

**Аккумуляторный бетон
как структурный суперконденсатор: принципы, технологии и
перспективы**

© ООО «РЕМТИС», 2026

Магнитогорск, 2026

Оглавление

Введение	3
1. Суперконденсатор: физические основы и современное состояние	4
1.1. Принцип работы и классификация суперконденсаторов	4
1.2. Материалы электродов и электролитов	5
2. Аккумуляторный бетон - реализация структурного суперконденсатора	7
2.1. Концепция «бетонной батареи»	7
2.2. Состав, технология получения и микроструктура	7
2.3. Электрические характеристики прототипов	9
3. Перспективы внедрения бетонного аккумулятора	11
Разработка нашей компании	12
Заключение (Выводы)	13
Список литературы	14

Введение

Современная энергетика сталкивается с проблемой нестабильности возобновляемых источников (солнце, ветер), что требует доступных и долговечных систем накопления энергии. Одновременно растёт потребность в автономных зданиях и «умной» инфраструктуре. В этой связи выделяются две перспективные линии: суперконденсатор как мощный импульсный накопитель с высокой удельной мощностью (10-20 кВт/кг) и ресурсом >100 000 циклов, и бетон - как самый массовый и дешёвый и надёжный строительный материал [1].

Идея, реализованная в MIT и других лабораториях - это превратить бетон в структурный суперконденсатор (аккумуляторный бетон). Добавление в цемент углеродной сажи (~10% от массы) приводит к образованию проводящей сети частиц, а цементный камень с поровой жидкостью выступает как твёрдый электролит. Прототипы демонстрируют ареальную ёмкость до 2188 мФ/см², плотность энергии до 178,7 Вт·ч/кг, ресурс >10 000 циклов. Блок объёмом 45 м³ способен запастись ≈10 кВт·ч – это примерное суточное потребление дома. В открытых российских источниках данные отсутствуют, что подчёркивает актуальность обобщения зарубежного опыта [3].

Цель обзора: проанализировать принципы работы суперконденсатора, способы интеграции в цементную матрицу, технологию получения, микроструктуру, а также электрические характеристики аккумуляторного бетона и перспективы его внедрения.

Задачи: рассмотреть физические основы суперконденсаторов. Описать концепцию, состав и свойства аккумуляторного бетона, сравнить его параметры с коммерческими аналогами, а также рассмотреть и оценить области его применения.

1. Суперконденсатор: физические основы и современное состояние

1.1. Принцип работы и классификация суперконденсаторов

Суперконденсатор представляет собой высокотехнологичное электрохимическое устройство нового поколения. Согласно техническим спецификациям российского стандарта ГОСТ 57437-2017, принцип аккумулирования энергии базируется на формировании электрического поля в двойном электрическом слое на границе раздела между проводящим элементом с электронной проводимостью и электролитической средой [4].

Российская техническая документация оперирует различными терминами: суперконденсаторы, ионисторы, ультраконденсаторы, конденсаторы с двойным электрическим слоем (ДЭС), суперкапы, электрохимические ячейки.

Суперконденсаторы демонстрируют революционное превосходство по удельной мощности и способности к сверхбыстрой энергоотдаче без деградации эксплуатационных характеристик. Удельная мощность суперконденсаторов достигает 10-20 кВт/кг, тогда как у литий-ионных аккумуляторов - лишь 0,3-1,5 кВт/кг.

При требованиях экстремально высокой мощности за минимальные временные интервалы, аккумуляторные системы подвергаются критической деградации и быстро утрачивают емкостные характеристики. Суперконденсаторы же способны многократно отдавать максимальную мощность без какого-либо ущерба для срока службы или характеристик.

Наглядный пример работы суперконденсатора показан на рисунке 1.

