

УДК 681.5.08

DOI 10.17513/snt.39866

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИХРЕТОКОВОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОЛЬНОСТИ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Сентяй Р.Н., Капустин Д.А., Швыров В.В.

ФГБОУ ВО «Луганский государственный педагогический университет», Луганск,
e-mail: sentyayroman@yandex.ru.

Одним из привлекательных видов топлива ввиду его характеристик является водоугольное топливо, в том числе получаемое путем переработки отходов углеобогащения. На сегодняшний день существует ряд качественно не решенных задач, ограничивающих широкое применение водоугольных суспензий в сфере энергетики. Одной из таких задач является определение зольности водоугольного топлива. Решение данной задачи позволит обеспечить стабильную работу энергетических котлоагрегатов на водоугольном топливе, в том числе получаемом из отходов углеобогащения. В целом эффективная переработка угольных отходов также может снизить их негативное влияние на экологию. В ходе проведенных экспериментов по определению зольности водоугольного топлива была предложена конструкция вихретокового преобразователя и схема обработки сигнала. В результате обработки экспериментальных данных и основываясь на результатах анализа материалов по изучению электрических свойств водоугольного топлива, установлена возможность определения зольности водоугольного топлива методом вихревых токов. Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенная конструкция вихретокового преобразователя и схема предварительной обработки сигнала может быть использована для определения качественного состава водоугольного топлива, что даст возможность проектировать автоматизированные системы управления энергетическими котлоагрегатами.

Ключевые слова: водоугольное топливо, вихретоковый метод, проходной вихретоковый преобразователь, отходы угольного обогащения, измерительная обмотка, компенсационная обмотка

USING THE EDDY CURRENT METHOD TO DETERMINE THE ASH CONTENT OF COAL-WATER FUEL

Sentyay R.N., Kapustin D.A., Shvyrov V.V.

Luhansk State Pedagogical University, Luhansk, e-mail: sentyayroman@yandex.ru

One of the attractive types of fuel, due to its characteristics, is coal-water fuel, including those obtained by processing coal processing waste. Today, there are a number of qualitatively unsolved problems that limit the widespread use of coal-water suspensions in the energy sector. One of these tasks is to determine the ash content of coal-water fuel. Solving this problem will ensure stable operation of power boilers using water-coal fuel, including that obtained from coal preparation waste. In general, efficient recycling of coal waste can also reduce its negative impact on the environment. As a result of the processing of experimental data and based on the results of the analysis of the data on the study of the electrical properties of the coal-water fuel, the possibility of determining the ash content of coal-water fuel by the method of eddy currents has been established. The results obtained indicate that the proposed eddy current converter design and the signal preprocessing scheme can be used to determine the qualitative composition of coal-water fuel, which will make it possible to design automated control systems for power boilers.

Keywords: coal-water fuel, eddy current method, through-pass eddy current converter, coal enrichment waste, measuring winding, compensation winding

Развитие современных методов обработки данных позволяет проводить измерения электронными измерительными системами с высокой разрешающей способностью за короткий промежуток времени, что позволяет повышать скорость реагирования автоматизированных систем управления. Изучение методов использования электромагнитных воздействий на различные виды топлива позволяет проводить исследования их электрических свойств и представляет как научный, так и практический интерес ввиду возможности разработки автоматизированных комплексов и систем в сфере энергетики. Одним из привлекательных на сегодня видов топлива, ввиду ряда его характеристик, является водоугольное топливо (ВУТ) [1, 2]. Однако по сей день ка-

чественно не решена задача низкой реакционной способности водоугольного топлива на начальном участке горения.

Актуальность тематики работы обусловлена возможностями использования отходов обогащения угля в энергетических котлоагрегатах ввиду выгоды как с экономической точки зрения, так и за счет возможности решения задач, связанных с утилизацией отходов угольного обогащения [3, 4]. При использовании в качестве топлива отходов углеобогащения в виде водоугольной суспензии возникает ряд проблем, связанных с ее неоднородной структурой, из-за присутствия негорючих примесей, а следовательно, и процесс горения такого топлива будет нестабилен. Повысить стабильность горения возможно за счет исполь-

зования электронных измерительных систем, на основании полученных с датчиков данных о его составе и последующем учете их в системе автоматизированного управления энергетическими котлоагрегатами.

Одним из перспективных методов для определения зольности водоугольного топлива является вихретоковый метод контроля.

