислові відходи. При високих температурах (вище 1200 °С) всі шкідливі органічні компоненти розкладаються та згорають. *Бібл. 25.*

Ключові слова: водовугільне паливо, дисперсна система, седиментаційна стійкість.

Makarov A.S., Doctor of Technical Sciences

The Institute of Colloid and Water Chemistry of NAS of Ukraine, Kiev

42, Academic Vernadskyi Ave., 03680, Kiev-142, Ukraine, e-mail: makarov.a.s1937@gmail.com

Prospects for the Development and Use of Water-Cooled Fuel (Review)

The perspective of obtaining fuels based on different degrees of metamorphism coals and organic waste has been considered. Coal-water fuel is a highly concentrated dispersed system consisting of a highly dispersed coal fraction and water with additives of plasticizers and stabilizers. Using these additives in the slurry gives possibility to reduce their viscosity, as well as to provide aggregative and sedimentation stability at higher concentrations of the solid phase. To ensure the ecological safety of combustion products in suspension, if it is necessary, products are added such as desulfurizers, corrosion inhibitors. The resulting slurry fuels are highly caloric and environmentally friendly. The suspension fuel caloric content can reach and even exceed the coal energy intensity. Due to this, as one of the components of dispersion medium industrial waste can be used. All harmful organic components decompose and burn at high temperatures (above 1200 °C). *Bibl. 25.*

Key words: water-coal fuel, disperse system, sedimentation resistance.

References

1. Khodakov G.S. [Water-coal suspensions in power engineering]. *Teploenergetika [Heat power engineering]*. 2007. No. 1. pp. 35-45. (Rus.)
2. Makarov A.S, Yanko S.V. [Problems of using highly concentrated water-coal fuel based on coals of Ukraine]. *Ugol' Ukrainy [Coal of Ukraine]*. 1992. No. 3. pp. 3-5. (Rus.)
3. C.c. 1166507 USSR, MKI⁴ C 10/32. [Water-coal suspension]. A.S.Makarov, Z.P.Vasilyeva, V.V.Capable, N.N.Kruglitsky, E.P.Olofinsky, B.S.Stepin, E.I.Rukin, Yu.G.Switly, T.B.Carlina. Publ. 01.03.1985. (Rus.)
4. C.c. 1274291 USSR, MKI⁴ C 10/32. [Method of preparation of water-coal suspension]. A.S.Makarov, Z.P.Vasilyeva, V.V.Sposobny, N.N.Kruglitsky, E.P.Olofinsky, B.S.Stepin, E.I.Rukin, Yu.G.Svitly, T.V.Carlina. Publ. 08.01.1986. (Rus.)
5. C.c. 1372926 USSR, MKI⁴ C 10/32. [Water-coal suspension]. A.S.Makarov, V.A.Sushko, Yu.T.Svitly, E.P.Olofinsky, T.D.Degtyarenko, V.V.Vasilyev. Publ. 08.10.1987. (Rus.)
6. C.c. 1372927 USSR, MKI⁴ C 10/32. [Additive to water-coal suspension]. E.I.Rukin, A.S.Makarov, Z.L.Shevko, A.V.Gamera, V.V.Vasilyev, V.Yu.Tretinnik, A.F.Gafarov. Publ. 08.10.1987. (Rus.)
7. C.c. 1392897 USSR, MKI⁴ 10/32. [Method of preparation of water-coal suspension]. A.S.Makarov, V.V.Vasiliev, V.I.Murko, V.A.Zavgorodny, E.P.Olofinsky, A.V.Gamera. Publ. 03.01.1988. (Rus.)
8. C.c. 1422658 USSR, MKI⁴ C 10 L 1/32. [Additive to water-coal suspension]. A.S.Makarov, A.V.Gamera, T.D.Degtyarenko, I.A.Chinenkov. Publ. 08.05.1988. (Rus.)
9. C.c. 1482178 USSR, MKI⁴ C 10 L 1/32. [Complex additive for water-coal suspension]. V.D.Bedenko, A.P.Izhik, S.P.Kostovetsky, A.S.Makarov, V.G.Pravdin, N.B.Uriev, E.P.Olofinsky, E.I.Bukin, V.V.Vasiliev. Publ. 22.01.1989. (Rus.)
10. C.c. 1559693 USSR, MKI⁴ C 10 L 1/32. [Method for obtaining water-coal suspension and device for its implementation]. A.S.Makarov, T.D.Degtyarenko, V.A.Zavgorodny, E.I.Bukin, A.V.Gamera, E.M.Voronova, V.I.Murko. Publ. 22.12.1989. (Rus.)
11. C.c. 1594974 USSR, MKI⁴ C 10 L 1/32. [Method for obtaining a water-coal suspension]. A.S.Makarov, E.P.Olofinsky, E.I.Rukin, V.Yu.Tretinnik, V.V.Vasiliev. Publ. 22.05.1990. (Rus.)
12. C.c. 1669180 USSR, MKI⁴ C 10 L 1/32. [Method for obtaining a coal-water suspension]. A.S.Makarov, T.D.Degtyarenko, V.A.Zavgorodny, E.I.Rukin, L.G.Primacheva, Z.P.Vasilyeva, G.N.Delyagin. Publ. 08.04.1991. (Rus.)
13. Pat. 8748 Ukr., MPC C 10 L 1/32. [Additive to water-cooled suspension]. A.S.Makarov, V.A.Zavgorodny, T.D.Degtyarenko, A.V.Gamera, Z.P.Vasilyeva. Publ. 30.09.1996. Bull. No. 3. (Ukr.)
14. Pat. 8749 Ukr., MPC C 10 L 1/32. [A method for obtaining an additive to a water-cooled suspension]. A.S.Makarov, L.G.Primacheva, E.I.Rukin, T.D.Degtyarenko, V.A.Zavgorodny, Z.P.Vasilyeva. Publ. 30.09.1996. Bull. No. 3. (Ukr.)
15. Pat. 8750 Ukr., MPC C 10 L 1/32. [A method for obtaining a water-cooled suspension and a device for its implementation]. A.S.Makarov, T.D.Degtyarenko, V.A.Zavgorodny, B.I.Murko, A.V.Gamera. Publ. 30.09.1996. Bull. No.3. (Ukr.)
16. Pat. 41597 Ukr., C 04 B 35/10, C 04 B 33/02. [Method for preparing a diluents]. A.S.Makarov, V.O.Yaremenko, V.Yu.Tretinnik, V.A.Zavhorodnii. Publ. 15.04.2004. Bull. No. 4. (Ukr.)
17. Ovchinnikov Yu.V., Lutsenko S.V. [Artificial composite liquid fuel from coal and the efficiency of its use]. *Scientific-practical conference «Perspective energy-saving technologies and methods of burning solid fuel in small and medium-sized boilers»*, Kemerovo. Nov. 15-18, 2005. Novosibirsk : Novosibirsk State Technical University, 2005. (Rus.)

