

# АЭРОГЕЛИ, ИХ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
Минск, Республика Беларусь

Хиневич А. С.

Позняк А. А. – канд. физ.-мат. наук, доцент

Бывают ли материалы, на 90 процентов состоящие из воздуха? И при этом твердые, тепло- и звукоизолирующие, проводящие электричество и вообще способные найти себе применение сразу в нескольких отраслях промышленности? Представленный ниже материал дает ответ на этот вопрос.

## I. Свойства аэрогеля

Аэрогель — твердым материалом на 99,8% состоит из воздуха и при этом способен выдерживать вес, превышающий его собственный в 4000 раз. Аэрогели огнеупорны, воздухопроницаемы, способны впитывать воду или масло, могут, в зависимости от материала изготовления, служить электрическим проводником или не менее эффективным изоляционным материалом.

Наиболее характерные свойства аэрогеля:

- очень низкая плотность;
- крайне низкая теплопроводность (до 0,016 Вт/(м·К)), в 10 раз ниже, чем у дерева;
- низкая скорость распространения звука (до 70 м/с);
- чрезвычайно низкий коэффициент преломления света (до 1,0002);
- электрическая проводимость может меняться в широких пределах в зависимости от используемого материала [1, 2].

У аэрогелей есть еще один уникальный параметр — отношение площади полной поверхности к весу: до 3200 м<sup>2</sup>/г. Это означает, что если представить площадь всей поверхности в виде единой плоскости, то одного грамма этого материала хватит, чтобы покрыть половину футбольного поля.

Тем не менее, несмотря на то, что изобрели аэрогель почти сто лет назад, сфера его применения на данный момент ограничена. В первую очередь это связано с очень высокой ценой.

Себестоимость исходных материалов для аэрогеля составляет порядка 1000 долларов за 1 см<sup>3</sup>, и это не считая серьезных временных затрат. Второй недостаток — чрезмерно малая пластичность, то есть аэрогели очень хрупкие. Они выдержат давление, но не удар [2].

## II. Что такое гель

В основе уникальных свойств аэрогелей в первую очередь лежит их пространственная структура с крошечными открытыми порами. Материал стенок, безусловно, также имеет значение. Например, от него в значительной мере зависят механические свойства, а также электропроводность конкретного аэрогеля.

Именно гели являются исходным материалом для создания аэрогелей. Любой гель состоит из двух компонентов с разными физическими свойствами: твердой фазы в виде непрерывной пористой пространственной структуры, пронизывающей весь образец, и жидкой фазы, заполняющей поры. Причем характерный размер структурных элементов твердой фазы — как раз десятки нанометров, ведь твердая фаза в гелях — это обычно конгломераты наночастиц или длинных макромолекул.

Типичный гель можно себе представить в виде поролоновой губки для мытья посуды, пропитанной жидкостью. Только поры в такой губке в сотни тысяч раз меньше, чем в той, что у нас на кухне. Если удалить всю жидкость из такой губки, то получится сухая губка с заполненными воздухом порами. Таким образом, казалось бы, для получения аэрогеля достаточно просто высушить любой гель. Но это не так. Практика показала, что при испарении жидкой фазы гель начинает быстро уменьшаться в объеме и, в конце концов, получается маленький плотный комочек сухого вещества, а не желаемый пористый наноматериал со сверхмалой плотностью. Коренным отличием модели с губкой от реального геля являются размеры пор: у губки они исчисляются миллиметрами, а у гелей — десятками нанометров, то есть разница составляет примерно пять порядков. Когда происходит испарения жидкости из пор, в какой-то момент жидкость перестает полностью заполнять поры, и появляется граница между жидкостью и парами этой жидкости, смешанными с воздухом. Как известно, на границе жидкости всегда действуют силы поверхностного натяжения, которые приводят к взаимодействию поверхности жидкости и стенок сосуда (стенок пор). Если стенки хорошо смачиваются, то поверхность жидкости приобретает вогнутую форму и на стенки действует сила, тянущая их внутрь сосуда. Величина этой силы, приходящаяся на единицу длины стенки поры вдоль границы жидкости, не зависит от радиуса поры. Но при этом в геле стенки этих пор в тысячи раз тоньше, чем в губке. Получается, что прилагаемая к стенкам удельная сила в геле и в губке одна и та же, а вот толщина этих стенок и, соответственно, их механическая прочность — совсем разные. Не удивительно, что поры губки выдерживают высыхание наполняющей их жидкости, а поры геля — нет. Отсюда и «скукоживание» геля при высыхании — поверхность жидкости в порах просто ломает хрупкие стенки одну за другой по мере испарения, и в результате получается сухой сплюснутый комочек из изломанных стенок, а не ажурная конструкция, свойственная аэрогелям [2].