Известно, что в зависимости от стадии метаморфизма угли обладают диэлектрическими, полупроводниковыми свойствами, антрациты являются проводниками [5]. Удельное электрическое сопротивление, измеренное для порошка, при нормальных условиях, составляет для каменных углей средней стадии метаморфизма 10^{10} – $2 \cdot 10^{10}$ Ом·см, для антрацитов – $5 \cdot 10^5$ – $2 \cdot 10^6$ Ом·см. Относительно магнитных свойств угли являются диамагнетиками, в то время как примеси обладают парамагнитными свойствами [5].

В зависимости от стадии метаморфизма, электропроводимость углей может варьироваться в широких пределах. Следует отметить, что значительное влияние на электропроводимость углей также оказывает влажность, содержание минеральных примесей, петрографического состава. Влияние этих факторов для углей различных стадий метаморфизма различно. Так, для бурых углей электропроводимость в значительной степени зависит от влажности, а для каменных углей и антрацитов большее влияние на электропроводимость оказывает содержание минеральных компонентов.

Анализ публикаций и литературы показал, что сведения об измерении зольности углей вихретоковым методом отсутствуют. Известны лишь немногочисленные данные о прямых измерениях электрических свойств водоугольных суспензий [6], способы измерения зольности угля в потоке, основанные на их диэлектрических свойствах [7], а также способы измерения, основанные на других физических принципах [8]. Все описанные способы определения зольности ВУТ обладают рядом недостатков, таких как необходимость учета сложного механизма формирования результирующего значения от большого количества параметров при методе прямого измерения [6], значительное влияние воды при определении зольности, основываясь на зависимости между диэлектрической проницаемостью и зольностью пробы [7], из-за влияния ряда факторов транспортируемой среды (водоугольного топлива), влияющих на точность показаний измерительных устройств [9].

Общеизвестно, что в электромагнитном поле происходят изменения, если в нем расположить электропроводный материал.

Такие изменения происходят благодаря возникновению в электропроводящем материале вихревых токов из-за его магнитной проницаемости, которая для углей приблизительно равна единице ($\mu \approx 1$ для всех углей независимо от их влажности и стадии метаморфизма) [10]. Следовательно, внесение угля в проходной вихретоковый преобразователь повлечет изменения электромагнитного поля внутри соленоидальной катушки, что неминуемо приведет к изменению электрических параметров во вторичной обмотке, в частности, наводимого напряжения. Такие изменения во вторичной обмотке вихретокового преобразователя будут возникать только при попадании в него угольной массы, а при попадании породы или минеральных примесей таких изменений не будет. Это позволяет, подавая сигнал с измерительной и компенсационной обмоток на дифференциальный усилитель, получать сигнал для дальнейшей его обработки. Уровень данного сигнала будет пропорционален зольности угля, находящегося в вихретоковом преобразователе, и после его обработки может быть использован в системе автоматизированного управления энергетическими котлоагрегатами.

Представленные данные свидетельствуют о возможности определения зольности ВУТ вихретоковым методом. Для подтверждения предположения необходимо провести экспериментальные исследования с целью выявления закономерностей протекания электромагнитных процессов в водоугольной суспензии и установить зависимость между уровнем сигнала с вихретокового преобразователя и зольностью угля.

Материалы и методы исследования

Экспериментальные исследования проводились для водоугольных суспензий, с содержанием твердой фазы 70%, полученных из антрацитов, так как данный класс углей по своему составу близок к графиту, изделия из которого, как известно, контролируются вихретоковым методом контроля.

В качестве датчика был выбран проходной вихретоковый преобразователь, фотография которого представлена на рис. 1. Вихретоковый датчик содержит два каркаса, на которых намотаны катушки возбуждения, измерительная и компенсационная обмотки. Как видно на рис. 1, располагаются каркасы под углом 90° относительно друг друга, для уменьшения влияния взаимной индукции измерительных контуров. Каждая обмотка возбуждения, измерительная и компенсационная, содержит по 20 витков провода. Все выводы обмоток выведены на контактную площадку.