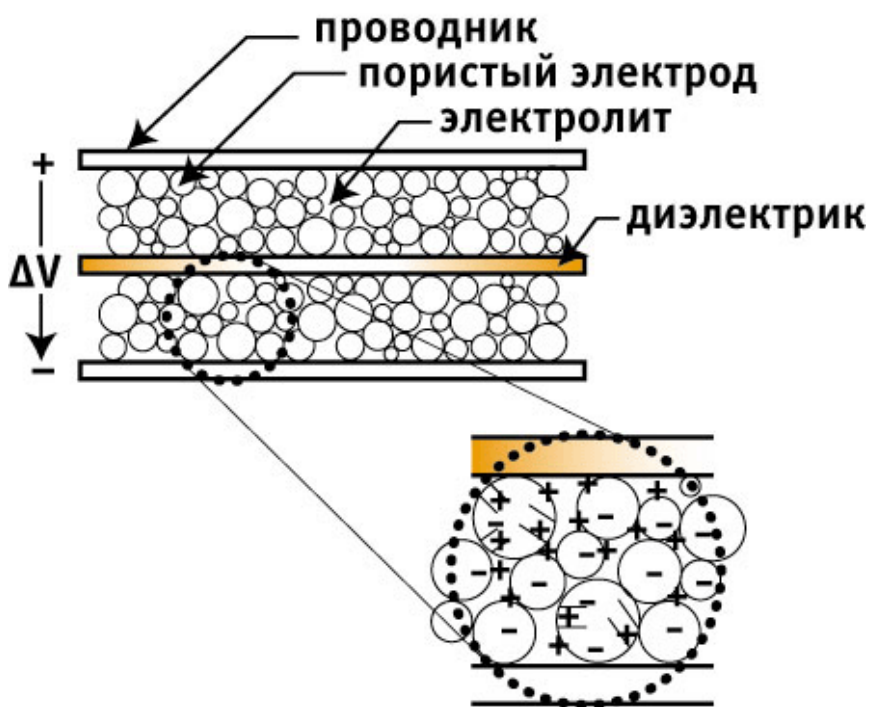


Рис. 1. Структура электрического двухслойного конденсатора

1.2. Материалы электродов и электролитов

Основу электродов большинства суперконденсаторов составляют углеродные материалы из-за их высокой электропроводности, развитой поверхности и химической стабильности. Ключевыми кандидатами выступают: активированный уголь, углеродные нанотрубки, графен и технический углерод (сажа). Важнейший параметр - удельная поверхность, которая для активированных углей может достигать 1500-2500 м²/г, что прямо коррелирует с достигаемой ёмкостью [5].

Электролиты: от жидких к твёрдым

Электролит - это второй ключевой компонент суперконденсатора, обеспечивающий ионный транспорт между электродами. Традиционные жидкие электролиты (водные растворы кислот, щелочей, солей) обладают высокой ионной проводимостью. Органические электролиты позволяют поднять напряжение до ~3 В, однако их проводимость значительно ниже.

Твёрдые полимерные и гелевые электролиты стали перспективной альтернативой, так как они негорючи, исключают утечки, обеспечивают гибкость, хотя их ионная проводимость пока уступает жидкостным аналогам.

Связь с бетоном

Цементный камень обладает собственной ионной проводимостью: в процессе гидратации в нём формируется система микротрещин и нанопор, заполненных водным раствором, содержащим ионы H^+ , OH^- , Ca^{2+} . Исследования показывают, что по мере твердения цемента тип проводимости эволюционирует от водно-ионной до геле-ионной и электронной прыжковой. Эта сеть пор и капилляров может быть использована как природный твёрдый электролит, а при добавлении в цементное тесто высокодисперсной углеродной сажи (технического углерода) формируется перколяционная проводящая сеть, превращающая цементный блок в электрод суперконденсатора [10].

Таким образом, цементный камень выступает одновременно и как твёрдый электролит, и как матрица-носитель для углеродного электрода. В современных работах проходят исследования пористые цементные твёрдые электролиты, модифицированные йодидом калия и пероксидом водорода, что позволяет сочетать высокую ионную проводимость с механической прочностью на сжатие [11].

2. Аккумуляторный бетон - реализация структурного суперконденсатора

2.1. Концепция «бетонной батареи»

Согласно новому исследованию институтом MIT (Массачусетского технологического института), два самых распространенных в истории человечества материала - цемент и технический углерод (похожий на очень мелкий древесный уголь) могут стать основой для новой недорогой системы хранения энергии. Эта технология может способствовать использованию возобновляемых источников энергии, таких как солнечная, ветровая и приливная энергия, поскольку позволит энергетическим сетям сохранять стабильность, несмотря на колебания в поставках возобновляемой энергии [6].

Исследователи обнаружили, что эти два материала в сочетании с водой могут образовывать суперконденсатор - альтернативу батареям, который может накапливать электрическую энергию. По словам исследователей, разработавших эту систему, суперконденсатор можно встроить в бетонный фундамент дома, где он сможет накапливать энергию в течение целого дня, практически не увеличивая стоимость фундамента, но при этом обеспечивая необходимую прочность конструкции. Ученые также предлагают создать бетонную дорогу, по которой электромобили смогут заряжаться бесконтактным способом.