### III. Как высушить гель

Решение было найдено еще в 1931 году американским ученым Самуэлем Кистлером. Идея Кистлера состояла в том, чтобы избавиться от поверхности жидкости и связанных с ней сил натяжения, раз уж именно поверхность и является причиной всех бед. Пусть имеется запаянная стеклянная колба, которая наполовину заполнена жидкостью. Через прозрачные стенки наблюдается граница жидкости и газа над ней. При нагревании колбы жидкость внутри будет испаряться, что приведет к повышению количества и давления пара над ее поверхностью. А также, естественно, и температуры этого пара. Если продолжать нагревание достаточно долго, то в определенный момент давление и температура внутри колбы достигнут такого уровня, что плотность пара сравняется с плотностью жидкости и граница между ними просто исчезнет. А сам пар и жидкость потеряют знакомые характеристики (например, жидкость станет сжимаемой) и превратятся в одно неразделимое целое. Вместе с поверхностью раздела фаз исчезнут и силы поверхностного натяжения. Такие температура и давление, при которых пар

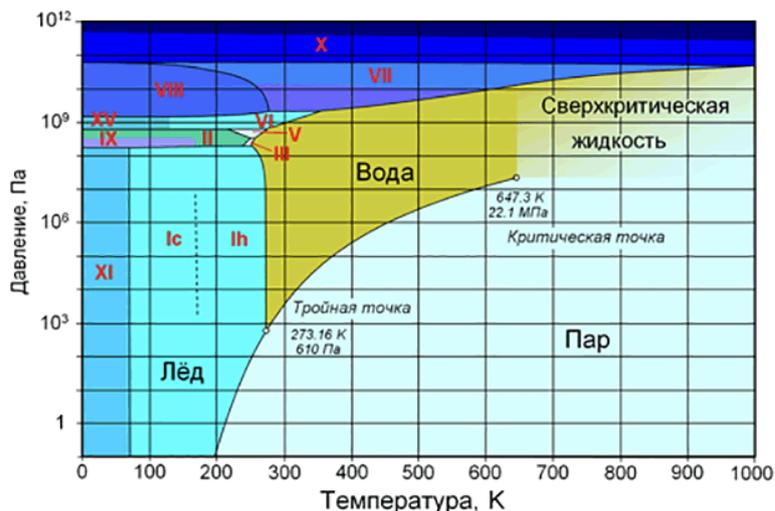


Рис. 1. — Фазовая диаграмма воды

перестает отличаться от жидкости, а жидкость от пара, в термодинамике называются критическими и изображаются в качестве критической точки на фазовой диаграмме, рис 1.

Для воды критическая температура и давление составляют 374 °С и 218 атм. соответственно. То есть, если повышать давление в камере с гелем на водной основе до 218 атм. И выше и затем поднимем температуру выше 374 °С, то какое-либо различие между паром и водой исчезнет — получится так называемая сверхкритическая жидкость.

Внутри каждой поры геля окажется очень плотный пар или вода, что при таких условиях по сути одно и то же. Если теперь начать понижать давление до критического и ниже, сохраняя температуру выше критической, то этот плотный пар начнет постепенно выходить из геля без какой-либо конденсации. Затем можно начать понижать и температуру до тех пор, пока остатки пара не покинут гель и он не превратится в нужный нам сухой аэрогель, заполненный воздухом. Описанный процесс называется суперкритической сушкой и показан красной стрелкой на рис. 2.

Так как по этому сценарию в процессе превращения жидкости в пар не возникает границы раздела жидкой и газообразной сред, то не возникает и сил поверхностного натяжения внутри пор и они остаются целыми в процессе сушки.

Зеленая стрелка обозначает сценарий сушки, когда жидкость превращается в пар обычным порядком. В этом случае мы имеем одновременное существование двух фазовых состояний, границу раздела и, соответственно, разрушение структуры геля. Синяя стрелка показывает, что возможен и третий путь, который называется сублимационной сушкой. По этому сценарию жидкость внутри пор сначала переводится в твердое состояние путем заморозки, а затем, при пониженном давлении, твердая фаза превращается в газообразную, минуя жидкую (и связанные с ней проблемы с поверхностным натяжением). На практике такой вариант действительно позволяет получать некоторые виды аэрогелей.

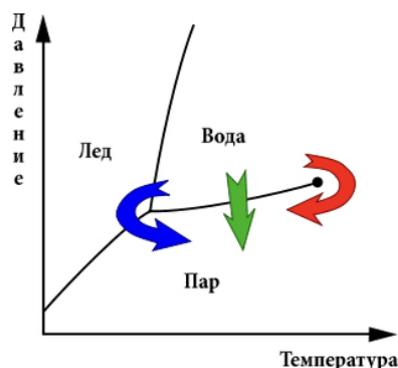


Рис. 2. – Иллюстрация процессов превращения при сушке аэрогеля

В реальной жизни прямое использование гелей на водной основе для изготовления аэрогелей очень неудобно из-за высоких критических температуры и давления воды. Поэтому до начала сушки обычно производится замещение первоначальной жидкой составляющей геля на более подходящую в смысле критической точки. Таким заместителем может выступать, например, метиловый спирт (критическая температура — 250 °С, критическое давление — 77 атм.). Именно спирты использовал Кистлер для получения аэрогелей со стенками из неорганических соединений. Для органики он рекомендовал сжиженный пропан в качестве жидкой составляющей геля при суперкритической сушке. Также находят применение ацетон и сжиженный углекислый газ [2].