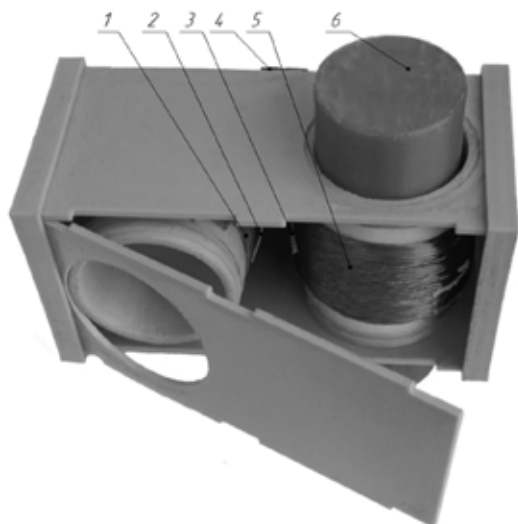


Рис. 1. Фотография экспериментального вихретокового преобразователя:

- 1, 5 – обмотки возбуждения;
- 2 – измерительная обмотка;
- 3 – компенсационная обмотка;
- 4 – контактная площадка;
- 6 – контрольный образец

В качестве контрольного образца использовались полые цилиндры (рис. 1), внутри которых были помещены образцы водоугольной суспензии, или сухая угольная пыль с добавлением 30% порошка мела, для сохранения количественного состава угольной массы в образцах и выявления влияния воды на результирующий сигнал.

Обмотки возбуждения вихретокового датчика подсоединялись последовательно (рис. 2), а измерительная и компенсационная обмотки подключались к дифференциальному усилителю с коэффициентом усиления $K_u = 10$. В ходе проведения экспериментов синусоидальный ток в обмотках возбуждения, вне зависимости от частоты задающего генератора, устанавливался равным 0,5 А.

В качестве задающего генератора был использован сигнальный генератор JDS-2900 с возможностью изменять амплитуду сигнала с шагом 1 мВ и частоту сигнала

с шагом 0,01 Гц в диапазоне от 0,01 мГц до 30 МГц. В качестве усилителя мощности использовался прибор LPA01 с возможностью усиливать входной сигнал в диапазоне частот до 1 МГц с максимальным выходным током до 1 А. Дифференциальный усилитель выполнен на операционных усилителях AD8065A, с коэффициентом усиления 20 dB на частоте до 2 МГц. Сигнал с выхода дифференциального усилителя подается на цифровой осциллограф VDS1022I и отображается на компьютере при помощи программного обеспечения, поставляемого с осциллографом.

Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальные исследования проводились в широком диапазоне частот от 50 кГц до 1 МГц. На рис. 3 представлена информация относительно уровня напряжения, вносимого водоугольным топливом, его формы и частотной характеристики. Программное обеспечение, поставляемое с цифровым осциллографом, позволяет производить быстрое преобразование Фурье над измерительным сигналом, что позволяет оценить его частотный спектр и выявить частоты, на которых вносятся сторонние сигналы. Так, на рис. 3, а, можно наблюдать пиковое значение измерительного сигнала на частоте 1 МГц и увеличение шума в диапазоне частот от 1 МГц до 1,3 МГц, что затрудняет обработку данных при оцифровывании сигнала. При сопоставлении уровня сигнала / шум можно сделать вывод, что наиболее целесообразно выполнять измерения на частотах близких к 500 кГц.

В ходе проведения экспериментов производилось сравнение уровня вносимого напряжения водоугольной суспензией и мелкодисперсной угольной пылью, смешанной с мелом, с приблизительным сохранением пропорций угля в сечении измерительного преобразователя. На рис. 4 представлена полученная зависимость уровня вносимого сигнала от частоты.

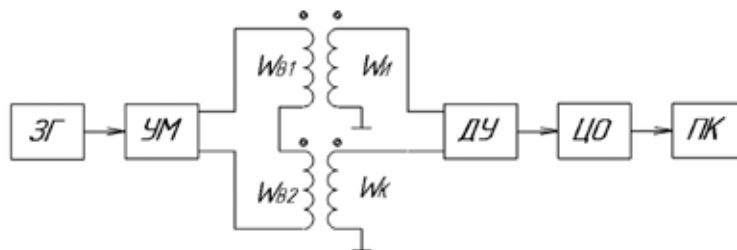


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки по определению зольности ВУТ: ЗГ – задающий генератор; УМ – усилитель мощности; WB1 и WB2 – обмотки возбуждения; WI – измерительная обмотка; WK – компенсационная обмотка; ДУ – дифференциальный усилитель; ЦО – цифровой осциллограф; ПК – персональный компьютер