18. Delyagin G.N. [Questions of the theory of ignition and combustion of a sprayed water-coal suspension. In: Kinetics and aerodynamics of combustion processes of fuels]. Moscow : Science. 1969. pp. 111–127. (Rus.)
19. Krut O.A. [Water-coal fuel]. Kiev : Naukova Dumka, 2002. 169 p. (Ukr.)
20. Makarov A.S., Eburnov A.I., Boruk S.D., Sochikan O.M. [Highly concentrated suspensions based on waste coal-enrichment. Receiving, rheological characteristics and energy value]. *Khimichna promyslovisht Ukraina [Chemical industry of Ukraine]*. 2007. No. 2. P. 56–60. (Rus.)
21. Makarov A.S., Eburnov A.I., Boruk S.D., Sochikan O.M. [Interaction of dispersed phase particles in highly concentrated water-coal suspensions]. *Ugol' Ukrainy [Coal of Ukraine]*. 2005. Nov. P. 37–39. (Rus.)
22. Eburnov A.I., Makarov A.S., Boruk S.D., Savitsky D.P. [Obtaining water-coal fuel based on brown coal, modified by organic substances]. *Zbahachennya korysnykh kopalyn [Enrichment of minerals]*. 2007. No. 29–30. pp. 156–166. (Rus.)
23. Pat. 75264 UA, C 10 L 1/32. [The method for the preparation of water-and-coal suspension]. O.L. Yegurnov, V.A.Zavgorodnii, A.S.Makarov, O.L. Kokhaniuk, O.M.Krupnyk. Publ. 15.02.2006. (Ukr.)
24. Pat. 102159 UA, C 10 L 1/32. [Alcohol suspension suspension of coal]. D.P.Savitsky, A.S.Makarov, V.A.Zavgorodnii, I.I.Tokarev. Publ. 11.02.2013. Bull No. 3. (Ukr.)
25. Pat. 113871 UA, C 10 L 1/32. [Liquid fuel]. A.S. Makarov, S.D.Boruk, O.I.Egurno, Ya.Yu.Tevtul, O.V.Korenchuk, V.M.Sokolik, N.M.Zapotichna, O.Yu.Lobanov. Publ. 27.03.2013. Bull No. 6. (Ukr.)

Received March 14, 2018

УДК 551.491.3

Ключ В.П.¹, канд. техн. наук, **Ключ С.В.¹**, канд. техн. наук,
Четверик Г.А.¹, **Демчина В.П.²**

¹ **Институт возобновляемой энергетики НАН Украины, Киев**
ул. Гната Хоткевича, 20а, 02094 Киев, Украина, e-mail: biomassa@ukr.net

² **Институт газа НАН Украины, Киев**
ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: boris.ilienko@gmail.com

Газификация канализационного ила

Канализационный ил является возобновляемым биотопливом. Проблема использования ила обусловлена его высокой влажностью и зольностью. Для уменьшения влажности исходной массы ила предложено добавлять в нее сухую мелкодисперсную биомассу (опилки, сечка соломы). Для проведения исследований были отобраны образцы ила длительного хранения Бортнической станции аэрации г. Киева и свежего ила очистных сооружений г. Львова, из которых изготавливались гранулы диаметром 6 мм. Газификацию гранул проводили в две стадии по технологии «обратной тепловой волны». Установлено, что при температуре свыше 700 °С происходит спекание коксозольного остатка, выход которого составил 53–63 %. Определены параметры газификации, состав и теплота сгорания горючего газа. Разработаны рекомендации по использованию горючего газа и коксозольного остатка. Проведенными исследованиями установлена возможность полной и частичной газификации гранул ила на воздушном дутье. *Библ. 10, рис. 5, табл. 2.*

Ключевые слова: канализационный ил, гранулы, газификация, коксозольный остаток, горючий газ.

Постановка проблемы

Органические отходы в виде образующегося илового осадка при очистке сточных вод рассматриваются в настоящее время как перспективный возобновляемый ресурс биомассы, заключающий в себе значительный энергетический потенциал [1]. Проблема переработки илового осадка имеет два основных аспекта:

– технический, обусловленный устаревшей технологической схемой, которая не отвечает современным требованиям по времени и качеству обработки осадка;

– социально-экологический, выраженный в потере ценнейших земель под складирование осадка, что приводит к загрязнению почвы, а также к распространению микробиологического