

мосфере до полного охлаждения. Система от- качки отходящих газов организовывали с использованием водяного насоса, который обеспечивал предварительный вакуум равный 20 мбар. Физическую активацию предварительно карбонизированной СГО проводили с использованием газопаровой смеси, подаваемой в печь, которая была предварительно нагрета до 900 ° С. Эту стадию проводили путем подачи смеси активационного газа, состоящего из азота и пара, генерируемого барботированием азота через воду. Парогазовая смесь проникала далее в реакционную зону с использованием термически изолированных пластиковых трубок диаметром 10 мм и длиной 300 мм. Коэффициент пропитки определяли по разнице в объеме воды в барботере до и после активации, при этом соотношение составляло примерно 10:1 (масса пара к массе карбонизированной СГО).

Для анализа изотерм адсорбции азота углеродные материалы дегазировали при 200 ° С в течение 3 часов до проведения анализа. Изотермы адсорбции азота определяли с помощью Autosorb-1 (Quantachrome instruments, UK) в диапазоне относительных давлений от 0,005 до 0,991. Данные анализировали с помощью программного обеспечения Quantachrome с использованием модели равновесных пор NLDFT.

Для оценки электрохимических свойств АУ на основе скорлупы грецкого ореха в суперконденсаторах использовались композитные электроды. Электроды приготавливались в форме гранул с геометрической площадью поверхности 0,785 см<sup>2</sup> (5-8 мг / шт.) путем смешивания 90 % АУ, 5 % политетрафторэтилена (ПТФЭ) (пр-во Sigma-Aldrich) и 5 % ацетиленовой сажи (С-65, Imcrys).

Симметричные двухэлектродные ячейки были реализованы в тефлоновых фитингах Swagelok® с использованием 1 моль л<sup>-1</sup> Li<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> водного электролита со стекловолоконным сепаратором и токосъемниками из нержавеющей стали.

Электрохимические испытания проводились с использованием многоканального потенциостата VMP-3 / гальваностата BioLogic Instruments, Франция. Гравиметрическая емкость (Ф·г<sup>-1</sup>) рассчитывалась по гальваностатическим характеристикам разряда двухэлектродных ячеек по формуле:

$$C = (2)I / [(dU/dt)m_{am}]$$

где I - ток (А),

dU / dt - наклон кривой разгрузки (V с<sup>-1</sup>), а

m<sub>am</sub> - средняя масса активированного угля на одном электроде (г).

### Результаты и обсуждение

Поскольку в составе карбонизированной СГО имеется лишь небольшое количество щелочных производных, ответственных за процессы самоактивации, их отсутствие вызвало формирование довольно низкой площади удельной поверхности, значение БЭТ которой соответствует 246 м<sup>2</sup>·г<sup>-1</sup>. Следовательно, при использовании карбонизированной СГО в составе электродных композитов суперконденсатора, расчетная разрядная емкость на массу одного электрода составила 10 Ф·г<sup>-1</sup>, что и следовало ожидать. По этой причине активирующие агенты, способные сформировать достаточное количество нанопор, были введены извне путем физической активации водяным паром.

Рисунок 2 демонстрирует результаты измерения адсорбции-десорбции азота на полученных углях при температуре -196 ° С. Влияние температуры воды в барботере, и соответственно давления насыщенного пара на удельную емкость и выгорание углей, полученных из скорлупы грецких орехов, показано на рисунке 3.

При увеличении концентрации водяного пара в подаваемой газовой смеси, наблюдался более высокий уровень выгорания, и значения разрядной емкости резко увеличивались с 20 Ф г<sup>-1</sup> до 80 Ф г<sup>-1</sup>. Удельная площадь поверхности по БЭТ в данном случае также резко увеличивалась до 757 м<sup>2</sup>·г<sup>-1</sup>.

Отмечено, что при подаче газа из барботера непосредственно в реакционную зону наблюдается снижение температуры на начальном участке до 800°С.

По этой причине, конструкция установки парогазовой активации была улучшена путем ее модификации за счет применения соответствующего технологического метода. В данном случае практиковалось использование дополнительного металлического спирального инжектора, расположенного внутри зоны нагрева и предназначенного для предварительного подогрева парогазовой смеси.