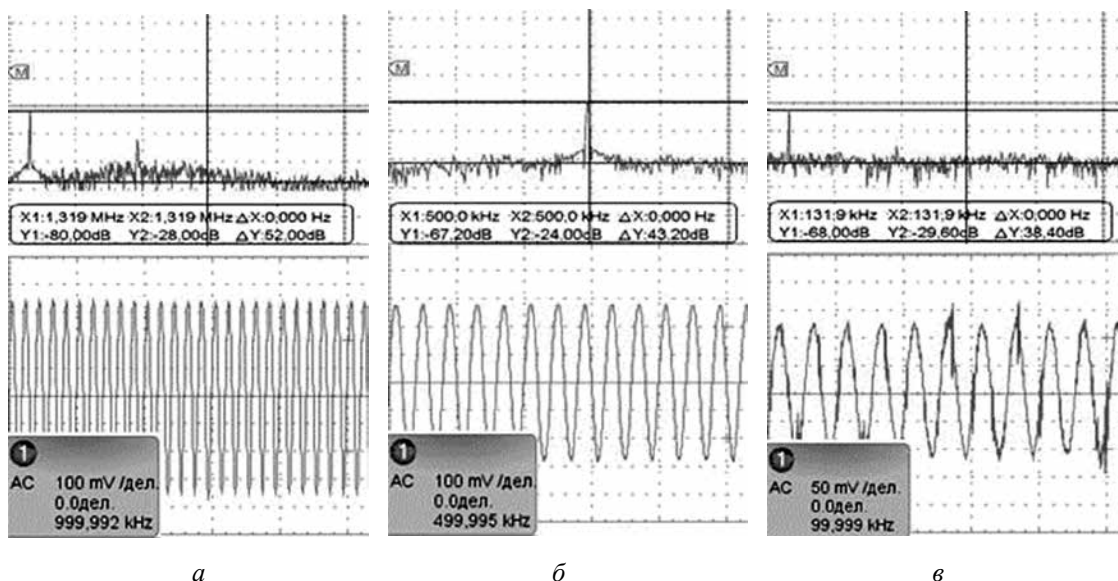


Рис. 3. Уровень вносимого напряжения водоугольным топливом и коэффициент усиления сигнала относительно шума (ΔY) на частотах: а – 1 МГц; б – 500 кГц; в – 100 кГц

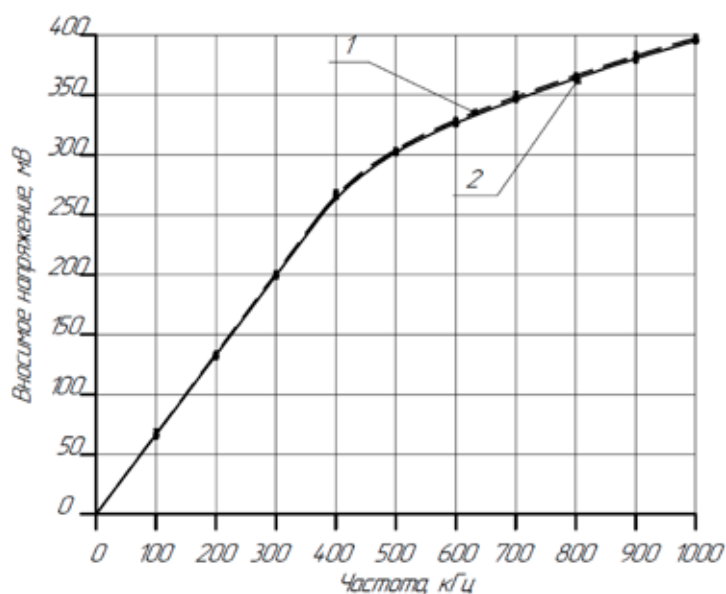


Рис. 4. Зависимость уровня вносимого напряжения от частоты сигнала: 1 – угольная пыль; 2 – водоугольное топливо

Полученные значения свидетельствуют о том, что существенного влияния воды на изменение уровня выходного сигнала в ходе экспериментов не выявлено. Незначительное отклонение линий 1 и 2, представленных на рис. 4, находится в пределах погрешности средств измерения. Для повышения достоверности полученных результатов необходима дополнительная фильтрация измерительного сигнала и увеличение сквозного коэффициента усиления схемы обработки.

Полученные результаты исследования электромагнитных свойств водоугольных суспензий могут быть использованы при разработке автоматизированных систем управления энергетическими котлоагрегатами.

Заключение

На сегодняшний день существует ряд качественно не решенных задач, ограничивающих широкое применение водоугольных суспензий в сфере энергетики. Одной из таких задач является определение золь-

ности ВУТ, решение которой позволит обеспечить стабильную работу энергетических котлоагрегатов на водоугольном топливе, в том числе получаемом из отходов углеобогащения.