2.2. Состав, технология получения и микроструктура

Материал представляет собой композит на основе портландцемента, воды и высокодисперсной углеродной сажи (Carbon Black, например Ketjenblack EC-600JD). Именно углеродная сажа и формирует проводящий каркас. В качестве электролита для ионного транспорта используют водные растворы KCl, NaCl (вплоть до морской воды) или органические электролиты. Для улучшения удобной укладки могут вводиться суперпластификаторы. Установлено, что для несущих конструкций оптимальная доля углеродной сажи составляет около 10 % от всей массы цемента [5].

Технология получения

Наиболее масштабируемый метод разработан в MIT (технология электропроводящего углеродного бетона EC³):

1. Сухое смешивание цемента и порошка углеродной сажи.
2. Добавление воды и, при необходимости, пластификаторов.
3. Заливка смеси в формы и отверждение в процессе гидратации цемента. Уже на этом этапе самопроизвольно формируется проводящая сеть.
4. Два затвердевших блока пропитывают электролитом и соединяют через ионопроницаемый сепаратор (изолятор), получая уже готовый суперконденсатор.

Микроструктура

Ключевая особенность - самосборка частиц углеродной сажи в фрактальную (древовидную) проводящую сеть, пронизывающую весь объем цементного камня. В ходе гидратации гидрофобные частицы углерода вытесняются растущими кристаллогидратами в поровое пространство, образуя высокопроводящий каркас. Эта сеть, визуализируемая методом FIB-SEM томографии, контактирует с заполненными электролитом порами, что и обеспечивает огромную площадь поверхности для накопления заряда при сохранении несущей способности бетона. Наглядный пример перехода частиц показан на рисунке 2.

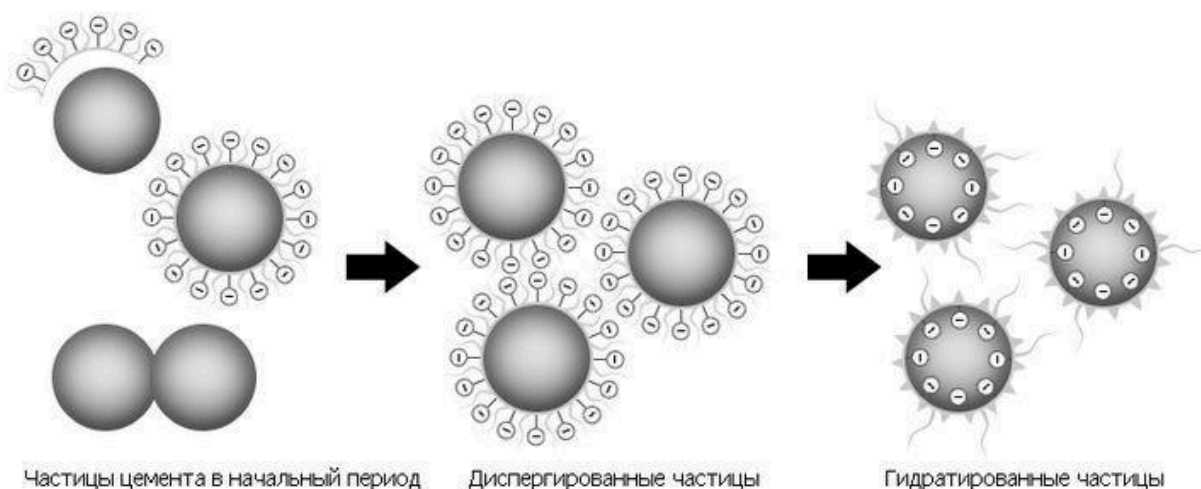


Рис. 2. Микроструктура аккумуляторного бетона: сеть частиц технического углерода в гидратированной цементной матрице

2.3. Электрические характеристики прототипов

Лабораторные образцы на основе цемента и углеродной сажи демонстрируют площадную (ареальную) ёмкость от 1,59 мФ/см² в простых 3D-печатных структурах до 2188 мФ/см² при оптимизации содержания сажи и пористости методом прессования под давлением, а добавление углеродных нанотрубок (1,5 мас.%) позволяет достичь 1562 мФ/см² [7].

Согласно данным MIT, в расчете строительных конструкций, блок легированного углеродной сажей цемента объемом 45 м³ способен запастись около 10 кВт·ч энергии - это приблизительное суточное потребление среднего городского домохозяйства. Ниже представлена таблица сравнения коммерческих суперконденсаторов, аккумуляторов и лабораторного образца аккумуляторного бетона MIT.

Таблица 1: Сравнение параметров: обычный суперконденсатор, аккумуляторный бетон (лабораторный образец), литий-ионный аккумулятор.