#### IV. Из чего делают аэрогель

Что касается твердой составляющей аэрогелей, то для её изготовления можно использовать различные материалы:

**Диоксид кремния (силикагель).** Это наиболее известный материал (гранулы внутри бумажных пакетиков-осушителей и в кошачьих туалетах). Полученный из него аэрогель почти прозрачен, имеет голубоватый оттенок за счет релеевского рассеяния света на нанопорах, обладает чрезвычайно низкой теплопроводностью, хрупкий, но твердый.

**Углерод (карбон).** Карбоновый аэрогель непрозрачен, характеризуется чрезвычайно высокой пористостью с показателем площади полной поверхности к весу 400 — 1000 м<sup>2</sup>/г. Проводит электричество, что делает его одним из наиболее популярных материалов для ионисторов с емкостью в тысячи фарад. Кроме того, такой аэрогель поглощает почти 100% излучения в инфракрасном диапазоне, а это очень ценное качество для солнечной энергетики [1, 2].

**Оксиды металлов.** Соответствующие аэрогели широко используются для изготовления катализаторов. Обычно в их состав входит оксид алюминия с добавкой никеля. NASA использует алюминиевый аэрогель с добавкой гадолиния и тербия для регистрации космических частиц сверхвысоких энергий. Дело в том, что эти аэрогели флуоресцируют при попадании в них таких частиц, что позволяет их регистрировать. Причем мощность излучения зависит от энергии частицы. Окраска аэрогелей на основе оксида металла варьирует в широких пределах.

**Органические полимеры.** Например, аэрогель из агар-агара, того самого, который добавляют во фруктовое желе. Другой органический материал — целлюлоза — используется для производства гибких аэрогелей.

**Халькогены.** К этой группе относятся: сера, селен, теллур.

**Селенид кадмия.** Аэрогель, изготовленный из этого материала, обладает полупроводниковыми свойствами.

Более того, свойства аэрогелей можно дополнительно изменять с помощью введения различных модифицирующих добавок в состав твердой фазы [2].

#### V. Применение аэрогеля

Одна из основных отраслей, использующих подобные материалы, — космическая.

Например, в 1999 году агентство NASA запустило космический аппарат «Стардаст», созданный специально для исследования короткопериодической кометы 81P/Вильда. Пролетев около 4,8·10<sup>9</sup> км, «Стардаст» успешно достиг кометы, сделал ряд фотоснимков и, что очень важно, собрал частицы «звездной пыли» из комы (облака пыли и газа), окружающей комету.

Для сбора образцов как раз и использовался аэрогель, известный своими абсорбирующими качествами. 260 аэрогелевых параллелепипедов уловили значительное количество частиц и послужили «контейнерами», позволившими доставить «звездную пыль» на Землю в полной сохранности. В 2006 году «Стардаст» успешно вернулся, и ученые впервые за много лет получили образцы космического вещества — причем не какого-то, а из «окружения» кометы; анализ полученных образцов стал еще одной вехой в исследовании космоса.

Абсорбирующие свойства аэрогеля позволяли использовать его в качестве загустителя в напалмовых бомбах, также он использовался при производстве лакокрасочной продукции и т. д.

Ныне аэрогели применяются в различных отраслях промышленности, например при производстве силикона и строительных материалов. Аэрогель можно встретить в красках, косметике, водонепрони-

цаемых и огнеупорных тканях, в ядерной отрасли. Но основное употребление он нашел в сфере изоляционных материалов. В частности, это идеальный огнеупорный материал, позволяющий увеличить пожарную безопасность зданий, а также теплоизоляционная структура для труднодоступных участков (скажем, оконные щели в точках открывания [2]).

### **Заключение**

Себестоимость производства аэрогелей в последние годы снижается рекордными темпами, и уже сегодня любой желающий может купить относительно недорогие теплоизоляторы на основе гибкого аэрогеля. Ожидается, что объем рынка аэрогелей составит 2 миллиарда долларов к 2022 году. Широкое внедрение этого удивительного представителя наноматериалов — дело ближайшего будущего, так что через несколько лет дома будут с прозрачными стенами из аэрогелевых стеклопакетов, вода отфильтрованная в аэрогелевом фильтре, смартфоны можно будет питать от аэрогелевого суперконденсатора [2].

Список использованных источников:

1. Sun, Haiyan. Multifunctional, Ultra-Flyweight, Synergistically Assembled Carbon Aerogels / Haiyan Sun, Zhen Xu, Chao Gao // *Advanced Materials*. — 2013. — № 25. — С. 2554 – 2560.
2. Скоренко, Т.Ю. Когда воздух кажется тяжелым / Т.Ю. Скоренко // *Популярная механика*. — 2013. — № 6. — С. 34 – 37.