В ходе проведенных экспериментов по определению зольности водоугольного топлива была предложена конструкция вихретокового преобразователя и схема обработки сигнала. В результате обработки экспериментальных данных и основываясь на результатах анализа данных по изучению электрических свойств ВУТ, установлена возможность определения зольности водоугольного топлива методом вихревых токов.

Также была экспериментально определена зависимость вносимого ВУТ напряжения в вихретоковый преобразователь от частоты подаваемого на обмотку возбуждения. Из приведенной ранее зависимости (рис. 4) видно, что до частоты 350 кГц можно наблюдать линейную зависимость приращения входного сигнала от частоты в обмотке возбуждения. На частотах выше 350 кГц можно наблюдать нелинейную зависимость изменения измерительного сигнала. Учитывая соотношение уровня вносимого напряжения сигнал / шум и стремление максимально увеличить его уровень за счет повышения частоты, целесообразно производить измерения на частоте 500 кГц.

При проведении экспериментов в частотном диапазоне до 1 МГц не выявлено существенного влияния воды, находящейся в водоугольной суспензии, на изменение уровня выходного сигнала, относительно сигнала вносимого угольной пылью, то есть при равных концентрациях проводящего материала, помещенного в вихретоковый преобразователь, наличие воды не оказывает существенного влияния на выходной сигнал.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предложенная конструкция вихретокового преобразователя и схема предварительной обработки сигнала может быть использована для определения качественного состава водоугольного топлива, однако для повышения достоверности измерений необходимо увеличить сквозной коэффициент усиления экспериментальной установки, увеличить ток обмотки возбуждения и обеспечить фильтрацию измери-

тельного сигнала до его обработки на компьютере. Также необходимо установить зависимость уровня вносимого напряжения водоугольными суспензиями для углей различной стадии метаморфизма.

Практическое применение полученных результатов исследования электромагнитных свойств водоугольных суспензий может быть непосредственно связано с разработкой автоматизированных систем управления энергетическими котлоагрегатами.

Список литературы

1. Багрянцев В.И., Казимиров С.А., Куценко А.И., Подольский А.П., Рыбушкин А.А., Темлянец М.В. Практика и перспективы использования твердых углеродсодержащих отходов в качестве топлива для теплоэнергетических агрегатов // Вестник СибГИУ. 2013. № 3 (5). С. 33–37.
2. Мурко В.И., Таилаков О.В., Хмяляинен В.А., Шеховцова В.О. Развитие экологически чистых технологий по использованию отходов обогащения и сжигания угля // ГИАБ. 2016. № 10. С. 249–258.
3. Дмитриенко М.А., Няшина Г.С., Шлегель Н.Е., Шевырев С.А. Снижение антропогенных выбросов при сжигании углей и отходов их переработки в качестве компонентов органоводоугольных суспензий // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2017. № 3–4. С. 41–52.
4. Злобина Е.С., Папин А.В., Игнатова А.Ю. Экологические и технологические аспекты утилизации твердых углеводородных отходов // Вестник КузГТУ. 2015. № 3 (109). С. 92–102.
5. Бондаренко В.И. и др. Энергетика: история, настоящее и будущее. Т. I: От огня и воды к электричеству: в 4 т. Киев, 2005. 304 с.
6. Пинчук В.А., Должанский А.М. Исследование электрических свойств водоугольных суспензий // Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. 2013. № 5. С. 171–180.
7. А.с. 436274 СССР, МПК G01N 27/22. Устройство для измерения зольности угля в потоке / Синепольский В.С., Сердюк Н.С. (СССР). 1709020/26-25; заявлено 26.10.71; опубл. 15.07.74, Бюл. 26. С. 3.
8. Сентяй Р.Н., Капустин Д.А., Короп Г.В., Швыров В.В. Исследование и сравнительный анализ систем и способов поточного определения зольности угля на предприятиях // Вестник Луганского государственного педагогического университета. Серия 5. Гуманитарные науки. Технические науки. 2022. № 1 (79). С. 99–107.
9. Капустин Д.А., Куценко А.В., Швыров В.В., Сентяй Р.Н. Определение факторов транспортируемой среды (водоугольного топлива), влияющих на точность показаний измерительных устройств // Актуальные вопросы механики текучих сред: материалы II Международной научно-технической интернет-конференции. 2018. [Электронный ресурс]. URL: <http://gdynamic.dahluniver.ru/node/60> (дата обращения: 05.07.2023).
10. Комаров Н.В., Сентяй Р.Н. Способ сухого обогащения угля // Патент UA № 57294. 2011. Бюл. № 4.