Параметр	Обычный суперконденсатор	Литий-ионный аккумулятор	Аккумуляторный бетон (лабораторный образец)
Плотность энергии	1-30 Вт·ч/кг (гравиметрическая); 2,5-15 Вт·ч/кг	50-260 Вт·ч/кг; 100-300 Вт·ч/кг	21,6 Вт·ч/кг (гравиметрическая); до 178,7 Вт·ч/кг (биогибридный); ~300 Вт·ч/м ³ (объемная); 0,22 кВт·ч/м ³ (ЕС ³)
Плотность мощности	500-10 000 Вт/кг; до 10 000 Вт/кг	150-315 Вт/кг; 1 000-3 000 Вт/кг	1106,2 Вт/кг; 8,3 кВт/кг (биогибридный); 0,90 мВт/см ² (ареальная)
Циклический ресурс, циклов	> 100 000; вплоть до 1 000 000	500-2 000 (типично); до 15 000-25 000 (LTO)	> 10 000 (с сохранением 80-85% емкости)
Время заряда	Секунды-минуты	Часы	Секунды-минуты
Стоимость материалов	Средняя	Высокая (Li, Co)	Низкая (цемент, вода, сажа)
Основная функция	Накопление энергии	Накопление энергии	Несущая конструкция + накопление

Работоспособность концепции подтверждена в лабораторных условиях. Прототип цементного структурного суперконденсатора с углеродными

нанотрубками обеспечивал питание красного светодиода в течение более чем 540 секунд после зарядки. В более ранних своих экспериментах команда MIT запитывала светодиод от сборки из трех последовательно соединенных углерод-цементных ячеек [4].

Проанализировав и сравнив параметры с возможностями лабораторного образца, можно сделать следующие выводы:

— **Масштабируемость:** компоненты (цемент, вода и сажа) доступнее и дешевле, а технология изготовления совместима со стандартным строительным производством, что позволяет создавать накопители огромных масштабов

— **Двойная функция:** материал одновременно несет механическую нагрузку и запасает энергию, что не требует дополнительного места и материалов

— **Мощность и ресурс:** как и любой суперконденсатор, бетонный накопитель способен быстро заряжаться/разряжаться и выдерживать сотни тысяч циклов без существенной деградации, что недостижимо для батарей.

Созданные зарубежные прототипы демонстрируют способность цементных суперконденсаторов заряжаться даже от солнечных панелей и обеспечивать питание в течение нескольких часов. В российских источниках, опубликованных открытых данных нет, что указывает на необходимость активизации отечественных исследований в данном направлении [14].

3. Перспективы внедрения бетонного аккумулятора

Бетонный аккумулятор имеет широкую область будущего применения. В большинстве случаев он больше пригоден для энергетически автономных зданий, так как его легко интегрировать в их фундамент, стены и покрытия. За счет него будет возможность накапливать энергию для обеспечения зданий электричеством

Его также можно интегрировать и в умную инфраструктуру города. Его функция будет заключаться в питании дорожных светофоров и освещении улиц как для дорог, так и для тротуаров. Он также может служить дорожным покрытием с подогревом в зимнее время года, исключая частые дорожные насыпи реагентов с противоскользящим эффектом.

Ниже на рисунке 3 представлена концепция интеграции бетонного аккумулятора в городскую инфраструктуру.



Рис. 3. Концепция интеграция бетонного аккумулятора в городскую инфраструктуру

Разработка нашей компании

Нашей лабораторией была подтверждена работоспособность разработки ученых MIT и ее эффективность.

В данный момент ведется полным ходом разработка и испытания собственного отечественного продукта. По результатам десятков испытаний, были улучшены показатели эффективности материала, а также пересмотрена структура бетона опытным путем.

Отдельно наша компания пересмотрела все часто используемые материалы при строительстве зданий и для создания бетона. Было принято решение о создании армирования с проводящим углеволокном для улучшения характеристик электропроводности и прочности материала.

Таким образом, мы можем подтвердить, что технология масштабируема и совместима со стандартными бетонными работами.

Заключение (Выводы)

По итогам проведенного обзора перспектив бетонного аккумулятора, анализов и исследований по сей день, можно сделать следующие выводы:

1. Физическая основа и технологии доказаны. Суперконденсатор, работающий на принципе двойного электрического слоя, является высоконадёжным накопителем с рекордной удельной и циклическим ресурсом.
2. Работоспособность аккумуляторного бетона подтверждена экспериментально. Материал одновременно выдерживает и механическую нагрузку, что подтверждает его статус структурного суперконденсатора.
3. Есть дальнейшие перспективы использования материала. При успешном преодолении указанных ограничений аккумуляторный бетон способен изменить модель проектирования энергоэффективных зданий и «умной» инфраструктуры.

Аккумуляторный бетон может стать заменой классическим батареям. Технология имеет перспективу, особенно в регионах с высокой стоимостью затрат на электроэнергию и традиционных аккумуляторов для объектов, где важна пожаробезопасность и минимальное обслуживание.

Список литературы

1. О последних достижениях МІТ (новости 2025-2026 гг.)
 - Детинич Г. В МІТ на порядок улучшили батарею из бетона - фундамент сможет питать дом в течение суток и дольше [Электронный ресурс] // 3DNews. - 2025.:
<https://3dnews.ru/1130262/v-mit-na-poryadok-uluchshili-batareyu-iz-betona-fundament-smoget-pitat-dom-v-techenie-sutok-i-dolshe/print?topblock> (дата обращения: 26.05.2026).
 - Аккумулятор из бетона: как ученые из МІТ придумали материал будущего [Электронный ресурс] // Рамблер/новости. - 2025.:
<https://news.rambler.ru/tech/55477851-akkumulyator-iz-betona-kak-uchenye-iz-mit-pridumali-material-buduschego/> (дата обращения: 26.05.2026).
2. О ключевых публикациях и исследованиях (2023-2024 гг.)
 - Физики сделали электрическую батарею из бетона [Электронный ресурс] // Naked Science. - 2023.:
<https://naked-science.ru/article/physics/sdelali-batareyu-iz-betona> (дата обращения: 26.05.2026).
 - Марина А. Учёные МІТ разработали суперконденсатор из обычного бетона и сажи - запастись энергией можно будет прямо в фундаменте дома [Электронный ресурс] // 3DNews. - 2024.:
<https://3dnews.ru/1106403/novoe-slovo-v-hranenii-energii-uchyonie-mit-razrabotali-superkondensatori-iz-betona> (дата обращения: 26.05.2026).
 - Ставицкий А. Электроэнергию предложили хранить в бетоне [Электронный ресурс] // [Lenta.ru](https://lenta.ru). - 2024.:
<https://lenta.ru/news/2024/06/13/cement/amp/> (дата обращения: 26.05.2026).
3. О перспективах и обзорах
 - Ученые научились превращать здания и мосты в огромные внешние аккумуляторы из бетона [Электронный ресурс] // [Overclockers.ru](https://overclockers.ru). - 2025.:

https://overclockers.ru/blog/Global_Chronicles/show/240172/Batarei-iz-betona-Uchenye-nauchilis-prevrashchat-zdaniya-i-mosty-v-gigantskie-vneshnie-akkumulyatory#comments (дата обращения: 26.05.2026).

- Инновационный бетон превратит дороги в гигантские аккумуляторы [Электронный ресурс] // Gismeteo. - 2024.:

<https://www.gismeteo.ru/news/science/innovatsionnyy-beton-prevratit-dorogi-v-gigantskie-akkumulyatory/> (дата обращения: 26.05.2026).

4. Российские разработки и публикации

- В России разработали новый материал для суперконденсаторов [Электронный ресурс] // НПОЭ. - 2023.:

<https://npoe.ru/v-rossii-razrabotali-novyj-material-dlya-superkondensatorov/> (дата обращения: 26.05.2026).

- Российские ученые создали материал, повышающий энергоэффективность суперконденсаторов [Электронный ресурс] // [Neftegaz.RU](https://neftegaz.ru). - 2023.:

<https://neftegaz.ru/news/alternative-energy/759724-rossiyskie-uchenye-sozdali-material-povyshayushchiy-energoeffektivnost-superkondensatorov/> (дата обращения: 26.05.2026).

- Электрифицированный цемент превращает дома и дороги в источники тепла [Электронный ресурс] // [INOSMI.INFO](https://inosmi.info). - 2023.:

<https://inosmi.info/elektrificirovannyj-cement-prevrashhaet-doma-i-dorogi-v-istochniki-tepla.html> (дата обращения: 26.05.2026).

5. Патентные документы

- Electron-Conducting Carbon-Based Cement (e-C3) : пат. 10,875,809 США.:

<https://tlo.mit.edu/industry-entrepreneurs/available-technologies/electron-conducting-carbon-based-cement-e-c3> (дата обращения: 26.05.2026).

- Суперконденсатор на основе наноструктурированного углеродного материала : пат. 2820678 Рос. Федерация.:

https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_2024_12_3/DK/00000282/000002820678.pdf?type=PN&number=2820678 (дата обращения: 26.05.2026).

© ООО «РЕМТИС», 2026

Текст является служебным произведением. Исключительные права принадлежат ООО «РЕМТИС». Копирование, распространение или использование письменного разрешения правообладателя запрещено